

Pierre Beuzit

Hydrogène

l'avenir de la voiture ?



Les révélations de l'ex-directeur de la recherche de Renault

**LE CARBURANT DE DEMAIN
EXISTE DÉJÀ !**

l'Archipel

PIERRE BEUZIT
LAURENT MEILLAUD

HYDROGÈNE :
L'AVENIR DE LA VOITURE

www.editionsarchipel.com

Si vous souhaitez recevoir notre catalogue et être tenu au courant de nos publications, envoyez vos nom et adresse, en citant ce livre, aux Éditions de l'Archipel, 34, rue des Bourdonnais 75001 Paris. Et, pour le Canada, à Édipresse Inc., 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3.

ISBN 978-2-84187-973-1

Copyright © L'Archipel, 2007.

Avant-propos

Sur fond de pétrole cher, de tensions dans le monde autour des questions d'énergie et d'environnement, il est permis de penser que nous roulerons peut-être demain dans des voitures à hydrogène. Reste seulement à savoir quand. À partir de 2010 ou 2015 pour les plus optimistes ; après 2020, voire 2030, pour les plus pessimistes. Techniquement, on sait d'ores et déjà fabriquer des voitures alimentées par de l'hydrogène et qui ne rejettent que de la vapeur d'eau. Elles roulent, aujourd'hui, un peu partout dans le monde. Certains constructeurs proposent même des modèles en location et s'appêtent à produire des petites séries pour l'Europe, les États-Unis et le Japon.

L'enjeu des prochaines années est de préparer la transition au sein de l'industrie automobile. Car l'impact ne sera pas négligeable. Propulser une voiture par de l'hydrogène (obtenu à la pompe sous

forme gazeuse ou liquide, ou encore produit par le véhicule) revient à modifier totalement le moteur tel qu'on le connaît aujourd'hui. La pile à combustible, qui va trouver place sous le capot, permet de recréer une électrolyse à l'envers et génère du courant qui fera tourner un moteur électrique. Oui, la voiture à hydrogène sera en fait électrique ; autrement dit, non polluante et silencieuse. Les performances seront au rendez-vous, de même que l'autonomie, sensiblement plus importante que celle d'un véhicule électrique classique. Par ailleurs, la voiture à hydrogène offrira de nouvelles prestations. À bord, il y aura plus de place, grâce à un moteur plus compact, à la disparition de la plupart des pièces mécaniques et à de nouvelles fonctions électrifiées. On pourra, par exemple, brancher directement sur la voiture un four à micro-ondes ou un ordinateur portable !

Vecteur d'énergie inépuisable, l'hydrogène offre des perspectives nouvelles. Présent dans l'eau, et pouvant être obtenu à partir de la biomasse, du gaz ou encore du pétrole, il peut être fabriqué quasiment par n'importe qui et n'importe où. Nous sommes en pleine rupture. Face à un univers où le pétrole est concentré dans quelques régions du monde, comme le Moyen-Orient, la perspective de l'hydrogène redessine la carte énergétique de la planète. La France peut y jouer un rôle actif : elle a tous les éléments en main.

L'introduction de l'hydrogène se fera toutefois en douceur, car il sera en compétition avec d'autres méthodes qui libéreront l'automobile du pétrole et

protégeront l'environnement, comme les biocarburants, ou encore les hybrides. Il doit par ailleurs faire ses preuves sur deux points clés : le bilan du puits à la roue, et surtout le bilan économique. Mais une chose est sûre : vous verrez bientôt dans la rue des véhicules totalement non polluants. Et peut-être même bien plus tôt que vous ne l'imaginez !

Introduction

Peut-on imaginer une automobile sans pétrole ?

Depuis la fin 2004, avec l'augmentation rapide et assez inattendue du prix du pétrole, l'énergie est devenue un sujet très populaire. Par la même occasion, les soucis environnementaux sont réapparus dans la presse et dans le discours politique.

Il s'agit en fait d'une prise de conscience collective de problèmes déjà anciens, mais dont on pensait confusément qu'ils seraient résolus par l'alchimie du progrès technique, sans que cela ne perturbe ni les habitudes des consommateurs ni notre infrastructure industrielle.

Le grand public a alors découvert que les énergies utilisées étaient pour une grande part d'origine fossile, et que cette donnée pouvait avoir des conséquences dramatiques :

– Les besoins énergétiques de la planète ne cessent d'augmenter, alors que les énergies fossiles, en quantité limitée, s'épuisent. Une pénurie est donc

inélucltable, à moins d'utiliser d'autres sources d'énergie.

– La répartition des besoins énergétiques dans le monde est très inégale : les pays qui en consomment le plus ne sont, en général, pas ceux qui en produisent le plus ; cela peut entraîner des tensions politiques et des hausses de prix.

– Pour finir, l'utilisation de ces énergies dites « primaires » émet des gaz à effet de serre. Or on a démontré qu'une trop forte concentration de ces gaz dans l'atmosphère a des effets néfastes sur le climat – et nous sommes déjà dans une phase d'augmentation de cette concentration. Il faut cependant noter que la combustion des énergies fossiles n'est pas la seule source d'émissions humaines de gaz à effet de serre¹.

Dans ce contexte de questions et d'inquiétudes, les transports sont particulièrement mis en cause, du fait qu'ils sont très fortement dépendants du pétrole (98 % des véhicules l'utilisent comme carburant). Or, de toutes les énergies fossiles, le pétrole sera sans doute le premier à s'épuiser. Aux

1. En matière d'effet de serre, il faut souligner que la part de l'automobile, dans le monde, n'est responsable que de 10 % de la totalité des émissions dues aux activités humaines (source WRI : World Resources Institute). Les deux plus importants émetteurs de gaz à effet de serre sont la production d'électricité (sauf en France) et l'agriculture. Une action importante sur le transport n'aura donc qu'un effet limité sur les changements climatiques. Mais chaque domaine doit contribuer à l'amélioration générale. Nous nous occuperons donc ici des transports.

yeux du public, il ne semble pourtant pas se produire l'amorce d'une évolution propre à libérer les transports de l'emprise de l'or noir. Certes les constructeurs ont significativement amélioré le rendement des chaînes de traction – en particulier avec l'injection directe diesel et l'introduction de moteurs à essence hybrides. Mais on sent confusément que ces progrès ne sont malheureusement pas de nature à résoudre de façon définitive le problème de la rareté de l'énergie, ainsi que les effets climatiques liés à son utilisation.

Depuis très longtemps, le monde des transports se préoccupe d'énergie. Près de 60 % des efforts de recherche des constructeurs et de leurs fournisseurs y sont consacrés. Ces recherches ont principalement eu pour but d'améliorer le rendement de la chaîne de traction et de réduire les émissions de polluants. Cette démarche n'a toutefois pas remis en cause l'utilisation du pétrole comme carburant. Il faut dire que ses propriétés sont à l'origine du développement extraordinaire des moyens de transport dans le monde, tant pour les personnes que pour les marchandises. L'or noir a ainsi contribué au développement économique de la planète. Toutes les tentatives de substitution comme le GPL, le gaz naturel ou les nouveaux modes de propulsion tels que le moteur électrique alimenté par batterie, n'ont pas réussi à prendre une part significative du marché.

Comment se présente le problème de l'énergie dans les transports aujourd'hui ?

Le défi énergétique du transport peut se résumer en quatre objectifs principaux :

– Ne plus polluer. On entend par pollution les émissions qui portent atteinte à la santé. La recherche a beaucoup progressé et l'on peut dire que, même sans changer de carburant, cet objectif sera atteint au début de la prochaine décennie.

– Réduire les émissions de CO₂ (le principal gaz à effet de serre émis par les véhicules). Les constructeurs européens se sont engagés sur une réduction de 25 % à l'horizon 2008 (par rapport à 1995). Les constructeurs français tiendront sans doute cet engagement, car ils étaient déjà parvenus à une baisse de 20 % fin 2005. La France veut cependant aller plus loin, et propose de diviser les émissions par quatre à l'horizon 2050. C'est un objectif très ambitieux puisque, dans ces conditions, il ne reste que peu de place pour les carburants issus d'énergies fossiles. Ce projet nécessite donc une reconversion complète de l'industrie des moyens de transport.

– Réduire la dépendance au pétrole, pour assurer une meilleure sécurité d'approvisionnement et maintenir les coûts à un niveau raisonnable.

– Utiliser de plus en plus d'énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

Compte tenu du capital considérable qui est en jeu, tant du point de vue humain que financier, il n'est pas envisageable de traiter séparément ces différents objectifs, et de remettre en cause périodiquement les solutions choisies pour chacun. Le

monde du transport doit donc appréhender le problème dans son ensemble et trouver une démarche qui conduise progressivement au résultat attendu, tout en assurant une transition compatible avec les ressources disponibles. Or le temps nous est compté, comme nous l'expliquent les climatologues et les spécialistes de l'énergie. C'est donc un pari formidable pour ce secteur d'activité.

On peut affirmer aujourd'hui qu'une telle solution existe et qu'elle permettra au secteur du transport de s'inscrire dans le cadre du développement durable, tout en répondant aux besoins de mobilité sans cesse croissants.

Du fait de la complexité du problème, la solution ne peut être unique. Elle se composera d'un ensemble de mesures qui feront appel à différentes technologies.

Il y a deux façons complémentaires de traiter le problème : l'une est de réduire la demande en énergie pour le même service, de façon à gagner en consommation et en émission de CO₂ ; l'autre voie consiste à substituer aux systèmes existants des systèmes plus efficaces faisant peu ou pas appel aux énergies fossiles. On peut considérer, en première approximation, que chacune de ces voies permettra de parcourir la moitié du chemin.

La réduction de l'exigence énergétique consiste à travailler le rendement du système de propulsion, à modifier les caractéristiques du véhicule et à repenser les modes de déplacement. Cela n'est pas l'objet de ce livre. Aussi nous contenterons-nous

d'esquisser quelques pistes de travail qui font aujourd'hui l'objet de recherches.

1/ Le moteur à combustion interne peut encore être amélioré. De nombreux chercheurs y travaillent. Citons le pilotage des soupapes, le taux de compression variable, l'adaptation du nombre de cylindres, le pilotage cycle à cycle de l'injection et de la combustion... De nombreuses technologies sont donc envisageables. Certaines sont déjà disponibles en série.

2/ Les actions possibles sur le véhicule concernent principalement quatre domaines : la masse, les accessoires, l'aérodynamique et les frottements. Des travaux sont conduits sur tous ces sujets, avec des résultats assez variables.

Malgré tous les efforts déployés par les industriels, les véhicules ont une fâcheuse tendance à être de plus en plus lourds. On considère que la masse moyenne des véhicules vendus en Europe augmente de 15 kilos par an ! Il y a évidemment des raisons à cela (normes de sécurité, exigences de confort, engouement pour certains équipements), mais il faut reconnaître que ce fait n'est pas acceptable. Y a-t-il des solutions ? Je pense que oui, mais elles sont difficiles à mettre en œuvre. Les « nouveaux matériaux », qui s'appuient sur l'utilisation de nanotechnologies, offrent des possibilités, mais obligent à revoir complètement la conception des véhicules – et ce n'est pas chose facile quand on sait l'importance considérable de l'expérience

acquise dans leur conception. Les Japonais se sont fixé, pour l'horizon 2050, une réduction de 30 % du poids des véhicules, sans perte de prestations.

Les accessoires consommateurs d'énergie sont de plus en plus nombreux. Leur rendement énergétique n'est en général pas très bon. Des progrès sont possibles et font l'objet de recherches actives de la part des fournisseurs : alternateurs pilotés, air conditionné électrique...

Dans le domaine de l'aérodynamique, des progrès significatifs sont réalisés – contrariés hélas par les goûts des clients qui préfèrent des véhicules hauts et larges. Ici encore, les nouvelles technologies comme l'aérodynamique active doivent permettre des gains substantiels.

Dans le domaine de la réduction des frottements, d'excellents résultats ont été obtenus à l'intérieur du moteur, dans les transmissions, mais aussi (et c'est l'un des postes les plus importants), dans le frottement du pneu sur le sol. Michelin, pour citer la firme plus active sur le sujet, a réduit la « traînée de roulement » de plus de 30 % et vise un objectif de 50 %.

3/ Quand on parle de mobilité, cela ne concerne pas seulement les véhicules, mais aussi l'infrastructure et les systèmes d'exploitation. À titre d'exemple, des gains importants de consommation peuvent être obtenus par une meilleure fluidité du trafic. Avec les moyens de communication modernes, et en particulier le téléphone portable, il serait possible d'informer le conducteur, et de mieux

répartir les flux de circulation. Les embouteillages sont, rappelons-le, la première cause de perte de rendement (et aussi la première cause d'énerverment au volant).

On parle souvent d'intermodalité mais peu de projets sont menés dans ce domaine. L'intermodalité consiste à mettre en place une infrastructure (des parkings) et un système d'information (via le portable) pour pouvoir emprunter différents moyens de transport afin d'aller du point A au point B. C'est l'une des conditions du développement des transports en commun, en substitution à la voiture.

Enfin, les ménages étant de plus en plus multimotorisés, on peut envisager le développement de véhicules à usage limité aux zones urbaines et suburbaines, qui consommeraient très peu, ou qui pourraient même être à propulsion électrique.

En matière de nouveaux systèmes de propulsion, on le verra au chapitre suivant, les possibilités sont nombreuses, tant en matière de carburants pour les moteurs à combustion interne qu'en termes de nouveaux vecteurs d'énergie. Ce qui est clair aujourd'hui, c'est qu'à court et moyen terme aucune de ces solutions n'est en mesure de remplacer, à elle seule, le pétrole. Il faudra donc se résigner à abandonner la notion de carburant unique, pour s'ouvrir à la diversité. Celle-ci sera dictée par les ressources disponibles et les priorités qui seront retenues par les différents pays.

Dans l'ensemble des solutions qui seront disponibles, l'hydrogène est appelé à jouer un rôle

particulièrement important, compte tenu de ses propriétés énergétiques et de son universalité. Du téléphone portable à la fusée *Ariane*, en passant par l'automobile, il permet de changer radicalement la donne énergétique et de nous libérer de bien des contraintes.

Certes, le chemin pour y arriver est encore semé d'embûches, mais les résultats de la recherche permettent de pronostiquer des applications commerciales dans les prochaines années.

1

UN CONTEXTE FAVORABLE À L'HYDROGÈNE

Sur fond de pétrole cher et de prise de conscience écologique, du fait du réchauffement du climat, l'opinion et les industriels commencent à accorder plus de crédit aux énergies alternatives. L'hydrogène peut-il remplacer le pétrole ?

Le 28 janvier 2003 est une date marquante pour les partisans de la voiture propre. Ce jour-là, à l'occasion du discours annuel sur l'état de l'Union, une annonce du président George W. Bush retient l'attention de la planète. Alors que tout le monde attend une déclaration sur l'Irak, le président américain fait part de son souhait que « la première voiture conduite par un enfant qui naît aujourd'hui puisse être une voiture à hydrogène, inoffensive pour l'environnement ». Venant de la part d'un pur produit du Texas, dont on connaît l'attachement à

l'industrie pétrolière, une telle annonce surprend – d'autant que le président Bush annonce dans la foulée une initiative pour développer l'hydrogène aux États-Unis, avec un budget de 1,2 milliard de dollars. Combiné avec un programme de recherche baptisé Freedom Car (Cooperative Automotive Research), qui avait déjà été lancé par l'administration Bush à la suite du programme PGNV¹ mis en place par Bill Clinton, ce gros effort financier s'élève au total à 1,7 milliard de dollars. L'objectif est de développer une technologie permettant de produire et de stocker de l'hydrogène à bord des voitures, à prix raisonnable et dans les cinq ans – autrement dit vers 2010, sachant que la date limite est fixée à 2020 pour le marché de grande consommation. À cette date, les Américains sont censés pouvoir choisir entre plusieurs carburants à la pompe, dont l'essence, les biocarburants et l'hydrogène. Tout un symbole dans un pays où l'on dénombre 250 millions de véhicules et qui possède le plus grand marché automobile du monde avec 17 millions de véhicules neufs vendus chaque année.

1. PGNV (Partnership for a new generation of vehicles) : programme de réduction de la consommation aux États-Unis.

L'hydrogène, bouée de sauvetage des États-Unis ?

L'annonce du président Bush n'est pas un effet d'annonce¹. À cette époque, l'Amérique est préoccupée par la hausse des cours du pétrole. Il faut en effet savoir que la première puissance du monde importe 65 % du pétrole qu'elle consomme (13 millions de barils par jour, sur un total de 20 millions de barils quotidiens, alors que le reste du monde consomme 65 millions de barils par jour). Cette proportion est même censée passer à plus de 70 % en 2025. Si l'importation d'or noir a des conséquences sur la balance commerciale, largement déficitaire, le souci de Washington est plutôt de sécuriser ses approvisionnements en énergie. Or le pétrole provient essentiellement du Moyen-Orient, une région très instable, notamment depuis les attentats du 11-septembre et la guerre en Irak.

L'hydrogène apparaît donc comme l'une des voies permettant de garantir une relative autonomie par rapport à certaines régions du monde, et comme une solution apte à satisfaire les besoins croissants du pays le plus glouton du monde en matière d'énergie. Tout comme l'Asie, l'Amérique du Nord a une approche pragmatique, destinée à sécuriser ses approvisionnements énergétiques, alors que l'Europe fustige le pétrole pour d'autres

1. L'effort a été maintenu avec 289 millions de dollars supplémentaires débloqués pour l'hydrogène sur la période 2006-2007 (soit 50 millions de dollars de plus par rapport à l'année précédente).

raisons (les émissions, qui favorisent les gaz à effet de serre).

L'intérêt subit des États-Unis pour l'hydrogène ne relève pas du hasard. En fait, cette filière avait été bien identifiée, mais elle devait concerner en premier lieu les habitations, avec des piles à combustible stationnaires produisant de la chaleur et de l'énergie électrique (ce qui n'est pas une mince affaire, quand on connaît les pannes à répétition de ce pays, notamment en Californie). Il est toutefois apparu que l'automobile allait rapidement poser problème, en raison de la consommation de carburant. Le revirement s'est opéré vers l'an 2000.

Brainstorming à Detroit

Il se trouve qu'à cette époque j'ai été convié, à titre d'expert européen, par les responsables du ministère de l'Énergie (DOE : Department of Energy), afin d'aider les Américains dans leur réflexion et de préparer le discours du président Bush. Je représentais Eucar (European Council for Automotive R&D), l'organisme de recherche et de développement de l'association des constructeurs européens d'automobiles. Nous étions une centaine d'experts du monde entier, dont des Européens, des Indiens et des Chinois, conviés par le DOE dans un hôtel de la banlieue de Detroit, le Ritz-Carlton de Dearborn. Le lieu même de cette réunion, à quelques miles du siège de Ford, le long du Southfield Freeway et sur les terres de l'industrie automobile américaine, était en soi tout

un symbole. Les experts américains nous ont appris que plus de 60 % du pétrole aux États-Unis était consommé par le secteur des transports (plus de 12 millions de barils par jour), majoritairement par l'automobile, et que la consommation allait doubler dans les trente ans à venir ! Dans ce contexte, pour un pays qui consomme 25 % de l'or noir du globe, la hausse des cours était tout simplement intolérable.

L'administration Bush souhaitait donc trouver le moyen de produire de l'énergie en quantité importante et à un coût compétitif, afin de contenir le prix du pétrole à un niveau inférieur à 30 dollars le baril – d'où l'intérêt des États-Unis pour l'éthanol (issu de la biomasse) et pour l'hydrogène. Inutile de préciser qu'il n'a, au cours de cette réunion, jamais été question du protocole de Kyoto et des gaz à effet de serre... Ce n'était vraiment pas le sujet. Il faut donc imaginer le contexte : pendant deux jours, nous fûmes enfermés (sans avoir le droit de sortir, même pour le petit déjeuner et les pauses-repas !), et abreuvés de boissons non alcoolisées en quantités industrielles noyées dans des océans de glace, afin de plancher sur des questions extrêmement précises posées par les experts du DOE. Les Américains souhaitaient savoir si l'hydrogène pouvait constituer une énergie ou un vecteur d'énergie abondant et bon marché à partir de 2015, et quels étaient les moyens à mettre en œuvre pour atteindre cet objectif.

Le reste du monde aligné sur l'Amérique pour la cause de l'hydrogène

À l'issue de cette consultation, une sorte de consensus s'est dessiné parmi les experts. Nous avons décidé d'aller dans le même sens que les Américains, tout en ayant en tête des objectifs parfois différents. L'Europe défend par exemple le développement durable, alors que les États-Unis veulent continuer à gaspiller de l'énergie. Mais tout le monde s'y retrouve avec l'hydrogène qui permet de jouer à fond la carte de la mondialisation avec des nations telles que l'Inde et même le Brésil (malgré son leadership mondial dans le domaine de l'éthanol), qui se déclarent très intéressées par ce vecteur d'énergie. Les réponses ont été synthétisées dans un rapport remis au Congrès¹. Un volet concerne l'approche aux États-Unis ; l'autre est plus ouvert sur les problématiques mondiales. Une « roadmap » (feuille de route) très précise a même été établie à partir de nos travaux : combien faut-il dépenser en recherche et développement (dix milliards de dollars selon nos estimations) ? À quel horizon peut-on envisager un prix de 1,50 dollar au kilo d'hydrogène² ? L'approche était assez comparable à celle que peut avoir un

1. Le rapport est synthétisé en annexe (voir p. 189).

2. Le kilogramme d'hydrogène est une unité bien pratique, car 1 kilo permet de parcourir environ 100 kilomètres. D'autre part, le kilogramme d'hydrogène contient autant d'énergie qu'un gallon d'essence aux États-Unis, soit 3,78 litres.

Carlos Ghosn (le patron de Renault et de Nissan) quand il se penche sur un problème stratégique.

Il faut bien connaître les États-Unis pour savoir que les automobilistes ne sont pas du genre à se serrer la ceinture. Dans les États de l'Amérique profonde, on conduit en effet de gros pick-up de 6 à 7 litres de cylindrée, qui consomment en moyenne 30 litres aux 100 kilomètres... Cela peut se comprendre dans un pays qui a toujours connu le pétrole à bon marché, avec un prix du baril stabilisé autour de 20 dollars.

Le pétrole (cher) est encore là pour longtemps

En vérité, le problème de fond ne vient pas d'un « peak oil », le fameux seuil maximal de production de pétrole au-delà duquel s'opérera un déclin inexorable des réserves, selon la théorie du géophysicien Marion King Hubbert, employé chez Shell. L'épuisement des ressources est évoqué régulièrement par certains Cassandres qui avancent la date de 2010 (le pic avait même été pronostiqué pour 2005...), quand des responsables pétroliers (et, parmi eux, le P-DG de Total) avancent plutôt l'hypothèse de 2025. De ce point de vue, il n'y a pas de véritable danger.

Les quarante années de réserves évoquées dans les médias correspondent en effet aux réserves dites conventionnelles. Et quand bien même ces réserves seraient surévaluées, comme on le dit pour le Proche-Orient, quand bien même les gisements de la mer du Nord seront épuisés en 2015, il

y a lieu d'espérer. Les gisements explorés n'ont effectivement été exploités qu'à 50 %, en Amérique comme au Moyen-Orient¹. Par ailleurs, on peut extraire du pétrole à partir de sable et de schistes bitumineux, et de nouvelles techniques d'extraction, notamment en utilisant le CO₂ pour pousser le pétrole vers la surface, permettant de reculer l'échéance. Ainsi, les réserves seraient de cent vingt ans au moins. Il est cependant communément admis que le pétrole restera durablement cher.

Bien que la production pétrolière dépasse régulièrement les prévisions de l'AIE (Agence internationale de l'énergie), on va peut-être finir par assister à une régulation de la demande (un plateau) par une limitation de la production, afin de préserver l'état des réserves et de limiter l'investissement. À vrai dire, tout le monde y trouve son intérêt, les pays producteurs tout comme ceux qui prélèvent des taxes – à l'exception bien sûr du consommateur qui n'a pas son mot à dire. Mais d'un autre côté, un pétrole cher peut rendre plus compétitifs d'autres vecteurs et sources d'énergie, dont l'hydrogène.

Les pays émergents feront connaître leur choix en 2010

Selon l'AIE, il va falloir dépenser 16 000 milliards de dollars d'ici 2030 pour répondre aux besoins

1. Il n'est toutefois pas si facile de réexploiter les puits, en raison des problèmes posés par la porosité des roches.

mondiaux en matière d'énergie. Cela représente une belle somme, à répartir à parité entre les pays industrialisés et les pays émergents. Sur ces 16 000 milliards, pas moins de 3 100 milliards devraient être investis dans le secteur pétrolier, où les capacités d'extraction et de raffinage sont déjà utilisées à plus de 95 %. Il faut notamment investir dans le forage en eau très profonde (à plus de 3 000 mètres sous le niveau de la mer). Évidemment, certains pays (dont l'Inde et la Chine) peuvent se demander s'il ne serait pas judicieux d'investir directement dans des voies d'avenir telles que la biomasse, le nucléaire, le charbon « propre » ou... l'hydrogène. On attend pour 2010 une annonce de ces nouveaux géants. Nul doute que leurs orientations en matière énergétique seront suivies très attentivement et risquent d'influer sur la stratégie de l'Amérique et de l'Europe. Nous y reviendrons plus tard. Il serait toutefois illusoire de penser que l'on remplacera le pétrole du jour au lendemain. La montée de l'hydrogène se fera progressivement, et les sources d'énergie seront demain multiples.

Il faut aussi prendre en compte d'autres facteurs, en particulier celui de l'opinion publique. Les consommateurs ont aujourd'hui intégré la cherté du pétrole dans leur mode de vie. Contrairement aux premiers chocs pétroliers, qui reposaient sur des événements conjoncturels, la crise est cette fois structurelle. On peut d'ailleurs constater que les ventes de gros véhicules (les 4 × 4 gourmands en essence pour ne pas les nommer) sont en recul, et

que les Américains, par exemple, s'intéressent aujourd'hui à des véhicules plus sobres et plus compacts. C'est d'ailleurs l'une des raisons qui explique pourquoi l'industrie automobile de Detroit éprouve de telles difficultés. Le timing de l'annonce de George Bush ne doit d'ailleurs rien au hasard. Elle intervient début 2003, à un moment où l'opinion publique américaine commence à se rendre compte que la consommation de carburant pose problème. Les Européens, eux, s'en étaient déjà aperçus depuis un moment...

Merci la Prius !

Paradoxalement, c'est grâce à la voiture hybride que l'on parle aujourd'hui tellement de l'hydrogène. Toyota, qui a écoulé dans le monde plus de 500 000 exemplaires de sa Prius, a joué un rôle efficace dans l'information du public. Pour la première fois en effet, un constructeur automobile – qui plus est, le futur numéro un mondial – arrivait à concrétiser le rêve d'une voiture propre et peu gourmande en carburant. Depuis l'échec mémorable de la voiture électrique, plus personne n'y croyait, à l'exception d'écologistes irréductibles. Or, voilà qu'une technologie enflamme à nouveau les esprits : plus de jauge à surveiller, plus besoin de recharger la batterie, l'hybride permet de concilier le meilleur des deux modes avec un moteur électrique et un moteur thermique.

L'accueil est plus favorable au Japon et aux États-Unis qu'en Europe, mais l'impact est réel auprès

des automobilistes. La Prius a aussi contribué à réveiller les constructeurs, dont Renault qui travaillait sur cette piste sans trop y croire en tant que solution à court terme. L'industrie automobile constate l'intérêt du public pour la technologie hybride. Les Européens sont alors très embarrassés, car ils ont surtout mis l'accent sur le diesel – une motorisation qui ne jouit pas d'une bonne image et ne fait pas très « high tech », malgré la présence du filtre à particules. D'autre part, il n'était pas concevable de copier les Japonais (rendez-vous compte, nous qui avons inventé l'automobile !), même si la Commission européenne se déclare prête à financer des travaux, et même si un groupe de travail se forme autour de Mercedes – qui avait pourtant juré de ne jamais faire d'hybride !

Il faut comprendre le point de vue des constructeurs, pour qui l'hybride ne fait pas mieux que le diesel en termes de consommation de carburant et de rejets d'émissions de CO₂. Surtout, cette solution n'est pas viable si elle n'est pas fortement subventionnée. Mais allez expliquer cela aux consommateurs, pour qui la Prius est synonyme de modernité. La notoriété de la voiture est telle qu'on la voit dans tous les salons. Sous le gouvernement Juppé, on aperçoit même un ministre de l'Environnement, Serge Lepeltier, arriver en Prius dans la cour de l'Élysée pour le Conseil des ministres. À l'époque, il m'a d'ailleurs demandé quand Renault comptait proposer un modèle hybride ! Dans ce contexte, et alors que Toyota et Honda semblaient vraiment croire au potentiel de

l'hybride, nous n'avons eu d'autre choix que d'explorer les solutions alternatives.

Le président de Renault Carlos Ghosn a d'ailleurs récemment annoncé que le constructeur allait proposer d'ici 2009 des voitures hybrides, électriques et alimentées par des biocarburants. De son côté, Nissan développe sa propre technologie hybride pour l'horizon 2010.

Le retour de la voiture électrique

D'autres éléments viennent une fois de plus plaider en faveur de la voiture propre. Coup sur coup, deux acteurs qui n'ont a priori rien à voir avec l'automobile ont annoncé récemment leur intention de produire et de vendre des voitures électriques. Il s'agit de Dassault d'une part (associé à Heuliez pour former la SVE – Société de véhicules électriques), et de Bolloré d'autre part, avec chacun une technologie qui lui est propre.

Prenons le cas de Bolloré, plus connu pour le papier et sa division de films plastique. Associé à EDF, le groupe breton a fondé la société Batscap en Bretagne, plus exactement à Ergué-Gabéric près de Quimper, pour y produire des batteries d'un nouveau type (lithium-métal-polymère), avec une autonomie censée atteindre les 200 kilomètres. À la recherche d'un constructeur, Bolloré a d'ores et déjà réalisé un prototype roulant de sa Blue Car, conçue par Philippe Guédon, ancien P-DG de Matra Automobiles et créateur de l'Espace.

Le groupe Dassault connaît un peu l'univers du véhicule électrique. Il avait aidé Renault pour la partie électronique, quand le constructeur avait, dans les années 1990, conçu une Clio électrique dans le cadre d'une expérience de location en libre-service (projet Praxitèle, dans la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines). L'avionneur, qui, depuis quelque temps, exprime des velléités de partenariat dans l'automobile, a aujourd'hui choisi de se rapprocher du groupe Heuliez. Spécialiste de la production de petites séries, ce dernier a déjà produit des milliers de véhicules électriques pour le compte du groupe PSA Peugeot Citroën. Les deux partenaires travaillent avec Saft, fabricant bien connu de batteries, dont la filière lithium-ion à basse température offrirait 200 kilomètres d'autonomie.

On mesure le chemin parcouru, par rapport aux 70 kilomètres de rayon d'action dont étaient capables nos voitures, à l'époque où le gouvernement Fabius demandait aux constructeurs français de mettre l'accent sur la voiture électrique. Depuis longtemps, et sans forcément remonter jusqu'à la Jamais Contente du Belge Camille Jenatzy, qui, en 1899, dépassa pour la première fois le mur des 100 km/h, la voiture électrique a toujours été un mythe qui fait rêver. C'est l'exemple même du véhicule propre et silencieux.

Renault ne se désintéresse pas du problème. Tous les deux ans, les spécialistes font le tour des fabricants mondiaux de batteries pour faire le point sur les technologies. Le constructeur français a bien

identifié les opportunités commerciales avec des véhicules de flottes. Le problème vient, comme toujours, des batteries. Ce n'est pas vraiment un problème d'autonomie : 200 kilomètres, c'est bien suffisant pour effectuer un trajet quotidien domicile-travail et pour se déplacer en ville – même si ce rayon est en fait inférieur à 150 kilomètres en cycles d'usage et de moins de 100 kilomètres par conditions difficiles, par exemple l'hiver avec le chauffage en marche. Le souci vient plutôt de la fiabilité. La batterie entraîne en effet une migration des ions entre l'anode et la cathode et une destruction des électrodes. On ne sait donc pas combien de temps elle va durer...

L'équipementier américain Johnson Controls a monté, avec le français Saft, une société entièrement dédiée à l'automobile : JCS (Johnson Controls-Saft Advanced Power Solutions), dont il est l'actionnaire majoritaire. Il y a bien des progrès en vue, mais pas de rupture. Il faut savoir que l'on stocke 12 500 watts-heure par kilo¹ dans l'essence, alors que dans les batteries l'objectif est de stocker 300 watts-heure par kilo (contre 120 watts-heure par kilo aujourd'hui). Le véhicule électrique ne pourra donc jamais faire aussi bien qu'un véhicule classique en ce qui concerne l'autonomie.

Or l'hydrogène permet justement de faire avancer une voiture à l'énergie électrique, tout en supprimant le problème du stockage de cette énergie

1. Mesure utilisée pour la quantité d'énergie stockée par unité de poids.

à bord. Nous pouvons donc dire que le regain d'intérêt pour le véhicule électrique bénéficiera, *in fine*, à l'hydrogène.

Le mythe du pétrole vert

Comme l'Allemagne et la Suède, la France met aujourd'hui l'accent sur les biocarburants. Ces carburants d'origine végétale (issus de la betterave ou du maïs pour l'ETBE et l'éthanol, mélangé avec de l'essence ; du tournesol ou du colza pour le diester ou biodiesel que l'on mélange au gazole) sont encensés par les agriculteurs, qui y voient le moyen de diversifier leur activité. Le gouvernement a d'ailleurs entendu leur message. Alors que la France était jusqu'à présent l'un des plus mauvais élèves de l'Europe, avec une part d'à peine 1 % de biocarburants dans la consommation annuelle de carburants, notre pays a décidé de tripler sa production pour devancer dès 2008 une directive européenne qui fixe en 2010 un seuil de 5,75 % pour les biocarburants. À cette date, la part des biocarburants dans la consommation hexagonale devrait donc avoir atteint 7 %. Selon les responsables politiques, c'est la solution du futur. Cela peut se comprendre si l'on veut bien admettre que la Pac, la Politique agricole commune de l'Europe qui absorbe près de la moitié du budget de l'Union, est dans une mauvaise passe.

On peut en effet produire de l'énergie à partir de la biomasse, même si peu de gens se posent la question du montant de l'investissement. Pourtant,

cette solution intéresse beaucoup de monde, dont les constructeurs automobiles. Pourquoi ? C'est très simple : il est plus facile de remplacer l'essence par de l'éthanol, tout en conservant le moteur à combustion interne, que de lui substituer l'hydrogène, dont la fabrication est plus complexe, et qui requiert en outre l'utilisation d'une pile à combustible. Bien qu'il présente quelques défauts (il contient de l'oxygène et ne supporte guère les démarrages à froid), l'éthanol peut se mélanger sans problème majeur avec de l'essence. En Suède et au Brésil, on trouve d'ailleurs assez fréquemment des véhicules « Flex Fuel », roulant au super et à l'éthanol. La France vient tout récemment de reconnaître l'éthanol, que seules les flottes de véhicules pouvaient utiliser jusqu'à présent. 500 pompes au bio-éthanol (ou E85 : 85 % d'éthanol et 15 % d'essence) devaient être opérationnelles en France d'ici à fin 2007, et les constructeurs, dont Renault, préparent des modèles compatibles avec cette essence « verte ».

Les biocarburants représentent donc une solution de facilité. Il est vrai que ces carburants sont renouvelables et permettent de réduire de 40 à 70 % les émissions de gaz à effet de serre. Ils ne pourront cependant jamais remplacer complètement le pétrole. Si l'on prend l'exemple de l'éthanol et du biodiesel (ou diester), ces carburants d'origine végétale ne pourraient combler au mieux que 7 à 8 % des besoins en France. L'usine rouennaise du groupe Sofiprotéol (l'un des leaders français dans le domaine des biocarburants) ne peut

ainsi produire que 250 000 tonnes de carburants végétaux par an, parce qu'elle n'exploite que la graine marron du colza.

À titre de comparaison, on peut rappeler que la consommation de carburants dans les transports représente en France près de 50 millions de tonnes équivalent pétrole. Le gazole est le carburant dominant (73 % des volumes), devant le super (26,4 %) et le GPL (0,5 %). Le gaz naturel représente 42 000 tonnes équivalent pétrole. Enfin, la France a consommé 866 000 tonnes de biocarburants (bio-diesel et bioéthanol) en 2006. Soit 1,75 % de la consommation totale de carburants.

L'ère des carburants synthétiques

Certes, une deuxième génération de biocarburants est à l'étude. Le président George Bush (encore lui !) en a d'ailleurs parlé lors de son discours sur l'état de l'Union en janvier 2006 – ce discours où – un comble – il a fustigé les Américains « drogués » au pétrole (!) et évoqué l'éthanol ligno-cellulosique. Ce carburant serait produit à partir de résidus de paille et de bois. À partir de ces matériaux, on procède à une hydrolyse enzymatique (on casse les molécules de la cellulose pour en faire du saccharose, puis, comme pour le vin, on utilise la fermentation pour obtenir de l'éthanol) : ni plus ni moins que de la chimie biologique ! L'intérêt est double, car le mode de production est plus simple et moins coûteux. En raison d'un investissement plus limité et de l'abondance de la biomasse,

cet éthanol ligno-cellulosique peut être fabriqué partout dans le monde (sauf dans le désert évidemment), d'autant que la production ne fait pas appel à la haute technologie. Mais cet éthanol en est encore au stade du développement et ne devrait pas apparaître avant 2015. Encore une fois, il faut bien considérer que dans un pays qui consomme plus de 500 millions de tonnes de carburant par an, les biocarburants de deuxième génération ne pourraient, au mieux, subvenir qu'à 30 % des besoins.

Il ne faut pas oublier non plus les carburants de synthèse. Ce procédé, inventé par les Allemands dans les années 1920, à une époque où ils manquaient cruellement de pétrole, et utilisé pendant la Seconde Guerre mondiale, est aujourd'hui d'actualité. Toujours à partir de la biomasse, on peut obtenir des carburants liquides (BTL – Biomass to liquids), par gazéification, en utilisant ce procédé qui a pour nom Fischer-Tropsch (FT). On obtient un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone (que la France a bien connu sous le vocable de « gaz de ville », alors produit à partir du coke). On applique le procédé FT à ce gaz et on obtient de la paraffine, à partir de laquelle on peut créer un carburant. Au même titre que Volkswagen, DaimlerChrysler et Shell, Renault fait d'ailleurs partie de l'AFSE (Alliance for Synthetic Fuels in Europe), une association de promotion des carburants synthétiques. Ce carburant a pour nom « Sunfuel » en Allemagne, où il est soutenu par Volkswagen. Le BTL permet de réduire de 85 % les émissions de gaz à

effet de serre par rapport à un carburant classique. Notons qu'un tel procédé peut aussi être utilisé en partant du gaz naturel, pour fabriquer ce qu'on appelle du GTL (Gas to liquid), comme au Qatar, où plusieurs unités sont en construction. On peut aussi partir du charbon et obtenir du CTL (Coal to liquid), qui intéresse entre autres la Chine. Mais pour transformer de la biomasse ou d'autres composants, il faut disposer d'une énergie abondante, peu coûteuse et produite sans émissions de gaz à effet de serre.

Les solutions actuelles sont coûteuses

Ces sources d'énergie alternatives sont intéressantes, mais elles ne remplaceront qu'une partie de notre consommation de pétrole, de l'ordre de 30 à 40 % environ en Europe. Autrement dit, l'or vert ne se substituera pas du jour au lendemain à l'or noir. La juxtaposition de toutes ces voies permettra-t-elle de répondre au problème ? Pas si sûr... Suivant la situation de chaque pays, le poids des énergies sera différent. La stratégie s'articulera donc autour du gaz, du pétrole ou de la biomasse.

Si l'on prend l'exemple de la France, on constate une légère tendance à la baisse de la consommation de carburants¹. On peut expliquer ce phénomène

1. Selon l'Ufip (Union française des industries pétrolières), les Français ont consommé 0,5 million de tonne de carburant de moins en 2005, par rapport à 2004 (42 millions de tonnes au lieu de 42,5 millions de tonnes).

par plusieurs facteurs : le prix du pétrole, qui incite à moins rouler ou à préférer des véhicules plus sobres ; la peur des radars ; et, sans aucun doute, une moindre consommation des nouveaux modèles.

Contrairement à une idée reçue, la demande de mobilité ne cesse d'augmenter, avec un nombre de kilomètres par passager en hausse constante d'année en année. Mais ce besoin de se déplacer est compensé par des voitures moins gourmandes en carburant. La priorité, chez tous les constructeurs, est actuellement de réduire la consommation.

Tout cela a cependant un coût. En France, on consomme par exemple trois fois plus d'énergie que ce dont on a besoin, si l'on considère le rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale (celle qui est finalement utile). D'autre part, l'industrie automobile dépense des milliards d'euros pour optimiser le moteur à explosion, dont l'invention remonte au XIX^e siècle. Il faut en effet savoir que le rendement de la chaîne de traction n'est que de 20 à 25 %, ce qui est très faible. De plus, les coûts ont fortement augmenté pour améliorer les performances et réduire la pollution des gaz d'échappement des moteurs diesel actuels, tels les moteurs à injection directe *common rail*.

Où l'on reparle de l'hydrogène

Même si l'information n'a pas fait la une des grands magazines, la France a accueilli en juin 2006 un congrès de renommée mondiale : le WHEC (World Hydrogen Energy Conference). Il s'est tenu

à Lyon, pendant une semaine. Un tel événement a lieu tous les deux ans et s'organise en alternance dans différentes régions du monde (le dernier avait eu lieu à Yokohama au Japon, et le prochain se tiendra à Brisbane en Australie). Il réunit environ 1 000 participants venus du monde entier. Dans ce genre de congrès, on fait le point sur les avancées techniques. Lors de cette édition 2006, on a pu noter l'intérêt croissant vis-à-vis de la pile à combustible, considérée comme une véritable alternative, même s'il y a encore du travail dans le domaine de la recherche. Plusieurs pistes sont prometteuses pour l'avenir, dont l'électrolyse à terme et la synergie entre biomasse et hydrogène (que l'on peut par exemple produire à partir des algues, sous l'action de bactéries qui jouent le rôle d'enzymes glutons).

Si l'on peut considérer la présence des politiques comme un baromètre, le WHEC peut se féliciter d'avoir accueilli le ministre français de l'Industrie, François Loos, ainsi que le commissaire européen à la Recherche, Janez Potocnik. Officiels et visiteurs ont pu essayer en grandeur nature des voitures à hydrogène, dont la Nissan X-Trail FCV, qui roule déjà au Japon et est disponible en location longue durée. On a aussi pu voir des vélos, des scooters et même des trottinettes alimentés par hydrogène.

Je retiens par ailleurs que les Chinois sont très présents dans l'hydrogène. Ils utilisent la pile à combustible comme vecteur de communication, avec de nombreux programmes d'expérimentation et des démonstrations en vue des JO de 2008. D'autres pays s'intéressent aussi beaucoup à l'hydrogène,

dont l'Inde, mais aussi, plus près de nous, la Suisse et naturellement l'Allemagne.

La France ne peut ignorer plus longtemps un tel engouement au niveau mondial.

2

RAPPELS SUR L'HYDROGÈNE

Pour bien comprendre les enjeux de la voiture à hydrogène, quelques mises au point s'imposent. Sans revenir en détail sur les cours de physique qu'on vous a dispensés au lycée et que vous avez sans doute oubliés, voici quelques rappels simples.

Qu'est-ce que l'hydrogène ?

L'hydrogène est la plus petite molécule qui existe dans la nature : elle se compose de deux atomes identiques qui, chacun, combinent simplement un proton et un électron. C'est la matière la plus simple au monde. Elle est si petite que si l'on met de l'hydrogène dans une bouteille, il faut des matériaux spéciaux pour l'empêcher de passer au travers. L'atome d'hydrogène se faufile partout.

En vérité, l'hydrogène n'existe pas à l'état libre. Ce n'est donc pas à proprement parler une source

d'énergie, mais plutôt un vecteur d'énergie – comme peut l'être l'électricité par exemple. Si l'on rapporte le poids de l'hydrogène à son équivalent en essence, il faut savoir que sa combustion produit trois fois plus d'énergie.

L'hydrogène est en fait présent dans plusieurs produits, notamment dans l'eau. Rappelez-vous la formule de l'eau : H_2O – deux atomes d'hydrogène, un atome d'oxygène. La structure de la molécule d'eau est représentée par un triangle. Figurez-vous qu'un litre d'eau contient 116 grammes d'hydrogène. Mais la molécule d'hydrogène est si petite et si légère que 100 litres de gaz, à pression et température ambiantes, ne contiennent en fait que 10 grammes d'hydrogène. Il faut donc stocker l'hydrogène soit pur à très haute pression, soit sous forme liquide à -253 °C.

Contrairement à ce que d'aucuns imaginent, il n'y a pas d'hydrogène pur dans l'air (qui est un gaz complexe, constitué à 80 % d'azote et à 20 % d'oxygène). Mais globalement, on trouve de l'hydrogène partout, notamment dans le bois, la biomasse et même le pétrole. Pour brûler, l'hydrogène doit être combiné à de l'oxygène. Cette combustion donne de l'eau parfaitement pure, alors que celle de carburants fossiles (pétrole, gaz, charbon) relâche du carbone (le fameux gaz carbonique CO_2), qui contribue à l'effet de serre, et donc au réchauffement du climat.

Les deux principaux agents qu'on utilise dans le monde sont l'hydrogène et le carbone. Nous allons passer d'une civilisation carbone (C_8H_{18} : le célèbre

octane de l'essence ; CH_4 : gaz naturel) à une autre fondée sur l'hydrogène (H_2).

Comment produit-on de l'hydrogène ?

Pour produire de l'hydrogène, la matière première principalement utilisée aujourd'hui est le gaz naturel (CH_4). Mais son bilan énergétique est mauvais, car on dépense plus d'énergie pour fabriquer l'hydrogène qu'on n'en récupère à l'issue de ce procédé. D'autre part, cette production génère du CO_2 , qui contribue, comme nous l'avons déjà expliqué, à l'effet de serre.

Une autre solution consiste à réaliser une électrolyse de l'eau. Cela vous rappelle sans doute quelque chose... En voici le principe : à l'aide de deux électrodes, l'anode et la cathode, on fait passer du courant électrique dans l'eau. Autour de l'une des électrodes (l'anode), se dégage de l'oxygène, autour de l'autre (la cathode), de l'hydrogène : on arrive ainsi à dissocier la molécule d'eau. Le résultat de cette transformation chimique se traduit par des ions H^+ , qui se recombinent pour former de l'hydrogène.

Ce procédé permet de récupérer beaucoup d'énergie, mais à un coût élevé (de 20 à 70 euros par mégajoule, contre 7 euros par mégajoule pour la transformation du gaz naturel). Ce coût est en effet lié à la quantité d'électricité nécessaire. L'électrolyse de l'eau est donc considérée comme un produit de luxe. Mais elle est malgré tout jugée comme une voie d'avenir, à plus ou moins long terme,

notamment grâce à des procédés à haute température ou à des procédés d'électrolyse délivrant directement l'hydrogène sous pression (10 à 100 fois la pression atmosphérique). Son rendement théorique est en effet de 85 % (contre 70 % aujourd'hui, selon le dernier rapport de l'Agence internationale de l'énergie).

Il peut paraître absurde d'utiliser de l'électricité pour produire de l'hydrogène, que l'on recombina ensuite avec l'oxygène de l'air, pour produire à nouveau du courant électrique... Mais en y réfléchissant bien, c'est le meilleur moyen de bénéficier d'une énergie électrique sans avoir à la stocker dans une batterie. Précisons par ailleurs que l'électrolyse permet de récupérer de l'oxygène, qui est très utilisé en médecine et dans l'industrie chimique.

Déjà une production de masse

L'hydrogène n'a rien d'un produit expérimental. On en produit chaque année dans le monde environ 50 millions de tonnes, soit 500 milliards de m³, pour des usages marchands. Les deux principales applications sont la production d'ammoniac (NH₃) pour l'industrie chimique, et la désulfuration des carburants (essence et gazole). L'hydrogène contribue déjà à rendre les voitures plus propres, puisqu'on l'utilise pour réduire la teneur en soufre et en composés aromatiques des carburants (comme le benzène), afin de répondre aux normes antipollution, toujours plus contraignantes.

L'hydrogène est un agent chimique important. C'est la raison pour laquelle il intéresse des acteurs tels que les marchands de gaz (Air Liquide, Linde), qui produisent, stockent et vendent du gaz. L'industrie du chlore utilise elle aussi de l'hydrogène, par exemple pour fabriquer de la soude, en se basant sur l'électrolyse. À des titres divers, les pétroliers s'intéressent également à l'hydrogène. Le plus présent sur ce marché est sans aucun doute Shell Hydrogen. Également mobilisés, Total (qui mène plusieurs programmes de recherche sur la pile à combustible), BP, ou encore Exxonmobil (impliqué entre autres dans le reformage d'hydrogène à bord du véhicule), qui travaille avec GM et Toyota. Les pétroliers ne sont pas les leaders, mais ils regardent ce qui se passe et suivent les progrès de l'industrie automobile.

La pile à combustible au cœur du système

Il existe plusieurs façons d'utiliser l'hydrogène. On peut soit le brûler dans une tuyère (comme pour la fusée *Ariane*), soit l'utiliser comme carburant dans un moteur à combustion classique, ou bien encore le combiner à de l'oxygène dans une pile à combustible (PAC). Ce dernier système, dont nous allons beaucoup parler dans les pages qui suivent, est au cœur même de la voiture à hydrogène.

Qu'est-ce qu'une pile à combustible ? C'est en fait une électrolyse de l'eau à l'envers. On prend de l'hydrogène et de l'oxygène (issu de l'air ambiant), qu'on fait passer dans un empilement

électrochimique appelé stack (le cœur de la pile), afin d'obtenir de l'électricité et de l'eau. Ce procédé est un cercle vertueux, car on peut réutiliser l'eau pour produire de l'hydrogène qui, associé à de l'oxygène, va à nouveau générer de l'énergie. Il y a une déperdition d'énergie, mais le rendement théorique de la PAC (entre 60 et 75 %) est bien supérieur à celui du moteur à combustion interne (33 %). À ce propos, Carnot disait déjà il y a un siècle que ce rendement ne pourrait être fortement amélioré, en raison des limites atteintes par la température maximale (il faut d'autre part savoir que l'augmentation de la température du moteur génère des polluants). D'autres paramètres, dont la résistance à l'air, mais aussi les frottements liés à la transmission et au contact entre le pneu et la chaussée, abaissent par ailleurs le rendement global au niveau de la roue à moins de 25 %.

Un procédé réhabilité par la conquête spatiale

Ce principe de la pile à combustible a été découvert dès 1839 par un physicien gallois, William Groove, qui était aussi médecin. Ce savant a déposé un brevet à l'Académie royale de Londres. L'invention est restée lettre morte jusqu'à ce que, dans les années 1950, la firme américaine DuPont de Nemours mette au point une membrane qui, par hasard, parvient à recréer la combinaison entre l'hydrogène et l'oxygène par réaction chimique. Cette membrane, baptisée Nafion®, réussit à recréer le procédé de Groove.

Conquête spatiale oblige, c'est la Nasa qui récupère l'invention pour ses programmes Gemini et Apollo. La pile à combustible nécessaire pour alimenter les capsules en énergie a été réalisée par United Technologies Corp., une société dont le siège est situé dans le Connecticut, et dont l'un des fleurons est le fabricant de moteurs pour avions Pratt & Whitney. Pour l'anecdote, la pile était pratiquement en or et les cosmonautes ont bu de l'eau sortant de la pile. Théoriquement, l'eau ultra-pure sous sa forme H_2O est strictement imbuvable, mais elle n'est pas nocive. La société canadienne Ballard, l'un des leaders mondiaux de la pile à combustible, qui équipe des bus à l'hydrogène partout dans le monde, a d'ailleurs convié une fois des invités à boire de l'eau qui sortait de la PAC. Comme quoi, c'est possible !

Toujours est-il que la conquête spatiale est l'occasion de réhabiliter la pile à combustible et de démontrer son intérêt. Les Russes ont aussi utilisé la PAC pour leur programme spatial dans les années 1960 et 1970.

Les premières applications pour le grand public

Taille mini, mais applications maxi... On peut miniaturiser la pile à combustible pour fabriquer des micro-piles, comme dans l'électronique. La première application concerne les batteries pour ordinateurs. La firme japonaise Toshiba propose ainsi des PC portables fonctionnant avec des piles à combustible, grâce à la technologie du méthanol

direct. L'autonomie passe ainsi à vingt heures, au lieu de trois heures en moyenne pour des batteries classiques. Concrètement, on installe sur le PC une cartouche de méthanol, dont le liquide est transformé en hydrogène directement dans la pile et qui fournit du courant électrique. Il suffit ensuite de remplacer la cartouche, à chaque fois que l'on en a besoin. Le récipient est de la taille d'une boîte d'allumettes. C'est le principe de la cartouche à encre : dès qu'elle est usée, on jette ! Si ces micro-piles fonctionnent déjà sur des PC portables, on songe aussi à les utiliser sur des téléphones mobiles, afin de remplacer les batteries classiques. Il serait ainsi possible de doper la résolution des écrans couleur (davantage de pixels) et d'ajouter des prestations, ce qui n'est guère possible aujourd'hui, faute d'une autonomie suffisante. Avec les téléphones mobiles, les lecteurs MP3, les lecteurs DVD, les consoles de jeux et les ordinateurs portables, le marché gigantesque de l'électronique de loisirs s'ouvre à l'hydrogène. Les premières recharges pourraient être commercialisées vers 2007-2008.

Du chariot électrique au chariot à l'hydrogène

Un autre gros marché est le chariot électrique (comme ceux de la marque Fenwick), très utilisé dans les usines, les aires de stockage, les terrains de golf, ou encore pour aider les handicapés à se déplacer. Ce véhicule fonctionne sur batterie, qu'il faut en permanence recharger. Or c'est une opération longue et fastidieuse (huit heures pour une

recharge complète). La PAC pourrait donc, là aussi, remplir son office. Le principe consiste à installer sur site une unité de production qui, à partir de gaz naturel, permettrait d'obtenir de l'hydrogène, qu'on comprimerait ensuite à 350 bars pour alimenter le chariot.

Les États-Unis sont les pionniers dans ce domaine. Chez Chrysler par exemple, un calcul a permis d'établir que le retour sur investissement dans une usine est obtenu en à peine trois ans. La firme américaine Nuvera propose un pack complet, avec un système de production de la taille d'une armoire, qui fabrique jusqu'à 50 kilos d'hydrogène par jour, à partir de gaz naturel. L'hydrogène est ensuite stocké sous forme de gaz comprimé, dans des bouteilles qui assurent une autonomie de huit à dix heures.

Chauffage à l'hydrogène

Mais le plus gros débouché à l'heure actuelle est sans aucun doute la pile stationnaire, qui permet de produire de l'énergie pour alimenter en électricité et en eau chaude des maisons et des bâtiments. Des fabricants de PAC nord-américains comme Ballard, Nuvera, ou encore Plugpower en vendent déjà. Des compagnies japonaises sont également très présentes sur ces applications. La puissance électrique installée est de l'ordre de 3 kilowatts (1 kilowatt en moyenne au Japon, contre 5 kilowatts aux États-Unis). La pile à combustible présente un réel intérêt, y compris en Europe, où nous

sommes assez gourmands en énergie, en raison des nombreux équipements électriques (micro-ondes, télévision, etc.) que nous utilisons au quotidien.

L'intérêt est de pouvoir s'affranchir d'un réseau de distribution très coûteux, dans les endroits isolés en pleine campagne ou dans les îles, par exemple. À la base, on utilise du gaz naturel (mais aussi du GPL ou du fioul domestique), transformé en hydrogène, que la pile convertit en courant et en eau chaude (à une température de 80 °C environ). Une pile de la taille d'un frigo pourrait remplacer la chaudière, tout en assurant la production électrique de la maison. De plus, le courant peut être réattribué sur le réseau électrique, ce qui fait que tout un chacun peut finalement se muer en transformateur d'énergie. On obtiendrait ainsi de l'énergie à profusion et bon marché, dont la production se fait à la demande.

À Paris, Dalkia (groupe Veolia Environnement) vient d'installer une PAC dédiée au logement social, qui sert à alimenter les 283 logements d'un immeuble de la rue Brancion, dans le XV^e arrondissement. Cette pile, qui a pour nom Cellia, est une première en France et en Europe pour sa puissance et sa technologie. D'une puissance de 180 kilowatts thermiques et 230 kilowatts électriques, elle permettra de couvrir 20 % des besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire.

Ce type d'applications se développe plus au Japon et aux États-Unis, essentiellement parce que ces pays ont un très mauvais système de production et de distribution d'énergie électrique. Une

myriade d'acteurs sont impliqués dans la chaîne. Ce qui coûte cher, en vérité, c'est la distribution d'énergie. Il faut en effet tirer des lignes, les entretenir et les prémunir contre des facteurs extérieurs aussi divers que les arbres, les oiseaux et les intempéries. La PAC peut être utile pour délivrer une énergie d'appoint dans les endroits reculés, mais aussi pour éviter l'investissement dans de grosses centrales et passer sans encombre les pointes de consommation (comme on a pu le voir lors du black-out qu'a connu l'Allemagne). Même s'il ne s'agit pas de remplacer les centrales, les piles stationnaires devraient connaître un avenir intéressant.

Honda se lance sur le marché de la maison

On peut d'ailleurs noter que Honda propose depuis peu aux États-Unis des piles à combustible à usage stationnaire (Home Energy Station). Pourquoi diable le constructeur japonais s'intéresse-t-il à ce marché ? C'est en fait assez simple. Honda, qui est, soit dit en passant, le premier motoriste au monde (avec 18 millions de moteurs produits chaque année pour les voitures, les motos et les motoculteurs), se trouve être aussi le principal fabricant de groupes générateurs diesel. Or la PAC peut justement remplacer le groupe électrogène classique, avec un système pas plus cher, d'un meilleur rendement et surtout totalement silencieux.

De la même façon que le téléphone mobile et Internet ont réussi à détrôner le téléphone fixe, on peut s'attendre à ce que des opérateurs alternatifs

fassent leur apparition et changent les habitudes. Alors, pourquoi un constructeur automobile ne deviendrait-il pas fournisseur d'énergie pour la maison ? General Motors entend également se positionner sur le marché des piles stationnaires aux États-Unis. GM a conclu avec Dow Chemicals un accord en ce sens, pour produire des piles de 50 kilowatts, utilisables dans les usines chimiques de Dow.

On y songe dans le transport

En attendant de voir des véhicules à hydrogène dans la rue, le secteur du transport commence à songer aux générateurs électriques embarqués, ou APU (Auxiliary Power Unit). De quoi s'agit-il ? L'APU est une petite pile à combustible qui permet d'alimenter les équipements électriques de bord, tels que la climatisation, la radio, le téléphone, le système de navigation ou encore le lecteur DVD. La PAC pourrait être utilisée, au lieu de faire tourner des moteurs et des alternateurs pour fournir du courant électrique à ces équipements, lorsque le véhicule est à l'arrêt, avec un rendement de seulement 20 % (et surtout une consommation de carburant et des émissions de gaz polluants réduites). On ferait alors appel à un boîtier, baptisé « reformeur », qui serait placé par exemple dans le coffre. Pour l'anecdote, certains camping-cars de la marque allemande Hymer proposent déjà des piles à combustible au méthanol direct, destinées à assurer l'alimentation électrique du véhicule à l'arrêt.

À l'avenir, on interdira sans doute en ville (le jour d'abord, et la nuit peut-être) de faire tourner le moteur des camions à l'arrêt pour alimenter la chaîne du froid, comme ce sera le cas aux États-Unis. La PAC permettrait de fournir l'énergie nécessaire, tout en offrant aux transporteurs un gain de consommation de carburant de l'ordre de 85 %. Les routiers, qui sont contraints de dormir dans leur véhicule avec un fort volume sonore, apprécieraient également le silence d'une pile à combustible d'appoint. Les chariots élévateurs des camions, destinés à décharger les marchandises, pourraient également être alimentés de la sorte, en particulier sur les camions poubelles. En supprimant le bruit et la pollution, la circulation des véhicules de livraison serait sans doute mieux acceptée en ville.

On le voit, l'hydrogène est déjà parmi nous, et son potentiel important.

Demain, l'avion à hydrogène ?

L'avion à hydrogène est une piste d'étude plus que sérieuse. Boeing, Airbus ou encore la SNECMA s'y intéressent. Dans un premier temps, l'idée est de déconnecter la propulsion et l'alimentation électrique (gouvernes, renouvellement d'air, climatisation). En raison de la forte puissance nécessaire pour alimenter les appareils électriques (100 kilowatts), une coopération s'est instaurée entre l'aéronautique et l'automobile. Renault a ainsi collaboré avec la SNECMA dans le cadre du projet RESPIRE. Une pile à combustible de type PEMFC pourrait

faire son apparition dans moins de dix ans. Face à la multiplication des équipements de bord, dont les écrans qui se généralisent dans les appareils pour diffuser des films et offrir dans certains cas une connexion Internet, il vaudrait certes mieux utiliser une PAC sous forme d'APU. Cette pile constituerait une sorte de générateur auxiliaire, utilisant toujours le kérosène de l'avion, mais avec un meilleur rendement. N'oublions pas que le prix du carburant a un impact direct sur le coût final du billet.

Étape suivante, les avions pourraient voler aux biocarburants, au lieu du kérosène classique. Le carburant serait alors transformé à bord en hydrogène, de façon à améliorer le rendement global et à réduire le bruit. Le futur avion supersonique destiné à remplacer le Concorde à l'horizon 2017, et qui fait l'objet d'une coopération entre la France et le Japon, pourrait ainsi utiliser de l'hydrogène.

Les obstacles à l'hydrogène

L'image de l'hydrogène n'est hélas pas très bonne dans le public. Ce formidable combustible brûle très bien – voire trop bien. Le public a encore en mémoire la tragédie du *Hindenburg*, ce dirigeable allemand qui prit feu lors de son arrivée à Lakehurst, près de New York, le 6 mai 1937. Ce jour-là, le plus grand aéronef de tous les temps (235 mètres de long, 41 mètres de diamètre, lourd de 60 tonnes sans gaz porteur), symbole de la puissance nazie, prend feu, alors qu'il doit se poser. Le vol LZ 129, qui avait déjà connu des complications

en raison des intempéries, connaît un nouveau rebondissement lorsqu'un incendie se déclare à l'arrière de l'appareil. Le *Hindenburg* se trouve alors à 300 mètres de son mât d'amarrage. Il ne s'est écoulé que 34 secondes entre le moment où la première flamme s'est déclarée et celui où le dirigeable touche terre, alors qu'il se trouvait à 80 mètres d'altitude. Malgré la gravité de l'accident, on ne dénombre que 34 victimes sur un total de 97 passagers.

Détail pour le moins insolite, le *Hindenburg* était prévu pour être gonflé à l'hélium, mais suite à la décision du gouvernement américain de ne pas fournir ce gaz à l'Allemagne d'Adolf Hitler, les nazis s'étaient rabattus sur l'hydrogène.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer un tel accident. Après l'enquête du FBI, on attribua d'abord la catastrophe de Lakehurst à un sabotage (crédible pour mettre à mal le pouvoir nazi, sous la forme d'une bombe à retardement). On incrimina ensuite l'électricité statique, et enfin un nouveau vernis appliqué sur l'enveloppe de l'aéronef et qui aurait pu favoriser la création d'électricité, donc la formation d'étincelles, que l'hydrogène n'aurait fait qu'amplifier. Cette dernière piste est privilégiée par une thèse aux États-Unis, reprise par l'Onu dans une déclaration d'intention sur l'hydrogène publiée en 2005. Concrètement, le vernis en question – opaque et imperméable à l'hydrogène – aurait brûlé sous l'effet de la foudre qui s'était abattue sur le pylône d'amarrage.

Alors, l'hydrogène est-il dangereux ? Non, car c'est une petite molécule, qui se dissout instantanément au contact de l'air. L'hydrogène est beaucoup plus léger que l'air et ne brûle qu'en forte concentration. Il se dilue au contact de l'air ambiant et se diffuse très vite (dix fois plus vite que le gaz naturel dans l'air).

Un autre fait divers a défrayé la chronique : l'opinion publique se souvient de la tragédie des cosmonautes qui périrent brûlés dans la capsule *Apollo 1*, lors d'un exercice au sol le 27 janvier 1967. Mais la cabine spatiale contenait en fait de l'oxygène pur sous pression, et non de l'hydrogène. D'autre part, il faut savoir que la fusée *Ariane*, fierté de l'industrie spatiale européenne, fonctionne à l'hydrogène. Elle intègre en effet un moteur oxygène-hydrogène (un seul moteur sur *Ariane 5*, contre quatre pour *Ariane 4*), fabriqué par la SNECMA. Celui-ci utilise directement de l'hydrogène comme combustible.

De l'hydrogène pour le meilleur comme pour le pire

Quel meilleur exemple au quotidien que le Soleil, l'astre céleste qui fonctionne à l'hydrogène ? Il libère une énergie considérable depuis cinq milliards d'années, et en a encore pour 4,5 milliards d'espérance de vie. Le soleil est bel et bien un réacteur à hydrogène.

Mais si le soleil est bien perçu pour la chaleur et le hâle qu'il procure, l'hydrogène suscite la méfiance en raison de ses applications militaires. Il

suffit par exemple d'évoquer la bombe H (bombe à l'hydrogène). Dans le nucléaire, il existe deux types de réaction : la fission (un noyau lourd d'uranium est cassé en morceaux, comme pour la bombe A d'Hiroshima et de Nagasaki) et la fusion (c'est le cas de la bombe H, où l'on prend des petits noyaux, des isotopes, qu'on fusionne pour obtenir de gros noyaux). La puissance d'une bombe H est sans commune mesure avec les bombes A d'Hiroshima et de Nagasaki, dont tout le monde a pu mesurer la force de frappe à la fin de la Seconde Guerre mondiale. La bombe H fait d'autant plus peur que la fusion nucléaire sera bientôt maîtrisée par un nombre croissant de pays, pas forcément démocratiques ni nourris de bonnes intentions.

Mais l'hydrogène peut aussi constituer une source d'espoirs. Si l'on prend l'exemple d'ITER à Cadarache, le fameux réacteur nucléaire censé reproduire sur Terre la fantastique énergie des étoiles à partir de la fusion des atomes, nous aurons peut-être réussi à la fin de ce siècle à domestiquer une source d'énergie inépuisable. Notre avenir est en effet limité si l'on continue à brûler les ressources naturelles de la planète, comme nous le faisons aujourd'hui. À ce rythme, l'espérance de la vie ne dépassera guère un à deux siècles. Par ailleurs, il n'est pas tolérable qu'une partie importante de l'humanité n'ait pas accès à l'eau et au confort. L'hydrogène et le nucléaire font partie de cette panoplie d'épanouissement, mais il faut maîtriser l'ensemble du processus afin qu'il ne se retourne pas contre l'homme.

Les programmes de recherche sur l'hydrogène

On l'a dit, l'Amérique est très volontariste sur la question de l'hydrogène. Toujours pragmatiques, les Américains ont calculé que le basculement d'une économie fondée sur le pétrole vers une économie basée sur l'hydrogène ne reviendrait pas plus cher que d'envoyer des hommes sur la Lune. Un investissement de 100 milliards de dollars, tout de même... Mais les États-Unis ne veulent pas fournir à eux seuls tous les efforts de recherche. Ils ont donc proposé des accords à l'Union européenne et à plusieurs autres pays, dans le cadre du programme IPHE (International Program for Hydrogen Economy). Ce programme est aujourd'hui opérationnel : il associe dix-sept pays, dont la France, l'Allemagne, l'Italie, la Grande-Bretagne, l'Islande, l'Australie, le Brésil, la Russie, le Japon, l'Inde ou encore la Chine. Les recherches se font en commun.

En dehors des États-Unis, le Japon est aussi un pays très volontariste. Un programme d'action national sur la PAC, plutôt axé sur le transport, a été lancé sous l'impulsion de l'ancien Premier ministre, Junichiro Koizumi. L'objectif est de consommer de l'hydrogène pur dans l'automobile. Tous les grands industriels, dont Toyota, Nissan et Honda, ont suivi.

En ce qui concerne l'Europe, je peux d'autant plus témoigner que j'ai fait partie du High Level Group : composé de quinze personnes reflétant les applications de l'hydrogène dans les différents secteurs industriels, ce groupe a été créé par la

Commission européenne pour réfléchir à la manière de développer l'économie de l'hydrogène en Europe. Renault était présent, au même titre que DaimlerChrysler. C'est dans ce cadre qu'est née la plate-forme hydrogène en Europe. Elle regroupe tous les grands acteurs : pétroliers, constructeurs et producteurs d'énergie. La plate-forme a produit un agenda de recherche stratégique, ainsi qu'un autre document qui expose la stratégie de déploiement de l'hydrogène. Par ailleurs, l'Union européenne a suscité de vastes programmes de recherche appliquée (JTI – Joint Technical Initiatives). Ils devraient voir le jour dans le cadre du 7^e PCRD, le Programme-cadre de recherche et de développement pour la période 2007-2013 en Europe. Bruxelles favorise également un réseau d'autoroutes de l'hydrogène, qui partirait de l'Espagne, passerait par la Grande-Bretagne et remonterait vers l'Allemagne et la Norvège. Vingt-cinq pays d'Europe, dont la France, sont impliqués dans ce projet, qui en est au stade préindustriel.

Indépendamment des États européens, chaque grand constructeur automobile a développé sa propre activité dans l'hydrogène. Ainsi BMW et Ford ont-ils pris le parti de brûler de l'hydrogène dans un moteur à combustion. Mercedes, General Motors, Volkswagen, Fiat, Nissan et PSA sont partisans d'un stockage de l'hydrogène pur, afin d'alimenter une pile à combustible et de faire fonctionner un moteur électrique. Pour leur part, Renault et Toyota souhaitent fabriquer de l'hydrogène à bord avec un reformeur. Nous en reparlerons un peu plus loin.

La France est-elle en retard ?

En France, Claude Allègre, ancien ministre de la Recherche sous le gouvernement Jospin, avait créé le réseau PACO. J'en faisais partie et représentais alors l'industrie automobile, en tant que vice-président. PACO fédérait les acteurs français impliqués dans la recherche, tels que le CEA (Commissariat à l'énergie atomique), l'IFP (Institut français du pétrole), le CNRS (Centre national de la recherche scientifique), Renault, PSA, Total, ainsi que les ministères de la Recherche et de l'Industrie. Mais il n'y avait alors pas vraiment de vision nationale. PACO constituait plutôt un forum, au sein duquel on discutait de projets proposés par les acteurs, qui étaient ensuite soumis aux pouvoirs publics pour être subventionnés. Cela a permis de lancer une recherche française, alors faite de projets épars, sans vision partagée de l'avenir, et sans véritable projet national.

Ce réseau a été dissous lors de la création de l'ANR (Agence nationale pour la recherche) en 2005. Mais, entre-temps, un programme national a été lancé en 2004, sous l'impulsion de la direction de la technologie au ministère de la Recherche. Il a pour nom PAN'H (Plan d'action national pour l'hydrogène), et pour vocation prioritaire le transport. Les membres fondateurs en sont Air Liquide, EDF, GDF, Total, l'IFP, le CEA et Renault, qui ont été rejoints par d'autres entités publiques et privées. Ce programme, qui va de la recherche fondamentale à l'application industrielle, a été repris par l'ANR.

Il faut au passage préciser comment est organisée la recherche en France. L'ANR se situe en amont ; plus en aval, l'AII (Agence pour l'innovation industrielle) finance des programmes qui vont de l'expérimentation à l'industrialisation.

Toujours en 2004, le gouvernement français – à l'époque dirigé par Jean-Pierre Raffarin – avait lancé une grande réflexion sur les problèmes d'énergie. Elle a débouché sur un rapport concernant l'énergie, le rapport Chambolle. Il a été repris par le ministère de la Recherche (rapport Gagnepain, rédigé par Jean-Jacques Gagnepain, alors directeur de la technologie au ministère de la Recherche), et a abouti à la création des NTE – les nouvelles technologies de l'énergie. Cette organisation est hébergée par le CEA, bras séculier de l'État pour l'énergie, qui est le levier de déploiement des nouvelles énergies (hydrogène, photovoltaïque, bio-énergies, captage et stockage du CO₂).

L'ANR s'appuie sur cet organisme pour la conseiller lors des appels d'offres de recherche. NTE dispose d'un conseil stratégique, dont je fais partie et qui est dirigé par Anne Lauvergeon, P-DG d'Areva. On y retrouve entre autres PSA, Air Liquide, Total et l'Ademe. L'idée était de déboucher sur des mesures concrètes, concernant aussi bien l'automobile que le bâtiment.

Las, malgré toutes ces structures, force est de constater que la France ne fait pas la course en tête pour proposer une nouvelle organisation dans le domaine de l'hydrogène.

3

L'HYDROGÈNE DANS L'AUTOMOBILE

Les alliances se font et se défont pour être le premier à sortir des voitures à hydrogène. Mais la route est encore longue et la compétition se déroule à l'échelle de la planète.

Le saviez-vous ? La toute première voiture à hydrogène est française ! Elle a même été inventée une trentaine d'années avant la pile à combustible. En 1807, le Suisse François Isaac de Rivaz (qui est le père du moteur à explosion) a déposé à Paris le brevet d'un véhicule alimenté par de l'hydrogène et répondant au nom de prototype 1813. Cette carriole en bois disposait d'un moteur à combustion interne, brûlant de l'hydrogène sous forme gazeuse stocké dans une bonbonne (il n'y avait pas de pétrole à l'époque !). Les performances n'étaient pas fameuses, avec une autonomie d'à peine... 100 mètres. Mais le mouvement est lancé et, dès

lors, les projets vont se succéder avec l'*Hippomobile* d'Étienne Lenoir en 1860, le *concept car* de Norsk Hydro en 1933 (avec reformage d'ammoniac à bord pour produire de l'hydrogène) et la Gaz-AA du Russe Boris Shelishch en 1941 – jusqu'à ce que l'industrie automobile se penche vraiment sur la question dans les années 1960 et 1970.

Un coup d'envoi donné il y a déjà dix ans

Si l'intérêt pour l'hydrogène ne date pas d'hier dans l'industrie automobile, les premières études sérieuses ont été menées dans la seconde moitié des années 1990, à l'initiative notamment de General Motors et Mercedes. À cette époque, deux constructeurs (Ford et Mercedes) deviennent actionnaires de Ballard, une société canadienne spécialisée dans la pile à combustible. Un geste pour le moins symbolique... Les investissements sont faramineux et se montent en centaines de millions de dollars¹, pour une technologie qui est alors extrêmement chère et volumineuse. Cette époque constitue un véritable tournant, car certains experts pensent alors que l'hydrogène va connaître un avenir intéressant dans l'automobile.

On commence à voir fleurir des prototypes un peu partout à partir de 1996. Tous les constructeurs se lancent dans la pile à combustible : des

1. On peut d'ailleurs estimer à une bonne dizaine de milliards de dollars l'ensemble des sommes déboursées en recherche par l'industrie automobile, jusqu'à aujourd'hui.

Européens comme Mercedes et Fiat, les Américains GM et Ford, les Japonais Toyota, Honda et Nissan, le Coréen Hyundai... Volkswagen et PSA attendent de voir. Pour sa part, BMW choisit une autre voie et annonce qu'il va utiliser de l'hydrogène sous forme liquide dans un moteur à combustion interne – histoire sans doute de se démarquer de Mercedes !

Renault se lance fin 1996 et met en place un programme avec l'aide de la Commission européenne, qui débouchera deux ans plus tard sur un prototype baptisé Fever, élaboré sur la base d'une Laguna break. C'est presque une contre-démonstration, car le matériel nécessaire remplit le coffre ainsi que les places arrière. Le véhicule quant à lui ne dépasse pas les 40 km/h... Nous voici donc revenus aux performances du début du siècle dernier. Ce véhicule permet néanmoins de lister un certain nombre de problèmes et donne naissance chez Renault à une équipe dédiée à la pile à combustible. Un peu plus tard, le groupe PSA Peugeot Citroën rejoindra la liste des constructeurs avec son projet Hydro-Gen.

L'alliance éphémère de Renault et de PSA

Fin 1998, Renault et PSA travaillent ensemble à l'invitation du gouvernement. Le ministre de l'Industrie de l'époque convoque les P-DG des deux constructeurs nationaux, Louis Schweitzer et Jean-Martin Folz. Un programme de travail commun voit le jour, avec une équipe qui s'installe à Trappes. La

structure s'entoure de partenaires, qui sont à l'époque le CEA et Air Liquide. En juin 1999, on annonce un programme de recherche commun, labellisé par le réseau Pile à combustible (PACO) mis en place par le ministère de la Recherche, qui doit unir les deux constructeurs pour une durée de quatre ans. La volonté affichée est de développer un véhicule de série pour 2010.

Mais le projet ne va durer en fait qu'un an. L'aventure prend fin, car à l'époque Renault est impliqué dans un tout autre challenge : le rapprochement avec Nissan. Or il se trouve que le constructeur japonais mène des travaux sur la pile à combustible (il étudie comme Mercedes la piste du reformage de méthanol à bord). La marque au losange décide alors de faire alliance avec Nissan sur ce sujet (il y eut même un projet d'alliance entre Renault, Nissan et DaimlerChrysler), plutôt que de continuer la collaboration avec PSA. Ce dernier fera donc cavalier seul sur la route de l'hydrogène.

L'euphorie de Mercedes

À l'aube de l'an 2000, l'intérêt pour l'hydrogène est réel chez les constructeurs. Le plus euphorique est sans aucun doute Mercedes. En 1999, Jurgen Schrempp fait un discours mémorable à Washington. Le P-DG récemment arrivé à la tête du groupe DaimlerChrysler (né de la prise de contrôle de Chrysler, présentée au début comme une fusion avec Mercedes) annonce devant un parterre de personnalités et de journalistes la commercialisation

pour 2004 de 40 000 voitures à pile à combustible ! Mieux : il en promet 100 000 pour 2005... Cet objectif sera martelé à maintes reprises, jusqu'à ce que le réalisme l'emporte. Mais à l'époque, seul l'hydrogène compte ; le patron de Mercedes déclare par ailleurs que l'hybride n'est pas une solution ! À l'époque, on voit circuler les premières Classe A à l'hydrogène (les Necar, qui donneront naissance à une génération de véhicules de recherche). DaimlerChrysler va jusqu'à susciter la création d'un consortium au sein duquel se regroupent Ford et Ballard.

La riposte est immédiate chez General Motors. Dans le cadre du PNGV (Program for Next Generation Vehicles), un programme de recherche sur la voiture propre et économe aux États-Unis, le géant américain de l'automobile (par ailleurs numéro un mondial) se lance aussi dans la bataille. J'ai d'ailleurs eu l'occasion de rencontrer plusieurs fois le patron de la recherche de GM, Larry Burns. Dans son bureau (quatre fois plus grand que celui de Carlos Ghosn, le P-DG de Renault), on peut admirer un système entier de propulsion par pile à combustible – preuve que General Motors s'implique résolument dans l'hydrogène.

De l'autre côté du Pacifique, une alliance à la japonaise se met en place entre Honda, Toyota et Nissan. L'ancien Premier ministre Koizumi prend d'ailleurs l'affaire en main et lance un plan ambitieux. Celui-ci ne prévoit pas moins de 50 000 véhicules sur les routes au Japon en 2010, 5 millions en 2020 et 15 millions en 2030 !

Le retard à l'allumage de l'Europe

En Europe, il ne se passe toujours rien à ce moment-là. Seul le 5^e PCRD (Programme-cadre de recherche et développement), initié par Bruxelles pour la période 1998-2002, traite de l'hydrogène dans le cadre de programmes de recherche. Mais les choses vont évoluer un peu plus tard. En 2002, à l'occasion du lancement du 6^e PCRD (2002-2006), l'Union européenne commence à prendre conscience des événements. L'hydrogène est alors mis davantage en valeur dans le cadre de programmes de recherche (tels que le European Integrated Hydrogen Project, qui a fait des propositions de standards). Une cellule de veille est mise en place, mais il n'y a pas encore de stratégie clairement définie. Il faudra attendre début 2003 pour assister à la création du High Level Group, le groupe d'experts dont je ferai partie avec mon collègue de DaimlerChrysler en tant que représentant de l'industrie automobile. La Commission est alors pilotée par Philippe Busquin pour la Recherche et Loyola de Palacio pour l'Énergie et les Transports. Leur message était on ne peut plus clair : nous avons un an (neuf mois en vérité) pour proposer une stratégie en matière d'hydrogène. Le rapport tiré de ces réflexions donnera finalement naissance à la plate-forme hydrogène, toujours d'actualité aujourd'hui. Cependant, la stratégie demeure encore floue en Europe, en raison des conflits entre nations.

Le président de la Commission européenne, José Manuel Barroso, a plusieurs fers au feu, dont les biocarburants. Mais c'est un partisan de l'hydrogène, qu'il soutient et qu'il a inscrit en bonne place parmi les sujets de recherche du 7^e PCRD, à partir de 2007.

La France absente du débat

En France, la seule initiative d'envergure sur la voiture propre est le plan VPE (Véhicule propre et économe), impulsé à l'époque du gouvernement de Jean-Pierre Raffarin, en 2003. Ce plan à court et moyen terme est l'illustration d'une volonté politique. Il assigne aux constructeurs automobiles français l'objectif ambitieux d'être à la pointe de la technologie en matière de réduction de consommation et d'émissions, vers 2012-2013. Malheureusement, le plan VPE ne prévoit aucun volet sur l'hydrogène ! De toute façon, le timing n'était pas bon ; le dossier hydrogène en France est, qui plus est, alors géré par le réseau PACO (qui n'existe plus de nos jours). En 2004, apparaît PAN'H (Plan d'action national pour l'hydrogène), qui est donc le seul programme français en vigueur dédié à l'automobile.

La stratégie de Renault

Afin de marquer sa volonté d'être l'un des acteurs-clés sur le marché naissant de la voiture à hydrogène, Renault a choisi de s'associer avec la société Nuvera.

Ce partenaire incontournable pour l'industrie automobile est né en 2000 de la fusion entre la société Epyx (filiale de la firme de consulting Arthur D. Little, spécialisée dans le reformage) et De Nora Fuel Cells (filiale de la société italienne d'électrochimie De Nora, qui fabrique des piles à combustible). Le siège de Nuvera est situé à Cambridge, près de Boston, et les effectifs sont alors de 150 personnes (100 aux États-Unis et 50 en Italie). La société s'occupe de reformage et de piles. Renault la connaît bien, pour avoir travaillé depuis 1998 avec Epyx sur le reformage. Il y a en fait eu des études préliminaires jusqu'en 2004, date qui correspond aux études menées par Renault sur les organes du véhicule. C'est en 2004, justement, que Renault a décidé de prendre une participation dans Nuvera, avec un engagement par contrat jusqu'en 2007. J'ai proposé à l'époque à la direction générale de Renault de devenir un partenaire de l'entreprise, en prenant une part du capital mais aussi en engageant un important contrat de recherche sur quatre ans, sur le reformage d'hydrocarbures appliqué à l'automobile. L'idée ? Continuer les travaux et être le conseiller automobile de Nuvera. Les actionnaires de référence de la société sont le pétrolier américain Amerada Hess, De Nora et Renault. Chaque actionnaire représente un domaine d'application de la pile à combustible : énergie, chimie et automobile.

Plusieurs arguments ont pesé en faveur de ce choix. Il se trouve que Nuvera a développé son propre reformeur et sa propre pile à combustible,

avec une orientation nettement marquée vers l'automobile. La présence de Renault en tant qu'actionnaire permettait bien sûr de bénéficier des brevets, de participer au comité de direction et de contrôler l'activité dans l'automobile (en s'assurant par exemple que les contrats soient bien respectés). Il s'agissait aussi de montrer l'engagement clair de Renault. Le programme sur quatre ans était en ligne avec les objectifs fixés, à savoir développer un reformeur multicarburants, avec un certain nombre d'exigences en ce qui concerne les performances et les coûts. Renault ne devait cependant rester qu'un actionnaire minoritaire de Nuvera. La société dispose par exemple d'une autre branche qui travaille sur la pile proprement dite, où elle est plus autonome. Le hasard fait que Nuvera a pour client dans ce domaine le constructeur Fiat, qui utilise une pile à combustible pour sa Panda à l'hydrogène. Le matériel fonctionne aux basses températures (jusqu'à - 20 °C) et se montre performant, puisque la Panda H2 a gagné dans sa catégorie (devant Mercedes et sa Classe A) lors d'une édition du rallye des voitures à énergies alternatives de Monte-Carlo, en marge du salon Ever Monaco.

La coopération avec Nissan

Comme je l'ai déjà mentionné, Nissan travaillait depuis longtemps sur la pile à combustible. L'allié japonais de Renault s'était plus précisément penché sur le reformage du méthanol, ainsi que sur le « stack » (le cœur de la pile). Les travaux ont

été arrêtés à la demande de Renault, en l'an 2000. De nos discussions, il est ressorti que le méthanol n'avait pas d'avenir dans l'automobile, du fait de sa toxicité. Par ailleurs, le gouvernement japonais ayant fait le choix de l'hydrogène direct, Nissan a suivi cette voie, qui se révélait complémentaire de celle choisie par Renault. Dès 2001, Nissan a d'ailleurs lancé un grand programme de travail qui a été soutenu par Carlos Ghosn, et étendu sur cinq ans, avec un budget de 600 millions de dollars. Actuellement, les chercheurs en sont à la deuxième étape du programme et visent une pré-industrialisation. Nissan a d'ailleurs des véhicules en démonstration, dont le X-Trail FCV (Fuel Cell Vehicle), qui est autorisé à rouler au Japon et en Californie, et qui est mis à la disposition de collectivités territoriales et ministérielles. Il s'agit là d'un mode de fonctionnement typiquement japonais pour marquer l'évolution des connaissances. Les progrès sont sensibles d'année en année. La dernière version du X-Trail, sortie fin 2005, marque ainsi une évolution par rapport à la version 2003, tant en termes de performances que d'autonomie. Ce véhicule a d'ailleurs rencontré un certain succès lors des essais qui ont été organisés en France, dans le cadre du congrès WHEC à Lyon.

Au-delà de la complémentarité des technologies choisies, il faut noter celle des démarches : plus expérimentale chez les Japonais, plus théorique chez les Français. Cela correspond bien aux deux cultures dont le mariage est fructueux dans le cadre de l'alliance Renault-Nissan.

Avant l'accès à la présidence de Renault de Carlos Ghosn, la coopération entre Renault et Nissan s'articulait de la façon suivante : Renault travaillait sur le reformage à bord et la pile à combustible, tandis que Nissan se concentrait sur l'alimentation directe par hydrogène (hydrogène sous forme gazeuse et pile). Mais les choses ont changé à partir de 2006. Tout ce qui concerne la pile à combustible est maintenant localisé chez Nissan ; Renault se concentre uniquement sur le reformeur. Cette décision marque une volonté de synergie entre les deux constructeurs, qui ont chacun leur programme intégré. Plusieurs études sur les nouvelles technologies sont également communes, en liaison avec les universités. Nous avons par exemple eu l'occasion de nous pencher sur des pistes d'avenir prometteuses, telles que les réacteurs à microcanaux ou encore les systèmes de purification de l'hydrogène par membranes.

L'hydrogène est la solution pour relever les défis de l'automobile

L'industrie automobile est aujourd'hui à la croisée des chemins, car elle doit relever quatre défis majeurs. Il s'agit en effet d'éradiquer la pollution d'ici 2010-2012 (normes Euro 6) ; de réduire les gaz à effet de serre, dont le CO₂ (l'industrie automobile européenne a pris l'engagement d'abaisser la moyenne à 140 grammes de CO₂ en 2008, puis à 120 grammes en 2012, alors que la France s'engage à diviser ses émissions par quatre d'ici 2050) ;

de réduire la consommation et la dépendance au pétrole (la situation n'étant pas viable sur le plan politique et économique) ; et enfin – objectif le plus ambitieux – de parvenir à un développement durable. Ce n'est pas un programme par étapes car toutes ces démarches sont menées de front. Pour rendre les voitures plus propres, plusieurs voies sont possibles. On peut naturellement continuer à optimiser les moteurs par la combustion homogène (essence comme diesel), utiliser les biocarburants et développer l'hybride par exemple. Mais ces technologies ne permettront de parcourir qu'une partie du chemin. Le développement durable désigne en effet l'utilisation d'énergies renouvelables, sans pollution et sans émission de gaz à effet de serre. En dehors du moteur classique, essence ou diesel (voire gaz naturel), on ne connaît que le moteur électrique pour descendre à zéro émission. Cette électricité peut être fabriquée par des centrales non polluantes – en France, par la filière nucléaire –, puis être ensuite stockée dans des batteries, comme c'est le cas sur un véhicule électrique classique. On peut également produire directement de l'électricité à bord du véhicule, grâce à la pile à combustible.

Autrement dit, seul l'hydrogène permet de faire avancer des véhicules sans pollution et de relever le défi du développement durable.

Les prévisions des constructeurs

- DaimlerChrysler : 100 000 voitures PAC d'ici à 2015.
- GM : 1 000 voitures en 2010, 100 000 en 2015.
- Honda : 5 % du marché américain en 2020.
- Toyota : 12 000 voitures aux États-Unis en 2010.

La voiture à hydrogène en chiffres

Avec 1 % de la production mondiale d'hydrogène d'aujourd'hui (50 millions de tonnes par an dans le monde), on pourrait faire rouler 3 millions de voitures.

À température et à pression ordinaires, 1 kilo d'hydrogène gazeux occupe un volume de 12 000 litres. Pour faire entrer ce gaz dans une voiture, il faut donc le comprimer énormément. On stocke généralement l'hydrogène sous forme gazeuse à 350 bars (350 fois la pression atmosphérique), pour ramener le volume d'1 kilo d'hydrogène à 34 litres. Mais certains constructeurs comme Mercedes et Nissan utilisent maintenant de l'hydrogène comprimé à 700 bars. Le volume d'1 kilo d'hydrogène descend alors à seulement 15 litres. Mais c'est encore trop. Dans la mesure où l'hydrogène occupe deux fois plus d'espace que l'essence¹, il

1. 1 kilo d'hydrogène équivaut au contenu énergétique de 3,7 litres d'essence ; comme la pile à combustible a un rendement deux fois plus élevé qu'un moteur à combustion interne, il faudrait arriver à l'équivalent énergétique de 7 à 8 litres d'essence pour 1 kilo d'hydrogène.

faudrait le comprimer à 1 200 bars pour un pouvoir calorifique équivalent (sur la base d'un véhicule qui consomme 7 litres pour 100 kilomètres).

Avec 150 kilos d'hydrogène, par véhicule et par an, on pourrait parcourir l'équivalent de 15 000 kilomètres (le kilométrage moyen des Français), sur la base d'une Renault Scenic.

Le prix actuel de l'hydrogène est de 1,70 euro (hors taxe) si on le rapporte à l'équivalent d'un litre d'essence, sur la base d'un prix du baril à 60 dollars. Mercedes espère pouvoir descendre ce prix à 0,85 euro (hors taxes) par litre.

Pour 2015, le Département américain de l'énergie (DOE) se fixe pour objectif un prix de 1,50 dollar le kilo d'hydrogène (soit 0,50 dollar l'équivalent d'1 litre d'essence).

et Francfort. BMW y a contribué en grande partie. Il n'y a pas encore de stations en France. C'est en fait aux États-Unis que l'on en dénombre le plus, et notamment en Californie : une douzaine à ce jour et... deux cent cinquante prévues en 2016 ! Le gouverneur de cet État, l'ancien acteur Arnold Schwarzenegger, souhaite en effet créer des « autoroutes de l'hydrogène ». Il existe également une vingtaine de stations au Japon.

Cette solution pose néanmoins plusieurs problèmes techniques. Dans un moteur à combustion interne, la principale difficulté est de faire entrer l'air qui va se mélanger au carburant. C'est d'ailleurs pour cette raison que l'on fait de plus en plus appel aux turbocompresseurs. Cette manœuvre est encore plus difficile avec l'hydrogène, qui est un gaz et prend beaucoup de place dans le cylindre (rappelons-nous la loi des gaz parfaits, résumée par la formule $pV = nRT$, qui établit un lien entre la pression, le volume et la température). De plus, la combustion de l'hydrogène est violente et rapide. Elle se fait à 3 000 °C, ce qui occasionne la formation d'oxydes d'azote (NOx). Il faut donc adapter le moteur et le faire fonctionner en mode dégradé.

Sur la dernière version de la Série 7, BMW n'arrive ainsi à tirer que 260 chevaux avec un 12 cylindres alimenté à l'hydrogène – ce qui est bien inférieur aux 445 chevaux du moteur classique à essence. Mais le moteur est à aspiration naturelle et BMW embarque 8 kilos d'hydrogène liquide pour parcourir 200 kilomètres.

En comparaison, la pile à combustible (PAC) a un rendement deux à trois fois supérieur, par rapport au moteur à essence.

Il se pose par ailleurs le problème du stockage de l'hydrogène. On l'utilise sous forme liquide (il doit alors être stocké dans un réservoir et maintenu à la température de -253 °C), ou bien sous forme gazeuse à 350 bars (et bientôt 700 bars). Chez BMW, le réservoir est constitué de quarante couches d'aluminium, ce qui permet de conserver à température l'hydrogène liquide pendant quatre-vingts jours. Ce carburant pose toutefois moins de problèmes que le gaz naturel et le GPL.

BMW doit encore résoudre bon nombre de difficultés, mais l'on ne peut nier certaines avancées après vingt-cinq ans de recherche. La firme bavaroise a d'ailleurs décidé de s'orienter vers une voiture bicarburant, capable de rouler à la fois à l'hydrogène (200 kilomètres) et à l'essence (500 kilomètres). Ce modèle a été produit à une centaine d'exemplaires pour des campagnes d'essais auprès de personnalités dans le monde entier. La voiture ne rejette que 5 grammes de CO_2 par kilomètre en mode hydrogène (près de 30 fois moins qu'une voiture classique), les seules émissions se limitant à de la vapeur d'eau. Quand le réservoir est vide, la Série 7 revient alors automatiquement en mode essence.

Mazda pour sa part travaille depuis 1991 sur l'hydrogène brûlé dans un moteur à combustion interne. La nuance vient du fait que le constructeur nippon a fait le choix du moteur rotatif, qui lui

paraît être la meilleure solution pour obtenir une combustion homogène de l'air et de l'hydrogène. Le principe a été testé sur plusieurs modèles, en particulier sur la sportive RX-8, disponible en location au Japon (ce qui est une première mondiale pour une voiture à moteur classique fonctionnant à l'hydrogène). Comme BMW, Mazda propose un véhicule qui peut rouler à la fois à l'essence et à l'hydrogène.

Le cas de Ford est plus énigmatique. La marque à l'ovale était pourtant partie en pole position, dans le cadre de l'alliance avec DaimlerChrysler et Ballard. Mais, apparemment, rien de concret n'est sorti de ce programme. Ford est donc présent de deux façons sur la voiture à hydrogène : sous la forme du moteur à combustion interne, comme on vient de le voir, et sous la forme de la pile à combustible. La marque affirme que l'hydrogène fait partie intégrante de ses recherches, au même titre que l'hybride, l'éthanol, le diesel propre et les évolutions sur les motorisations classiques.

2. L'hydrogène avec une pile à combustible

Cette solution est la plus courante chez les constructeurs. Mais il faut savoir qu'il y a trois façons de stocker l'hydrogène :

a) Le stockage gazeux

L'hydrogène est stocké à l'état de gaz à température ordinaire, mais il doit être comprimé à très haute pression – généralement 350 bars (jusqu'à

700 bars sur les dernières réalisations, en particulier chez Nissan et Mercedes). À titre de comparaison, il faudrait comprimer l'hydrogène à 1 200 bars (ce qui est colossal), à volume égal, pour rivaliser avec l'essence. Pour parcourir 100 kilomètres, il faut à un véhicule européen moyen 1 kilo d'hydrogène, qui, à une pression de 350 bars, occupe 34 litres. Pour ce même véhicule, 6 litres d'essence sont nécessaires pour rouler 100 kilomètres. En volume et à kilométrage égal, il faut donc six fois plus d'hydrogène que d'essence. Pour pouvoir résister à ces pressions très élevées, on doit recourir à des réservoirs cylindriques, très épais et résistants, généralement constitués d'acier et de fibre de carbone.

À la pompe, la manipulation n'est guère plus compliquée que pour un plein d'essence ou de gazole. Mais, au lieu d'un bec, on a en main un embout qui vient se fixer directement sur le bouchon de réservoir. Pour ceux qui l'ont déjà pratiqué, cela rappelle un peu le remplissage d'un réservoir au GPL. L'aménagement de ces pompes à hydrogène demande quelques précautions. Il faut en particulier éliminer l'électricité statique, avec un branchement à la masse, comme pour l'essence, car la compression nécessite de l'énergie. Le canadien Dynatek et l'américain Quantum sont les spécialistes de ces réservoirs.

b) Le stockage liquide

C'est l'un des principes élémentaires de la physique : dans un réservoir, on peut mettre plus

d'hydrogène sous forme liquide que sous forme gazeuse. Mais la température est très basse (-253 °C), et la quantité d'énergie nécessaire pour cette transformation annihile un peu les gains environnementaux liés à l'hydrogène. D'autre part, le rendement représente 65 %. Dans l'automobile, comme pour la fusée *Ariane*, on sait fabriquer des réservoirs à hydrogène liquide d'une épaisseur de plusieurs centimètres ; ils sont calorifugés. Le carburant est ainsi maintenu à température pendant plusieurs semaines.

Le français Air Liquide et l'allemand Linde sont les deux principaux acteurs en Europe sur ce créneau de l'hydrogène sous forme liquide.

c) Le stockage sous forme « solide »

Moins connu, le stockage sous forme « solide » devrait être prêt d'ici une dizaine d'années. L'idée est de faire entrer dans un matériau des molécules d'hydrogène maintenues sous pression à 20 ou 30 bars. Les molécules entrent dans le matériau, au niveau des interstices des alliages, et restent prisonnières. Pour libérer l'hydrogène, il suffit de chauffer le matériau.

Appliqué à l'automobile, ce mode de stockage prendra la forme d'un bloc de métal (réalisé à partir d'alliages complexes), de la taille d'une boîte à chaussures et dont 7 % de la masse seront constitués d'hydrogène. Un système de réchauffage pilotera la température pour faire sortir l'hydrogène du métal quand on en aura besoin. Au contraire, on enverra de l'hydrogène légèrement comprimé qui

imbibera le réservoir froid pour rester à l'état solide dans le bloc de métal.

Si l'on part du principe que les piles à combustible d'aujourd'hui utilisent 1 kilo d'hydrogène pour un trajet de 100 kilomètres, il ne faudrait stocker que 5 kilos d'hydrogène à bord pour garantir une autonomie de 500 kilomètres, et rivaliser ainsi avec une voiture à essence ! Ce chiffre est à comparer avec les 26 kilos d'essence nécessaires à une voiture classique, qui consomme 7 litres aux 100 kilomètres.

Voilà pour la théorie ; dans la pratique, c'est un peu plus compliqué. Car, pour que les systèmes à base d'essence et d'hydrogène rivalisent en termes de masse, il faudrait idéalement que l'hydrogène puisse représenter jusqu'à 15 % de la masse dans le réservoir solide. Or on n'arrive aujourd'hui qu'à 3 %. Ce mode de stockage sera compétitif quand on aura atteint au moins le seuil de 7 %.

Aux États-Unis, General Motors travaille sur le stockage solide avec Sandia National Labs (un laboratoire américain lié à Lockheed Martin et au Département de l'énergie).

Il existe aussi d'autres méthodes de stockage à l'état solide. On peut par exemple combiner chimiquement les molécules d'hydrogène avec celles du matériau pour former des borohydrures de sodium. Il s'agit d'un solide blanc, sous forme de poudre. Mélangés à de l'eau, ces borohydrures dégagent de l'hydrogène – un système qui sera par exemple employé dans les téléphones et les ordinateurs portables. L'utilisateur achètera des

cartouches encliquetables contenant le borohydrure et l'eau. Il s'agit cependant d'un système « one shot », car il faut reconditionner le borohydrate, qui est le produit de la réaction de l'eau sur les borohydrures.

PSA Peugeot Citroën a exploré cette voie, mais les recherches n'ont pour l'instant pas dépassé le stade du laboratoire.

3. Le reformage à bord

Réformer signifie tout simplement extraire de l'hydrogène. Dans le cas du reformage à bord, on produit de l'hydrogène à bord à partir d'un hydrocarbure quelconque (essence, gazole) ou d'un produit issu de la biomasse (biocarburants). Renault et Toyota suivent cette voie, qu'ont déjà explorée un peu plus tôt GM et Mercedes. La technologie est connue.

Le reformage se compose principalement de deux opérations : l'une de « cracking », qui consiste à casser la molécule d'hydrocarbure, l'autre de purification.

Pour effectuer la première phase, trois procédés sont utilisables : le vaporeformage (SR – steam reforming), qui consiste à faire réagir le carburant avec de l'eau ; l'oxydation partielle (Pox – partial oxydation), qui consiste à faire réagir le carburant avec l'oxygène de l'air ; et enfin le reformage autotherme (ATR – autothermal reforming), qui consiste à faire réagir le carburant avec un

mélange d'eau et d'air, en combinant les deux procédés précédents.

À l'issue du cracking, on obtient un mélange de gaz, comprenant 35 % d'hydrogène, du monoxyde de carbone (CO) et de l'azote.

Le monoxyde de carbone est un véritable poison pour le catalyseur utilisé dans la pile à combustible ; il faut donc l'éliminer ou, tout au moins, réduire sa concentration à moins de 100 ppm (parties par million).

C'est le rôle de la seconde phase, dite de purification. Trois techniques sont utilisables : la purification par voie chimique, qui comprend une conversion par l'eau (WGS – water gas shift) et une oxydation préférentielle (PROx), qui convertit le CO en CO₂ et augmente la concentration en hydrogène, qui atteint alors 40 % ; la purification par membrane, qui est un procédé mécanique de séparation du CO, ensuite retraité ; et enfin la purification par adsorption différentielle du CO (PSA – pressure swing adsorption).

Renault, en collaboration avec Nuvera, a choisi le reformage « autotherme catalytique », qui a un excellent rendement, et la purification par voie chimique, qui donne de très bons résultats mais est onéreuse, car nécessitant des catalyseurs à base de métaux nobles.

Ce choix paraît plus logique dans un premier temps. Alors que créer une infrastructure coûterait des dizaines de milliards d'euros et prendrait des dizaines d'années, il est possible de faire rouler dès aujourd'hui des véhicules à pile à combustible, en

prenant n'importe quel carburant liquide disponible à la pompe : essence, gazole ou éthanol. Pour la première fois, le client a le choix de son carburant, qu'il peut déterminer sur des critères économiques, écologiques, ou tout simplement en fonction de sa disponibilité. Quel qu'il soit, un carburant du marché peut être transformé à bord en hydrogène. Aux yeux de Renault, il s'agit là d'une première étape pour amorcer le marché et démarquer la production de voitures à hydrogène.

Avec le reformage, on dispose en quelque sorte d'un laboratoire miniature dans la voiture. Le système reproduit, à bord du véhicule, ce qui se fait à grande échelle chez Air Liquide dans le Nord de la France, au sein d'installations gigantesques.

Le calendrier de ces technologies

- Hydrogène pur : pour des applications captives (flottes, taxis), on peut envisager l'utilisation de ce type de technologie vers 2010.
- Reformeur : 2015.
- Pile à combustible : après 2020 (consensus Europe, Japon et États-Unis).

5

CE QUI VA CHANGER À BORD DE VOTRE VOITURE

Plus propre et moins gourmande en carburant, la voiture à hydrogène va aussi changer votre quotidien. Elle apportera plus de services et va sans doute changer d'aspect. Est-ce la fin de l'automobile ou le début d'une ère nouvelle ?

Un nouvel équipement : la pile à combustible

Imaginez sous le plancher une valise de 80 kilos, renfermant des centaines de membranes, qui ne bouge pas, ne vibre pas et ne fait pas de bruit. C'est ainsi que se présente la PAC, la fameuse pile à combustible.

Il s'agit d'un mille-feuilles de matières très fines, empilées avec des plaques et des tiges serrées par des écrous. L'élément actif est la MEA (membrane electrode assembly). Il s'agit d'une membrane qui laisse passer les ions d'hydrogène, mais pas ceux de

l'oxygène. De chaque côté de la membrane se trouve une couche de catalyseur (en platine), et de part et d'autre de cet ensemble, une électrode (anode et cathode qui récupèrent le courant). L'ensemble se compose donc de 5 couches empilées les unes sur les autres. Pour compléter la cellule élémentaire, on trouve de chaque côté de la MEA une plaque bipolaire, dont la fonction est d'apporter les gaz (hydrogène d'un côté, oxygène de l'autre), et de récupérer l'eau produite par la pile à combustible.

Ces cellules délivrent du courant jusqu'à 1,2 ampère sous 0,7 volt. Jusqu'à 400 cellules sont disposées en série dans une voiture, afin de produire un courant électrique de 280 volts en continu. La puissance désirée est fournie en mettant en parallèle le nombre nécessaire de modules.

La pile à combustible ne tolère que de l'hydrogène parfaitement pur, en dehors de gaz neutres comme l'azote et le gaz carbonique, en association avec un catalyseur en platine. C'est un compresseur d'air qui fait entrer de l'air ambiant pour mélanger l'oxygène à l'hydrogène et produire ainsi du courant électrique. La pression varie de 1 à 3 bars, suivant la puissance demandée.

La PAC dégage beaucoup de chaleur (80 °C), autant que de puissance électrique, et ne rejette que de l'eau, par ailleurs réutilisée dans le reformeur.

Une pile guère plus complexe qu'un transistor

Si l'on regarde de plus près les feuilles qui constituent la pile, on note la présence de diffuseurs de

gaz sous forme de microcanaux et de serpentins, ainsi que d'électrodes bipolaires avec le + du côté de l'oxygène, et le - du côté de l'hydrogène. Au centre, on trouve la membrane, un polymère agrémenté de catalyseurs et qui a pour fonction de retirer l'électron de l'atome d'hydrogène (laissant ainsi le seul proton), et qui laisse l'ion d'hydrogène H^+ rejoindre l'oxygène, tout en interdisant aux ions d'oxygène d'aller en sens inverse vers l'hydrogène. Cette membrane échangeuse de protons (PEM – proton exchange membrane) a donné son nom à la technologie PEM (ou PEM Fuel Cell).

Contrairement à ce que l'on croit, une pile à combustible n'est pas plus compliquée que les transistors d'un poste de radio. Il n'y a d'ailleurs pas d'électronique dans une PAC ! En apparence, ce n'est donc pas très high tech.

Pourtant, la membrane est un polymère dont la fabrication est très complexe et qui vaut extrêmement cher (sa réalisation passe par des étapes de synthèse organique en atmosphère fluorée, et elle est ensuite enduite de platine). Les prix devraient cependant baisser, car DuPont de Nemours n'est plus le seul producteur sur le marché. Par ailleurs, les axes de recherche portent sur la réduction de la quantité de platine¹ et la mise au point d'un

1. Aujourd'hui de l'ordre du gramme par kilowatt. Les nanotechnologies appliquées aux catalyseurs devraient permettre de réduire cette teneur d'un facteur 10 dans les cinq prochaines années.

polymère moins cher, capable par ailleurs de supporter une plus grande température.

La voiture devient électrique

Mais la pile n'est pas le seul équipement de la voiture à hydrogène. Il y a aussi le moteur électrique, qui remplace le moteur classique et fonctionne en courant alternatif. Un onduleur permet de transformer le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Ce courant alimente un moteur électrique qui fait avancer la voiture.

Une voiture à pile à combustible est en fait l'équivalent d'une voiture électrique, mais sans batteries. C'est la production d'énergie électrique à bord, via l'hydrogène, qui assure la propulsion. En revanche, la batterie classique sera conservée. Elle est en effet plus pratique pour démarrer la voiture (le mode purement PAC est plus long et plus aléatoire) ainsi que pour réguler à bord la demande d'énergie. Si l'on devait prendre une image, disons que la batterie joue le rôle d'EDF, en stockant un peu d'énergie produite par la pile à combustible pour lisser le fonctionnement du système (le courant sort notamment de la batterie en cas d'à-coups – pour supporter une accélération par exemple).

Quel impact au quotidien ?

La voiture à hydrogène se fera à coup sûr reconnaître dans la rue, car elle ne fait pas de bruit. Tout comme la voiture électrique (d'ailleurs, c'en est une), elle avancera en silence et sa seule signature

sonore sera celle du contact entre les pneus et la chaussée (peut-être aussi celle du compresseur d'air). En tendant l'oreille, vous entendrez comme un léger sifflement. À l'intérieur, le silence sera tout aussi appréciable. Bien entendu, il faudra s'habituer à cette absence de bruit, notamment quand vous tournerez la clé du contact, que les voyants s'allumeront et qu'aucun son ne sortira du moteur. L'autre détail amusant concerne le pot d'échappement : s'il est maintenu, il aura un rôle tout à fait symbolique. La voiture à hydrogène ne rejette en effet pas de gaz polluants, uniquement de la vapeur d'eau. On verra donc de temps à autre quelques gouttes d'eau se former au démarrage et se répandre sur la chaussée. Les cyclistes et les piétons apprécieront de ne plus respirer les fumées des pots d'échappement.

Quant à l'épreuve du plein, elle n'a rien de si terrible. Si la voiture est dotée d'un reformeur, vous continuerez à vous ravitailler auprès d'une pompe classique (mais avec peut-être plus de choix, notamment grâce au bio-éthanol E85 qui se développe en France). Le carburant se transformera ensuite en hydrogène, sans aucune intervention de votre part. Sinon, vous ferez le plein auprès d'une pompe spéciale pour obtenir de l'hydrogène gazeux ou liquide. Ce ne sera pas plus compliqué que de remplir le réservoir d'une voiture au GPL ou au gaz naturel.

Une voiture comme les autres ou une nouvelle voiture ?

Il n'y a pas de réel consensus entre les constructeurs concernant l'impact de l'hydrogène au quotidien. En vérité, deux conceptions s'affrontent.

Une première idée consiste à dire que la pile à combustible est un générateur associé à un moteur électrique, et que rien ne change dans la voiture. Pour le client, le mode de fonctionnement est transparent. Dans une voiture équipée d'un reformeur, on continue par exemple à prendre de l'essence à la pompe (mais on en met tout de même deux fois moins !). Les paramètres restent les mêmes pour l'autonomie et la vitesse maxi, de même que pour les performances. Le couple est identique, quoique supérieur à bas régime. Mais il y a une différence de taille : la voiture ne fait plus du tout de bruit et ne pollue plus. Certains constructeurs affirment que le passage à l'hydrogène va coûter cher, et qu'il ne faudrait pas tout bouleverser. C'est, entre autres, l'opinion des spécialistes allemands de la voiture haut de gamme, très attachés à une image statutaire.

Même si mon opinion ne reflète pas forcément celle de Renault, je pense au contraire qu'il faut tirer la quintessence des nouvelles technologies. On voit bien que la voiture conventionnelle arrive à ses limites. Elle est plus difficile à réparer et atteint un pic en matière de poids. En l'état actuel, l'ajout de fonctions n'est pas possible indéfiniment. Il faut donc totalement repenser la concep-

tion. Si l'on réfléchit bien, le véhicule classique n'a pas tellement évolué depuis sa création (hormis la caisse autoporteuse à la fin des années 1930, grâce à Citroën). Il est donc temps de changer. Honda et General Motors sont les plus ardents promoteurs d'une évolution sensible de l'automobile dans le cadre de la pile à combustible.

Des changements à tous les étages

L'autre idée consiste justement à dire que l'on peut aller plus loin. L'énergie électrique peut faire marcher l'air conditionné (qui absorbe du carburant et de la puissance, et fonctionne avec du fréon, un gaz que la Commission européenne veut éliminer et remplacer par le CO₂). De même, on peut utiliser un compresseur électrique, au lieu d'un compresseur mécanique. Un tel système serait autonome et produirait à la fois du chaud et du froid, en étant utilisé comme une pompe à chaleur. On peut aussi électrifier le freinage. Le temps de réponse serait plus court, ou même nul, et l'on récupérerait en prime de l'énergie au freinage. Il devient également possible de s'affranchir de la direction classique. Ainsi, il n'y aurait plus de colonne de direction, et même plus de volant du tout... Un *joystick* permettrait de diriger la voiture depuis les places avant, voire depuis l'arrière. Et, si l'on conserve le volant pour des raisons pratiques, la direction pourrait s'adapter aux conditions de la route, avec une assistance plus ou moins grande, en interaction avec l'ESP (le système électronique de contrôle de la trajectoire).

Le véhicule lui-même serait plus efficace avec une suspension pilotée électroniquement qui modifierait les paramètres en fonction de la charge, répartissant les masses et corrigeant l'amortissement en fonction du profil de la route. Avec une plate-forme indépendante de la carrosserie, il serait ainsi possible de filtrer les vibrations et de résoudre les problèmes de sensibilité aux rugosités de la route.

Une architecture véhicule différente

Ce qui va le plus changer dans la voiture à hydrogène, c'est l'architecture du véhicule telle qu'on l'a connue jusqu'à présent. Tous les organes mécaniques (câbles de frein, colonne de direction, pédales et groupe motopropulseur) disparaîtront au profit d'organes miniaturisés, intégrant de l'électronique et reliés par des fils électriques que l'on peut placer n'importe où. C'est ce que l'on appelle dans l'automobile le « X by wire ». Dès lors, il n'y aura plus de contraintes. Les constructeurs pourront donc privilégier l'espace disponible pour les passagers et les bagages, récupérant par exemple l'espace sous le plancher, jusqu'ici dévolu à la mécanique. On pourra aussi améliorer le confort, en isolant acoustiquement l'habitacle du reste de la carrosserie. La liberté de forme deviendra totale, ce qui devrait grandement inspirer les designers.

Renault n'a pas encore exploré cette voie, mais il y a sans aucun doute une énorme marge de progrès. Pourquoi ne pas, par exemple, changer

de silhouette quand on le désire ? L'hydrogène peut donner naissance à des voitures transformables, capables de se métamorphoser, à la demande, en cabriolet ou en pick-up. Avec une carrosserie qui n'a plus rien à voir avec la mécanique, il est possible de développer une approche très modulaire. On peut par exemple imaginer des véhicules en matériaux composites, de forme sphérique ou variable (rappelons-nous la Zoom de Matra et la Bertone Slim, ces concept cars qui pouvaient se rétracter et s'allonger en fonction des emplacements de parking). L'automobile de demain s'inspirera sans doute des formes géométriques du tissu urbain.

Autre choc : il n'y aura plus rien sous le capot ! Ce sera sans doute la plus grande rupture avec l'idée qu'on pouvait se faire de l'automobile. On peut d'ailleurs se demander s'il est bon de conserver un avant aussi proéminent. Mais ne serait-ce que pour des raisons de sécurité (habitacle qui recule en cas de choc, pare-chocs), il faut de toute évidence conserver un « nez » à la voiture (encore que l'absorption de l'énergie du choc puisse se faire par d'autres moyens, en particulier des éléments dédiés : amortisseurs, écrasement de blocs en composite...).

Des fonctions nouvelles

La production d'électricité à bord, grâce à la présence de l'hydrogène, va également se traduire par l'apparition de fonctions nouvelles. Dans quelques

années, on pourra, directement sur une prise du véhicule, alimenter un réfrigérateur, un ordinateur, un home cinema ou encore un four à micro-ondes (sur 220 volts au lieu de 12 volts). En guise de clin d'œil, Mercedes a par exemple prévu des prises à l'arrière de la F600 HYGenius – un *concept car* dévoilé dans le cadre du salon de Tokyo en 2005. La firme à l'étoile avait d'ailleurs choisi d'accompagner la présentation de ce véhicule d'un concert rock, les instruments du groupe étant branchés directement sur le véhicule. On pourra donc utiliser des produits de la vie courante (machine à laver, réchaud, cafetière, téléviseur portable), lors d'un arrêt sur la route des vacances, ou tout en roulant. La voiture va en quelque sorte devenir une maison en miniature.

Si l'on suit cette logique, on pourra même à terme connecter le véhicule à la maison. Honda commence à y penser. Quand la voiture se trouve dans le garage, elle peut par exemple se connecter au foyer et fournir une partie de l'énergie domestique. On peut aussi profiter de ce laps de temps pour charger le véhicule avec des contenus multimédias.

L'occasion de tout changer

Prenons le cas du véhicule haut de gamme, un domaine que Renault continue d'explorer et pour lequel il nourrit quelques ambitions. Tout constructeur qui se respecte recherche une certaine perfection sur des prestations de base (motorisation,

tenue de route, freinage, confort acoustique et vibratoire). C'est ce qu'on appelle dans notre jargon « les fondamentaux ». La différence se fait ensuite sur des prestations complémentaires. Si l'on ajoute des fonctions liées à la suspension et au freinage, on va sans doute plafonner en matière de performances, tout en augmentant les coûts. Au contraire, la voiture à hydrogène permet, grâce à l'énergie électrique, d'apporter de nouvelles prestations, en les intégrant mieux et en optimisant le fonctionnement. On peut ainsi obtenir un véhicule au comportement autoadaptatif, reconnaissant la morphologie du conducteur et réglant les commandes automatiquement, capable d'éviter les accidents en voyant ce qui se passe autour, et optimisant le trajet grâce aux informations fournies par le système de navigation. On saura mieux faire le découplage entre tenue de route et confort, de façon plus simple et moins coûteuse.

Imaginez un véhicule procurant le confort d'une Rolls et la tenue de route d'une Porsche, avec la consommation d'une Clio (90 grammes de CO₂/km). Ce type de véhicule constituerait une vraie rupture. On serait dans l'excellence (plus seulement mécanique) avec de l'électricité, de l'électronique, de l'informatique et des matériaux. Le fait de supprimer les organes mécaniques supprime les frottements et réduit l'usure, ce qui signifie moins d'entretien. Renault serait plus libre de concevoir un tel véhicule, plutôt que Mercedes par exemple, forcément plus conservateur en raison de son image de marque.

Quelques exemples de voitures à hydrogène novatrices

La Michelin Hy Light

Dans le cadre du Challenge Bibendum, un événement sur le thème de la mobilité durable organisé par Michelin qui se déroulait à Shanghai, en 2004, nous avons eu la surprise de découvrir la Hy Light. Ainsi donc, dans le plus grand secret, le manufacturier de Clermont-Ferrand avait conçu un *concept car*. Pour réaliser ce véhicule, Michelin s'était appuyé sur le Paul Scherrer Institut (PSI), un laboratoire très discret situé en Suisse. Le projet Hy Light était d'ailleurs rattaché, non à la recherche, mais au P-DG de l'époque (le regretté Édouard Michelin). C'est dire si le projet était confidentiel... Si le design n'est pas son point fort, ce véhicule à hydrogène fait preuve d'originalité à plusieurs titres. Tout d'abord, il n'utilise pas l'air ambiant pour le mélanger à l'hydrogène. Michelin a fait le choix de stocker de l'oxygène pur (comme dans une navette spatiale) dans une deuxième bonne. C'est d'ailleurs assez logique, car l'hydrogène est obtenu à partir de l'électrolyse de l'eau, qui donne bien de l'hydrogène et de l'oxygène.

Seconde originalité : un moteur électrique dans chaque roue. Les roues intégraient en effet un petit moteur capable de piloter l'accélération, le freinage et la suspension. Ce concept va d'ailleurs se développer sous le nom de « e-corner ». La Hy Light fonctionne donc totalement à l'énergie électrique.

De plus, cette solution technique permet d'apporter des prestations radicalement nouvelles. La voiture peut se pencher dans les virages et adapte la hauteur de sa garde au sol, en fonction du profil de la route.

Bien entendu, l'objectif de Michelin n'est pas de construire des voitures. Bibendum a simplement voulu susciter la curiosité autour du thème de l'hydrogène. Ce véhicule a été un aiguillon pour les constructeurs automobiles, qui ont réalisé que la pile à combustible fonctionnait. Les équipes de Renault sont d'ailleurs allées voir en Suisse ce qui s'y passait.

La GM Hy Wire

La GM Hy Wire est la première voiture à présenter un châssis en forme de skate-board. General Motors a choisi d'associer ce que l'on appelle le X by wire (commandes par fils électriques) à la propulsion par pile à combustible, d'où ce profil original. Mais ce n'est ni plus ni moins qu'un retour aux sources. Au début du xx^e siècle, toute la mécanique était dans le châssis, et l'on rajoutait la carrosserie dessus. L'intérêt économique était d'utiliser le même châssis en association avec plusieurs carrosseries. C'est ainsi qu'étaient conçues les Delahaye et autres Hotchkiss. On voit à travers cet exemple que l'on peut radicalement changer la conception d'une voiture.

En dehors de son plancher plat, la Hy Wire – présentée en 2002 – se distingue aussi par son habitabilité. Les passagers ont la place d'allonger

leurs jambes. Les pédales ont disparu et le conducteur tient entre les mains un volant où sont concentrées les fonctions de direction, d'accélération et de freinage. Ce concept se décline aussi sur la Chevrolet Sequel, un *concept car* présenté en 2005 au salon de Detroit.

6

LES PROBLÈMES À RÉSOUDRE

Si, techniquement, la pile à combustible a fait la preuve de son efficacité et continue de s'améliorer, il reste encore bon nombre de problèmes à résoudre. Le plus grand challenge est celui de l'infrastructure, pour accueillir et alimenter en carburant les voitures à hydrogène.

Des véhicules déjà sur les routes

Le saviez-vous ? Un constructeur comme Mercedes a déjà mis en circulation une flotte de 100 véhicules à pile à combustible, dont 60 voitures (Classe A F-Cell), qui ont parcouru au total plus de 3,5 millions de kilomètres dans le monde. C'est un record mondial. Ces autos roulent en Allemagne, en Islande, aux États-Unis (Californie, Michigan), au Japon et à Singapour. Équipées de capteurs en tous genres, ces Classe A à l'hydrogène

sont suivies à la loupe par des ingénieurs. Ils analysent les paramètres liés à la conduite, à la consommation et au remplissage du réservoir. Les données sont globalement satisfaisantes. Par ailleurs, Mercedes a livré des bus à pile à combustible dans les grandes capitales et métropoles européennes (Amsterdam, Barcelone, Hambourg, Londres, Luxembourg, Madrid, Porto, Stockholm et Stuttgart) dans le cadre du projet CUTE¹, mais aussi en Chine et en Australie.

BMW a également lancé une opération pilote en décidant de produire à 100 exemplaires la Série 7 Hydrogen. Il s'agit du premier « véhicule de série », dûment homologué, roulant à la fois à l'essence et à l'hydrogène. Il a déjà été testé dans certains pays du monde par des personnalités et des leaders d'opinion.

Un autre constructeur comme Nissan propose aujourd'hui au Japon une X-Trail FCV en location longue durée. Cette version à l'hydrogène a été autorisée à rouler sur route ouverte par les autorités locales. Elle est notamment utilisée au quotidien par un pétrolier (Cosmo Oil) et par la préfecture de Yokohama. Toyota fait également rouler des véhicules à hydrogène au Japon : des bus, et la FCHV, une voiture hybride-pile à combustible homologuée pour la route. Le prix de la location chez Nissan et Toyota est de 1 million de yens par mois (environ 6 700 euros).

1. CUTE : Clean Urban Transport for Europe.

Aux États-Unis, plusieurs constructeurs (General Motors, Ford, Mercedes, mais également Toyota et Honda) font circuler des véhicules et les proposent même en leasing. Les voitures roulent notamment en Californie, en Floride, dans le Michigan, à Washington et à New York. GM a annoncé son intention de produire plus de 100 exemplaires de la Chevrolet Equinox en version « Fuel Cell » pour un test grandeur nature.

Des pays très actifs

Les États-Unis sont très volontaristes sur l'hydrogène. Cela est particulièrement vrai pour la Californie qui, par tradition, demande toujours aux industriels d'élaborer des voitures plus propres. Sous l'impulsion du gouverneur Arnold Schwarzenegger, elle a même ouvertement proclamé son intention de réaliser des autoroutes de l'hydrogène. « Terminator » a d'ailleurs fait transformer son Hummer afin de pouvoir l'alimenter avec une pile à combustible. À Los Angeles comme à San Francisco, on peut croiser des véhicules à hydrogène, principalement dans des flottes relevant des collectivités. Une famille de Redondo Beach, près de Los Angeles, a pour sa part fait l'acquisition d'un véhicule Honda. Jon et Sandy Spallino ont signé un contrat de deux ans pour utiliser au quotidien une FCX à pile à combustible – une première mondiale. Précision utile : on peut trouver 46 stations à hydrogène aux États-Unis (contre 150 000 qui délivrent de l'essence). C'est peu, mais cela représente

tout de même un tiers du parc mondial, qui s'élève à 119 stations¹.

Les autres pays « moteurs » en ce qui concerne l'hydrogène sont le Canada, l'Islande, le Japon², la Chine (les autorités de Pékin jouent la carte de l'environnement pour les JO de 2008 avec une armada prévue de 3 000 autos et de 1 000 bus à hydrogène, en attendant le déploiement de 1 000 taxis pour l'Exposition universelle de Shanghai de 2010), ainsi que la Corée du Sud (qui a un programme national).

En Europe, seule l'Allemagne s'implique réellement, avec des opérations pilotes, notamment à Berlin et Hambourg. En France, il ne se passe absolument rien. Chez nous, la démarche est plus universitaire. Elle est très différente de celle des Anglo-Saxons qui cherchent plus à tester pour améliorer leur compréhension. La France estime qu'il est prématuré de faire de l'expérimentation en vraie grandeur.

Le Fuel Cell Marathon d'Opel

Pour convaincre les décideurs (médias, gouvernements, milieux économiques) que l'hydrogène

1. On trouve aujourd'hui 119 stations à l'hydrogène : 46 aux États-Unis, 33 en Europe, 22 au Japon, 9 dans le reste de l'Asie, 8 au Canada et un dans le reste du monde. 83 autres stations à l'hydrogène sont en projet.

2. Yokohama vient d'ailleurs d'accueillir EVS22, un symposium sur les véhicules électriques, hybrides et à pile à combustible. Le Japon a aussi organisé des tests à destination du public.

est une solution viable à moyen terme, General Motors n'a pas hésité à organiser un tour d'Europe (du 3 mai au 11 juin 2004) pour promouvoir la pile à combustible. L'Opel Zafira HydroGen 3 a ainsi parcouru 9 696 kilomètres en 38 jours, en partant de la Norvège pour arriver au Portugal. La voiture faisait 500 kilomètres en moyenne par jour. Lors de son passage dans les principales villes européennes, dont Paris, le « Fuel Cell Marathon » conviait journalistes et personnalités. Des forums ont également été organisés dans les grandes universités européennes – l'occasion de présenter les derniers développements de la technologie et de montrer l'intégration de la pile à combustible dans le véhicule. GM a fait des progrès et arrive à préserver l'habitabilité du véhicule, qui conserve ses cinq places. La pile pèse 90 kilos et développe 92 kilowatts. Une telle initiative est très positive sur le plan de la communication, notamment auprès du grand public (un aspect dont la France se soucie moins), même si elle n'apporte pas grand-chose sur le plan de la recherche.

L'objectif d'Opel était de préparer les autorités à l'arrivée de la voiture à hydrogène – programmée d'après eux pour 2010. Les démonstrations continuent, notamment avec une Zafira HydroGen 3 utilisée par la chaîne de magasins Ikea à Berlin.

La pile à combustible dans la course

Dans un autre registre, il faut aussi mentionner des épreuves telles que le Challenge Bibendum.

Initié par Michelin (sous l'impulsion de son ancien P-DG, Édouard Michelin), cet événement dédié à la mobilité durable permet de confronter les énergies entre elles, à la fois sur route et sur les circuits du monde. Les constructeurs viennent en effet présenter leurs dernières réalisations, qui sont testées aussi bien de la tenue de route que du freinage, en autonomie qu'en matière de consommation. Chaque Challenge Bibendum comprend des voitures à hydrogène.

Un salon qui se tient chaque année à Monaco (Ever Monaco : Ecologic Vehicles & Renewable Energies) a par ailleurs le mérite d'organiser un rallye entre des véhicules électriques, hybrides et à pile à combustible. Le Rallye de Monte-Carlo Fuel Cells & Hybrids est organisé par l'Automobile Club de Monaco et reconnu par la FIA (Fédération internationale de l'automobile). L'épreuve, dont le départ est donné depuis Lugano en Suisse, suit un itinéraire de 430 kilomètres, transitant par Turin en Italie, où un ravitaillement en carburant est prévu au centre de recherche sur l'hydrogène « Environment Park ». Le rallye se termine à Monaco. General Motors, Fiat, Hyundai, Mercedes et Toyota ont déjà participé à cette épreuve pour le moins inhabituelle.

Berlin, capitale européenne de l'hydrogène ?

La capitale allemande peut se vanter d'être particulièrement à la pointe sur l'hydrogène. Elle abrite en effet deux stations à hydrogène, l'une exploitée

par Total, l'autre par BP, mais aussi le siège du CEP (Clean Energy Partnership). Ce partenariat pour une énergie propre regroupe depuis juin 2002 un certain nombre d'acteurs¹, dont Volkswagen qui vient de rejoindre la liste. Ils ont pour vocation de promouvoir la mobilité durable. Le projet CEP, piloté par DaimlerChrysler, va durer jusqu'à la fin 2007. Il prévoit essentiellement le test au quotidien de véhicules alimentés par une pile à combustible, en coopération étroite avec les pétroliers. Dix-sept véhicules circulent ainsi à l'hydrogène dans les rues de Berlin (10 Mercedes Classe A F-Cell, 2 BMW Série 7 Hydrogen, 3 Ford Focus FCEV et 1 VW Touran Hy Motion). L'intérêt vient du fait que le public peut lui aussi tester les autos.

Le CEP considère que l'hydrogène ne s'imposera pas du jour au lendemain, et qu'il faut préparer progressivement les automobilistes à ce nouveau carburant.

Parallèlement à cette initiative, Shell Hydrogen, Total, BMW, Mercedes, Ford, GM Europe, Volkswagen et le fabricant de camions Man ont décidé de promouvoir collectivement l'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant du futur en Europe. Ils ont défini un plan d'action pour les dix ans à venir. Il comprend notamment des projets de recherche et des objectifs précis de réduction des coûts pour faciliter la mise sur le marché de tels

1. Aral, BP, BMW, DaimlerChrysler, GM/Opel, Hydro, Linde, Total, Vattenfall Europe et Volkswagen.

véhicules. Berlin sera plus que jamais un site pilote pour le déploiement de l'hydrogène.

Le rôle-clé de l'infrastructure

Le principal problème qui se pose ici est celui de l'infrastructure. Si l'on met à part la question de la production de l'hydrogène (à des coûts acceptables et sans émettre trop de CO₂, ce qui reste encore un challenge difficile), il va falloir investir massivement dans la fabrication et la distribution de ce nouveau carburant. En raison de sa spécificité, qui réclame des normes de sécurité très strictes, l'hydrogène gazeux ou liquide ne pourra prendre place à côté des autres carburants dans les stations-service. On ne le trouvera pas non plus tout de suite dans les hypermarchés. Songez par exemple que dans le cas d'une station à l'hydrogène liquide, le carburant est stocké à - 253 °C. Le plein se fait par l'intermédiaire d'un gros tuyau, parfaitement étanche et qui enclenche automatiquement le remplissage du réservoir. La procédure, gérée électroniquement, prend huit minutes.

Selon BMW, il faudrait développer environ 2 000 stations à l'hydrogène en Allemagne (sur un total de 16 000) et 12 000 en Europe pour assurer un bon ravitaillement. Cela prendra entre dix et quinze ans, peut-être plus. La mise en place d'un réseau de stations-service à l'hydrogène va donc dépendre de plusieurs acteurs : les constructeurs qui fournissent les véhicules, les pétroliers qui assurent l'infrastructure, et les pouvoirs publics qui

autorisent le carburant. L'administration va jouer un rôle essentiel.

Un budget important

Le coût de ces infrastructures va se chiffrer en centaines de milliards de dollars selon les projections de l'AIE (Agence internationale de l'énergie). Ces estimations sont sans doute à relativiser, mais le passage à une économie basée sur l'hydrogène brûlera sans aucun doute beaucoup de cash. Le retour sur investissement est d'autant plus difficile à évaluer que l'hydrogène sera en concurrence avec d'autres carburants. En dehors de l'essence, du gazole et des biocarburants (éthanol, diester) qui vont eux aussi se développer, on trouvera à la pompe des carburants synthétiques issus de la transformation du gaz naturel (GTL – Gas to Liquids) et de la biomasse (BTL – Biomass to Liquids). À l'IFP (Institut français du pétrole), on parle même de l'hythane : un mélange à 20 % d'hydrogène et à 80 % de gaz naturel. Un tel carburant permettrait d'utiliser les canalisations qui existent déjà pour le gaz naturel et de limiter l'évolution technique des moteurs.

Avec un tel choix, les automobilistes vont devoir réapprendre à faire le plein.

Une introduction progressive de l'hydrogène

La volonté des constructeurs est de réduire la pollution et de limiter les gaz à effet de serre, ce qui permettra de réduire la dépendance au pétrole et

d'ouvrir progressivement la voie aux énergies renouvelables.

En ce qui concerne les émissions polluantes locales, on sait déjà résoudre le problème sur les moteurs classiques, tant avec le gazole (filtres à particules et catalyseur Denox) qu'avec l'essence (catalyseur Denox pour l'injection directe à mélange pauvre). La pollution locale sera éradiquée en 2010.

Pour le CO₂, la piste consiste à améliorer le rendement du moteur et à réduire la consommation de carburant. À ce propos, on peut ajouter un turbo et utiliser l'injection directe. Le gain est alors de 20 à 30 %. Une autre solution consiste à réduire la taille du moteur (« downsizing »), en gardant la même puissance. Par exemple, un 1,9 litre est remplacé par un 1,5 litre plus petit et suralimenté. On obtient ainsi un gain de poids sur le moteur, tout en améliorant les performances et en réduisant la consommation de l'ordre de 15 %. Les constructeurs ont chacun une technique pour optimiser le fonctionnement du moteur, que ce soit BMW pour le pilotage des soupapes, Volkswagen pour le double turbo, Mercedes pour la désactivation des cylindres en ville, sans oublier Saab pour le taux de compression variable. L'hybridation peut également jouer un rôle pour la réduction du CO₂, qu'il s'agisse de l'hybride essence à la façon de Toyota et de Lexus, ou de l'hybride diesel tel que l'imagine PSA Peugeot Citroën à l'horizon 2010. Les constructeurs sont aussi engagés dans d'autres technologies. Renault par exemple fait partie du consortium Enerbio piloté par l'IFP, qui concerne les biocarburants

de deuxième génération. Il ne faut pas non plus oublier les véhicules électriques à batteries, qui peuvent séduire une certaine clientèle.

La diversité des technologies à l'étude fait que l'hydrogène apparaîtra peut-être dans un contexte moins dramatique, et sans doute moins en rupture. Mais c'est aujourd'hui la solution la plus crédible sur le long terme.

Un renouvellement lent du parc

Il faudra un certain temps avant que l'effet positif des voitures propres (à zéro émission, comme le véhicule à hydrogène) ne se fasse sentir. Si aujourd'hui 2 millions de véhicules sont renouvelés chaque année en France, sur un parc automobile qui en compte plus de 36 millions, dont 30 millions de voitures, il ne faut pas oublier que l'âge moyen des véhicules est de 7,7 ans. Les Français ont tendance à conserver plus longtemps leur voiture.

Or, le temps presse. Si la France veut se conformer à son objectif de division par quatre des émissions de CO₂ à l'horizon 2050, il faudrait, à cette date, 30 % de véhicules alimentés aux biocarburants, 10 % de véhicules électriques à batteries et 60 % de voitures à hydrogène. Il y a même urgence, quand on sait que le parc met trente-cinq ans à se renouveler entièrement, d'après les études menées a posteriori par l'INRETS (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité). Bien sûr, on peut imaginer que les technologies propres vont s'imposer plus rapidement,

surtout si elles interviennent dans un contexte de pétrole cher. On a vu par exemple que le diesel « common rail » n'a mis que dix ans pour gagner tous les constructeurs, à l'instar de l'ESP (contrôle électronique de trajectoire) pour la tenue de route. Mais cela veut donc dire qu'il faudrait dès 2010, au plus tard 2015, voir rouler des voitures à hydrogène sur les routes de l'Hexagone. C'est possible si l'on commercialise des véhicules munis d'un reformeur, capables de transformer le carburant classique en hydrogène pour alimenter ensuite la pile à combustible. Cette solution permettra de pallier l'absence initiale d'infrastructures dotées de pompes à hydrogène.

Il est clair qu'un consensus sera nécessaire, pas seulement en France, mais également au niveau mondial, pour faire évoluer les mentalités et changer l'énergie utilisée par les automobiles. Les constructeurs, qui évoluent eux-mêmes sur un marché planétaire, seront des acteurs importants pour conduire cette transition. Mais tout ne va pas changer du jour au lendemain. Les investissements vont se faire sur trente ans. Le démarrage du marché sera donc progressif.

Une voiture encore cinq fois trop chère

En dehors de la distribution d'hydrogène, qui est un aspect déterminant, se posent aussi des problèmes liés à la pile à combustible elle-même. Le plus préoccupant est la question du coût, qu'il faut réduire d'un facteur 5 si l'on veut proposer la technologie à un tarif acceptable pour le client final.

Aujourd'hui, le coût de revient est de 30 euros par kilowatt pour un moteur classique. Il va d'ailleurs augmenter en raison des normes européennes, qui imposent la mise en place de systèmes de dépollution. Mais avec la pile à combustible, on se situe plutôt dans une échelle de 150 euros par kilowatt ! Et encore, il s'agit là d'une projection dans une optique de production en série (c'est-à-dire plus de 100 000 véhicules par an)... C'est évidemment beaucoup trop cher.

Heureusement, il existe des voies de progrès. On peut encore réduire les coûts en diminuant la quantité de platine (par nanocatalyse, en passant de 2 milligrammes à 0,2 milligramme par cm^2 de membrane). Les constructeurs planchent également sur la structure des membranes (avec de nouveaux polymères moins sensibles aux hautes températures et moins chers) et sur les plaques bipolaires (en utilisant de l'acier ordinaire au lieu de carbone). Ces pistes de travail devraient permettre, d'ici cinq ans, d'atteindre des coûts plus raisonnables. Objectivement, il faudrait atteindre un coût de 50 euros par kilowatt pour amorcer le marché.

Ensuite, il conviendra de régler quelques problèmes de performances. La durée de vie d'une pile à combustible est par exemple de 2 500 heures, alors que l'objectif est de 5 000 heures. En ce qui concerne le rendement, le niveau actuel est de 40 %. C'est mieux que les 25 à 30 % du moteur à combustion classique, mais encore loin de l'objectif annoncé de 60 %. D'autre part, on peut encore progresser dans le domaine du remplissage en hydrogène.

Pas de risque d'explosion

Dès que l'on évoque le thème de la voiture à hydrogène, les visages se ferment et les automobilistes évoquent tout de suite le risque d'explosion. La question est d'ailleurs parfaitement légitime. L'opinion a encore en mémoire les explosions de véhicules au GPL (du fait de l'absence d'une soupape de sécurité sur les voitures concernées par ces drames), et elle est tentée de faire le parallèle. Il faut pourtant savoir que l'hydrogène n'a rien à voir avec le GPL (gaz de pétrole liquéfié), ni même avec le gaz naturel. On l'a vu, l'hydrogène est un gaz plus léger que l'air, dont la molécule est très petite et se diffuse rapidement dans l'atmosphère. La concentration est si faible dans une voiture qu'il n'y a pas de risque d'explosion. Il suffit d'ailleurs de regarder les images d'un crash test, comme celui de BMW avec sa Série 7 à l'hydrogène, pour constater qu'il ne se produit absolument rien.

A contrario, le gaz naturel (CH₄) peut s'accumuler dans des espaces confinés et, sous certaines conditions, s'enflammer voire exploser. Contrairement à une idée reçue, l'hydrogène est beaucoup moins dangereux que l'essence, dont les vapeurs peuvent provoquer une explosion. Dans un véhicule avec reformeur et pile à combustible, il n'y a jamais plus de cinq grammes d'hydrogène gazeux présents dans le système. C'est mille fois moins que pour un véhicule à hydrogène ayant fait le plein, et pour une pression cent fois moindre.

Une remise en cause pour l'industrie automobile

L'hydrogène aura du mal à se faire accepter par les usagers, d'autant qu'il n'existe pas à l'état naturel. Il faut changer les mentalités, en agissant en premier lieu sur les industriels. L'industrie automobile vit depuis plus d'un siècle avec le pétrole. Tout son mode de fonctionnement est basé sur le moteur à combustion interne, qui a permis d'acquérir un savoir et de développer des modèles économiques. Aujourd'hui, on touche à la propulsion, qui est le dernier domaine réservé des constructeurs. Si les marques automobiles soustraient plus de 75 % des composants du véhicule à des équipementiers, à qui elles délèguent par ailleurs de plus en plus la recherche et le développement, elles gardent en revanche la mainmise sur le moteur. Cet attachement est si fort que les experts en mécanique rechignent par exemple à faire plus de place aux électroniciens. Ils seront donc enclins à combattre une technologie qui menace leur savoir-faire.

Cette situation pourrait toutefois changer avec l'arrivée d'une nouvelle génération d'ingénieurs. L'automobile du futur comportera encore de la mécanique, mais avec des évolutions majeures. Il n'y aura par exemple plus de combustion dans le moteur, en raison de la présence d'une pile à combustible. Il sera nécessaire de sensibiliser les futurs ingénieurs, peut-être même dès l'école.

Une nouvelle industrie à créer

En fait, ce domaine tout nouveau de la voiture à hydrogène reste encore vierge en matière de réglementation, même si de premiers textes existent. Il faudra combler cette lacune. C'est finalement toute une industrie qui reste à créer. Si l'on fait le parallèle avec les moteurs actuels, qui nécessitent des investissements élevés du fait de leur complexité – d'autant qu'un constructeur ne peut se contenter d'un seul modèle, et doit donc se doter d'une gamme complète, essence comme diesel –, on peut dire que les coûts de développement de la pile à combustible seront finalement inférieurs. Le système de propulsion est en effet plus simple que dans le cas du moteur classique. On peut par ailleurs modifier la puissance en assemblant des éléments standard qu'on mettra en plus ou moins grande quantité.

Mutations en vue dans la filière mécanique

Chez General Motors, 600 personnes œuvrent à la pile à combustible. La plupart des grands constructeurs font travailler plusieurs spécialistes sur la voiture à hydrogène, comme chez Nissan où près de 400 personnes s'activent, suite à une impulsion forte donnée par Carlos Ghosn. En comparaison, en 2006, on n'en compte chez Renault que... 30. L'effectif est identique sinon plus faible chez PSA. Mais au-delà des chiffres, il faut bien voir que les nouveaux entrants peuvent se retrouver sur un

ped d'égalité avec les constructeurs, en raison de la nouveauté de ce concept. Les fournisseurs aussi sont des acteurs nouveaux. L'hydrogène permet par exemple d'ouvrir la porte à des fournisseurs chinois. En moins de dix ans, des sous-traitants localisés dans des pays émergents peuvent rattraper les Occidentaux. Les constructeurs le savent, c'est pour eux un risque majeur. D'où une certaine inquiétude et beaucoup de questionnements, qui incitent à toujours plus de recherche et d'investissements.

Il est clair qu'à terme toute une industrie liée aux moteurs à combustion interne va disparaître. On peut d'ailleurs s'étonner de voir que de grands équipementiers comme Bosch, Valeo, Johnson Controls et Visteon ne s'intéressent que médiocrement à la nouvelle donne. En revanche, d'autres tels que Dana, Delphi et Siemens VDO (qui a racheté les brevets de Westinghouse et ses travaux sur la pile à combustible, et racheté la branche moteurs électriques de Ballard Power Systems) sont plus en avance.

Les pétroliers s'intéressent fortement à l'hydrogène. Mais ils ne suivent pour l'instant les travaux que de loin, pour rester au contact des constructeurs. Total est par exemple présent dans plusieurs programmes de recherche, tels PAN'H en France. Les plus actifs sont Shell, Exxon Mobil et BP. Pour les Américains, qui contrôlent le marché du pétrole après avoir dominé celui du charbon, il est essentiel de se positionner sur le marché émergent de l'hydrogène. Les pétroliers savent toutefois qu'il y

a encore de l'or noir en quantités importantes. Ils gardent par ailleurs un œil sur le gaz et la biomasse. Ils sont déjà passés du stade d'industriels du pétrole à celui de producteurs d'énergie.

Remplacer un liquide noir par un produit invisible et inodore

Si l'on développe demain l'hydrogène, ce n'est pas seulement pour l'automobile. Aujourd'hui, personne ne s'en rend compte, mais nous sommes inféodés au pétrole, qui vient se glisser jusque dans le textile, les cosmétiques, les huiles, les plastiques et les matériaux, en plus du réservoir de nos voitures. Avec cet or noir, on fabrique par exemple du Teflon[®], mais aussi du Nylon[®], des matières plastiques, de l'huile, des produits d'entretien, etc. Bien sûr, on peut également utiliser la biomasse ou l'énergie d'origine solaire, et ainsi remplacer le pétrole dans le textile, la pharmacie et les matériaux. Les produits agricoles n'ont toutefois que des champs d'application limités. En revanche, on peut cumuler la biomasse et l'hydrogène pour remplacer complètement et durablement le pétrole.

Reste à convaincre l'opinion de remplacer un liquide de couleur noire que l'on peut toucher et sentir par un produit impalpable, inodore et invisible. La représentation que l'on peut se faire de l'hydrogène est très abstraite. L'électricité est aussi une source d'énergie impalpable, bien que ce mode de circulation d'électrons ait des effets plus visibles, tels que les décharges et les éclairs. En fait,

ces deux modes sont des cousins germains. On peut transformer de l'électricité en hydrogène par électrolyse, ou de l'hydrogène en électricité par pile à combustible. L'hydrogène est un vecteur d'énergie, comme l'électricité. Il peut servir dans la transformation d'un certain nombre de produits.

Tout comme le charbon a laissé la place au pétrole, le pétrole va devoir laisser la place à l'hydrogène. Un juste retour des choses, si l'on considère que l'or noir est une combinaison de carbone et d'hydrogène. Et la bonne nouvelle, c'est que n'importe qui dans le monde peut produire de l'hydrogène, n'importe où. L'Inde envisage par exemple de fabriquer de l'hydrogène à partir de plantations de riz !

Le rôle des politiques

Les politiques détiennent une partie du pouvoir de décision pour faire basculer l'économie du pétrole vers l'hydrogène. Le développement durable passe par les gouvernements, comme on a pu le voir dans l'élaboration du protocole de Kyoto, qu'une immense majorité de pays ont signé dans le monde, à l'exception notable des États-Unis (la Californie a toutefois décidé de l'appliquer). Ce sont aussi les politiques qui conditionnent les relations entre pays, et, partant, l'approvisionnement en énergie (pétrole, gaz). Les mesures fiscales jouent également un rôle déterminant. Chacun le sait, les carburants sont très taxés en Europe, notamment en France où l'État profite beaucoup de

la hausse du pétrole, en raison de la TIPP (taxe intérieure sur les produits pétroliers). En 2005, selon le ministère de l'Économie et des Finances, la part des taxes sur le prix de vente s'élevait pour le gazole à 57 % ; pour le SP 98, cette part atteignait 65,3 %, et pour le SP 95, 66,9 %. Ces taxes rapportent énormément d'argent, car si l'industrie pétrolière gagne chaque année 2 000 milliards de dollars (avec des coûts qui représentent quand même 500 milliards), les États producteurs ne perçoivent que 500 milliards, alors que les pays consommateurs accumulent 1 000 milliards de recettes¹.

Pour les hommes politiques, il serait toutefois temps de sortir de cette logique à court terme et de voir plus loin en matière de stratégie énergétique. Aujourd'hui, nos dirigeants ne jurent que par les biocarburants. Ils ne parlent jamais d'hydrogène, et aucun candidat à l'élection présidentielle n'y a fait allusion. L'autonomie énergétique et la sécurité de l'approvisionnement sont pourtant des points très stratégiques pour la France. Il se trouve que nous avons un atout : l'énergie nucléaire, qui permet de produire de l'électricité à moindre coût, mais qui sera aussi mise à contribution pour transformer la biomasse en carburant et produire plus tard de l'hydrogène. Cet aspect n'est malheureusement

1. Ces chiffres proviennent d'un livre de Jean-Marie Chevalier. Professeur à l'université Paris-Dauphine, il est considéré comme l'un des gourous de l'énergie en France. Il dirige le CGEMP (Centre de géopolitique de l'énergie et des matières premières).

pas abordé lorsqu'on évoque les critères de compétitivité. Or, sans opposer les biocarburants à l'hydrogène, il conviendrait tout de même d'analyser les coûts.

Le successeur le plus crédible du pétrole est l'hydrogène d'origine nucléaire, une solution 100 % française. Il suffit de prendre de l'eau et de l'électricité nucléaire – domaine dans lequel nous sommes un ténor mondial – pour produire de l'hydrogène. Avec la quatrième génération du nucléaire (dite à neutrons rapides), prévue pour 2030-2040, nous aurons de l'énergie à plus haute température (800 °C au lieu de 400 °C), qui utilisera de l'uranium isotope 238, cent fois plus abondant que l'uranium isotope 235 utilisé dans les centrales actuelles. Nous jouirons là d'une vraie opportunité compétitive. Il sera ainsi possible de produire de l'hydrogène à partir des centrales nucléaires, en particulier la nuit lorsque les besoins en électricité sont moindres. Cette perspective ne semble malheureusement pas être une priorité, même si le gouvernement pousse les recherches sur les réacteurs nucléaires de quatrième génération.

Peut-être le sursaut viendra-t-il des médias. Si on leur fait comprendre l'intérêt et le potentiel de la filière hydrogène, ils pourront informer l'opinion et valoriser un mode énergétique propre. Répétons-le, le plaisir de la conduite ne disparaîtra assurément pas dans l'automobile lorsque le moteur classique sera remplacé par un moteur électrique plus silencieux.

7

L'HYDROGÈNE REDESSINE LA CARTE DU MONDE

Pouvant être fabriqué à partir de l'eau, du gaz et de la biomasse, l'hydrogène change considérablement la donne sur le plan géopolitique. De nouveaux pays producteurs pourront émerger, dont la France, face aux poids lourds du pétrole que sont le Moyen-Orient et la Russie.

On s'inquiéterait moins du développement de la Chine et de l'Inde, s'il n'y avait un tel impact sur le pétrole et l'énergie. La demande d'or noir ne cesse d'augmenter dans ces pays à forte croissance, ce qui se traduit par une tension sur les prix. Si l'on fait un autre parallèle avec la montée de l'islamisme, qui se manifeste dans les pays producteurs de pétrole du golfe Persique, on voit bien que c'est finalement toute la politique mondiale qui est impactée par l'énergie. Il y a comme un effet papillon.

L'hydrogène est au contraire un vecteur d'énergie plus polyvalent et surtout géopolitiquement plus stable. C'est en effet une énergie stockable, que l'on peut produire avec pratiquement n'importe quoi. Elle peut être adaptée localement en fonction des ressources du pays, autour du solaire, de l'éolien, de l'eau, de la biomasse, du pétrole, du gaz ou encore du charbon. L'hydrogène offre un bon rendement et ne produit pas de CO₂, sauf en cas de production à partir de réserves fossiles. Mais on peut imaginer qu'il sera sans doute possible à terme de capter et de stocker le CO₂ produit dans de gigantesques unités de gazéification. Les utilisateurs pourront choisir leur mode énergétique et en changer en cours de route, selon les possibilités et les convictions. De plus, la production d'hydrogène n'est réservée ni à des gens très riches, ni à des États. De nouveaux acteurs pourront se positionner.

Une opportunité pour certains pays

Certains pays se préparent à cette perspective. Prenons le cas du Brésil : devenu un champion mondial de la production d'éthanol (à partir de l'alcool de canne à sucre), qu'il exporte dans bon nombre de régions, le géant sud-américain considère que l'hydrogène est clairement un produit d'avenir. Ce pays en développement est jeune d'esprit. Il est donc prêt à saisir de nouvelles opportunités. Le Brésil abrite aussi l'une des plus importantes structures de gaz naturel carburant (GNV), avec un parc de plus d'un million de véhicules.

À ses côtés dans les starting-blocks, on pourrait retrouver quelques mastodontes : la Russie (qui dispose de gaz et de pétrole), l'Inde (qui possède du charbon) et la Chine (forte de beaucoup de charbon et d'un peu de pétrole) notamment n'ont pas encore fait leurs choix énergétiques pour le futur. Il est clair que leur décision va impacter la stratégie mondiale. Les experts guettent notamment la position de Moscou, qui reste très discrète sur ses intentions.

Plus près de nous, l'Islande a nettement pris parti en faveur de l'hydrogène. Ne disposant ni de pétrole ni de gaz, et ne disposant que peu de biomasse, cette île volcanique a décidé de tirer parti de la géothermie, du vent et des fortes marées pour assurer son indépendance énergétique. Le pays a ainsi décidé de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau et d'en faire le mode énergétique dominant à l'horizon 2050. Une société, Icelandic New Energy, a même été créée afin de promouvoir ce mode d'énergie propre, avec le concours de partenaires dont Norsk Hydro, Shell Hydrogen et DaimlerChrysler (groupe Mercedes). Dans la foulée, cette start-up de l'hydrogène a fondé une association (NAHA – North Atlantic Hydrogen Association). Elle regroupe des pays voisins comme la Norvège, le Danemark, le Canada et l'Écosse. Mais l'Islande n'est pas un modèle pour les pays en voie de développement.

Objectif zéro pétrole au Japon

Le Japon a lui aussi des objectifs ambitieux. Tokyo a d'ores et déjà annoncé que le pétrole serait totalement remplacé dans l'automobile en 2050. Le MITI (Ministry of Economy, Trade and Industry, un super-ministère qui réunit l'Industrie et la Recherche) a ainsi demandé à une agence nationale de réfléchir à un plan sur cent ans. Le pays du Soleil-Levant considère l'hydrogène comme une opportunité, d'autant qu'il ne possède pas de sources primaires d'énergie. Il caresse d'ailleurs l'ambition de devenir un leader mondial dans ce domaine.

Pour les Japonais, qui rejoignent sur ce point les États-Unis, tous les problèmes d'énergie et d'environnement peuvent être résolus par la technologie. Ils ne posent pas comme préalable de contraindre les utilisateurs à une moindre utilisation de l'énergie, contrairement à ce que pensent les Occidentaux, en particulier les Européens. Les Japonais savent que les évolutions technologiques auront des conséquences sur les comportements individuels.

Le plan nippon repose sur deux piliers : la réduction de la consommation de carburant et le remplacement du pétrole. Pour abaisser la consommation, plusieurs solutions sont envisagées, dont l'allègement des véhicules, la réduction des frottements, mais aussi de nouvelles fonctions comme la climatisation électrique et les énergies alternatives telles que les carburants de synthèse, l'hybridation, les batteries électriques ou encore la pile à

combustible. Nissan a naturellement participé à ce plan de travail. Il apparaît toutefois que les Japonais accordent plus d'importance à la technologie hybride à court et moyen terme, sans doute sous l'influence de Toyota. Cela explique que l'entrée en vigueur de la PAC soit décalée après 2020. Ce contretemps a certainement suscité quelques doutes dans l'esprit de Carlos Ghosn, à propos de l'hydrogène en tant que substitut au pétrole à moyen terme.

Le cas des États-Unis

Aux États-Unis, la position de la Maison-Blanche vis-à-vis des énergies propres n'a pas changé. Le président George W. Bush a rappelé que 10 milliards de dollars avaient été dépensés depuis 2001. Il a par ailleurs annoncé une initiative (Advanced Energy Initiative) visant à augmenter de 22 % les dépenses en faveur des énergies propres. Cet effort englobe notamment un plan sur les biocarburants, afin de produire de l'éthanol de deuxième génération, appelé ligno-cellulosique. Ce carburant, issu des résidus de paille, et pas seulement du grain de blé, devrait être prêt avant 2012. Washington souhaite également développer les voitures hybrides et électriques, sans oublier les véhicules à hydrogène qui restent dans la course. D'ici 2025, l'objectif est de réduire de 75 % les importations de pétrole en provenance du Moyen-Orient. Les États-Unis encouragent enfin l'énergie nucléaire et le charbon propre (clean coal) avec captage et stockage du CO₂.

Avec cet ensemble, la première puissance du monde devrait être en mesure – *dixit* George W. Bush – « de sortir d'une économie basée sur le pétrole et de faire de sa dépendance énergétique par rapport au Moyen-Orient une chose du passé ». Tout un symbole...

La position des pétroliers

Nous l'avons déjà dit à plusieurs reprises, il y a encore du pétrole en quantité sur la planète et le système est encore viable jusqu'en 2020. Il est aussi utile de préciser que les puits « épuisés » ne le sont en fait qu'à 50 %. On pourrait donc les exploiter de nouveau, mais avec des méthodes plus efficaces, en piégeant notamment les émissions de CO₂.

Il convient néanmoins de préparer la transition dès aujourd'hui. On peut mesurer cette évolution à travers quelques signes très nets. D'abord, les pétroliers commencent à travailler sur la transformation de la biomasse dans le cadre de leurs installations actuelles. Ils ont intégré la démarche du développement durable. Ensuite, un saut a été fait par certains pays producteurs de pétrole. C'est le cas du Qatar, qui utilise le gaz sortant avec le pétrole pour faire du GTL (Gas to liquids). On peut également citer le site de Bintulu, en Malaisie, où Shell possède une unité de production de GTL. Les pétroliers se préparent donc à cette échéance, en particulier Shell, qui a déjà réalisé des démonstrations avec des constructeurs (Volkswagen à Berlin, Toyota à Londres). On prête par ailleurs à la Chine

des projets de carburant liquide obtenu à partir de charbon (CTL – Coal to liquids). Ce projet est d'ores et déjà une réalité en Afrique du Sud, où 150 000 barils sortent chaque jour du site de Secunda, et où la compagnie pétrolière locale Sasol a acquis une réputation mondiale en ce qui concerne les technologies de production de carburants de synthèse. Ce premier stade est très encourageant, car ce procédé de gazéification destiné à réaliser des carburants de synthèse permettra à terme de fabriquer de l'hydrogène. Il en résultera une plus grande flexibilité énergétique. On peut par ailleurs utiliser des hydrocarbures moins raffinés, comme le naphta (un composant de base pour les essences, extrait par distillation).

Les pétroliers peuvent donc devenir à terme des producteurs d'hydrogène. Mais ils seront peut-être confrontés à d'autres acteurs spécialisés, tels Linde ou Air Liquide. D'autre part, le rapport de forces change radicalement avec l'hydrogène. Ce ne sont pas Air Liquide ou Total qui vont imposer l'énergie, mais le client qui pourra peser sur les choix, ainsi que les politiques. Le constructeur automobile reste pour sa part au milieu et s'adaptera à la nouvelle donne.

Le basculement vers une économie de l'hydrogène

Comme d'autres pays dans le monde, la France va devoir consentir de gros investissements énergétiques. Pour remplacer le pétrole, il sera nécessaire de transformer des matières, comme la

biomasse. L'énergie issue des produits agricoles pourrait notamment être utilisée dans le domaine du textile, mais aussi dans les produits pharmaceutiques, la biochimie, et naturellement le secteur énergétique. De même, la France pourrait accentuer la production de biocarburants et remédier à 40 % des besoins, à l'horizon 2050. Pour aller encore plus loin, une décision plus radicale consisterait à utiliser des centrales nucléaires pour fabriquer de l'hydrogène, soit par thermochimie à partir de l'énergie thermique générée par le réacteur, soit par électrolyse de l'eau à partir de l'électricité fournie par la centrale. Certains foyers pourraient être alimentés par des systèmes de pile à combustible de cogénération (électricité et chaleur). Ainsi la production d'électricité serait-elle à la fois tirée par la production d'électricité traditionnelle et par les besoins de l'industrie. Ce serait évidemment un changement total de situation, et pour EDF le début d'une nouvelle activité.

Mais à bien considérer ce choix, il permettrait à la France de se réindustrialiser pour le textile. L'hydrogène remplacerait le pétrole pour la fabrication de fibres polymères, par exemple issues de la biomasse, qui permettent de faire des vêtements. Cela éviterait d'une part d'importer de l'énergie et du textile, et développerait d'autre part une industrie dans ces domaines. Le pays serait ainsi plus compétitif. Le textile n'est pas le seul secteur de l'économie où la France pourrait se réindustrialiser : citons les matériaux recyclables pour remplacer les matières plastiques, les médicaments... EDF

serait alors un levier de promotion du développement industriel. On remarquera au passage que l'hydrogène peut être utilisé à la fois comme vecteur d'énergie et comme agent chimique.

Mais le basculement vers l'hydrogène peut être très progressif. C'est vrai pour l'économie comme pour l'automobile. La coexistence du pétrole et de l'hydrogène est possible pendant de longues années.

En attendant son avènement, l'hydrogène continue à étonner. L'électrolyse de l'eau connaît des progrès extraordinaires, avec un rendement supérieur à 70 % et pour un coût dérisoire. De plus, l'hydrogène peut être réutilisé.

On assiste clairement à un changement du schéma industriel dans le domaine de l'énergie. Si aujourd'hui EDF, Areva, Total et GDF sont les champions nationaux et les grands groupes qui dictent la stratégie du pays, cela pourrait changer demain. Le Français Air Liquide, mais aussi l'Allemand Linde et l'Américain Air Products auront leur mot à dire.

Détaxer l'hydrogène pour rester compétitif

Nos politiques ont la désagréable manie de taxer les nouvelles sources d'énergie. Ce sera sans doute le cas pour les biocarburants, même si, pour son lancement, l'E85¹ bénéficie des faveurs de Bercy.

1. E85 : carburant constitué à 85 % d'éthanol et à 15 % d'essence.

Par tradition culturelle, l'énergie est taxée en Europe, alors que c'est exactement l'inverse aux États-Unis, où l'énergie est bon marché. Pour une fois, nous pourrions nous inspirer de l'exemple américain ! Rappelons que la France taxe lourdement (à plus de 60 %) les carburants, avec la TIPP et la TVA. Le ministère de l'Économie, qui applique depuis peu une surtaxe CO₂ liée à la carte grise, va-t-il créer une taxe sur l'hydrogène ?

Jusqu'à présent, l'énergie contrôlait le développement industriel. Cela a été le cas avec le charbon au XIX^e siècle, et avec le pétrole pendant tout le XX^e siècle. L'État a toujours régulé l'économie du pays. Mais aujourd'hui, nous sommes en situation de crise car notre pays doit importer du minerai de fer, de l'uranium et surtout du pétrole. Or tout le monde achète ses matières premières au même endroit et subit de plein fouet la hausse des prix. La France doit donc réagir. Face à une crise mondiale, il ne suffit pas de dire que la réponse passe par l'innovation (pas de pétrole, mais des idées). Il faut un projet porteur pour mobiliser l'industrie.

La France a justement les capacités nécessaires pour produire une énergie propre avec la biomasse et le nucléaire de quatrième génération. Elle doit simplement avoir le courage politique de détaxer cette énergie propre et autonome pour en assurer la compétitivité, ou tout au moins adapter les taxes pour favoriser le développement économique du pays et par là l'emploi. Les hommes politiques auront donc un rôle vital à jouer pour orienter l'économie, à mi-chemin entre le libéralisme et

l'économie dirigée. De même, il sera nécessaire de développer la concertation pour la prise de décision. Si ces conditions sont remplies, l'hydrogène aura un potentiel important pour la création d'emplois. Mais il faudra faire preuve de beaucoup de pédagogie. En réalité, les responsables politiques sont peu au fait des évolutions technologiques, en France comme au sein du Parlement européen.

Les qualités de la France

Dans un univers automobile très mondialisé, Renault travaille avec de nombreux partenaires, notamment des Américains et des Japonais. Ces derniers nous le disent, la France a des capacités d'innovation. Elle n'a rien à envier aux États-Unis et au Japon, bien au contraire. Ces pays jaloussent la formation et le système éducatif des Français, capables d'abstraction (grâce à la démarche conceptuelle) afin d'imaginer le futur. Nous avons des facultés de sciences, qui, justement, forment l'esprit à cette démarche abstraite, et proposent, de plus, des outils de simulation et de modélisation. Cela explique pourquoi les ingénieurs des écoles françaises sont très appréciés chez les constructeurs et équipementiers étrangers. Pour innover, il faut sortir du réel et du présent pour imaginer le futur. Il faut également faire preuve d'esprit critique. Mais à côté de ces qualités incontestables, les Français se distinguent aussi par un esprit de contradiction et un certain individualisme. Ils n'ont pas la capacité de se fédérer, comme le font les Allemands,

les Américains et les Japonais, qui avancent ensemble dans le même sens. Peut-être peut-on pour une fois changer, en donnant une orientation claire. Si l'on pense que l'hydrogène est un vecteur porteur pour l'énergie du futur, les autorités publiques doivent donner le *la*.

Pour montrer les capacités d'innovation en France, je voudrais juste prendre un exemple : la société bretonne Olmix, qui fabrique des bio-aliments. Située à Bréhan dans le Morbihan, entre Rennes et Vannes, elle a réussi à fabriquer un nanomatériau à base d'argile et d'algues vertes. Ce produit, qui permet de donner des propriétés mécaniques à des polymères, pourrait révolutionner les pièces d'origine plastique. Renault et Toyota s'y intéressent. On le voit, l'énergie propre et la matière ouvrent de nouvelles possibilités.

La French Connection de l'hydrogène

Depuis mon départ de Renault, je suis devenu le président d'Alphea Hydrogène. Cet organisme, dont le siège est situé à Forbach, en Moselle, a été créé par les collectivités territoriales et les Charbonnages de France quand l'industrie du charbon a disparu. La Lorraine est une région qui, comme la Sarre, a toujours misé sur l'énergie. Depuis 1986, elle s'intéresse à l'hydrogène, en tant qu'axe de développement économique. Alphea a le statut d'association (selon la loi allemande de 1906) et compte une quarantaine de membres, dont de grands groupes industriels (Renault, Airbus,

SNECMA), des producteurs d'énergie (GDF, EDF), des collectivités, le CEA, des PME, ainsi que des universités et écoles de Nancy et Metz.

Alpheia Hydrogène se veut un pôle de compétences sur l'hydrogène et ses applications, dont l'automobile. C'est un bureau d'études, dont les principales missions sont la veille technologique, les études et les publications. Cet organisme propose des animations dans des organismes à vocation économique (DRIRE, chambres de commerce) pour faire venir des industriels. Il assure aussi de la formation et de la pédagogie dans les écoles et lycées.

À l'avenir, ses missions seront élargies pour contribuer à l'élaboration d'une stratégie nationale industrielle et de recherche dans l'hydrogène, en fédérant les acteurs. Alpheia construit une vision prospective dans le transport et le bâtiment.

Parallèlement à Alpheia Hydrogène, j'ai aussi pris la présidence d'Ineva, un centre national de recherche technologique (CNRT) basé à Belfort. Cet institut a pour but de promouvoir la recherche entre les groupes industriels et la recherche publique (universités, CNRS). On y retrouve des universités de la région et des groupes industriels concernés par l'hydrogène (Air Liquide, Alstom, General Electric, Delphi, PSA Peugeot Citroën). Depuis sa reprise en main par le ministère de la Recherche, Ineva s'est orienté vers la recherche expérimentale. L'institut s'appuie sur le FC Lab (jeu de mots sur Franche-Comté et *fuel cell*, « pile à combustible » en anglais), dans les locaux de l'université technologique de

Belfort-Montbéliard (UTBM). Les équipes, principalement composées de chercheurs des universités de Belfort, Nancy et Besançon, sont dynamisées par la présence de l'INRETS et du CEA. Des travaux sont également menés avec l'équipementier Delphi. Ces recherches concernent un système auxiliaire d'énergie, basé sur une pile à combustible (projet APUROUTE, soutenu par l'ANR). La volonté est de devenir un laboratoire de référence (laboratoire national orienté systèmes et à vocation transport). Les industriels peuvent faire ou faire faire des travaux. Plusieurs projets sont en cours. Ineva a aussi pour vocation de définir des standards et des normes en matière d'hydrogène.

On le voit, l'Est de la France met le turbo sur l'hydrogène. Alors, pourquoi ne pas créer un pôle de compétences « Grand Est » sur l'hydrogène et ses applications ? Ce pôle pourrait réunir les régions limitrophes allemandes, dont la Sarre, mais aussi la Suisse. Il y a des compétences de part et d'autre de la frontière franco-allemande. Si, aujourd'hui, l'hydrogène n'est pas la priorité des pôles de compétitivité classiques, qui traitent de moteurs et d'énergies, il n'est pas trop tard pour fédérer les compétences. La France a un rôle à jouer sur la scène mondiale, à l'heure où tant de pays se posent la question pour l'énergie du futur.

Alors, osons l'hydrogène !

ANNEXES

I. L'AGENDA DE LA VOITURE À HYDROGÈNE

2008 : Intensification de l'utilisation des biocarburants en France (5,75 % des volumes de carburants, alors que la directive européenne ne le prévoit qu'en 2010).

2010 : Premières productions en petite série de voitures à pile à combustible ou PAC (quelques milliers de voitures, dont 12 000 prévues par Toyota aux États-Unis).

Entre 2012 et 2015 : Biocarburants de deuxième génération (éthanol ligno-cellulosique – plante complète et gazéification du bois).

2015 (date-clé) : Commercialisation en grande série des premiers véhicules dotés d'une PAC (avec reformeur embarqué ou stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse pour des applications de flottes).

DaimlerChrysler se fixe un objectif de 100 000 voitures à cette date.

2020 : L'Europe fixe à 20 % le seuil des énergies alternatives.

Honda se fixe pour objectif 5 % du marché américain avec des voitures à hydrogène.

Entre 2020 et 2025 : L'hydrogène arrive à la pompe (5 % de couverture du réseau de stations-service dans un premier temps, avant de parvenir à un maillage progressif de 20 % pour pouvoir accéder au seuil critique de perception par l'opinion et être considéré comme un carburant disponible). La généralisation du GPS permettra de trouver plus facilement ces stations H₂.

2030 : Énergie nucléaire de quatrième génération. Rendement multiplié par 50, pratiquement plus de déchets. Ressources infinies pour la production à grande échelle de l'hydrogène. La bio-énergie peut à cette date couvrir jusqu'à 40 % des besoins de la France.

2050 : Réduction par un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre en France et en Europe (effet parc), disparition du pétrole dans les transports japonais.

À cette date, le parc automobile français est idéalement constitué de 30 % de véhicules alimentés aux biocarburants, 30 à 40 % de voitures PAC, 20 % de véhicules électriques, le reste étant constitué d'hybrides.

2100 : Stabilisation des émissions de gaz à effet de serre dans le monde.

II. LES IDÉES REÇUES SUR L'HYDROGÈNE

Certains spécialistes de l'automobile voient, comme le grand public, leur jugement parfois altéré par des idées reçues sur l'hydrogène. Voici quelques-unes des thèses qui circulent à l'heure actuelle, et les réponses que nous pouvons leur apporter.

1/ On entend dire que l'hydrogène est le carburant du futur... pour toujours. Que peut-on répondre à cela ?

Il faut savoir que l'on produit déjà de l'hydrogène pour alimenter le moteur de la fusée *Ariane* et pour purifier les carburants conventionnels. Peu de gens savent par ailleurs que les carburants évoluent depuis plus d'un siècle, notamment avec le GPL et le gaz naturel, et que ces produits sont de plus en plus riches en hydrogène. L'hydrogène n'est donc pas un carburant alternatif mais un véritable substitut aux carburants classiques.

Il s'agit d'un carburant propre, qui peut être utilisé dans une combustion classique, ou bien dans une réaction électrochimique ; dans les deux cas, le produit est de l'eau.

La seconde voie paraît plus prometteuse, puisque le rendement de la réaction est deux à trois fois plus important. Le vecteur énergétique qui en résulte est de l'électricité. Dans un futur plus ou moins lointain, si l'on arrive à stocker correctement l'énergie électrique produite par une centrale nucléaire à très haut rendement (quatrième génération), il pourrait être plus judicieux de l'utiliser dans le véhicule au lieu d'opérer une première transformation (par exemple l'électrolyse de l'eau) afin d'obtenir de l'hydrogène. Pour l'instant, on ne voit pas à quel horizon une telle solution sera viable.

2/ Est-il vrai que le bilan de l'hydrogène est aujourd'hui négatif, en raison de l'énergie nécessaire pour produire ce carburant ?

Pas forcément. Il n'existe en fait pas de filière unique pour le H₂. Parmi les différentes façons de produire de l'hydrogène, certaines présentent un bilan négatif. Une étude (JRC/Eucar/Concawe) a été menée sur le bilan de l'hydrogène, du puits à la roue. C'est la diversité dans les modes de production, de transport, de stockage et d'usage de l'hydrogène qui en fait un produit si riche et si universel.

Dès aujourd'hui, l'hydrogène pourrait se montrer plus compétitif en matière d'émissions de CO₂, si l'on privilégie la solution du reformeur. Prenons l'exemple d'un véhicule qui fonctionne normalement à l'essence et consomme en moyenne 6 litres pour 100 kilomètres. Son moteur à combustion interne serait remplacé par un ensemble comprenant un reformeur et une pile à combustible. Le

reformeur utilise le même carburant (de l'essence), qui est transformé en hydrogène au lieu d'être brûlé. Dans ce cas, la consommation d'essence, dans les mêmes conditions d'utilisation, n'est que de 3 litres. Soit moitié moins qu'avec un moteur classique !

3/ Quand peut-on espérer trouver de l'hydrogène à la pompe ?

À mon avis, on trouvera des pompes H₂ après 2020. Et ce, pour au moins trois raisons.

La première est liée à l'investissement nécessaire pour produire l'hydrogène et le distribuer jusqu'à la pompe. Notre estimation est qu'un équipement minimum en Europe de l'Ouest (sur l'exemple du réseau GPL d'aujourd'hui) coûterait plus de 100 milliards d'euros.

La seconde raison est qu'il faudra encore du temps avant que l'hydrogène soit économiquement compétitif.

La troisième est qu'il existe pour les quinze ans qui viennent d'autres solutions plus facilement accessibles techniquement et économiquement, et qui peuvent nous permettre de progresser dans la réduction de la consommation de pétrole et d'émissions de CO₂.

4/ Quelle est la différence entre l'hydrogène gazeux et l'hydrogène liquide ?

Sous forme gazeuse, 1 kilo d'hydrogène occupe, à la pression atmosphérique, 12 m³ (soit 12 000 litres). Sous forme liquide, 1 kilo d'hydrogène n'occupe que 14 litres, mais à une température de - 253 °C.

5/ Peut-on rouler avec de l'hydrogène dans un moteur conventionnel ?

Pas tout à fait. Comme pour l'utilisation du gaz naturel, une adaptation est nécessaire – entre autres un injecteur spécial et un programme d'injection adapté. D'autre part, compte tenu de certains produits de la combustion, il faut changer les matériaux utilisés. La question que l'on peut se poser est la suivante : un moteur à combustion interne conçu pour fonctionner à l'hydrogène peut-il fonctionner à l'essence ? La réponse est oui. BMW en fait d'ailleurs la démonstration avec la dernière version de sa Série 7 Hydrogen, qui roule aussi bien à l'hydrogène qu'à l'essence.

6/ L'hydrogène va supprimer le plaisir de conduire.

À partir du moment où le moteur fournit le couple désiré à toutes les vitesses de roulage, le plaisir de la conduite reste intact. La seule différence, lorsqu'on utilise une pile à combustible, est que le « moteur » ne fait plus de bruit (à l'instar d'un véhicule électrique). Si l'on considère que le bruit contribue au plaisir de la conduite, alors peut-être pourra-t-on envisager d'installer un bruiteur programmable...

7/ La voiture à hydrogène ne dépasse pas les 120 km/h.

La pile à combustible est un système modulaire : il suffit d'ajouter des éléments pour en augmenter

la puissance. Celle-ci peut aller de quelques watts à des centaines de mégawatts. La vitesse maximale n'est donc limitée que par la législation en vigueur. Un point intéressant à souligner concernant la pile est que le rendement de celle-ci augmente quand la charge diminue – à l'inverse du moteur à combustion interne. C'est-à-dire qu'un gros moteur utilisé à faible puissance aura un excellent rendement, sans polluer du tout et sans faire de bruit : un problème majeur de la circulation en ville se trouvera ainsi résolu.

S'agissant de la performance pure, on peut rappeler que BMW, avec un moteur thermique à hydrogène, a battu plusieurs records de vitesse avec sa H2R (plus de 300 km/h sur le circuit de Miramas) et que la Série 7 Hydrogen dépasse allègrement les 200 km/h.

8/ Les réservoirs prennent toute la place dans le coffre.

C'est effectivement l'une des difficultés actuelles. Quand il est comprimé à 350 bars et que l'on vise une autonomie de 500 kilomètres, l'hydrogène requiert un volume quatre fois plus important que celui d'un réservoir à essence. De plus, pour des raisons de résistance, ces réservoirs sont cylindriques et donc malaisés à loger sous plancher.

Rappelons qu'il existe des voies de progrès. On peut citer entre autres la compression à très haute pression (coûteuse en énergie), la liquéfaction (elle aussi très coûteuse en énergie), et enfin le stockage de l'hydrogène dans un solide (hydrures,

occlusions...), dont les recherches ne sont pas encore abouties.

9/ On ne verra pas de véhicule à l'hydrogène arriver avant 2020.

La commercialisation d'un véhicule dépend de plusieurs facteurs. D'abord, l'aboutissement des recherches : sur ce point, on peut estimer qu'un premier seuil devrait être atteint dans les cinq ans qui viennent. Ensuite, la mise en place des infrastructures nécessaires : dans le cas de l'utilisation de l'hydrogène embarqué à bord, cela demandera du temps, compte tenu des sommes exigées ; 2020 est alors effectivement une première date plausible. Mais dans le cas de l'utilisation du reformeur embarqué, cet investissement n'est pas nécessaire. L'échéance peut donc être ramenée à 2015, le temps de mettre en place le système industriel pour fabriquer le reformeur et la pile à combustible. Mais il y a un troisième facteur : l'opportunité de commercialiser de tels véhicules, car, si à moindre frais, il est possible de répondre aux exigences énergétiques et environnementales, les constructeurs ne se lanceront pas tout de suite dans l'hydrogène...

10/ Quel est le risque d'accident avec une voiture à hydrogène ?

Le seul cas qui pourrait poser problème est celui de l'hydrogène embarqué, et le risque est en fait très faible. En effet, comme nous l'avons souligné, l'hydrogène est un produit très peu dense, dont la molécule est très petite et qui, lorsqu'il est au

contact de l'air, se dissout instantanément. Enfermé dans un réservoir sous pression, il présente les mêmes risques que tout autre gaz.

11/ Peut-on déjà louer des voitures à hydrogène ?

Pas en France, où la législation actuelle interdit d'ailleurs l'utilisation de tels véhicules sur les routes. En revanche, cela est déjà autorisé en Allemagne, aux États-Unis ou encore au Japon. Certains constructeurs commencent d'ailleurs à mettre une offre sur le marché, comme Honda en Californie, ou encore Nissan, Mazda et Toyota au Japon...

12/ On dit que l'autonomie des voitures à hydrogène est très faible.

C'était effectivement le cas pour les premiers prototypes. Cela était dû d'une part au mauvais rendement des systèmes, et d'autre part à l'encombrement des réservoirs cylindriques et à pression limitée. Comme nous l'avons évoqué plus haut, des recherches sont en cours pour développer des systèmes de stockage offrant la même autonomie que celle des véhicules actuels.

13/ La voiture à hydrogène, c'est comme la voiture électrique, ça ne marchera jamais...

La voiture électrique, sur batterie, repose sur le stockage de l'électricité. Or la physique nous dit que la capacité des couples électrochimiques est limitée et qu'il n'y a pas aujourd'hui d'autre solution crédible pour le stockage de l'électricité. Ce

type de limitation n'a pas cours dans une pile à combustible. Des progrès restent à accomplir pour en améliorer le rendement, la fiabilité et réduire les coûts. Mais aucun principe de la physique ne s'y oppose.

14/ Les biocarburants sont-ils plus avantageux que l'hydrogène ?

Aujourd'hui, l'éthanol brésilien produit à base de canne à sucre est moins cher que l'essence (8 euros/gigajoule¹, contre 12 euros/gigajoule). L'hydrogène utilisé dans l'industrie chimique revient à environ 6 dollars par kilo, soit 43 euros par gigajoule. L'éthanol français (issu des cultures céréalières, dont la betterave) se situe autour de 20 euros/gigajoule, et le biodiesel aux environs de 16 euros/gigajoule.

À l'horizon de la sortie des premiers véhicules commerciaux, le prix de revient de l'hydrogène devrait descendre à 20 euros/gigajoule environ. Mais si l'on considère que le rendement d'un véhicule à pile à combustible est au minimum le double de celui d'un moteur conventionnel, l'hydrogène est en réalité tout à fait compétitif. Rappelons, pour finir, que l'objectif à terme est un hydrogène à 10 euros/gigajoule.

1. Gigajoule : unité de mesure dans le domaine de l'énergie. Pour information, 1 tonne équivalent pétrole équivaut à 42 gigajoules, et 1 litre d'essence est égal à 0,035 gigajoule.

15/ La technologie hybride est en train de se développer. Est-ce une solution pour limiter la pollution et la consommation de pétrole ?

La réponse est évidemment oui, puisque cette technologie vise à réduire la consommation de carburant. En usage réel, son potentiel est une réduction de l'ordre de 20 %. La réduction de consommation s'accompagne de surcroît d'une réduction similaire de la pollution et des émissions de CO₂. L'enjeu de la voiture à hydrogène est d'un autre ordre, puisqu'il s'agit cette fois de se libérer totalement du pétrole, de la pollution et de l'effet de serre !

16/ Toyota a montré la voie avec l'hybride. Il ne risque pas de se lancer dans l'hydrogène...

Pas du tout ! Toyota est l'un des constructeurs les plus actifs dans le développement de l'hydrogène et de la pile à combustible : il a même offert une voiture utilisant cette technologie au Premier ministre japonais Koizumi ! L'hybride peut être considéré comme une étape (même si les Européens font aussi bien avec des moteurs diesel). Il ne résout en aucun cas le problème d'énergie et d'environnement auquel nous sommes confrontés.

17/ Pourquoi devrait-on créer une économie de l'hydrogène en partant de zéro, alors qu'il y a suffisamment de réserves de pétrole sur Terre ?

D'abord, les réserves de pétrole ne sont pas infinies ; mais surtout, le pétrole, aussi facile soit-il à

utiliser, ne permet pas de traiter le problème des émissions de gaz à effet de serre, puisque sa combustion produit du CO₂. Il ne représente donc pas une solution entrant dans le cadre du développement durable afin d'assurer l'expansion de l'activité économique dans le respect de la planète.

18/ La France peut-elle devenir demain un pays producteur d'hydrogène ?

Évidemment ! D'ailleurs, tous les pays du monde peuvent devenir producteurs d'hydrogène. Il n'y aura plus, comme aujourd'hui, de pays producteurs et de pays consommateurs, avec les tensions (et même les conflits) qui en résultent. L'hydrogène est un vecteur universel d'énergie, qui peut être produit de mille manières selon les ressources énergétiques dont on dispose. On peut utiliser les plantes (biomasse), le soleil, le charbon, le nucléaire, le gaz, le pétrole... La France est particulièrement bien placée, puisqu'elle possède un parc important de biomasse ainsi que de l'énergie nucléaire (extraction de l'hydrogène de l'eau).

19/ Les pétroliers ont tout intérêt à décourager les constructeurs de s'intéresser aux énergies alternatives, dont l'hydrogène...

C'est une analyse à très courte vue. Il est vrai que les pétroliers tirent actuellement d'énormes bénéfices du pétrole. Mais ils ont très bien compris que les contraintes liées à la sécurité d'approvisionnement, ainsi que celles liées à l'environnement (en particulier la menace sur les climats), poussaient les

responsables politiques et les utilisateurs à s'orienter vers d'autres sources d'énergie. Or les pétroliers jouent aujourd'hui un rôle privilégié dans le business de l'énergie – un rôle qu'ils ne veulent évidemment pas perdre. Ils se sont donc beaucoup investis dans les énergies alternatives, en particulier les bioénergies et l'hydrogène, en espérant devenir des acteurs de premier plan dans ces domaines.

20/ Les Américains sont trop attachés au pétrole pour soutenir l'hydrogène...

Les Américains sont des gens pragmatiques. Tant que la solution la plus facile et la plus économique est d'utiliser les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), ils les utilisent. Mais ils savent pertinemment que cette situation ne durera qu'un temps. Aussi mènent-ils de très importantes recherches sur les nouvelles technologies : bio, hydrogène, captage du CO₂... Les États-Unis sont le pays du monde qui, en matière de recherche, investit le plus dans ces domaines.

III. LES CONSTRUCTEURS ET LA VOITURE À HYDROGÈNE

Du cabriolet à la limousine, en passant par le coupé sportif et le 4 × 4, pratiquement tous les constructeurs ont présenté un jour ou l'autre un modèle à hydrogène dans un salon automobile. Voici les principales réalisations.

- **Audi**

La marque aux anneaux croit moins à l'hydrogène qu'au diesel (il suffit de voir la Q7 V12 TDI, la plus puissante au monde dans sa catégorie, avec 500 chevaux), à l'injection directe essence et à l'hybride (travaux en commun avec Volkswagen et Porsche).

Audi a néanmoins présenté en 2004 une version H₂ de l'A2 – son modèle compact, qui n'est plus produit de nos jours. Ce véhicule est alimenté par de l'hydrogène sous forme gazeuse à 350 bars, stocké dans trois réservoirs, et propulsé par une pile à combustible et un moteur électrique de 110 kilowatts. La voiture revendique une vitesse de pointe de 175 km/h et met moins de dix

secondes pour accélérer de 0 à 100 km/h. L'autonomie est de 220 kilomètres. Performance d'Audi, le véhicule consomme moins d'un kilo d'hydrogène pour parcourir 100 kilomètres. Ce record s'explique en partie par la conception du véhicule, dont la structure est composée d'aluminium.

• BMW

À travers le concept « Clean Energy », la marque bavaroise défend la vision d'une voiture alimentée par de l'hydrogène liquide, mais conservant un moteur à combustion interne. On le sait, l'important chez ce constructeur de voitures de luxe et sportives est de préserver les performances, indépendamment des techniques utilisées sur les moteurs.

Les travaux de BMW dans ce domaine remontent à 1978. Quatre prototypes se sont échelonnés jusqu'en 1996, sur la base de la Série 7. Ce n'est toutefois qu'en l'an 2000 que les recherches se sont vraiment concrétisées, avec la sortie de la 750hL (h pour hydrogène, L pour limousine), exposée à Munich puis à l'Exposition universelle de Hanovre. La voiture est dotée d'un moteur 12 cylindres de 5,4 litres et d'un réservoir de 140 litres d'hydrogène. Elle revendique une vitesse de pointe de 226 km/h et une accélération de 0 à 100 km/h en 9,6 secondes. L'autonomie est de 350 kilomètres. L'année suivante, BMW a organisé un tour du monde (Clean Energy Tour) pour présenter son prototype, en choisissant comme première étape Dubaï, avant de partir pour Milan, Bruxelles, Tokyo et Los Angeles.

BMW a même osé réaliser une Mini à l'hydrogène, également en 2001. En 2003, le constructeur allemand a convaincu General Motors de s'associer avec lui afin de mettre au point des dispositifs de ravitaillement pour les véhicules à hydrogène liquide. L'objectif est de définir des normes mondiales et de trouver les fournisseurs capables de proposer des solutions financièrement accessibles. La volonté des deux constructeurs est de pouvoir proposer, à partir de 2010, des véhicules pouvant recevoir de l'hydrogène liquide. L'accord a été élargi avec l'arrivée de Honda en 2005. Selon BMW, un réseau de 10 000 stations-service à hydrogène pourrait voir le jour à long terme. BMW exploite d'ores et déjà une station-service à l'aéroport de Munich. Depuis mars 2006, avec Total, il en exploite une autre à Berlin, dans le cadre du programme CEP (Clean Energy Partnership in Berlin). C'est d'ailleurs sur le site de cette station que le ministre français des Transports, Dominique Perben, a pu faire l'essai de la Série 7 à hydrogène, en marge d'un conseil des ministres franco-allemand. Il est prévu que Total ouvre deux autres stations en Allemagne d'ici fin 2007, dont une à Munich près du centre de recherche de BMW.

En 2004, BMW a une nouvelle fois montré que l'on pouvait concilier environnement et performance. Le constructeur allemand a conçu une voiture de course, la H2R (R pour Racing), avec laquelle il a battu 9 records internationaux sur le circuit de Miramas, dans le Sud de la France. Ce véhicule, motorisé par le bloc 12 cylindres de la 760i, a été

chronométré à plus de 300 km/h et n'a mis que 6 secondes pour passer de 0 à 100 km/h.

La firme bavaroise a récemment levé le voile sur la dernière version de sa Série 7 à hydrogène. La BMW Série 7 Hydrogen est équipée d'un moteur de 12 cylindres, développant 260 chevaux, capable de passer de 0 à 100 km/h en 9,5 secondes, pour une vitesse de pointe de 230 km/h (bridée par électronique). La nouveauté vient du fait que la voiture peut à la fois être alimentée par de l'hydrogène et de l'essence, ce qui porte l'autonomie totale à 700 kilomètres (200 kilomètres en mode hydrogène, 500 kilomètres en mode essence). Pour faire le plein d'hydrogène, le conducteur appuie simplement sur une touche du cockpit pour ouvrir la trappe à carburant et ensuite raccorder le tuyau de remplissage. Le plein est fait automatiquement et dure environ huit minutes pour un réservoir de 8 kilos d'hydrogène liquide. En revanche, rien ne change pour un plein d'essence : la BMW Hydrogen 7 se contente de super sans plomb. Au volant, le conducteur peut ensuite commuter entre le mode hydrogène et le mode essence. Un voyant H₂ apparaît en mode hydrogène. La voiture passe d'un mode à l'autre dès que l'un des deux carburants est épuisé.

Malgré le peu de stations disponibles dans le monde, BMW a pris la décision de produire une centaine d'exemplaires de cette BMW Série 7 Hydrogen. Elle est destinée à être prêtée à des personnalités comme des acteurs (Richard Gere, Sharon Stone, Brad Pitt, Angelina Jolie), des artistes

(la soprano Anna Netrebko) et des leaders d'opinion (hommes politiques et commissaires européens). La voiture a parcouru plus de deux millions de kilomètres de Berlin à Bruxelles, en passant par la France où des tests sont également prévus. La Série 7 Hydrogen a roulé dans Paris et a conduit le président de l'État de Bavière dans la cour de l'Élysée, au cours d'une rencontre avec le président Nicolas Sarkozy. Ce modèle est considéré comme une voiture de série et a passé tous les tests nécessaires à son homologation, dont les crash-tests.

BMW ne se désintéresse pas pour autant de la pile à combustible. Le constructeur étudie en fait la possibilité d'intégrer un groupe auxiliaire (APU) avec une pile à combustible, tant sur les véhicules à hydrogène que sur les véhicules à essence, afin de délivrer de l'énergie électrique pour les équipements, en particulier quand le moteur est à l'arrêt.

• Chrysler

Avant d'être absorbé par Mercedes, le troisième constructeur américain a planché sur la pile à combustible. En 1997, Chrysler a présenté au salon de Detroit la maquette d'un véhicule de taille moyenne, dont l'alimentation est assurée par des carburants classiques (essence, diesel ou gaz naturel), qui sont transformés en hydrogène par un reformeur afin d'alimenter la pile. En décembre 1998, c'est avec une Jeep Commander que la marque américaine choisit de présenter l'état de ses recherches. Le véhicule embarque une pile Ballard de 30 kilowatts, ainsi qu'un reformeur (pour extraire l'hydrogène de

l'essence) et des batteries. Il s'agit en fait d'un véhicule hybride à quatre roues motrices. La Jeep Commander 2 à hydrogène fait son apparition en 2001, avec cette fois l'appui de DaimlerChrysler. Le véhicule embarque un reformeur au méthanol, ainsi qu'une pile de 50 kilowatts et deux moteurs électriques. Par la suite, la recherche va se concentrer chez Mercedes.

• Daihatsu

La marque japonaise, liée à Toyota, a présenté en 1999 la plus petite voiture à hydrogène au monde. Équipée d'une pile à combustible et d'un reformeur à méthanol, cette auto avait pour nom Move EV-FC. Une autre version a été montrée deux ans plus tard, avec une pile à 30 kilowatts et des batteries nickel-métal hydrure. Plus récemment, Daihatsu a présenté au salon de Tokyo de 2005 le Tanto FCHV qui est un *concept car*, associant la pile à combustible et l'hybride.

• Fiat

Les débuts de Fiat dans l'hydrogène remontent à 2001. La marque italienne a d'abord conçu un hybride électrique/pile à combustible : la Seicento Elettra H2 Fuel Cell, avant de sortir en 2003 une Seicento Hydrogen. La même année, Fiat a élaboré une Panda Hydrogen.

La firme de Turin est impliquée dans le programme Piémont Hydrogène en Italie (Piemonte Idrogeno). Elle en profite donc pour tester cette version pile à combustible de la Panda. La voiture

affiche une puissance de 60 kilowatts, une vitesse de pointe de 140 km/h, une accélération de 0 à 50 km/h en 5 secondes, une vitesse de pointe de 130 km/h et une autonomie de 220 kilomètres. L'hydrogène est stocké dans un réservoir de 1,6 kilo, capable d'accueillir 68 litres de gaz. Si l'on devait commercialiser en l'état cette version hydrogène de la Panda, elle coûterait la bagatelle de 600 000 euros. Ces deux modèles – Panda et Seicento – sont sans aucun doute les plus petits au monde dans leur catégorie.

Notons que Fiat, qui utilise une pile à combustible développée par Nuvera (dont Renault est actionnaire) a, dans sa catégorie, gagné avec sa Panda H2 l'une des éditions du Rallye de Monte-Carlo pour véhicules électriques, hybrides et pile à combustible.

Plus récemment, Fiat a présenté une Panda Multi Eco dont le moteur à combustion interne peut accepter à la fois de l'essence et de l'hydrogène.

• Ford

Le second constructeur américain s'est, au milieu des années 1990, lancé dans l'aventure de la pile à combustible, mais pas seul : il a en effet préféré s'associer dès le début avec DaimlerChrysler, sa filiale Mazda, Ballard et Shell.

Le premier prototype apparaît en 1999, dans le cadre du salon de Detroit. Cette berline sur plateforme Mondeo intègre pas moins de trois piles à combustible PEMFC Ballard de 25 kilowatts, ainsi que deux réservoirs d'hydrogène (stocké à l'état

gazeux). À l'époque, Ford déclare pouvoir sortir la première voiture 5 places à hydrogène, avec une autonomie de 160 kilomètres et une vitesse de pointe de 145 km/h. Le constructeur pense alors sérieusement démarrer la production en série en 2004.

La marque à l'ovale pousse même la réflexion jusqu'à s'associer avec la firme norvégienne Th!nk, pour lancer sous ce nom toute une gamme de véhicules propres. On voit ainsi apparaître en l'an 2000 la Th!nk FC5 sur la base d'une Focus, avec un reformeur au méthanol et une pile à combustible d'origine Ballard. La même année, une autre Focus Th!nk FCV est présentée, toujours avec un reformeur au méthanol et une pile PEMFC de 75 kilowatts.

En 2001, l'aventure Th!nk poursuit sa route, avec une autre Focus présentée à Berlin et n'utilisant que de l'hydrogène gazeux à 350 bars, en association avec une pile de 75 kilowatts. La même année, Ford explore néanmoins une autre piste, avec une nouvelle version de la P2000 utilisant directement de l'hydrogène gazeux dans un moteur classique (Zetec 2 litres essence). L'autonomie plafonne à 100 kilomètres. La marque à l'ovale se décide d'autre part à tourner la page de Th!nk (le projet a été abandonné définitivement en 2003).

Toujours en 2001, Ford essaie un autre concept, avec une FCV hybride qui associe les batteries électriques à une PAC de 85 kilowatts et de l'hydrogène à 350 bars (autonomie : 320 kilomètres). Le modèle est élaboré sur la base d'une Focus.

En 2003, le constructeur change à la fois de technique et de véhicule avec la Ford U. Ce SUV brûle de l'hydrogène gazeux à 700 bars dans un moteur à combustion interne de 2,3 litres. Doté par ailleurs d'un système hybride, ce prototype revendique 500 kilomètres d'autonomie. Il sera suivi quelques mois plus tard (pour la célébration du centième anniversaire de Ford) par un autre hybride à hydrogène : la Ford H2RV (Hybrid hydrogen research vehicle). Basé sur une Focus break, ce véhicule utilise un moteur classique de 2,3 litres, un moteur électrique, des batteries lithium-ion, une transmission hybride, et carbure à l'hydrogène gazeux. L'autonomie est de 200 kilomètres.

Plus récemment, la marque à l'ovale a réalisé la Focus C-Max à hydrogène, développée par le centre de recherche d'Aix-la-Chapelle, en Allemagne. Le constructeur semble avoir renoncé à la pile à combustible pour se concentrer sur le moteur à combustion interne, dans lequel il brûle de l'hydrogène à 350 bars (stocké dans trois réservoirs – deux dans le coffre et un sous le plancher). L'autonomie est de 200 kilomètres. En tout, pas moins de 30 Focus à l'hydrogène roulent dans le monde. Elles ont, à ce jour, parcouru plus de 480 000 kilomètres.

Ford a toutefois de nouveau créé la surprise en dévoilant d'abord la Airstream à Detroit, puis la Edge Hy Series à Washington. Ce dernier *concept car* est un véhicule hybride rechargeable (« plug in »), dont les batteries lithium-ion peuvent se brancher sur le secteur. Il est ainsi capable de parcourir

40 kilomètres en mode électrique. La nouveauté vient du fait qu'une pile à combustible est prévue pour alimenter ensuite les batteries, et ainsi fabriquer de l'électricité pour augmenter l'autonomie de 320 kilomètres. 360 kilomètres peuvent être parcourus sans émettre de CO₂. Au total, l'autonomie atteint 640 kilomètres si l'on tient compte du petit moteur thermique (essence ou diesel). Cette solution permet de réduire de plus de 50 % la taille, le poids, le coût et la complexité d'un système classique reposant entièrement sur la pile à combustible. L'Edge Hy Series Drive bénéficie d'une architecture adaptable qui permet de mettre en œuvre de nouvelles technologies de propulsion et d'alimentation, au fur et à mesure qu'elles évoluent, sans repenser entièrement la conception du véhicule.

• **General Motors**

Le groupe américain et numéro un mondial de l'automobile a commencé à travailler sur la pile à combustible dès les années 1960. On doit même à GM le premier véhicule conçu par un grand constructeur et propulsé par une pile à combustible : une camionnette élaborée en 1968.

Le véritable coup d'envoi date cependant des années 1990, quand le Département de l'énergie américain (DOE) lance des programmes de recherche associant les constructeurs américains. General Motors est en mesure de présenter dès 1997 un véhicule expérimental à pile à combustible, sur base Opel, dans le cadre du salon de Genève.

Puis le constructeur fonde en 1998 le GAPC (Global Alternative Propulsion Center), un centre de recherches associant GM et Opel sur la voiture à hydrogène. Cette même année, on voit apparaître la première version à hydrogène de la Zafira, lors du Mondial de l'auto à Paris. Ce premier prototype, qui fonctionne au méthanol, peut atteindre 120 km/h. Le concept est optimisé dès l'an 2000 avec l'Hydrogen 1 : un véhicule toujours basé sur une Zafira, mais alimenté cette fois par de l'hydrogène liquide. La puissance de la pile passe à 80 kilowatts et les performances sont en hausse sensible (140 km/h en vitesse de pointe, autonomie de 400 kilomètres). Pour l'anecdote, la voiture servait de « pace car » pour le marathon, lors des Jeux olympiques de Sydney.

Il faut toutefois attendre 2003 pour voir la version la plus aboutie de la Zafira avec HydroGen3, qui va participer à plusieurs événements dans le monde entier, dont un tour d'Europe de 10 000 kilomètres pour convaincre les décideurs politiques et économiques de la pertinence de la voiture à hydrogène. La voiture est proposée en deux versions : l'une avec de l'hydrogène gazeux à 700 bars (270 kilomètres d'autonomie), l'autre avec de l'hydrogène liquide (400 kilomètres d'autonomie), pour une vitesse de pointe de 160 km/h. Entre-temps, General Motors a aussi développé la Precept : un *concept car* à l'hydrogène qui sert de démonstrateur, dans le cadre du programme PGNV de voitures propres aux États-Unis. La firme sort également un pick-up : la Chevrolet S10. Ce

modèle embarque un reformeur à essence et une pile de 25 kilowatts.

Mais surtout, GM crée l'événement en 2002 à Detroit avec l'AUTOmomy : un concept pour le moins décoiffant, avec un châssis en forme de skate-board. Tous les composants liés au système de propulsion sont intégrés dans un plancher plat. L'approche est audacieuse, d'autant que GM choisit de combiner la pile à combustible avec la technologie « by wire », qui consiste à remplacer les parties mécaniques par des fils électriques. Un concept dérivé sera d'ailleurs présenté la même année lors du Mondial de l'automobile à Paris, avec la Hy Wire. Si AUTOmomy annonce l'ère du plancher plat, mais avec la ligne d'un coupé, la Hy Wire va plus loin dans l'aménagement intérieur, avec beaucoup d'espace pour les jambes des passagers, ainsi qu'un volant doté de deux poignées regroupant toutes les commandes. C'est une vraie voiture à quatre places. Ces deux concepts seront distingués par plusieurs magazines internationaux, dont le *Time*.

Plus récemment, le constructeur américain a développé un générateur auxiliaire utilisant la pile à combustible pour alimenter en énergie électrique des pick-up hybrides diesel de l'US Army. 30 000 véhicules sont concernés dans les dix ans à venir.

GM a aussi franchi une étape significative avec la Chevrolet Sequel – véritable vitrine technologique du savoir-faire du groupe, avec une pile à combustible de quatrième génération, des moteurs électriques dans les roues, des batteries lithium-ion, des

commandes « by wire » et une structure en aluminium. Reprenant la forme d'un SUV crossover (un 4 × 4 urbain) à cinq places, cet engin atteint 100 km/h en dix secondes et revendique une autonomie de 450 kilomètres. C'est non seulement une voiture spacieuse, mais aussi très agile, grâce à une direction électrique et des systèmes de contrôle de la trajectoire. Le dernier véhicule connu est la Chevrolet Equinox, qui adopte une pile de 115 kilowatts (pour une autonomie de 320 kilomètres), et dont 100 exemplaires doivent être produits en 2007.

Eu Europe, elle a pour nom HydroGen4. Les améliorations viennent de l'utilisation d'une batterie tampon pour les performances et le freinage régénératif, et d'un turbocompresseur électrique pour alimenter en air la pile à combustible. Ces évolutions améliorent l'utilisation au quotidien avec plus de puissance (160 km/h en vitesse maximale et de 0 à 100 km/h en 12 secondes) et la possibilité de démarrer à des températures en dessous de zéro. L'HydroGen4 est conçue pour durer deux ans ou 80 000 kilomètres avec le confort et la sécurité d'un véhicule conventionnel.

Aux États-Unis, les tests se poursuivent en étroite relation avec le gouvernement. GM a signé un accord avec le Département américain de l'énergie (DOE) pour fabriquer 40 véhicules à pile à combustible. Le programme, d'un montant de 88 millions de dollars sur cinq ans, sera financé à moitié par le DOE. Les véhicules sont destinés à des tests à Washington D.C., New York, ainsi que dans le Michigan et en Californie.

GM s'est par ailleurs associé à plusieurs constructeurs. Après un accord passé avec Toyota, puis Suzuki, le géant américain s'est lié avec BMW pour mettre au point des systèmes de stockage et de distribution de l'hydrogène liquide. Du côté des pétroliers, la collaboration a débuté d'abord avec Exxon, puis avec Shell Hydrogen.

Il faut aussi préciser que le numéro un mondial de l'automobile a mis un pied dans le secteur de la pile à combustible. Il a pris une participation minoritaire dans la société Quantum, spécialisée dans le stockage d'hydrogène. GM a aussi engagé un partenariat sur vingt-cinq ans (!) avec General Hydrogen pour accélérer le déploiement d'une infrastructure de stations à l'hydrogène, aux États-Unis, en Europe, en Asie et dans les pays émergents.

Enfin, General Motors se positionne sur la pile à combustible pour des applications stationnaires, en partenariat avec Dow.

• **Honda**

Plus connu pour ses travaux sur l'hybride, un domaine dans lequel il rivalise avec Toyota (notamment avec l'Insight aux États-Unis, la Civic et l'Accord hybride), le constructeur japonais travaille également sur la pile à combustible depuis 1989. Ce n'est que dix ans plus tard qu'apparaît le premier prototype, le FCX-V1 en 1999. Par la suite, Honda va produire d'autres véhicules avec le FCX-V2 (avec reformeur au méthanol), le FCX-V3 (avec pile PEMFC d'origine Ballard alimentée à l'hydrogène gazeux, et des performances en nette hausse),

puis le FCX-V4 (dont l'autonomie est de 300 kilomètres, pour une vitesse de pointe de 140 km/h).

En 2005, Honda a été le premier constructeur à décrocher un client particulier pour la location d'une voiture à hydrogène. La marque a en effet conclu un accord de leasing sur deux ans avec un couple de Redondo Beach en Californie. La FCX est utilisée au quotidien.

Par ailleurs, la marque japonaise a planché sur des deux-roues plus propres. Un scooter FCV à pile à combustible (sur une base de 125 cm³) a été présenté en 2004 au Japon, et un projet de moto à hydrogène pourrait aboutir d'ici 2010.

Le dernier-né de la marque japonaise est la FCX Concept, un modèle de coupé sportif à l'hydrogène et au look résolument futuriste. Ce modèle a été dévoilé dans le cadre du salon de Detroit en 2006. Les performances ont été revues à la hausse avec une nouvelle pile à combustible de type PEMFC de 100 kilowatts (dont la taille a été réduite de 20 % et le poids allégé de 30 %, tout en offrant plus de puissance), associée à une batterie lithium-ion et à trois moteurs électriques (un de 80 kilowatts à l'avant, et deux de 25 kilowatts dans chaque roue arrière). Le rendement de la FCX est de 60 %, soit trois fois mieux qu'un véhicule à essence et deux fois mieux qu'un hybride. L'hydrogène est stocké à l'état gazeux, à une pression de 350 bars, dans un réservoir de 171 litres. La nouveauté vient du fait que la pile est en position verticale (et non plus horizontale) dans le véhicule, ce qui facilite l'écoulement de l'hydrogène et

de l'eau. Par ailleurs, Honda garantit le fonctionnement du système jusqu'à une température de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. La vitesse maxi est de 160 km/h, alors que l'autonomie atteint un niveau record de 570 kilomètres.

Honda va lancer en 2008 un modèle produit en série limitée, issu du *concept car* FCX, qui sera proposé en leasing au Japon et aux États-Unis. Le président de la marque, Takeo Fukui, estime que 2018 sera l'année de la production de masse pour les véhicules à pile à combustible, dont le prix serait de 10 millions de yens (64 800 euros).

Le constructeur japonais est également impliqué dans la production de piles à combustible pour un usage stationnaire. Ce concept a pour nom Home Energy Station (HES). La pile produit du courant et de l'eau chaude, à partir de gaz naturel. L'économie est de 50 %, avec un gain de 40 % sur les émissions de CO_2 .

• **Hyundai**

Le constructeur coréen s'intéresse à la pile à combustible. Ses travaux dans le domaine remontent à 1992, et se sont poursuivis régulièrement, avec une accélération vers l'an 2000, quand Hyundai a rejoint le California Fuel Cell Partnership. La firme a présenté la même année un Santa Fé FCEV (Fuel cell electric vehicle), d'abord avec un reformeur à méthanol, puis avec une pile à combustible classique. En 2003, Hyundai est ensuite passé à l'hydrogène, avec un modèle FCHV (Fuel cell hybrid vehicle), toujours sur la base du Santa Fé.

Ces prototypes ont participé au Challenge Bibendum, où ils ont décroché un certain nombre de distinctions. Hyundai utilise de l'hydrogène sous forme gazeuse à 350 bars et une pile à combustible. Une batterie électrique permet de bénéficier d'un surcroît de puissance en fonction des conditions de circulation. Depuis 2004, les recherches se poursuivent avec de l'hydrogène stocké à une pression de 700 bars, pour porter l'autonomie à plus de 300 kilomètres sur un autre modèle de 4 × 4, le Tucson.

Le constructeur coréen se fixe la date de 2010 pour l'introduction de modèles roulant à l'hydrogène.

- **Kia**

La marque coréenne, liée à Hyundai, a d'abord présenté au Mondial de l'automobile de 2004 une version FCEV du Sportage. C'était un 4 × 4 hybride électrique, équipé d'une pile à combustible PEMFC de 80 kilowatts. Plus récemment, lors du salon de Los Angeles de 2006, Kia a levé le voile sur une étude de design pour le moins originale. La Side-winder est une voiture de course propulsée par une turbine à hydrogène.

- **Lada**

Ce n'est pas une blague ! La marque russe, propriété du groupe Avtovaz (avec lequel Renault entretient une coopération), travaille bien sur l'hydrogène. L'Antel-2 a été dévoilée pour la première fois à Moscou en 2003, sur la base d'un break 111. Ce véhicule utilise une pile à combustible

– une technologie déjà explorée par Lada en 2001. À l'époque, la pile prenait toute la place à l'intérieur de l'Antel-1 (basée sur le Niva long 2131) et plafonnait à la vitesse ridicule de 55 km/h. Sur la version la plus récente, la pile développe 90 kilowatts et revendique 350 kilomètres d'autonomie, pour une vitesse maxi de 100 km/h.

Lada, qui travaille sur un projet Antel-3 avec des performances revues à la hausse, envisage de lancer une offre en 2010.

• Mazda

Le constructeur japonais s'intéresse à l'hydrogène depuis une quinzaine d'années. Il a en fait décidé de suivre deux voies : d'une part l'utilisation de carburant dans un moteur à combustion interne (en utilisant son fameux moteur rotatif), et d'autre part la pile à combustible (testée notamment sur une voiture de golf, la Demio et la Premacy). Sans négliger la pile à combustible, ni les autres pistes comme la pile à méthanol (Premacy FC-EV) et l'hybride électrique-hydrogène (Premacy et Mazda 5 présentées en 2005 à Tokyo), il semble toutefois que le constructeur d'Hiroshima axe davantage ses travaux sur le moteur rotatif à hydrogène. Le premier prototype de la marque, la HR-X, qui remonte à 1991, avait été présenté au salon de Tokyo et utilisait déjà cette solution. Au fil des ans, Mazda a amélioré le concept sur la MX-5, la Capella et plus récemment la RX-8.

Mazda considère en effet que la combustion est plus efficace dans ce type de moteur doté d'un rotor

qui mélange l'air et l'hydrogène de façon plus homogène. Présentée en 2003, la RX-8 Hydrogen RE a été homologuée pour rouler sur route au Japon. C'est un modèle bicarburant, capable à la fois de fonctionner à l'essence (550 kilomètres avec un réservoir de 61 litres) et à l'hydrogène (100 kilomètres avec 110 litres d'hydrogène). En mode hydrogène, le carburant est directement injecté dans le rotor sous forme gazeuse, à une pression de 350 bars.

La RX-8 Hydrogen RE est disponible en location longue durée au Japon, au prix de 420 000 yens par mois (2 860 euros). On l'a vue rouler récemment en Europe, lors d'un test organisé à Stavanger (Norvège).

• Mercedes

La firme à l'étoile est sans aucun doute l'une de celles qui croient le plus à la voiture à hydrogène. Elle persévère dans cette voie depuis des années, avec une flotte impressionnante de véhicules.

L'aventure a débuté en 1994 avec la Nekar 1 : un minibus à hydrogène, dans lequel il n'y avait de la place que pour le conducteur et le passager avant. Les progrès sont notables dès l'apparition de Nekar 2 en 1996. Cette fois, le minibus offre assez de place pour six passagers. Il atteint 110 km/h. L'hydrogène est stocké sur le toit, pour garantir une autonomie de 250 kilomètres. Ce n'est qu'en 1997 que Mercedes sort sa première voiture à hydrogène, la Nekar 3 – sur base de Classe A, qui produit de l'hydrogène à bord par reformage de méthanol. En 1999, la firme à l'étoile sort la Nekar 4, qui

explore encore une autre voie : l'hydrogène liquide. La voiture atteint 145 km/h et étend l'autonomie à 450 kilomètres. Le concept sera optimisé un an plus tard avec la Necar 4 A, dotée d'une pile à combustible plus petite. Pour célébrer l'an 2000, Mercedes sort la Necar 5. La base est toujours une Classe A, et Mercedes revient au reformage du méthanol. Parallèlement, le groupe DaimlerChrysler va tester des versions à hydrogène chez Mercedes (Sprinter), Jeep et Chrysler. La génération NEBUS désigne des bus à hydrogène chez Citaro.

Pendant plusieurs années, Mercedes a scandé que 2004 serait l'année de l'introduction de la première voiture de série à hydrogène. Mais, avec le recul, on voit bien aujourd'hui que cette annonce était très prématurée.

La dernière version développée par le constructeur est la F-Cell, sur base de Classe A. Apparue en 2003, la voiture est dotée d'une pile à combustible PEMFC de 72 kilowatts et d'un moteur électrique développant de 45 à 65 kilowatts. L'hydrogène est stocké sous forme gazeuse à 350 bars. La F-Cell revendique une autonomie de 177 kilomètres, pour une vitesse maxi de 140 km/h. La consommation de ce modèle équivaut de 2,8 à 3,6 litres de gazole aux 100 kilomètres. Les ingénieurs ont travaillé sur l'intégration et le silence, qui est le point mis en avant par les utilisateurs. Actuellement, une soixantaine de Classe A F-Cell roulent dans le monde, essentiellement en Allemagne, aux États-Unis, au Japon et à Singapour. Mercedes a aussi mis en circulation 36 bus à travers la planète.

La firme a également présenté au salon de Tokyo de 2005 un *concept car* ingénieux : la F600 HYgenius. Ce véhicule inaugure une pile PEMFC de 85 kilowatts et un stockage de l'hydrogène à 700 bars, ce qui permet de porter l'autonomie à plus de 400 kilomètres. En soi, le résultat est déjà extraordinaire. Mais la F600 HYgenius innove par d'autres aspects, tant à l'extérieur (larges surfaces vitrées, ouverture originale des portes) qu'à l'intérieur (nombreux réglages électriques, sièges rabattables et coulissants). L'énergie électrique produite à bord permet par ailleurs de proposer des prises électriques (220 volts, et non 12 volts comme sur les voitures classiques). Résultat : on peut brancher une cafetière ou un four à micro-ondes. Mercedes reprendra d'ailleurs certains aspects de ce *concept car* sur de prochains modèles.

Mercedes prend date pour 2010 avec une Classe B F-Cell. Révélée au Salon de Francfort, cette version sera le premier modèle de série à l'hydrogène. L'autonomie sera de 400 kilomètres avec de l'hydrogène stocké à 700 bars, avec une consommation équivalente à 2,9 l/100 km. Les ingénieurs vont également s'efforcer de réduire le temps de démarrage.

La marque allemande envisage en fait un lancement commercial de la voiture à hydrogène entre 2012 et 2015.

• Mitsubishi

Le constructeur japonais s'est pour le moment contenté d'une maquette, présentée lors du salon

de Tokyo de 1999, et intégrant un reformeur au méthanol.

- **Morgan**

La firme anglaise veut réaliser une voiture sportive roulant à l'hydrogène. Ce projet est mené dans le cadre du projet LIFECar (Lightweight Fuel Efficient Car), en partie financé par le gouvernement britannique. Les principaux partenaires sont Qinetiq et l'université d'Oxford. Basé sur le modèle Aero 8, ce véhicule sera équipé d'une pile à combustible.

- **Nissan**

La marque japonaise a commencé ses travaux en 1997, avec une première pile à combustible, puis en présentant un premier véhicule (R'Nessa FCV) deux ans plus tard. À l'époque, comme Mercedes, Nissan étudiait le reformage du méthanol. La piste sera abandonnée sous l'impulsion de Renault, qui encourage le constructeur japonais à s'orienter vers l'alimentation directe par hydrogène. On a ensuite vu apparaître en l'an 2000 un autre véhicule : le X-Terra SUV. Il fonctionne effectivement à l'hydrogène et utilise des batteries lithium-ion. Il sillonnera dès l'année suivante les routes de Californie pour des tests intensifs.

Nissan va ensuite voler de ses propres ailes avec le X-Trail FCV, dont la conception remonte à 2001. Ce véhicule est, dans un premier temps, équipé d'une pile à combustible fournie par UTC fuel cells. La première version du X-Trail FCV, dont

les performances sont assez modestes (125 km/h en vitesse maxi, 200 kilomètres d'autonomie), sera homologuée dès 2002 sur route ouverte au Japon. Elle est ensuite suivie par une version 2003 plus aboutie (145 km/h en vitesse de pointe, 350 kilomètres d'autonomie). Nissan coopère au projet JHFC (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration), et propose son véhicule en location. L'un des premiers clients sera le pétrolier Cosmo Oil, pour un loyer mensuel d'un million de yens (6 700 euros !).

En 2005, Nissan réalise sa première pile à combustible « maison ». D'une puissance de 90 kilowatts, elle est plus puissante et aussi 60 % plus compacte que le système utilisé précédemment par le constructeur. La marque japonaise a aussi mis au point un réservoir capable de stocker l'hydrogène sous forme gazeuse à 700 bars. Grâce à ces atouts, Nissan est en mesure de présenter un X-Trail FCV plus performant que l'ancienne version de 2003. Il embarque 30 % d'hydrogène en plus et peut parcourir 500 kilomètres grâce à l'hydrogène, ce qui lui permet de rivaliser avec les véhicules à essence. La voiture revendique une vitesse maxi de 150 km/h, tout en préservant une habitabilité appréciable pour cinq passagers et des bagages. Une batterie lithium-ion permet d'apporter un surcroît de puissance pour l'accélération.

Le X-Trail FCV 2005 roule actuellement au Canada, ainsi qu'au Japon. Nissan a par ailleurs décidé de montrer et de faire essayer l'ancienne version à l'occasion d'événements organisés au Japon et en France.

• PSA Peugeot Citroën

Le groupe PSA a un œil relativement neuf sur le sujet. Sa première réalisation, le *concept car* Hydro-Gen, a été mise au point en 1997 avec le concours du CEA, d'Air Liquide, de Solvay et de Renault. Sur la base d'un Berlingo, ce véhicule disposait d'une pile à 30 kilowatts, d'un moteur électrique et de batteries. Alimenté par de l'hydrogène gazeux sous pression à 350 bars, il pouvait atteindre 100 km/h.

En 2001, on a vu apparaître le Taxi PAC (pour « pile à combustible »), sur la base d'un Peugeot Partner. Le véhicule était cette fois conçu par le seul groupe PSA. L'originalité vient du fait qu'il s'agit d'un véhicule électrique avec un prolongateur d'autonomie faisant appel à la pile à combustible, développé par Air Liquide. Cette pile PEMFC de 5,5 kilowatts permet d'améliorer l'autonomie (de 200 à 300 kilomètres), en consommant de l'hydrogène stocké sous forme gazeuse à 300 bars. Il est intéressant de noter que l'hydrogène est considéré comme une solution d'appoint, avec un rack « amovible » constitué de bouteilles d'hydrogène, que l'on peut remplacer par un autre en cas de panne sèche.

PSA et le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) se sont associés en 2002 pour réaliser de concert une pile à combustible destinée à l'automobile, dans le cadre du projet Genepac (Générateur électrique à pile à combustible). L'objectif était de mettre au point une pile compacte, modulable et efficace, d'une puissance de 80 kilowatts. Ache-

vée fin 2005, cette pile a fait l'objet d'une expérimentation sur un véhicule. C'est la PAC la plus puissante jamais réalisée en France. Elle revendique des performances de premier ordre, avec un rendement supérieur à 45 %, 1,5 kilowatt par litre et 1 kilowatt par kilo. C'est une pile de type PEMFC à membranes échangeuses de protons.

À travers cet accord, PSA Peugeot Citroën a montré sa volonté de se doter de ses propres moyens de recherche sur cette technologie d'avenir. Le groupe dispose à présent d'une unité pile à combustible, au centre de recherche de Carrières-sous-Poissy. Cette unité est dédiée aux études sur la pile à combustible, aux technologies associées et à l'intégration de la pile dans un véhicule. PSA a fait le choix d'une introduction progressive de la technologie, en privilégiant dans une première phase les flottes de véhicules de livraison en ville.

Le groupe a aussi eu l'occasion de présenter des véhicules à pile à combustible sous forme de concept cars, notamment chez Peugeot avec l'étonnante voiture de pompiers H₂O et le Quark (quad à hydrogène). Plus récemment, PSA a annoncé un projet de véhicule hybride électrique, combinant les batteries et une pile à combustible PEMFC de 10 kilowatts. Le test, mené avec Intelligent Energy, concernera des véhicules de flotte en France comme en Angleterre. Ce projet est soutenu par le ministère britannique de l'Industrie et du Commerce.

On a même vu au dernier Mondial de l'automobile de 2006 la surprenante 207 e pure (préfigurant

la nouvelle 207 CC), qui cachait sous sa robe de coupé cabriolet une pile à combustible Genepac.

• Renault

La marque au losange a commencé ses travaux dans les années 1990 et présenté son premier véhicule doté d'une pile à combustible en 1997, avec la Fever (Fuel Cell Powered Electric Vehicle for Efficiency and Range). Ce prototype a été réalisé sur la base d'une Laguna break. Même s'il affichait des performances satisfaisantes (zéro émission, 500 kilomètres d'autonomie avec 8 kilos d'hydrogène liquide, vitesse de pointe de 120 km/h), le véhicule manquait singulièrement d'habitabilité. Le matériel remplissait le coffre et les sièges arrière... Le projet a été mené avec Volvo, Air Liquide et De Nora dans le cadre d'un projet européen (Joule 2).

Depuis, Renault n'a pas présenté d'autres véhicules. La firme a néanmoins travaillé avec PSA Peugeot Citroën, puis avec Nissan dans le cadre d'un accord de R & D sur une période de cinq ans. La marque au losange a pris une participation au capital de Nuvera, une société spécialisée dans le reformage et la pile à combustible.

Renault pense que le marché va démarrer entre 2010 et 2015, avec des véhicules équipés d'un reformeur capable de transformer en hydrogène des carburants classiques. La marque au losange a profité de l'édition 2006 du WHEC (World Hydrogen Energy Conference) pour présenter un matériel de ce type. Le reformeur conçu avec Nuvera est

polycarburant : il accepte aussi bien de l'essence que du gazole ou encore de l'éthanol, qu'il va ensuite transformer en hydrogène. Le procédé se déroule en six étapes. La première consiste à « craquer » les molécules d'hydrocarbures, les cinq autres à purifier l'hydrogène pour le rendre compatible avec une exploitation dans une pile à combustible.

Avec BMW et Delphi, Renault a également étudié la possibilité d'intégrer un générateur auxiliaire (APU), avec une pile à combustible pouvant fournir de l'énergie électrique pour alimenter les équipements de bord du véhicule.

• **Subaru**

Plus connu pour ses modèles sportifs, le constructeur japonais a pourtant conçu en l'an 2000 un petit utilitaire à l'hydrogène (Sambar FC) doté d'un reformeur au méthanol.

• **Suzuki**

Ce modeste constructeur japonais, qui a aussi exploré la piste du véhicule électrique et de l'hybride, s'intéresse à l'hydrogène. Bénéficiant de l'aide de GM, Suzuki a conçu en 2005 une version à l'hydrogène du Wagon R, qui a été homologuée par les pouvoirs publics japonais. Ce modèle, révélé deux ans auparavant au salon de Tokyo, est doté de deux réservoirs stockant l'hydrogène sous forme gazeuse, à une pression de 700 bars. Lors du salon de Tokyo en 2005, Suzuki a également présenté l'Ionis – un petit monospace racé associant la pile PEMFC et la technologie « by wire » pour les commandes.

• Toyota

Bien qu'il soit le chantre de la technologie hybride avec sa HSD (Hybrid Synergy Drive), qui équipe entre autres la Prius, vendue à plus de 500 000 exemplaires dans le monde, Toyota ne se désintéresse pas de la pile à combustible.

Les travaux dans ce domaine ont débuté en 1992. Quatre ans plus tard, la marque japonaise présentait un véhicule combinant l'hydrogène et l'hybride. Son nom : le FCHV-1 (Fuel Cell Hybrid). Le concept a été amélioré en 1997 avec la version FCHV-2 intégrant un reformeur au méthanol pour fabriquer de l'hydrogène à bord. Par la suite, Toyota a sorti coup sur coup la FCHV-3 en mars 2001, avec un réservoir en alliage et une seconde batterie, puis la FCHV-4 en juin 2001, avec un réservoir capable de stocker l'hydrogène à haute pression. Cette dernière version est disponible à la location depuis 2003. Pour ce véhicule, Toyota a développé deux types de réservoirs, certifiés par les autorités japonaises : l'un à 350 bars, l'autre à 700 bars. Ils sont donnés pour une durée de vie de quinze ans.

En octobre 2003, le constructeur japonais a dévoilé au salon de Tokyo un concept intéressant de coupé à hydrogène. La Fine-N dispose de quatre roues motrices électriques et revendique une autonomie de 500 kilomètres. Elle permet de concilier respect de l'environnement et plaisir de conduire.

En 2004, Toyota a présenté au salon de Genève l'étonnante MTRC (Motor triathlon race car), une

voiture de course propulsée par une pile à combustible et disposant d'un moteur électrique dans chaque roue. La MTRC est capable de rouler aussi bien sur circuit qu'en dehors des sentiers battus. C'est également la première voiture à hydrogène que l'on peut conduire dans un jeu vidéo : elle figure en effet dans Gran Turismo 4, jeu mythique pour Playstation®2.

Le véhicule le plus récent de Toyota est la Fine-X – un hybride pile à combustible présenté lors du salon de Tokyo en octobre 2005. Ce véhicule se distingue par une ouverture des portes en papillon et quatre roues indépendantes, facilitant la circulation et les manœuvres.

Toyota poursuit ses travaux sur l'hydrogène et n'envisage pas d'application avant 2010.

• Volkswagen

Parti plus tard que les autres, VW explore avec beaucoup d'intérêt la filière hydrogène et pile à combustible. Le constructeur allemand a d'ailleurs récemment décidé de rejoindre le Clean Energy Partnership à Berlin, et de participer aux essais avec son Touran HyMotion. Ce véhicule est apparu pour la première fois aux États-Unis en 2004, lors d'un rallye californien de véhicules à pile à combustible. Il a ensuite participé au Challenge Bibendum. Avec sa pile d'une puissance de 80 kilowatts et son moteur électrique, le Touran HyMotion passe de 0 à 100 km/h en 14 secondes et affiche une vitesse de pointe de 140 km/h. Une batterie en nickel-métal lui offre de la puissance supplémentaire

grâce à l'énergie électrique. L'autonomie ne dépasse pas 160 kilomètres, avec un réservoir limité à 1,9 kilo d'hydrogène sous forme gazeuse.

Un peu plus tôt, en 2002, Volkswagen avait développé une Bora HyPower avec l'aide du Paul Scherrer Institut. La voiture, équipée d'une pile PEMFC de 28 kilowatts et de supercondensateurs, revendiquait une vitesse de pointe de 115 km/h et une accélération de 0 à 100 km/h en 15 secondes. La première incursion dans l'hydrogène remonte à 2000 avec la Bora HyMotion, qui utilisait de l'hydrogène liquide (350 kilomètres d'autonomie et 140 km/h en pointe) et la Capri (une Bora break avec reformeur au méthanol).

Il semble que Volkswagen ait rattrapé son retard, puisqu'il vient d'annoncer la mise au point d'une pile à combustible haute température (HTFC – High temperature fuel cell), capable de fonctionner jusqu'à 160 °C. Elle fait appel à une nouvelle membrane imbibée d'acide phosphorique et à des électrodes adaptées, permettant de développer des PAC plus compactes et moins onéreuses. VW estime que les piles à basse température n'ont aucune chance d'être retenues en série. Le constructeur allemand pense encore améliorer sa technologie d'ici 2010, et n'envisage pas d'application en série avant 2020.

L'hydrogène est l'un des piliers de la stratégie de Volkswagen en matière de développement durable, au même titre que l'hybride (VW va développer des batteries destinées à ce type de véhicules), et que les carburants synthétiques obtenus à partir du gaz naturel et de la biomasse, baptisés « Sunfuel ».

IV. LES AUTRES PROJETS

Émanant d'universités, d'équipementiers ou de nouveaux acteurs de l'hydrogène, certains projets méritent le détour.

- **H2 Développement**

Sous ce nom se cache une société d'ingénierie spécialisée dans l'hydrogène, elle-même filiale d'Espace Eolien Développement. C'est un bureau d'études spécialisé dans l'éolien situé à Lille depuis 1992. H2 Développement aide au montage de projets, tels ALTHYTUDE (projet pilote de bus alimenté par un mélange de gaz naturel et d'hydrogène, à Dunkerque) et ULTIM CAR (voiture à essence convertie à l'hydrogène par des solutions existant aujourd'hui commercialement). Ce dernier projet est mené en partenariat avec Air Liquide, Horizon GPL et des partenaires de la région Nord-Pas-de-Calais. La base est un utilitaire à moteur essence qui a été équipé d'un kit de bicarburation afin de pouvoir être alimenté par de l'hydrogène gazeux. Le véhicule peut rouler à la fois à l'essence et à l'hydrogène. En mode hydrogène, l'ULTIM CAR

utilise un réservoir constitué de quatre bouteilles à hydrogène. Une seconde génération est à l'étude, avec une petite station à hydrogène alimentée à partir d'énergies renouvelables (énergie éolienne ou solaire, biogaz ou gazéification du bois), qui pourrait remplir les réservoirs.

• **Hysun**

Imaginez un tricycle à roue arrière motrice, à une seule place et dont le conducteur serait assis juste derrière l'essieu avant. Ce curieux engin en forme de balle, qui a été équipé d'une pile à combustible de 1,2 kilowatt et d'un moteur électrique de 3 kilowatts, a pourtant été homologué pour la route en Allemagne. Mieux : il a réussi à parcourir 3 000 kilomètres en ne se ravitaillant qu'une seule fois. Oui, vous avez bien lu. En roulant à 80 km/h, le Hysun n'a dû faire le plein qu'au bout de 1 643 kilomètres. L'engin a effectué un périple de Berlin à Amsterdam, puis est revenu vers l'Allemagne. De telles performances sont aussi dues à un Cx (coefficient de traînée ou de pénétration dans l'air, dans le sens de l'avancement du véhicule) très bas, d'une valeur de 0,15 et à un poids plume de 187 kilos. L'objectif était de montrer que la pile à combustible et l'hydrogène étaient des solutions viables dès aujourd'hui.

• **Michelin Hy Light**

Lors du Challenge Bibendum de 2004 (un événement sur la mobilité durable parrainé par Michelin), le fabricant de pneus a créé la surprise en

dévoilant un *concept car* intégrant les dernières technologies de pointe en faveur de l'environnement. Ce véhicule est propulsé par une pile à combustible de 30 kilowatts, elle-même alimentée par de l'hydrogène gazeux stocké à 350 bars et par de l'oxygène embarqué à bord, avec l'aide d'un supercondensateur de 32-45 kilowatts (pour les phases d'accélération) et de deux moteurs électriques logés dans les roues avant. La Hy Light revendique une vitesse de pointe de 130 km/h et une autonomie de 400 kilomètres à une vitesse constante de 80 km/h. Ce véhicule présente beaucoup d'intérêt, car il supprime le moteur traditionnel ainsi que tous les éléments mécaniques (embrayage, boîte de vitesses). L'énergie est électrique. La présence de moteurs électriques dans les roues permet de gagner à la fois en habitabilité et en maniabilité. La Hy Light devance les désirs du conducteur et va jusqu'à se pencher dans les virages.

Conçue en partenariat avec le Paul Scherrer Institut (PSI), situé en Suisse, la Hy Light est une voiture 100 % propre. L'hydrogène qu'elle consomme peut en effet être produit à partir d'une station-service dotée de capteurs solaires et d'un électrolyseur.

- **Th!nk**

Basée en Norvège, cette jeune société qui a travaillé avec Ford se positionne comme un acteur de la mobilité. Elle a ainsi conçu une gamme de véhicules de petite taille, au look décalé et au nom évocateur : Th!nk City, Th!nk Open et New Th!nk City.

Th!nk Nordic AS travaille aujourd'hui sur un projet d'une durée de trois ans, doté d'un budget de 1,35 million d'euros, visant à développer une citadine à l'hydrogène. La Th!nk Hydrogen est un véhicule hybride pouvant être alimenté à la fois par de l'énergie électrique stockée dans des batteries, et par de l'hydrogène stocké à l'état gazeux à une pression de 700 bars. La pile à combustible de 10 kilowatts est placée sous le véhicule. Avec ces deux énergies, la Th!nk peut rouler pendant 250 kilomètres (125 kilomètres en mode électrique, 125 kilomètres supplémentaires avec l'hydrogène), sans bruit et en n'émettant aucun polluant. Le projet, mené avec le concours de Raufoss Fuel Systems, doit déboucher en 2007 sur une production en petite série.

V. LE RAPPORT DU CONGRÈS SUR LA PILE À COMBUSTIBLE

Réalisé à la demande du Congrès américain et préparé par le Département américain à l'énergie (DOE), un rapport sur la pile à combustible a été publié en février 2003. On peut le consulter en intégralité sur Internet et le télécharger à l'adresse suivante : http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fc_report_congress_feb2003.pdf.

Ce rapport avait pour but d'identifier les barrières à lever pour un déploiement commercial de l'hydrogène dans les transports à l'horizon 2015.

Afin de faire le point sur la technologie et ses applications, les auteurs ont consulté des constructeurs automobiles (General Motors, Ford, DaimlerChrysler, Honda, Nissan, Toyota), des pétroliers (BP, Exxon, Shell), des équipementiers (Delphi, Motorola), des spécialistes de la pile à combustible (Ballard, Nuvera), des laboratoires de recherche (Los Alamos, Argonne), des ministères (Environnement, Transport et Énergie), ainsi que l'armée américaine et des associations (dont Greenpeace).

En préambule, le rapport note que si rien ne change, les importations de pétrole vont augmenter (plus de 15 millions de barils par jour en 2020). Or le secteur des transports est le principal consommateur d'or noir.

Les rapporteurs estiment que la technologie devrait être prête en 2015, pour une commercialisation sur des véhicules de série en 2020. Selon l'hypothèse la plus optimiste (une pénétration en masse à l'horizon 2040), l'Amérique ferait alors l'économie de 11,6 millions de barils de pétrole par jour (la quantité importée à ce jour).

Outre son intérêt stratégique, l'hydrogène permet d'envisager un gain de 50 % sur la consommation de carburant par rapport à un moteur à essence classique, et un gain substantiel sur la qualité de l'air avec des véhicules à zéro émission.

Le rapport pointe cependant d'importantes barrières technologiques. Sont ainsi mentionnés : l'autonomie (au moins 300 miles, soit 460 kilomètres), la production, la distribution et le stockage de l'hydrogène à bord, le coût des équipements et leur durée de vie (au moins quinze ans, plus de 100 000 miles).

En conclusion, le rapport préconise d'établir des partenariats entre le public et le privé, afin de tester les véhicules à hydrogène en grandeur nature et d'analyser les données (maintenance, durée de vie, vieillissement des composants). C'est l'industrie qui prendra la décision de commercialiser la technologie.

VI. LE DICTIONNAIRE DE LA VOITURE À HYDROGÈNE

AFH2 : Association française de l'hydrogène.

APU (Auxiliary Power Unit) : Générateur auxiliaire qui peut produire de l'énergie électrique. C'est le rôle que peut jouer une petite pile à combustible, au lieu de la deuxième batterie qu'utilisent certains constructeurs haut de gamme.

Biomasse : Ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique, produites à partir de l'énergie solaire transformée par les plantes et utilisées directement (bois) ou obtenues par gazéification.

CEP (Clean Energy Partnership) : Partenariat conclu entre 11 sociétés à Berlin, dont des constructeurs et des pétroliers, pour tester et promouvoir la mobilité durable au moyen de l'hydrogène.

Clean Energy : Terme qui désigne l'hydrogène chez BMW.

CUTE (Clean Urban Transport for Europe) : Programme de recherche visant à promouvoir l'utilisation de véhicules non-polluants dans les grandes villes d'Europe.

EHA (European Hydrogen Association) : Association européenne de l'hydrogène, basée à Bruxelles, qui fédère plusieurs associations nationales, dont l'association française AFH2.

EVS (Electric Vehicle Symposium) : Cet événement, créé en 1969 aux États-Unis, a été depuis rebaptisé International Battery, Hybrid and Fuel Cell Symposium & Exposition. Il associe désormais les hybrides et la pile à combustible. C'est un événement de portée mondiale, organisé un peu partout dans le monde (Monaco en 2005, Yokohama en 2006). Le public profite de cet événement pour découvrir les nouvelles énergies et tester les véhicules.

F-Cell : Nom de la dernière version de la Classe A à pile à combustible fabriquée par Mercedes.

FC (Fuel Cell) : Nom anglais de la pile à combustible.

FCV (Fuel Cell Vehicle) : Terme qui désigne un véhicule alimenté par une pile à combustible.

FreedomCAR (Cooperative Automotive Research) : Programme de recherche américain lancé par l'administration Bush pour développer la voiture à hydrogène.

GAPC (Global Alternative Propulsion Center) : Centre de recherche de General Motors sur la voiture à hydrogène.

HES (Home Energy Station) : Pile à combustible à usage stationnaire, comme celle que Honda commercialise aux États-Unis.

HTFC (High Temperature Fuel Cell) : Pile à combustible à haute température, développée par Volkswagen.

Hydrogène : Élément chimique le plus simple au monde, constitué seulement d'un proton et d'un électron. Sur Terre, il se présente le plus souvent en combinaison avec d'autres atomes sous la forme d'un gaz plus léger que l'air. On le trouve dans de nombreuses molécules : eau, sucre, protéines, hydrocarbures. L'hydrogène est un vecteur d'énergie qui peut être stocké sous forme gazeuse, liquide ou encore solide. Il est également

l'un des principaux constituants du soleil et des étoiles.

Hythane : Carburant obtenu à partir d'un mélange de gaz naturel et d'hydrogène.

HY-Wire : Nom d'un *concept car* chez General Motors associant l'hydrogène et les commandes électrifiées de type « by wire ».

IAHE (International Association for Hydrogen Energy) : Association internationale visant à promouvoir l'hydrogène à travers des publications et des conférences.

IPHE (International Partnership for the Hydrogen Economy) : Partenariat international pour l'économie de l'hydrogène. Il s'agit d'un programme de recherche initié par les États-Unis et associant une quinzaine de pays.

JHFC (Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration) : Programme initié par les pouvoirs publics japonais afin de tester les véhicules à hydrogène sur route ouverte.

MEA (Membrane Electrode Assembly) : Membrane qui constitue la pile à combustible. La MEA est un ensemble de couches minces, formé de la

membrane, des catalyseurs (côté anode et côté cathode), de l'anode et de la cathode.

En français, on parle d'AME (assemblage membrane électrode).

MPa (Mégapascal) : Le pascal, que l'on doit au célèbre savant Blaise Pascal, est une unité de mesure de contrainte et de pression. On désigne par un pascal la contrainte qui, agissant sur une surface plane de 1 m^2 , exerce sur cette surface une force totale de 1 newton. $1 \text{ mPa} = 10^6 \text{ Pa}$.

NECAR (New Electric Car) : Nom générique donné par Mercedes à ses premiers prototypes de voiture à hydrogène.

PAC (pile à combustible) : Procédé inventé par l'Anglais William Grove en 1839, qui consiste à produire du courant électrique à partir d'une électrolyse inversée, associant de l'oxygène et de l'hydrogène. La réaction ne produit que de la vapeur d'eau.

PAN'H (Plan d'action national pour l'hydrogène) : Programme de recherche français dédié à la voiture à hydrogène.

PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) : Pile à combustible à membrane échangeuse

de protons. C'est le type de PAC qui se développe le plus vite, en raison de son coût plus abordable. Elle déclenche une réaction chimique qui permet de produire simultanément de l'eau, du courant électrique et de la chaleur. Ce type de pile ne fonctionne qu'à l'hydrogène pur et à une température de 80 °C.

PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) : Programme lancé par l'administration Clinton en vue de réduire la consommation des véhicules. Plusieurs technologies ont été utilisées, dont la pile à combustible.

Psi (Pound per Square Inch) : Unité de mesure de la pression, utilisée chez les Anglo-Saxons pour l'hydrogène stocké à l'état gazeux. 1 psi = 0,06894 bar.

Reformeur : Système qui permet de transformer les carburants (essence, gazole, biocarburants, gaz naturel) en hydrogène pour alimenter la pile à combustible.

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) : Type de pile à combustible pouvant être utilisée pour des applications stationnaires, comme la fourniture de courant électrique pour les équipements, tandis que le véhicule est à l'arrêt. La pile SOFC peut être alimentée par plusieurs carburants, comme le super

et le gazole, les biocarburants, le gaz naturel ou encore tout simplement l'hydrogène. Elle fonctionne à une température de 700 à 800 °C.

Stack : Cœur de la pile à combustible. Il est composé de la MEA avec des couches supplémentaires que sont les plaques bipolaires, servant à diffuser les gaz et à récupérer l'eau produite.

WHEC (World Hydrogen Energy Conference) : Conférence organisée tous les deux ans sous les auspices de l'Association internationale de l'hydrogène énergie (IAHE), pour faire le point sur les dernières avancées dans ce domaine.

VII. DES SITES INTERNET POUR Y VOIR PLUS CLAIR

AFH2 : <http://www.afh2.org/f/index.php>

Alphea : <http://www.alphea.com/index.php>

Ballard : <http://www.ballard.com>

BMW Clean Energy :

http://www.bmw.com/com/_shortcuts/clean-energy

California Fuel Cell Partnership :

<http://www.cafcpc.org>

CEA : <http://www.cea.fr/fr/magazine/somDossier.asp?id=3>

Club français des piles à combustible :

<http://www.clubpac.net>

DaimlerChrysler :

<http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7179-1-627008-1-0-0-627521-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html>

DOE Hydrogen Program : <http://www.hydrogen.energy.gov>

DuPont Fuel Cells :
<http://www.fuelcells.dupont.com>

EHA : <http://www.h2euro.org>

European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform : <https://www.hfpeurope.org>

EV World : <http://www.evworld.com>

Ford :
http://www.ford.com/en/vehicles/specialtyVehicles/environmental/fuelCell/default.htm?source=rt&referrer=fuelCells_default

Fuel Cell Marathon :
<http://www.gmeurope.com/marathon>

Gaz de France :
http://ecx.gazdefrance.fr/ecx/application?pageid=ecp_contenu&dossierId=100045

General Hydrogen : <http://www.generallyhydrogen.com>

General Motors : http://www.gm.com/company/gmability/adv_tech/

H2Cars : <http://www.h2mobility.org/index.html?>
http://www.h2mobility.org/welcome_e.html

H2 Développement :
http://www.h2-developpement.fr/Francais/appli_UltimCar.html

H2 stations : <http://www.h2stations.org>

Hydrogen Gov : <http://www.hydrogen.gov>

Hydrogen Highway :

<http://hydrogenhighway.ca.gov>

Hyweb : <http://www.hyweb.de>

IAHE : <http://www.iahe.org>

Ineva : <http://www.ineva-cnrt.com>

IPHE : <http://www.iphe.net>

Linde :

<http://www.linde.com/international/web/linde/like35lindecom.nsf/docbyalias/homepage>

North Atlantic Hydrogen Association :

<http://www.newenergy.is/naha/>

Nuvera : <http://www.nuvera.com>

Planete-Energies.com : <http://www.planete-energies.com/contenu/energies-renouvelables/voies-du-futur/pile-a-combustible.html>

Plug Power :

<http://www.plugpower.com/index.cfm>

Réseau PACO : <http://veille.reseaupaco.org>

Shell Hydrogen :

<http://www.shell.com/home/Framework?siteId=hydrogen-en>

Th!nk : <http://www.think.no>

WHEC : <http://www.whec2006.com>

**Pétition pour apporter son soutien aux
véhicules propres :**

<http://www.cleanvehicle.com>

Les auteurs

Pierre Beuzit, soixante-cinq ans, est l'ancien directeur de la recherche de Renault. Il a passé trente-cinq ans au sein de la marque au losange et occupé plusieurs fonctions à la direction des études et des avant-projets, travaillant notamment sur la Clio et la Twingo. Sa dernière mission pour Renault a été de réfléchir à la stratégie du groupe en matière d'énergie. Aujourd'hui président d'Alpea Hydrogène et du Centre national de recherche technologique sur l'hydrogène et la pile à combustible de Belfort, il est considéré comme l'un des meilleurs experts dans ce domaine. Diplômé de l'École centrale, titulaire d'un DEA de physique et docteur en sciences physiques, Pierre Beuzit est membre du conseil d'administration de plusieurs organismes, dont le pôle de compétitivité Véhicule du futur.

Laurent Meillaud, trente-neuf ans, est journaliste automobile. Spécialisé dans les nouvelles technologies, il collabore à l'émission « Turbo » sur M6 et a rédigé plusieurs ouvrages. Il a notamment contribué aux *Innovations du XXI^e siècle*, paru aux éditions de L'Archipel.

TABLE

<i>Avant-propos</i>	7
<i>Introduction</i> : Peut-on imaginer une automobile sans pétrole ?	11
1. Un contexte favorable à l'hydrogène	21
2. Rappels sur l'hydrogène	43
3. L'hydrogène dans l'automobile	65
4. Voiture à hydrogène, mode d'emploi	79
5. Ce qui va changer à bord de votre voiture ..	89
6. Les problèmes à résoudre	103
7. L'hydrogène redessine la carte du monde ..	125

Annexes

I. L'agenda de la voiture à hydrogène	141
II. Les idées reçues sur l'hydrogène	143
III. Les constructeurs et la voiture à hydrogène..	155
IV. Les autres projets	185
V. Le rapport du Congrès sur la pile à combustible	189
VI. Le dictionnaire de la voiture à hydrogène	191
VII. Des sites Internet pour y voir plus clair	199
<i>Les auteurs</i>	203

*Cet ouvrage a été composé
par Atlant'Communication
aux Sables-d'Olonne (Vendée)*

Impression réalisée sur CAMERON par

*La Flèche
en septembre 2007
pour le compte des Éditions de l'Archipel
département éditorial
de la S.A.R.L. Écriture-Communication*

Imprimé en France
N° d'édition : 1073 – N° d'impression :
Dépôt légal : octobre 2007