



Énergie, hydrogène et piles à combustible

Georges Dupont-Roc, Philippe Schulz, Patrick Borg, Michel Fouré et Daniel Le Breton. Task-force Hydrogène-piles à combustible, TotalFinaElf

Summary Energy, hydrogen and fuel cells

Fossil fuels already provide and will still provide in the next decades the energy needed to sustain the economic growth. However, extending the access to mobility to mankind while curbing emissions, will require to complement and diversify the transportation and fuel resources. In the long term, hydrogen could become a major carrier to bring to the market a variety of primary energy sources, including renewables, depending on environmental and/or local constraints. Such a transition would underpin a move towards a sustainable energy system.

Mots-clés Énergie, hydrogène, pile à combustible, transport, microgénération.

Key-words Energy, hydrogen, fuel cell, transportation, distributed power generation.

Le contexte : transitions du système énergétique et développement durable

Le concept du développement durable vise à « satisfaire les besoins du présent sans hypothéquer la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ». Essentiellement, il s'agit d'atteindre une amélioration durable de la qualité de la vie, aussi bien dans les pays de l'OCDE, que dans ceux en transition ou en développement. Comme montré par Louis Debiais dans l'article précédent, les combustibles ont fourni et fourniront encore pendant de nombreuses années une contribution essentielle au développement économique et au bien-être de l'humanité. Cependant, ils sont souvent perçus comme une ressource finie et économiquement limitée, dont l'usage a une influence importante sur l'environnement local et global : émissions de composés polluants, contribution à l'effet de serre.

Les grands groupes internationaux actifs dans le marché de l'énergie et des matériaux – pétroliers, électriciens, gaziers, chimistes, fabricants d'équipements ou d'automobiles – ont tous défini des programmes d'activités dont les orientations à long terme tentent d'apporter des éléments de réponse à ces préoccupations.

En ce qui concerne l'usage de l'électricité et des combustibles pour le transport, il existe aujourd'hui un contraste important entre l'OCDE et les pays en développement, directement lié au développement économique. Par exemple, pour amener l'ensemble des pays en développement au niveau actuel de l'Europe, il faudrait tripler la production mondiale d'électricité et quadrupler celle d'hydrocarbures pour les transports personnels (figure 1).

La diversification des sources d'énergie est une caractéristique fondamentale de l'évolution du

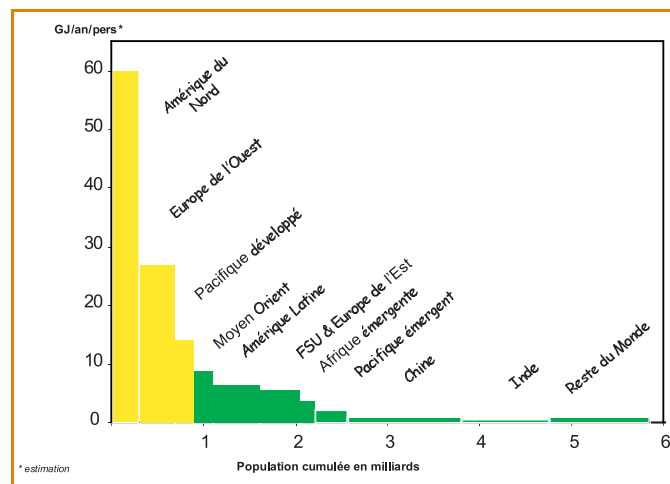


Figure 1 - Usage combustible transport personnel.

système énergétique depuis le début de la révolution industrielle : bois, charbon, pétrole et gaz, nucléaire, éolien, solaire... **Le système hydrogène-piles à combustible pourrait devenir à terme un des vecteurs majeurs de commercialisation de l'ensemble des énergies primaires, de manière flexible, tout en minimisant la formation de composés polluants et de gaz à effet de serre.**

La chaîne hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique comme l'électricité : contrairement aux sources primaires d'énergie, il doit être fabriqué avant d'être stocké et utilisé. L'hydrogène est aujourd'hui essentiellement obtenu à partir d'hydrocarbures – vaporéformage du gaz naturel ou gazéification (résidus pétroliers, charbon, biomasse) – ou encore par électrolyse de l'eau. Ces différents procédés varient en termes de complexité, de rendement, de pureté et de coût de l'hydrogène obtenu.



ÉNERGIE ET PILES À COMBUSTIBLE

Les transitions du système énergétique

Comme le montre la *figure 2*, au début du siècle, le charbon venait juste de dépasser le bois comme source d'énergie principale avec 55 % du marché et s'affichait comme la ressource dominante de l'avenir. Le pétrole atteignait 2 % de part de marché après 40 ans de développement chaotique et une image d'industrie précaire. Quarante années plus tard, il atteignait 25 %, permettant la mobilité terrestre et aérienne et donc la conquête du globe.

Les États-Unis comptaient 8 000 voitures en 1900 et 17 millions en 1925, une croissance annuelle de 30 %. La généralisation de la mobilité individuelle répondit essentiellement à un désir de liberté, satisfait grâce à un vecteur énergétique puissant, facile à mettre en œuvre, et au faible coût de la production des automobiles à la chaîne, aidé par l'accès généralisé au crédit individuel. Le développement de l'ensemble était soutenu par un cercle vertueux de progrès scientifiques et technologiques en mécanique, thermodynamique, métallurgie, et chimie des polymères.

En 1951 aux États-Unis, un pilote de 300 kW prouva le concept de production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire. En 1954, l'Atomic Energy Act encouragea l'industrie privée à développer, construire et opérer des centrales

nucléaires. Dans les pays industrialisés, des programmes sponsorisés par les gouvernements permirent de tester de nombreux concepts. La taille des installations passa de 80 MW à 400 MW entre le début et la fin des années 60, puis atteignit 900 MW vers la mi-70 et 1 300 MW mi-80. La part du nucléaire, exprimée en énergie primaire, s'est accrue de 4 % à 11 % au cours des vingt dernières années dans l'OCDE.

D'autres transitions du système énergétique verront le jour au cours des prochaines décennies pour permettre à l'humanité d'atteindre une amélioration permanente de la qualité de la vie, aussi bien dans les pays industrialisés, émergents ou en développement.

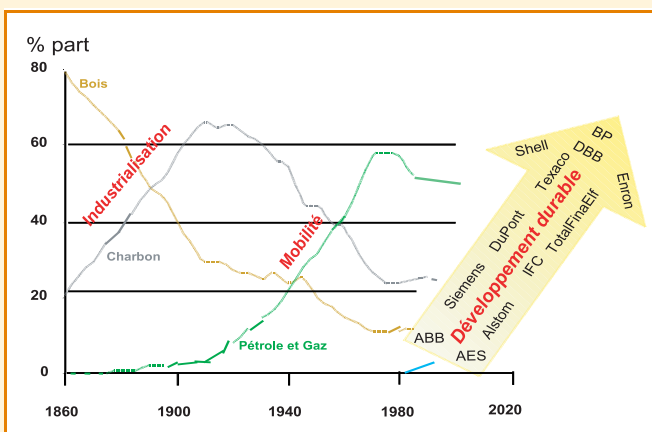


Figure 2 - Développement durable : nouvelle transition.

Dans les schémas actuels de fabrication, l'hydrogène est produit dans des unités centralisées, puis utilisé sur site ou transporté sur route ou par pipeline. Certains procédés (réformage, électrolyse) ont fait l'objet de développements ces dernières années pour permettre des fabrications délocalisées en quantité et qualité suffisantes pour alimenter une flotte captive de véhicules à hydrogène (pile à combustible ou moteur thermique). L'hydrogène pur est en effet un vecteur énergétique sophistiqué qui conduit à des rendements énergétiques élevés, en limitant les réactions secondaires à sa transformation en eau (oxydation ou combustion) et donc les émissions polluantes (oxydes d'azote, hydrocarbures imbrûlés, particules, CO₂).

Hors l'aspect réglementaire, la barrière principale à l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique réside dans les contraintes physiques associées à la logistique de distribution et le coût élevé qui en résulte. Aujourd'hui, il existe quatre

façons de transporter de l'hydrogène : gazeux par pipe, gazeux comprimé en semi-remorque, gazeux par bouteille ou liquide (transport cryogénique). C'est sous sa forme liquide que la densité énergétique par unité de volume est la plus élevée, mais la liquéfaction utilise environ 35 % de l'énergie contenue.

Ainsi, le choix des modes de production, de stockage et des filières de distribution aura donc des répercussions sur les coûts de l'hydrogène et sur les investissements à consentir.

Les enjeux technologiques des piles à combustible

Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un convertisseur continu et direct de l'énergie chimique du combustible en électricité, chaleur et eau par des réactions

ÉNERGIE ET PILES À COMBUSTIBLE



électrochimiques d'oxydoréduction, dont le principe de fonctionnement est notamment illustré dans l'article de Françoise Barbier et Thierry Alleau.

Au cours des dernières années, quelques centaines d'applications commerciales ont été développées pour des marchés de niche justifiant une qualité et un prix élevé de l'électricité (centres de traitement informatique, banques...). Il s'agit essentiellement d'installations utilisant des électrolytes liquides (acide phosphorique ou carbonates fondus). Leur taille est importante et le coût élevé (4 000 € par kW installé). Cette filière ne constitue cependant qu'une étape vers l'industrialisation de deux technologies jugées prometteuses :

- les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC), fonctionnant à 80 °C environ,
- les piles à oxyde solide (SOFC), fonctionnant à une température supérieure à 700 °C.

Ces filières offrent un meilleur potentiel de miniaturisation et de simplicité de mise en œuvre, grâce au remplacement de l'électrolyte liquide par une membrane solide en polymère ou céramique, et sont présentées en détail dans d'autres articles de cette revue.

Les quelques centaines de systèmes commercialisés à ce jour pour les applications stationnaires ont montré une fiabilité et une qualité du courant produit élevées, sans émissions de particules ou d'oxydes d'azote ou de soufre. Les technologies actuellement mises en œuvre permettent d'obtenir un rendement système de l'ordre de 40 % et des puissances spécifiques atteignant 20 kW/m³. Les efforts en cours devraient permettre d'améliorer ces performances.

L'amélioration des performances et les verrous technologiques

Au cours des dernières décennies, la puissance spécifique des piles s'est améliorée de deux ordres de grandeur (figure 3). La pile alcaline d'Apollo, conçue dans les années 60, produisait 1,5 kW pour un volume d'environ 200 L, alors que General Motors a atteint 1,75 kW/L en août 2001, améliorant sa performance d'un facteur 7 en quatre ans. Le passage de l'acide phosphorique à la membrane polymère a permis de réduire l'encombrement de la pile par un facteur 10 à puissance identique. Ces progrès spectaculaires sont attribuables en grande partie à la dynamique du PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) et des programmes nationaux de R & D mis en œuvre aux États-Unis depuis 1995.

Dans le cas d'une pile à membrane électrolyte polymère (PEMFC), il faut augmenter l'activité des

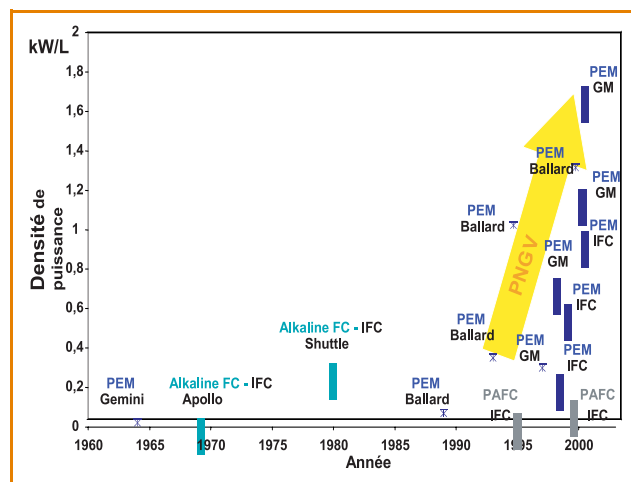


Figure 3 - Progrès des piles à combustible.

électrodes, notamment du catalyseur à base de platine, et accroître la densité de courant pour obtenir une meilleure puissance spécifique. Depuis le programme spatial Gemini, la teneur en platine a été réduite de 4 mg/cm² de membrane à 0,2 mg/cm², grâce à l'optimisation de la dispersion. Le catalyseur est déposé sur un support intimement lié à la membrane, placée entre les plaques bipolaires. L'ensemble électrode-membrane-plaque doit posséder des caractéristiques mécaniques et électriques spécifiques : conductivité, déformation élastique, résistance à la corrosion, imperméabilité à l'hydrogène, etc.

Les performances des assemblages membrane-électrode (MEA) se sont progressivement améliorées pour atteindre des densités de puissance de 3 à 7 kW/m², avec des courants de 0,5 à 1 A/cm² sous 0,7 V. Un système membrane-électrode-plaque idéal aurait une courbe de performance presque plate quelle que soit la densité de courant et à un niveau proche de 1,2 V, correspondant au potentiel chimique de la réaction d'oxydation de l'hydrogène. L'objectif pour les systèmes embarqués est de 10 kW/m², pour un encombrement de 1 kW/L. Par comparaison, la densité de puissance qui s'exerce sur la section des cylindres d'un moteur thermique est typiquement de 400 kW/m² pour 0,5 à 1 kW/litre d'encombrement.

La membrane est un polymère conducteur d'ions H⁺, en présence d'eau, dont la mobilité est assurée par des groupements sulfonates. La structure chimique de la membrane doit également lui permettre d'être un isolant électrique afin que les électrons suivent un circuit externe. Ce sont souvent des polymères perfluorés qui apportent la structure chimique de base. Le Nafion™, introduit par DuPont en 1962, constitue aujourd'hui la référence.



ÉNERGIE ET PILES À COMBUSTIBLE

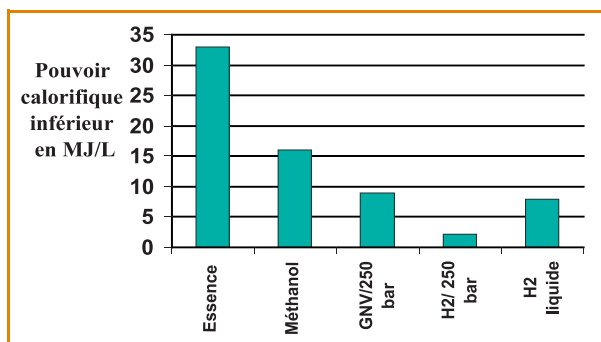


Figure 4 - Densité énergétique volumique.

parc neuf, à partir de 2010. La période 2005-2010 fera selon toute vraisemblance l'objet d'essais grandeur nature (à l'exemple du California Fuel Cell Partnership) et d'équipements de flottes captives, notamment aux États-Unis, en Europe et au Japon.

Le processus d'amorçage (baisse des coûts, accroissement du marché) reste cependant à établir. Des tensions sur le marché des produits pétroliers affectant la mobilité pourraient initier ce processus et accélérer alors la transition vers l'hydrogène.

La problématique du carburant

Le monde automobile dans sa quasi totalité est prêt à envisager l'hydrogène comme carburant du futur. Cependant, les étapes pour y parvenir ne font pas l'unanimité.

Tout d'abord, le passage à l'hydrogène suppose qu'on aura résolu à terme le problème de sa distribution et surtout de son stockage embarqué. Des solutions alternatives sont évaluées pour la distribution en station service (sous forme liquide, réformage local de carburant conventionnel ou de gaz naturel, voire électrolyse). A court ou moyen terme (2005-2010), la production et la distribution d'hydrogène seront réservées à des flottes captives (bus). Les contraintes du stockage embarqué d'hydrogène restent fortes malgré les progrès des dernières années.

Compte tenu des incertitudes pesant sur la disponibilité de l'hydrogène à court terme, deux options se dégagent pour les carburants, essentiellement fondées sur leur densité énergétique (figure 4), leur aptitude à être transformés en hydrogène par réformage et leur disponibilité :

- Le méthanol : il fait l'objet d'un débat intense entre constructeurs, équipementiers, pétroliers et chimistes. La disponibilité de véhicules fonctionnant avec le méthanol est annoncée par certains constructeurs pour 2004-2006.

- L'essence commerciale recueille actuellement le plus de faveurs, même si sa transformation en hydrogène est plus complexe qu'à partir de méthanol. La disponibilité immédiate de la logistique est vue comme un facteur indispensable de la réussite pour un nouveau concept de véhicule. Cependant, la mise au point d'un système de réformage demandera encore du temps et éventuellement, la définition d'un carburant spécifique, qui conduit à prévoir un démarrage de la filière guère avant 2010... si l'hydrogène ne s'impose pas d'ici là...

TotalFinaElf contribue à cette orientation à long terme de la transition vers le système hydrogène/pile à combustible :

- en développant des matériaux qui entreront dans la fabrication de composants essentiels de la pile via Atofina et ses filiales,
- en ayant établi en 2001 un accord de R & D avec Delphi Automotive Systems, premier équipementier automobile mondial, sur le réformage de combustible pour piles à oxyde solide permettant la production d'électricité embarquée comme auxiliaire de puissance ou à usage stationnaire,
- en évaluant, en partenariat, l'influence de la qualité des combustibles sur la performance et la durabilité de processeurs de combustibles qui produisent l'hydrogène requis par les piles,
- en contribuant à la mise en place d'infrastructures hydrogène (Californie, Allemagne),
- en suivant en permanence les évolutions des technologies concurrentes (microturbines, véhicules hybrides, nouvelles motorisations...).



G. Dupont-Roc



P. Schulz



P. Borg

Georges Dupont-Roc

est directeur de la mission Développement durable chez TotalFinaElf^a.

Philippe Schulz

est chef du Programme technologies chez TotalFinaElf^b.

Patrick Borg

est délégué recherche chez Atofina^c.

Michel Fouré

est directeur de la Recherche stratégique chez Atofina Chemicals Inc^d.

Daniel Le Breton

est adjoint au directeur délégué du Rafinage Marketing chez TotalFinaElf^e.



M. Fouré



D. Le Breton

^a 2, place de la Coupole, 92078 Paris La Défense.
E-mail : georges.dupont-roc@totalfinaelf.com

^b 2, place de la Coupole, 92078 Paris La Défense.
E-mail : philippe.schulz@totalfinaelf.com

^c Cours Michelet, 92091 Paris La Défense.
E-mail : patrick.borg@atofina.com

^d 900 First Avenue King of Prussia, PA 19406, États-Unis.
E-mail : michel.foure@atofina.com

^e Délégation France, 24 cours Michelet, 92069 Paris La Défense.
E-mail : daniel.le-breton@totalfinaelf.com