



Hydrogène et piles à combustibles

Problématique

Face à l'épuisement accéléré des combustibles fossiles et la menace des changements climatiques suite aux émissions à effet de serre provoquées par la combustion des combustibles fossiles, il est attendu que les énergies renouvelables, les économies d'énergie et l'efficacité énergétique occupent une place croissante dans les politiques énergétiques. L'utilisation de l'hydrogène à des fins énergétiques fait partie de cette tendance, l'hydrogène étant alors un vecteur énergétique dont l'impact écologique peut être faible, en fonction du mode de production.

Cette fiche décrit l'hydrogène, sa production et ses applications énergétiques principales, en particulier le moteur à hydrogène et la pile à combustible.

Principes de base

L'hydrogène (H_2) est l'élément chimique le plus simple. Très présent sur terre mais pas à l'état simple, il doit être séparé des éléments auxquels il est combiné. Autrement dit, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire, et utilisé dans des applications énergétiques (production de chaleur par combustion ou production d'électricité dans des piles à combustibles), il constitue un vecteur énergétique. Ainsi, il joue lui-même un rôle de stockage d'énergie. Il peut être brûlé ou converti en électricité dans une pile à combustible. L'impact écologique de son utilisation dépend donc de son mode de production (par exemple la production d'hydrogène par électrolyse a un impact écologique si le courant utilisé est d'origine renouvelable).

La consommation mondiale d'hydrogène est aujourd'hui d'environ 50 millions de tonnes par an. La majeure partie de la production est consommée localement jusqu'à maintenant. L'hydrogène est actuellement consommé principalement comme matériel de base dans l'industrie chimique et pétrochimique et dans le raffinage (synthèse de l'ammoniac, raffinage et désulfuration des hydrocarbures, synthèse du méthanol, etc.), mais aussi en métallurgie, dans l'industrie alimentaire (hydrogénation des graisses et des huiles), dans l'industrie verrière. Ses utilisations comme vecteur énergétique, objet de cette fiche, restent limitées, mais se développent.

Description technique

Production de l'hydrogène

Diverses méthodes sont utilisées pour la production industrielle d'hydrogène.

- *Vaporeformage d'hydrocarbures* notamment gaz naturel, méthane (le charbon peut être aussi utilisé par gazéification, conversion en méthane et ensuite réformage), voire de biocarburants : Cette méthode produit la dissociation de la molécule de l'hydrocarbure en hydrogène moyennant de la vapeur à haute température et pression en présence d'un catalyseur. Le rendement énergétique est de l'ordre de 40 à 45%. La méthode est utilisée par 90% de l'industrie mondiale de production de l'hydrogène.

Un inconvénient majeur de ce type de production est l'émission élevée de CO_2 , important gaz à effet de serre. La possibilité de capturer le CO_2 émis par la production d' H_2 , puis de le séquestrer (tout comme cela est envisagé pour les centrales de production d'électricité et certains procédés industriels) est à l'étude, mais soulève encore des questions de mise au point technologique, de rentabilité économique et d'acceptabilité (un projet en ce sens est prévu en Californie, où l'hydrogène sera produit à partir de 75 % de charbon et de 25 % de coke de pétrole, et l'hydrogène servira de combustible pour faire fonctionner une turbine à combustion et permettre la production de près de 250 MW d'électricité; près de 90 % du CO_2 produit dans le processus de gazéification, sera capté). Dans le cas de biocarburants produits de manière durable, l'impact environnemental du reformage est minimisé.

- *Vaporeformage de la biomasse*. Divers procédés, actuellement en cours d'expérimentation, concernent la gazéification de biomasse sur lit fixe ou lit fluidisé suivie par un vaporeformage. Ce procédé, industrialisé probablement autour de 2020, pourra permettre une production d'hydrogène quasiment neutre en CO_2 puisque le CO_2 émis lors de la production correspond aussi au CO_2 stocké par la biomasse lors de sa croissance
- *Électrolyse de l'eau* : L'électrolyse de l'eau (H_2O) est réalisée moyennant la dissolution d'un électrolyte en rendant l'eau conductrice. L'application d'un potentiel électrique continu entre deux électrodes immergées dans la solution fait ainsi que les électrodes attirent à elles les ions de charge opposée. L' H_2 et l' O_2 se libèrent ainsi dans l'eau.



Le rendement énergétique de l'électrolyse est fonction de divers paramètres (température, solution alcaline, potentiel électrique) et varie entre 50% et 70%. L'électrolyse pourrait être considérée totalement écologique si l'alimentation électrique provenait de sources renouvelables.

Un autre procédé, la photolyse de l'eau, encore à l'étude, consiste à utiliser les rayons X et les ultraviolets pour scinder l'eau en H_2 et O_2 , en utilisant des électrodes sensibles à la lumière immergées (par exemple, du dioxyde de titane). Le rendement de conversion reste encore faible, de l'ordre de 10%. Dans les années 70, lors de la réalisation du barrage d'Inga en République Démocratique du Congo, une gigantesque usine d'électrolyse avait été conçue pour produire de l'hydrogène qui aurait dû être transporté vers l'Europe par navire réfrigéré. Le projet ne fut jamais réalisé du fait des difficultés de construire un navire capable de transporter l'hydrogène sur de si longues distances.

Par ailleurs, un réacteur expérimental exploitant l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène par l'hydrolyse de l'eau a été mis en service en 2008 sur la plate-forme de recherche solaire d'Almeria en Espagne, dans le cadre du projet Hydrosol (<http://www.hydrosol-project.org/>)

- **Fermentation biologique** : Les procédés se basent sur le principe que les algues privées de soufre passent de la production d'oxygène (photosynthèse) à la production d'hydrogène. D'autres procédés se basent sur la fermentation (digestion anaérobie) de produits organiques par divers groupes de bactéries utilisant plusieurs enzymes. Les travaux se poursuivent pour améliorer le rendement de ces technologies.

Stockage, transport et distribution

L'hydrogène est un gaz très léger. Un enjeu important de son utilisation est la capacité de le stocker en toute sécurité. Diverses méthodes de stockage sont possibles.

- **Stockage sous forme de gaz comprimé** : Cette méthode est la plus répandue. L'hydrogène est comprimé généralement entre 350 et 700 bars ce qui permet d'atteindre une densité satisfaisante avec la résistance des matériaux des réservoirs. L'inconvénient réside dans l'énergie nécessaire à la compression.
- **Stockage sous forme de gaz liquéfié** : Le gaz est comprimé et refroidit à -253 °C sous 10 bars et stocké dans réservoirs à isolation thermique importante pour éviter l'évaporation. Cette technologie a une meilleure efficacité volumique que le stockage du gaz comprimé (70 kg/m^3 contre 10 kg/m^3 à 115 bars et 0 °C). Cependant, cet avantage est réduit par le volume important requis pour les réservoirs isolants. D'autre part, il est nécessaire dépenser une énergie importante pour passer en phase liquide : la liquéfaction consomme 30 à 40% du contenu énergétique du gaz ainsi qu'une perte importante est due à l'inévitable évaporation qui pénalise le stockage de longue durée.

- **Stockage dans les hydrures métalliques** : Ce procédé consiste à faire adsorber par des hydrures métalliques l'hydrogène sous forme gazeuse à haute pression et en refroidissant le composé métallique. Encore en développement, cette technique a l'inconvénient majeur du poids du stockage : le poids des adsorbants peut être aussi élevé que 800 kg pour stocker 100 litres d' H_2 .

Moteur à hydrogène

De nombreux prototypes de véhicules ont été mis au point, ainsi que des générateurs pour des applications fixes équipés de moteurs bi-carburant à combustion interne utilisant l'hydrogène (systèmes stationnaires de cogénération). L'hydrogène est stocké soit sous forme gazeuse dans un réservoir sous pression, soit sous forme liquide dans un réservoir cryogénique hautement isolé thermiquement.

Le fonctionnement du moteur n'est pas totalement écologique si la combustion a lieu en présence d'air car il y a alors production d'oxyde d'azote, ce qui n'est pas le cas si on utilise de l'oxygène pur.

Ces applications se heurtent à plusieurs difficultés. Tout d'abord, les contraintes associées au transport et à la distribution de l'hydrogène s'appliquent (voir ci-dessus). Notamment, il est nécessaire d'équiper les stations de service de réservoirs et de compresseurs spéciaux et, dans le cas d'hydrogène liquéfié, d'unités de liquéfaction et réservoirs cryogéniques. Ensuite, dans le cas des applications pour le transport, se pose la question du volume réduit de stockage dans le véhicule, ainsi que la nécessité de systèmes de sécurité importants dans les véhicules.

Une application particulière de l'hydrogène liquide concerne le secteur aéronautique : le moteur-fusée, mais aussi les turbo-réacteurs expérimentés pour l'aviation. Contrepartie de l'absence d'émission de CO_2 , l'émission plus importante de vapeur d'eau augmenterait la traînée visible derrière les avions, produisant une diminution possible de l'ensoleillement au sol. Les contraintes techniques liées au stockage de l'hydrogène à bord de l'avion persistent. À l'heure actuelle, aucun avion commercial ou militaire n'est équipé de moteurs à hydrogène.

Il faut aussi retenir la possibilité de mélanger le gaz naturel et l'hydrogène jusqu'à 20%. L'avantage de ce mélange (Hythane) est sa compatibilité avec les infrastructures existantes de transport, de distribution et d'utilisation du gaz. Il constitue un moyen de « lancer » la production et distribution d'hydrogène,

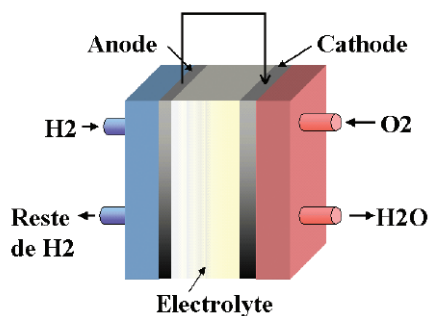
Pile à combustible

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la production de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un vecteur énergétique réducteur (par exemple, l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. La réaction chimique globale produit simultanément d'électricité, d'eau et de chaleur (Figure 1).

Tableau 1 : Les différents types de piles à combustibles

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alcaline (<i>Alkaline Fuel Cell</i>)	Pile à membrane d'échange de protons (<i>Polymer Exchange Membrane Fuel Cell</i>)	Pile à méthanol direct (<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>)	Pile à combustible à Acide Phosphorique (<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>)	Pile à carbonates fondus (<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>)	Pile à Oxyde Solide (<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>)
Electrolyte	Potasse	Membrane polymère	Membrane polymère	Acide phosphorique	Carbonate de métaux alcalins	Céramique
Température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂	Méthanol	H ₂	H ₂ ou autre (méthane, gaz de synthèse à partir du charbon, etc.)	H ₂ ou autre (méthane, gaz de synthèse à partir du charbon, etc.)
Oxydants	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles Appareils portables Cogénération Maritime	Portable	Stationnaire Cogénération pour Production centralisée d'électricité et chaleur applications industrielles et militaires.	Stationnaire Cogénération Production centralisée d'électricité et chaleur	Stationnaire Cogénération Production centralisée d'électricité et chaleur Production d'électricité auxiliaire dans les véhicules et maritime (climatisation, chauffage)
Puissance type	10-100 kW	<1 kW – 500 kW	< 1 kW – 100 kW	< 30 MW	< 1 kW – 1 MW	5 kW – 3 MW
Développement	Commercialisé/ Développement	Commercialisée/ Développement	Commercialisée/ Développement/	Commercialisée	Prototypes divers	Prototypes divers
Avantages	Simplicité Relativement peu coûteuse	Faible température de fonctionnement Large spectre de puissance	Méthanol liquide à température normale Pourrait bénéficier de l'infrastructure de distribution d'essence existante Possibilité de produire le méthanol à partir de déchets organiques et biomasse (gaz naturel actuellement)	Simplicité et portabilité	Rendement électrique élevé (60%) Possibilité d'utiliser divers carburants Possibilité de récupération de chaleur Utilisation de métaux non précieux pour les électrodes (moins coûteux)	Rendement électrique élevé (50 à 70%) Possibilité d'utiliser divers carburants Possibilité de récupération de chaleur Électrolyte solide (plus facile à gérer)
Inconvénients	Nécessite d'O ₂ Pollution par la potasse	Sensibilité au Co Coût élevé du catalyseur (platine)	Toxicité du méthanol	Température élevée requise même à l'arrêt pour éviter la solidification de l'électrolyte	Problèmes de corrosion	Problèmes de corrosion

Figure.1 Schéma de Pile à Combustible



Source : Anne-Sophie Corbeau

La pile à combustible fut découverte par l'Anglais William Grove en 1839, mais sa première utilisation industrielle fut dans les années soixante quand General Electric mis au point un prototype de 1 kW qui fut installé dans la capsule Gemini. Les raisons de ce délai depuis sa découverte furent les développements d'autres type de générateurs d'énergie électrique et le coût des matériaux initialement utilisés dans les piles à combustible. Divers types de piles à combustible ont été développés au cours des dernières années et sont actuellement sur les marchés ou en phase d'industrialisation. On compte actuellement 6 types de pile à combustible qui se différencient selon la nature de leur électrolyte, le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture, les combustibles utilisés et les domaines d'application (Tableau 1). Le méthane, méthanol ou l'éthanol peuvent aussi être utilisé mais un système de reformage est alors nécessaire pour produire l'hydrogène sauf si une pile à méthanol directe est utilisée.

La première utilisation des piles à combustibles est dans le secteur des transports : le(s) moteur(s) électrique(s) et les auxiliaires du véhicule sont piloté(s) par l'électricité produite par la pile à combustible. Les piles à combustible sont utilisées aussi comme générateurs stationnaires d'électricité et chaleur (cogénération décentralisée). L'alimentation en hydrogène, méthane ou méthanol est alors simplifiée car elle peut avoir lieu par gazoducs connectés à des réservoirs. Malgré la concurrence importante avec d'autres sources d'énergie (renouvelables notamment), ces applications stationnaires des piles à combustible sont en train d'entrer sur les marchés : chauffage central collectif de résidences (électricité, eau chaude, piscine, réfrigération) ; bâtiments administratifs, hôpitaux, piscines, maisons de retraite, centres commerciaux ; petites et moyennes entreprises en (électricité, vapeur, eau chaude, etc.) ; applications de secours ou de sécurité servant à alimenter des systèmes sensibles (centres informatiques, banques). Des municipalités éloignées peuvent aussi bénéficier de ces technologies (exemple de Bella Coola, au Canada http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/dimensions/numero4/bella_coola.html).

Finalement, l'utilisation dans le domaine du portable (téléphones mobiles et ordinateurs portables) est espérée prometteuse.

Résultats attendus et stratégies de mise en œuvre

Les motivations du développement de l'économie de l'hydrogène sont : la réduction des émissions de CO₂, lorsque l'hydrogène est produit de manière appropriée ; la sécurité énergétique, l'hydrogène facilitant la réduction de la dépendance face au pétrole dans ses applications dans le secteur du transport et dans la cogénération stationnaire, mais aussi pouvant encourager le recours aux énergies renouvelables lorsque produit par électrolyse ou à partir de biomasse durable ; le développement économique et l'emploi pour les régions productrices de technologies, d'hydrogène, et actives en recherche et développement.

Ainsi, selon le projet européen HyWays, il est estimé que l'introduction de l'hydrogène dans le système énergétique pourrait réduire la consommation totale de pétrole des transports routiers de 40% d'ici 2050. Mais l'analyse indique également que des obstacles importants doivent d'abord être surmontés, tant du point de vue économique et technologique qu'institutionnel.

Selon les analyses de l'Agence internationale de l'énergie, l'hydrogène pourrait pénétrer le marché après 2030 dans un contexte mondial de réduction des gaz à effet de serre (scénario BLUE), avec presque 200 Mtep consommées dans le transport, et 97 Mtep consommées dans des systèmes de cogénération à petite échelle dans les bâtiments. Toutefois, de tels résultats dépendent des réductions des coûts, de l'amélioration de la performance des technologies de production, transport, distribution et usage dans les 20 prochaines années.

Les coûts représentent une des barrières actuelles au développement de l'économie de l'hydrogène, en comparaison avec les autres formes d'énergie telles que le gaz naturel ou l'essence. Il est espéré qu'à partir de 2020 environ, les avancées de la recherche combinée à la production de masse des piles à combustible, des systèmes de production d'hydrogène, de stockage ainsi que la distribution pourront faire diminuer considérablement les coûts d'utilisation des véhicules à piles à combustible (coût des piles aujourd'hui supérieurs à 1000 \$/kW) qui pourront devenir compétitifs par rapport à ceux qui sont avec moteurs thermiques conventionnels. Les barrières technologiques pour des applications stationnaires (cogénération en particulier) et pour les portables étant moindres, la commercialisation de ces technologies pourrait être plus rapide que dans les transports.

Le seul coût de production de l'hydrogène est de 15 à 30\$/GJ actuellement, selon le mode de production et selon les prix du gaz, du charbon ou de l'électricité.

Tableau 2. Scénario 2020 de production, marchés et prix des piles à combustible dans l'Union Européenne

	Applications électronique portable	Générateurs portables	Applications cogénération stationnaire	Véhicules
Unités vendues/an UE en 2020	±250 millions	± 100000 (± 1 GWe)	100000 à 200000 (2-4 GWe)	0.4 à 1.8 millions
Vente cumulative UE en 2020	n.a.	± 600000 (± 6 GWe)	400000 à 800000 (8 - 16 GWe)	1 à 5 millions
État du marché UE en 2020	établi	établi	croissant	marché de masse
Puissance moyenne par équipement	15 W	10 kW	< 100 kW (micro cogen) > 100 kW (cogen industrielle)	80 kW
Objectif de coût par système	1-2 €/W	500 €/W	2000 €/kW (micro) 1000 €/kW (industrielle)	<100 €/kW (100.000 unités/an)

Source : ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/h2fc_review_days_en.pdf

D'importants **programmes de recherches** sont en cours. Par exemple, la Commission Européenne a créé l'Initiative Technologique Commune sur l'Hydrogène et les Piles à Combustible. D'importantes recherches ont lieu aussi aux États-Unis (notamment par le *National Renewable Energy Laboratory*), au Canada (Institut d'Innovation en Piles à Combustible) et au Japon (*Trade and Industry Ministry*, et *New Energy and Technology Industrial Organization*). La recherche est actuellement concentrée sur les méthodes de production de l'hydrogène, les matériaux et leur durabilité, les divers types de piles ainsi que les stockages (comprimé et liquéfié) et l'infrastructure de distribution. Un autre enjeu est l'interaction avec les réseaux électriques qui devront fournir l'énergie pour la production de l'hydrogène dans le cas spécifique de l'électrolyse.

Les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible pourraient trouver un marché important dans **les pays en développement**, notamment dans le secteur des transports des pays émergents et à forte population comme l'Inde et la Chine. Par exemple, **l'Inde** qui utilise depuis longtemps à large échelle le gaz naturel comprimé (CNG) pour l'alimentation des moteurs à combustion pour faire rouler les autobus et les camions, voire les pousse-pousse, est en train d'expérimenter des mélanges avec l'hydrogène afin de réduire les émissions de CO₂. Le pays a également développé une feuille de route pour le développement de l'hydrogène, encadré par le Ministère des énergies nouvelles et renouvelables. Il faut noter que l'Inde utilise déjà le mélange gaz naturel / hydrogène (hythane). Bien sûr, de tels

développements ne doivent pas réduire l'importance à accorder à l'amélioration de l'organisation des transports, notamment collectifs, pour favoriser la mobilité. La Société financière internationale de la Banque Mondiale a appuyé, en 2003, la fourniture de 400 piles à combustibles pour une puissance totale de 2 MWe dans plusieurs villages éloignés en Afrique du Sud. Il n'a pas été possible de trouver les résultats de ce projet. **La Chine, le Brésil et l'Afrique du sud** investissent également dans la recherche et le développement scientifiques et technologiques portant sur les piles à combustible et l'infrastructure associé. Par exemple, l'Afrique du Sud a annoncé sa volonté de développer la production nationale de catalyseurs à base de platine pour les piles à combustibles hydrogène, l'Afrique du Sud possédant la grande partie des réserves de platine du monde. Les **pays du Maghreb**, notamment l'Algérie, s'intéressent aussi à l'option hydrogène comme un moyen de stockage des sources d'énergies renouvelables. Des réflexions se sont tenues entourant la possibilité d'un projet fédérateur de production d'hydrogène à partir d'énergie solaire pour les besoins industriel et énergétique du bassin méditerranéen.

Au niveau européen, la « Facilité ACP-UE pour l'Energie » (EuropAid) est un instrument de co-financement pour soutenir des projets améliorant l'accès aux services énergétiques durables et abordables dans les pays en développement. Aucun des 74 projets de la première Facilité Énergie lancée en 2006 ne comprend des technologies relatives à l'hydrogène. Les résultats de la seconde Facilité (2009-2013) ne sont pas encore diffusés.

Conclusion

L'hydrogène est considéré comme un élément fondamental, pour le futur énergétique de l'humanité, en tant que vecteur énergétique, stockage des énergies renouvelables et possible contributeur aux réductions de gaz à effet de serre selon son mode de production. Ses applications dans les piles à combustible pourraient à terme substituer moteurs et générateurs autant dans le transport que dans le stationnaire. De nombreux obstacles doivent encore être franchis, tant technologiques qu'économiques, pour en permettre une importante diffusion (méthodes de production non polluante, stockage, matériaux, structures et fabrication des piles, etc.).

Références

Agence internationale de l'énergie : <http://ieahia.org/> et <http://www.iea.org/techno/etp/>

Association Française de l'Hydrogène
<http://www.afh2.org/f/index.php>

Cartes interactives des stations de distribution d'hydrogène
<http://www.h2stations.org/>

Europe : Initiative Technologique Commune sur l'Hydrogène et les Piles à Combustible
http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm

Europe : projets de recherche réalisés
http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/fch/support/index_en.htm

Europe : Projets de démonstration d'autobus
<http://www.h2moves.eu/>

Gvt du Canada, le progrès de l'hydrogène et des piles à combustibles
<http://www.h2fcprogress.collaboration.gc.ca/index-fra.htm>

Industrie Canada
<http://www.ic.gc.ca/eic/site/hfc-hpc.nsf/fra/accueil>

Observatoire français de l'hydrogène et des piles à combustible
<http://observ-h2.fr/>

Projet HyWays
<http://www.hyways.de/>

Projet HyChain, Apprentissage en ligne
<http://www.hychain.org/e-learning/>

Site internet d'information Notre Planète
<http://www.notre-planete.info/ecologie/energie/hydrogene.php>

Techniques de l'ingénieur (enregistrement gratuit)
<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/genie-energetique-ti200/combustible-hydrogene-be8566/>

Les fiches techniques PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie) sont publiées par l'IEPF.

Directrice de la publication :
Fatimata DIA Touré, directrice, IEPF

Comité éditorial :
Marcel Lacharité, directeur adjoint, IEPF
Jean-Pierre Ndoutoum, responsable de projets, IEPF

Supervision technique :
Maryse Labriet, ENERIS Environnement Energie Consultants

Auteur :
Fulcieri Maltini, FM Consultants Associates, France
fulcierimaltini@gmail.com

Édition et réalisation graphique :
Code Jaune, design et créativité



Institut de l'énergie et de l'environnement
de la Francophonie
IEPF

L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF). Il est né en 1988 de la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, cette action a été élargie à l'environnement. Basé à Québec (Canada), l'Institut a aujourd'hui pour mission de contribuer au renforcement des capacités nationales et au développement de partenariats dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Institut de l'énergie et
de l'environnement de la
Francophonie (IEPF)

56, rue Saint-Pierre, 3^e étage
Québec G1K 4A1 Canada
Téléphone : 418 692-5727
Télécopie : 418 692-5644
Courriel : iepf@iepf.org
Site Internet : www.iepf.org

Imprimé sur papier contenant 100 % de fibres recyclées postconsommation.



Décembre 2010

Étude de cas 1

Autobus à hydrogène (Projets CUTE et Hyfleet : CUTE)

Raisons et description du projet

La Commission Européenne a lancé en 2001 le projet CUTE (*Clean Urban Transport for Europe*), suivi du projet Hyfleet : CUTE de 2006 à 2009, avec l'objectif de démontrer la faisabilité du transport public urbain moyennant des autobus propulsés par combustion interne à hydrogène ou par moteurs électriques à pile à combustible à l'hydrogène. 47 bus à hydrogène, dont 33 à pile à combustible et 14 à combustion interne ont été mis en opération dans 10 villes européennes, à Pékin en Chine et à Perth en Australie. Dans chaque ville, l'infrastructure pour le stockage et le ravitaillement de l'hydrogène a été développée.

Le projet Hyfleet : CUTE a été développé en complémentarité avec deux autres projets de promotion de l'Hydrogène dans les transports : le projet ZERO REGIO qui développe une flotte de voitures alimentées en hydrogène par des stations services en Italie (Alto Adige et Lombardie) et en Allemagne (Rhin-Main), et le projet transversal : *Hylights* qui répertorie les enseignements tirés de ces 3 projets de démonstration. Ces projets ont été suivis par le projet CHIC (*Clean Hydrogen in European Cities*) lancé le 4 novembre 2010 qui regroupe 5 villes européennes avec Aargau (Suisse), Bolzano (Italie), London (GB), Milan (Italie), et Oslo (Norvège).

Figure 2 : Autobus à pile à Hydrogène en service à Madrid



Source : Projet CUTE

Stratégie de mise en œuvre et financement

Les projets ont été financés par des partenariats impliquant l'Union Européenne, les municipalités, les fournisseurs d'autobus et les industriels chargés de l'infrastructure de ravitaillement et distribution. Par exemple, le dernier projet CHIC a reçu un financement européen de 26 Millions € pour un coût total de 81,8 millions € dont : infrastructures: 20.37 %, bus hydrogène: 75.01 %, évaluations et tests: 1.70 %, déploiement: 1.89 %, management du projet: 1.03%.

Comme exemple d'application, dans la ville de Hambourg, l'infrastructure de production de l'hydrogène et de ravitaillement est installée dans le dépôt de la société municipale. L'électricité certifiée d'origine renouvelable (photovoltaïque et éolienne) fournie à travers le réseau à moyenne tension, alimente un électrolyseur et un pressuriseur qui produit de l'hydrogène pur à la pression de 450 bars et qui est stocké dans un réservoir sur le site. Le remplissage de 40 kg d'hydrogène dans le réservoir du bus, de la durée de 10 minutes, lui permet une autonomie à pleine charge de 250-300 Km.

Il faut noter un petit ajout nécessaire sur les autobus : un système de génération de sons légers semi-musicaux mais assez audibles pour alerter les piétons du passage du véhicule car la pile à combustible ne génère aucun son.

Résultats techniques et financiers

Les résultats sont les suivants : 170 000 heures de fonctionnement cumulées pour l'ensemble des bus, plus de 2,6 millions de kilomètres parcourus, 10 stations service ont été construites, dont 4 produisant l'hydrogène par électrolyse sur site (avec des énergies renouvelables) qui ont fourni plus de 555 tonnes d'hydrogène, aucun incident notable causé aux utilisateurs ou à l'environnement, environ 1 million de litres de diesel économisés par l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie pour cette flotte de bus. Les municipalités souhaitent continuer l'expérience.

Conclusion

Cette expérience a donc donné des excellents résultats et a démontré la faisabilité du transport public avec une propulsion exclusivement à hydrogène, la possibilité de production d'hydrogène localement en utilisant des énergies renouvelables ainsi que la sécurité du système. Il reste à réduire les coûts des équipements qui sont aujourd'hui supérieurs à ceux des moteurs à combustion afin de rendre compétitive cette technologie et réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre. Les progrès technologiques des prochaines années seront cruciaux.

L'utilisation des autobus se poursuit dans les villes partenaires de ces projets, et se développe dans de nouvelles villes, notamment au sein du nouveau projet CHIC.

Références

Projet HyFleet
<http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/>
 Ensemble des projets de démonstration en Europe
<http://www.h2moves.eu/> incluant les projets de Hyfleet CUTE (bus), ZERO REGIO (voitures) et Hylights (leçons apprises).
 Projet CHIC <http://chic-project.eu/>

Étude de cas 2

Chauffage de logements sociaux en France

Raisons et description du projet

L'entreprise de services énergétiques Dalkia, filiale de Veolia Environnement et d'EDF, a conçu un prototype de pile à combustible pour chauffer un ensemble de 283 appartements en région parisienne, de type « logement social ». Les dimensions de la pile, baptisée CELLIA, sont de 9 mètres de long sur 4 de haut et un poids total de 28 tonnes. C'est la première pile à combustible de grande puissance pour ce type d'application, et elle est prévue développer une puissance électrique de 230 kWh et une puissance thermique de 180 kWh pour chauffage et eau chaude, permettant de couvrir près de 20% des besoins des occupants en chauffage et eau chaude sanitaire.

Le projet vise l'étude du comportement de la pile sur une durée longue (6 ans minimum) afin de démontrer la viabilité technique de cette technologie (performances techniques, atouts environnementaux, coûts de maintenance, fonctionnement des composants et longévité de la pile). Il permet aussi le développement de l'expérience nécessaire à faire progresser la recherche sur l'utilisation de la pile à combustible appliquée au chauffage de logements.

Figure 4 : Pile CELLIA



Source : <http://www.cellia.fr/>

Stratégie de mise en œuvre et financement

Basée sur la technologie MCFC (carbonates fondus), la pile à combustible utilise l'hydrogène du gaz naturel et opère à une température de 600 °C. Elle est fournie par l'Allemand MTU-CFC Solutions et l'assembleur de l'unité de cogénération finale est Veolia environnement. Couplée à une installation existante classique, elle fonctionne du 1er novembre au 31 mars dans le cadre d'un contrat de rachat de l'électricité produite par EDF.

Ce prototype a coûté environ 7 millions €, alliant fonds publics et privés : Dalkia 1,6 M€, l'Office public d'aménagement et de construction de Paris (OPAC) 1 M€, le Conseil Général d'Ile-de-France 2 M€, l'Union Européenne 1,5 M€, ainsi que l'ADEME et EDF.

Résultats techniques

La source d'énergie primaire est l'hydrogène, obtenu par reformage du gaz naturel. L'installation a fourni du chauffage et de l'eau chaude à tous les occupants de l'immeuble depuis mars 2007. Elle a déjà opéré plus de 5 100 heures et produit plus de 806 MWh d'électricité et environ 374 MWh de chaleur. Le surplus d'électricité généré est réinjecté dans le réseau public, permettant une réduction annuelle des frais de chauffage de l'ensemble du bâtiment de 10 % en moyenne. La pile à combustible CELLIA est prévue émettre 30 % de CO₂ de moins qu'une installation classique (cycle combiné chaudière gaz + turbine vapeur).

Conclusion

Malgré ses avantages, la technologie reste encore très coûteuse pour des applications de forte puissance. L'objectif des industriels du secteur est de diviser le coût d'investissement par 10 en 10 ans. D'autres projets existent en France et en Europe, qui se distinguent néanmoins par leur puissance plus faible.

Références

<http://www.cellia.fr/>
http://www.notre-planete.info/actualites/actu_2281_cellia_pile_combustible_habitat.php