



Jérôme ADNOT (N72)



Jean-Louis RENAUDOT (N85)

Introduction au dossier "Piles à Combustible"

La pile à combustible rencontre deux rêves de nos contemporains*, qui pourraient éviter deux cauchemars qui nous guettent :

- la voiture propre, à l'échappement de laquelle on ne trouve que de la vapeur d'eau ; le cauchemar ce serait six milliards de voitures rejetant nos niveaux actuels de CO₂ et de gaz acides ;
- l'électricité sans lignes et sans centrales ; le cauchemar serait de devoir doubler les lignes et centrales existantes pour faire face à nos besoins de confort.

On en rêve tellement que l'on oublie :

- ❶ les limitations actuelles de la technique ;
- ❷ la nécessité de trouver quelque part une énergie primaire (la pile est un convertisseur) ;
- ❸ la masse de l'engin et de son stockage de combustible.

La réunion débat du 19 octobre 2000 organisée par le Club Energie-Mines a réuni un industriel et un chercheur, dont le dialogue reproduit ci-après souligne bien les limites de la technique.

L'article de Joseph BERETTA vous indiquera quelle technologie devrait l'emporter (en énergie primaire au moins) sur le marché automobile.

L'article de Alain GENET et Alain CURTIL repère quant à lui un créneau permettant de résoudre les problèmes de stockage, celui des bus et trolleys. Il vous annonce également une expérimentation très prochaine à Paris.

Chez les particuliers et dans les bâtiments tertiaires, la cogénération se développe. La valorisation locale de la chaleur permet de dépasser aisément le rendement de Carnot et de valoriser 80 à 90% de l'énergie primaire. Du point de vue électrique on rejoint le nouveau modèle de la "Production répartie sur le territoire" qui se nourrit également de dérégulation et de dématérialisation, avec de gros besoins en télécommunications. Quelque part sur cette route se trouve l'expérimentation de Chelles (77) décrite par Philippe MATHEVON.

Grâce à Corinne SUSINI, Jean THEVES et Eric BRESSOT-PERRIN nous avons des nouvelles fraîches du pays en pointe sur la technologie : le Canada. Le choix d'un pays de se spécialiser ainsi sur cette technologie nous interroge : pourquoi pas nous ? surtout nous qui avons su faire de tels choix de politique énergétique il y a quelques dizaines d'années.

Rêve contemporain, la pile à combustible n'a pas moins de chances de devenir une industrie que n'en avait le nucléaire des années 60. Plutôt plus !

* surtout s'ils sont ingénieurs !

Le réseau français "piles à combustible"

Le réseau technologique "Piles à combustible" a été lancé en Juin 1999, avec pour mission de mettre en place une technologie piles à combustible commercialement viable en France.

Le réseau s'organise autour d'équipes de recherche et de développement issues du monde industriel et de leurs directions scientifiques et techniques (grands groupes, PME/PMI, ingénieries) ou du secteur public (universités, organismes de recherche, écoles d'ingénieurs). Le réseau est organisé autour d'un Comité d'orientation, d'un bureau et d'une cellule d'animation et de coordination.

A la suite d'un appel à propositions, plus de cent équipes proposaient une cinquantaine de projet. Après regroupement et recadrage, ce sont 34 projets qui finalement ont été proposés à la labellisation du réseau. Le travail d'expertise et d'instruction par les organismes financeurs (MR, MEFI, ADEME) a occupé l'essentiel de l'année 2000. A cette échéance, ce sont 26 projets qui ont été labellisés, pour un montant d'aide publique d'environ 140 MF ce qui représente plus de 350 MF d'activité de R&D mobilisés.

Deux séminaires ont également été organisés en août 1999 et en juin 2000, qui ont réuni les principaux acteurs impliqués dans le développement des piles à combustible.

L'appel à proposition n'est pas le mode privilégié d'intervention du réseau. En effet, il repose sur une logique de type "Eureka", à savoir qu'il s'agit d'une instruction ouverte en continu de dossiers proposés par des équipes regroupant intérêts scientifiques et intérêts industriels. Le recours à des appels à proposition pourra cependant être activé s'il apparaît que des points critiques sont insuffisamment pris en charge.

Pour en savoir plus, contacter la cellule d'animation du réseau :

ADEME • 27, rue Louis Vicat 75737 PARIS Cedex 15
Tel. 01.47.65.21.74 • Fax. 01.40.95.74.53
A l'attention de Daniel CLEMENT

Compte rendu de la
Conférence organisée par
le Club Energie-Mines
du jeudi 19 octobre 2000

Piles à Combustible : Techniques et avenir

Cette conférence, la quatrième du Club, a réuni deux spécialistes avec deux visions complémentaires :

- **M. Jean-Pierre Hauet**, Vice-Président d'ALSTOM Technology, a présenté la vision d'un grand acteur de l'énergie sur l'état de l'art et les perspectives industrielles ;
- **M. Patrick Achard**, du Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris, à Sophia Antipolis, a participé à un projet, coordonné par Renault, de réalisation d'un véhicule expérimental alimenté par une pile à combustible.

La conférence a été animée par François GIGER

Jean-Pierre Hauet rappelle d'abord le principe de fonctionnement de la Pile à Combustible (PAC).

Il s'agit d'un dispositif électro-chimique qui convertit l'énergie d'une cohésion moléculaire en électricité. Concrètement, l'appareil consiste en un électrolyte séparant deux électrodes ; celles-ci sont poreuses, offrant ainsi des surfaces de réaction importantes entre le combustible et l'oxydant. Le fonctionnement se fait à une température fonction de l'électrolyte. En plus de l'énergie électrique, la

réaction produit également de la chaleur.

Le schéma de la figure 1 illustre ce principe avec l'exemple de la pile à membrane à échange de protons (PEM : proton exchange membrane). Le combustible est l'hydrogène, la pile consomme aussi de l'oxygène, et rejette de l'eau.

Il existe d'autres types de PAC, qui se distinguent par l'électrolyte utilisé : voir tableau ci-dessous.

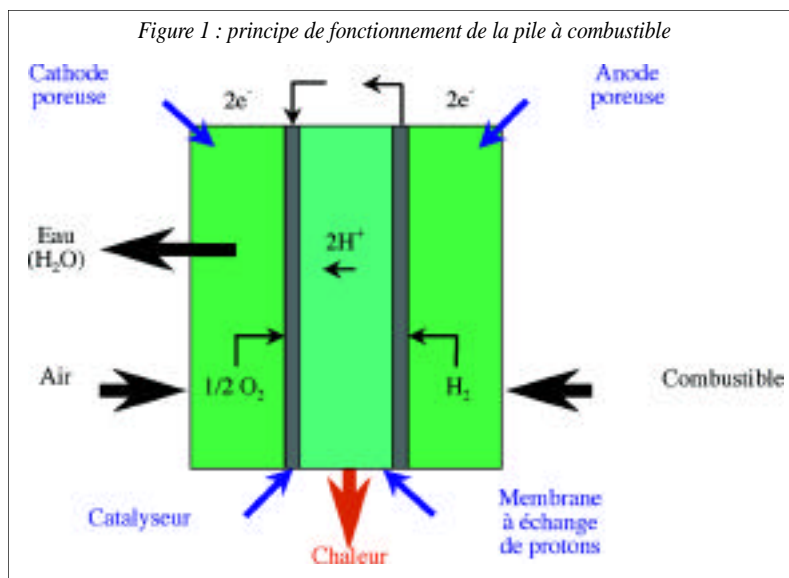
Les piles à combustible présentent plusieurs avantages :

- c'est une source d'énergie propre, puisqu'elle ne produit que de l'eau, et donc ne rejette ni polluant, ni même CO₂ (néanmoins l'hydrogène utilisé provient du réformage de méthane, qui, lui, rejette du CO₂) ;
- elle permet une production d'énergie autonome, pouvant assurer l'alimentation de sites isolés ;
- un rendement élevé voire très élevé si on valorise la chaleur produite.

La figure 2 (page suivante) situe les PAC parmi les autres formes de génération d'électricité, en termes de rendement et de puissance unitaire.

Aujourd'hui Alstom porte l'essentiel de ses efforts sur les piles de type PEM. Leur rendement peut théoriquement atteindre 70 à 80% en production combinée (électricité + chaleur). Ce rendement élevé doit toutefois être considéré avec prudence, car la chaleur produite en même temps que l'électricité n'est valorisable que pendant certaines périodes de l'année, et le réformeur génère des pertes significatives.

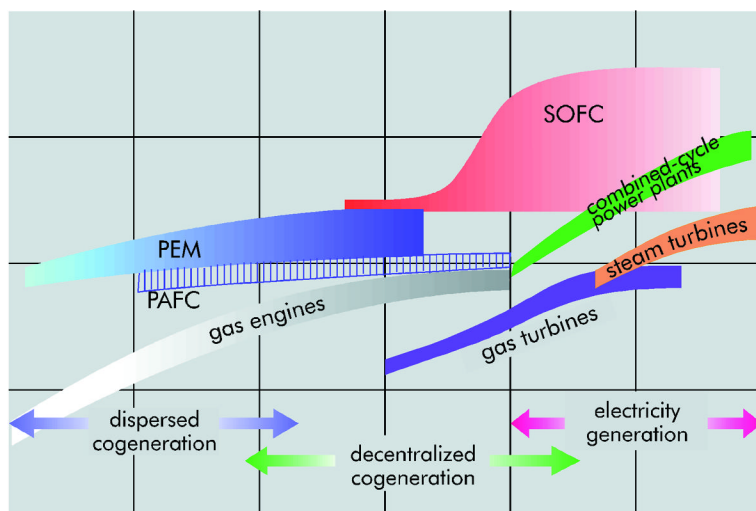
Alstom a déjà réalisé en Europe des uni-



TYPE	Electrolyte	Température (°C)	Combustible	Rendement électrique (%)
PEM	polymère	100	H ₂	40
PAFC	acide phosphorique	200	H ₂	40
MCFC	Li/K carbonate	650	H ₂	50
SOFC	zirconium	800-1000	CH ₄	50-55

Tableau des PAC

Figure 2 : comparaison du rendement des différentes formes de génération d'électricité



tés pilotes de taille moyenne (250 kW) adaptées à une production décentralisée.

Alstom s'intéresse également à la technologie SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), qui se caractérise par une température de fonctionnement plus élevée (800 à 1000 °C), et donc un rendement plus élevé atteignant 50% en cycle simple, mais aussi la possibilité de réformer les hydrocarbures dans la pile et donc de fonctionner directement à partir du gaz naturel. Le rendement en cycle combiné avec turbine à gaz dépasse 70%. Cette technologie est moins avancée, et les systèmes actuellement en démonstration se limitent à quelques dizaines de kW. L'objectif de puissance économiquement rentable est de quelques mégawatts.

Des applications embarquées sont également envisageables, mais Jean-Pierre Hauet les voit dans le ferroviaire et le maritime plutôt que dans le transport routier.

Enfin, pour que la pile à combustible à hydrogène puisse donner lieu à des applications répandues, il faudra résoudre le problème du transport et du stockage de cet hydrogène. Le stockage en phase gazeuse ou en phase liquide posant d'énormes problèmes, d'autres pistes sont aujourd'hui explorées, la plus prometteuse étant le stockage dans les fullerènes (nanotubes de carbone). L'utilisation directe, dans la pile, de méthanol ou d'hydrocarbures, serait à cet égard un avantage.

En conclusion, Jean-Pierre Hauet indique que si l'avenir de la pile à combustible est loin d'être assuré, l'enjeu est cependant suffisamment important pour qu'Alstom s'y

intéresse fortement. La pile à combustible est l'un des rares systèmes de production d'énergie décentralisée qui pourrait occuper, dans 15 ou 20 ans, une part de marché de 10 à 20% de l'électricité produite dans le monde.

Patrick Achard commence son exposé en rappelant le diagramme des énergies, montrant que la PAC prend, pour produire l'électricité, le chemin le plus direct, donc le plus séduisant pour l'esprit.

Il présente le projet FEVER, Fuel Cell Electric Vehicle of Extended Range, projet de développement d'une voiture à pile à combustible financé par des fonds européens. Les partenaires de ce projet, conduit de 1994 à 1998, étaient les suivants :

- Renault, coordinateur du projet, avec Volvo pour l'épauler,
- Air Liquide, pour ce qui concerne le stockage d'hydrogène liquide,
- Ansaldo, pour le module de motorisation, qui abandonnera ce projet en cours de route,
- De Nora, pour la fabrication des piles à combustible (3 modules de 10 kW)
- l'EMP, pour les essais et développements en laboratoire ; Patrick Achard responsable.

Si la technique des piles à combustible de type PEM, utilisée dans ce projet, est relativement bien maîtrisée, son intégration dans un véhicule a nécessité la résolution de

nombreux problèmes annexes :

- Le problème du stockage de l'hydrogène, déjà évoqué par M. Hauet, a été résolu par une technique cryogénique. 7 kg d'hydrogène permettent une autonomie de 500 km, mais l'encombrement total du réservoir est de 300 litres !
- En sortie de la pile, un convertisseur 90/250 V, très volumineux, a dû être ajouté.
- Enfin, dans le véhicule, la chaleur dégagée par la PAC doit être évacuée. La température de fonctionnement n'étant que de 70°C, ce qui est bas par rapport aux PAC en général, il a fallu insérer d'importants échangeurs de chaleur.

Cela explique que ce projet de motorisation par pile à combustible, initialement prévu sur une Clio, s'est finalement réalisé sur une Laguna break, ne pouvant transporter que le conducteur, sans passagers ni bagages ! Patrick Achard mentionne un autre problème technique typique des piles à combustible : la pression élevée à laquelle il faut comprimer l'air (à 4 bar la compression consomme 30% de l'énergie produite ! Il faut donc faire des efforts pour réduire cette pression, donc fabriquer des membranes plus fines et plus performantes). Il faut encore améliorer la distribution des gaz au niveau des matériaux d'électrode.



Figure 3 : vue arrière du véhicule FEVER

Enfin, au-delà des problèmes techniques, les difficultés vécues au cours du projet pour obtenir des DRIRE ou des organismes spécifiques les autorisations nécessaires en matière d'utilisation d'hydrogène, dans le laboratoire comme sur la voiture elle-même, illustrent quelques obstacles actuels à une utilisation répandue des PAC.

Finalement le projet a abouti, la voiture a roulé avec une vitesse maximum de 120 km/h. Comme aucun élément n'a été optimisé, la marge de progrès paraît importante. Ce véhicule n'a pas été utilisé au-delà de cette démonstration, mais Renault continue ses travaux de recherche sur le véhicule à



de gauche à droite : Patrick ACHART, François GIGER, Jean-Pierre HAUET

pile à combustible. Aux Etats-Unis, le double avantage des piles à combustible - rendement élevé et émission zéro - suscite beaucoup d'intérêt, notamment auprès du CARB, le California Air Resource Board, et une plate-forme d'essais multi-véhicules est actuellement en cours de démarrage en Californie, avec la participation des grands constructeurs automobiles.

Pour progresser dans la voie des piles à combustible, Patrick Achart, comme Jean-Pierre Hauet, insiste sur deux sujets connexes, sujets de deux thèses actuellement en cours sur le site de Sophia-Antipolis de l'Ecole des Mines de Paris : l'une concerne la production de l'hydrogène par réformage, et l'autre concerne le stockage de l'hydrogène dans les nano-structures de carbone. Souhaitons beaucoup de succès aux deux thésards !

La conférence a suscité de nombreuses questions, dont nous ne reproduisons que les principales :

❶ Quel est l'appel de l'industrie automobile ?

Aujourd'hui il est faible, et la recherche

s'oriente plutôt vers les applications fixes. Quant aux applications mobiles, Jean-Pierre Hauet les voit plutôt dans les trains et tramways, où l'utilisation des PAC permettrait de supprimer les caténaires, que dans l'automobile. Néanmoins si la pression écologique s'accroît, l'automobile produisant 10 fois plus de CO₂ que le train par km-voyageur, l'intérêt pour les applications automobiles devrait croître en conséquence. Le grand défenseur de la PAC dans l'automobile aujourd'hui est Mercedes, qui annonce des véhicules pour dans quelques années.

❷ Quelles sont les sources d'hydrogène ?

L'hydrogène est actuellement obtenu à partir de méthane par réformage. Le CEA mène des recherches sur la production par hydrolyse.

❸ Quelle est la motivation des acheteurs actuels de PAC ?

Quatre installations réalisées par Alstom sont aujourd'hui en cours d'exploitation. La motivation des acheteurs, en tant que producteurs d'électricité, est de se familiariser avec une nouvelle technique. Il faut commencer tôt, en particulier en ce qui concerne la maintenance, car si un jour les PAC se

généralisent, ceux qui en auront acquis une plus longue expérience seront avantagés.

❹ Quelles tailles d'installations peut-on raisonnablement envisager ?

Les PAC sont adaptées à des unités de production décentralisées, de l'ordre de 200 kW à 5 voire 10 MW. C'est le créneau potentiel visé par Alstom. On peut envisager également une petite unité de cogénération de 7 à 9 kW alimentant une maison isolée.

❺ Qu'en est-il de la sécurité des véhicules fonctionnant à PAC ?

Aucun système n'est parfait, et des progrès seront faits pour les véhicules à PAC en matière de sécurité comme on en a fait par exemple pour éviter tout contact accidentel avec le rail d'alimentation dans le domaine des tramways.

Le Club Energie-Mines tient à remercier MM. Hauet et Achart pour leurs interventions et à les assurer du vif intérêt qu'elles ont suscité, et vous donne rendez-vous pour la prochaine conférence ...

*Compte rendu réalisé par
Robert Avezou (P58) et
Eric Sachot (P90).*



Joseph BERETTA

Responsable du domaine
Electrochimie,
Electromécanique,
Electronique et systèmes
au sein de la Direction de
la Recherche et de
l'Innovation Automobile /
PSA Peugeot Citroën

La voiture Pile à Combustible : rêve ou réalité ?

Introduction

L'innovation et le progrès dans l'automobile dépendent d'une multitude de facteurs de nature très diverse. Cependant au moment de prendre les décisions d'introduction en série, on ne peut choisir que des concepts qui sont disponibles et validés et, en particulier dans ce que la science et la technologie ont eu la prévoyance d'amener à maturité. La pile à combustible est une de ces technologies émergentes qui pourrait si elle tient ses promesses bouleverser voire même révolutionner l'automobile de demain.

La pile à combustible et la problématique de l'automobile du XXI^e siècle

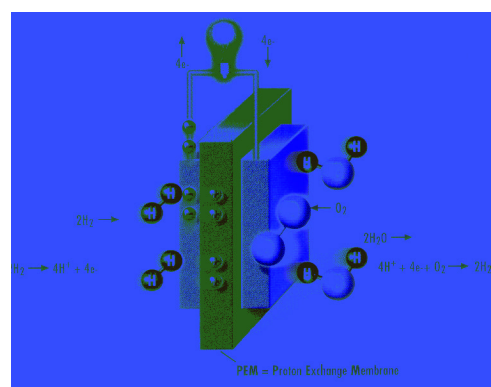
L'industrie automobile est entrée depuis dix années dans une évolution très rapide dans le sens d'une maîtrise de ses émissions pour diminuer de façon importante son impact sur l'environnement. Elle est également confrontée à sa contribution à la production de gaz carbonique et s'implique dans des programmes lourds de réduction des consommations.

La pile à combustible transformant directement l'énergie chimique en électricité apporterait la réponse technique la plus intéressante à cette problématique environnementale puisque parmi les modes de propulsion alternatifs, la pile à combustible est celui qui offre le plus fort potentiel d'évolution. Elle présente un rendement élevé et peut être alimentée avec une palette de carburants très différents.

Les principes de base de la pile à combustible

Une pile à combustible permet d'obtenir directe-

ment un courant électrique par une réaction électrochimique faisant intervenir d'une part sur une électrode l'oxydation d'un combustible (l'hydro-



gène est le combustible idéal) et d'autre part sur l'autre électrode la réduction de l'oxygène. Une cellule élémentaire est représentée sur la figure suivante ; il suffit alors d'empiler les cellules en série pour réaliser le générateur. La tension moyenne d'une cellule est de 0,6 V, le nombre de cellules définit la tension et la surface de la cellule le courant du générateur.

Les technologies qui sont plus particulièrement adaptées à l'automobile utilisent un électrolyte solide:

- La technologie "Proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC" possède les meilleures performances en terme de puissance; sa température de fonctionnement est de 20 à 80°C. Le combustible est de l'hydrogène avec un taux de CO < 100 ppm.
- La technologie "Solid Oxid Fuel Cell : SOFC" fonctionne à une température de 800 à 1000°C qui est nécessaire pour avoir une conductivité suffisante de l'électrolyte solide (céramique mince à base d'oxyde de zirconium). Le combustible est aussi de l'hydrogène et du fait de sa température élevée de fonctionnement la pile SOFC présente une très bonne tolérance aux impuretés. Cette technologie permet d'avoir un

processeur de carburant simplifié.

- La technologie "Direct Methanol Fuel Cell : DMFC" Elle utilise comme carburant du méthanol injecté directement dans la pile permettant ainsi de supprimer l'étape processeur de carburant. Cependant un gain important en performances doit être réalisé (5 à 10 fois) pour considérer sérieusement cette technologie.

Les autres types de piles utilisent un électrolyte liquide qui nécessite des circuits de circulation complexes du fait de la nature et de la température des liquides utilisés (potasse, acide phosphorique, carbonate fondu)

La problématique du combustible

L'utilisation de l'hydrogène et de l'oxygène pur permet d'obtenir le meilleur rendement. Comme l'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire, il est nécessaire d'en-

visager son mode d'élaboration, sa mise à disposition et son stockage à bord des véhicules. L'hydrogène peut être produit à partir de tous les composés contenant des atomes d'hydrogène (eau, hydrocarbure, alcool, ...). Cet hydrogène combiné peut être transformé en hydrogène moléculaire par l'intermédiaire de réactions de reformage pouvant être effectuées à l'intérieur ou à l'extérieur de la pile. Dans le cas de réaction extérieure, on utilise un reformeur ou un processeur

de carburant suivant le taux de CO que l'on désire en sortie.

Si la transformation dans la pile ne produit que de l'eau, il n'en est pas de même des étapes d'élaboration de l'hydrogène. D'un point de vue environnemental, c'est la filière complète qu'il faut considérer du puits à la roue.

Ce graphique montre clairement que suivant la filière considérée, le bilan CO₂ peut être très défavorable (électrolyse), que la majorité des filières se situe entre 90 et 120 g de CO₂ par km parcouru et seulement quelques unes marquent un pas significatif (bio éthanol, hydrogène comprimé élaboré à partir de gaz naturel).

Le deuxième problème que pose un nouveau carburant est l'infrastructure de distribution. Si l'hydrogène est considéré comme le meilleur carburant pour la pile, il bute aujourd'hui sur les difficultés de mise en place d'un réseau de distribution dans des conditions viables d'un point de vue économique et dans des conditions de sécurité adaptées. La problématique de stockage des

un peu plus complexe et présente un retard de maturité de deux à trois ans par rapport à celle du méthanol. Les premiers prototypes de véhicules équipés de reformeur essence ne devraient apparaître que vers 2003.

L'intérêt de la pile n'est pas vis-à-vis du CO₂, mais plutôt vis-à-vis des autres polluants qui deviennent soit insignifiants (utilisation de reformeur) soit inexistantes (utilisation d'hydrogène). L'intérêt de la pile est également de pouvoir utiliser une palette très large de combustibles.

Les applications de la pile à combustible dans l'automobile

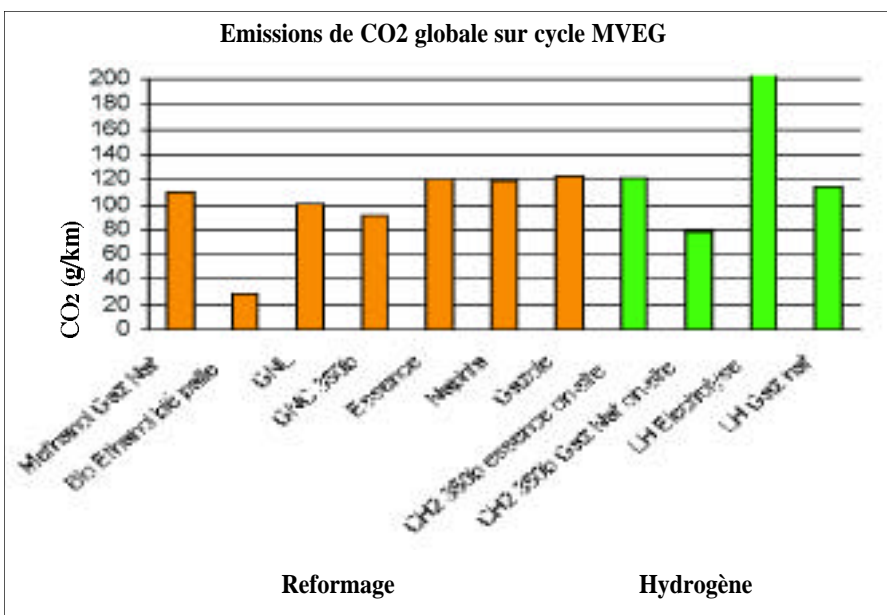
Les systèmes générateurs d'électricité mettant en œuvre des piles à combustible peuvent être utilisés de différentes manières dans l'automobile.

① Générateur d'électricité pour véhicules électriques :

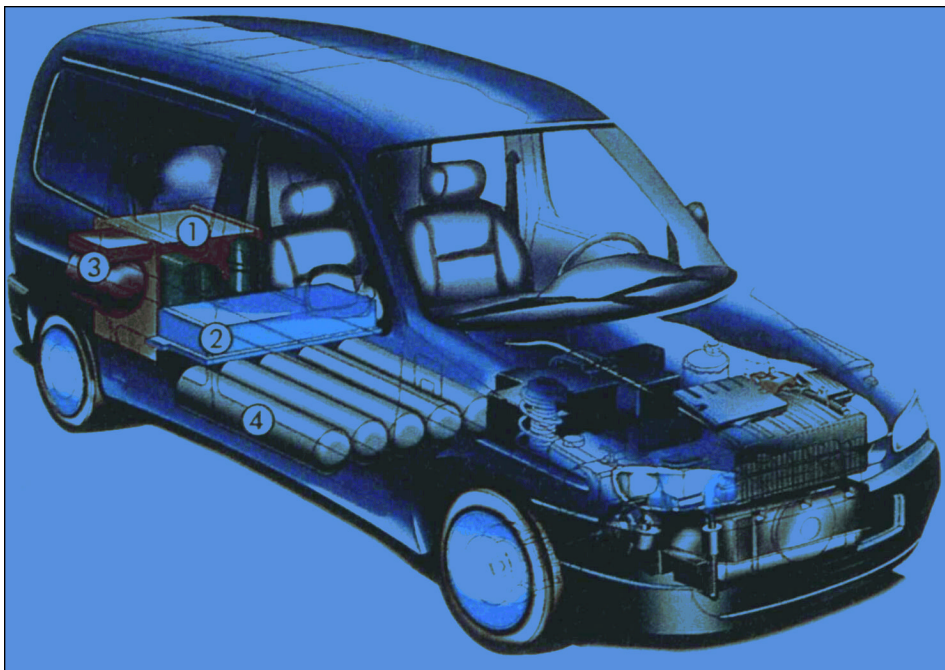
La pile est dans ce cas utilisée comme source d'énergie principale des véhicules à traction électrique, on résoud alors le problème d'autonomie et de temps de remplissage des batteries. Tous les grands constructeurs automobiles mènent des programmes de recherche dans ce domaine. De nombreux démonstrateurs roulent, les premières expérimentations de tailles significatives débutent en Californie; tout ceci démontre que cette technologie est en train de progresser à grands pas. Mais le problème du combustible reste entier ; ces véhicules utilisent soit de l'hydrogène soit un reformeur de méthanol. Page suivante, une vue du prototype du projet européen HYDRO-GEN utilisant une pile PEM alimentée en hydrogène stocké sous 350 bars sur base Partner électrique de PSA Peugeot Citroën.

② Générateur d'électricité auxiliaire pour véhicules électriques et hybride thermique-électriques

De petite puissance (5 à 10 kW), ce générateur Pile à combustible apporte un complément de puissance aux batteries utilisées dans ces types de véhicules. Pour les véhicules électriques, il remplace le groupe électrogène dans les applications Range Extender et permet d'étendre l'autonomie tout en préservant l'environnement et le



gaz à bord des véhicules (volume, sécurité) doit aussi être considérée avec la plus grande attention. C'est essentiellement pour ces raisons que pour le moyen terme (avant 2010), il faut envisager l'utilisation de combustibles liquides. Le méthanol est celui dont la technologie de reformage est la plus simple, mais du fait entre autres de sa toxicité, il risque d'être délaissé au profit de l'essence pour une utilisation de masse. La technologie des reformeurs d'essence est



- ❶ système pile à combustible
- ❷ convertisseur DC/DC
- ❸ humidificateur
- ❹ réservoirs H2 sous pression

silence du véhicule électrique.

Pour les hybrides, il doit permettre de minimiser la masse de batterie embarquée. Ses avantages sont l'absence de bruit, peu de pollution, des gains en consommation et la possibilité d'utiliser en théorie n'importe quel combustible (essence / gasoil / GNV / H2/...).

❸ Générateur d'électricité auxiliaire pour véhicules thermiques

Ce générateur remplace l'alternateur et a la capacité de fournir de l'électricité, même lorsque le moteur thermique est à l'arrêt. Il est constitué d'un système pile à combustible utilisant le même combustible que le moteur thermique. Ainsi, dans le cas de combustible essence ou diesel, il utilise un reformeur. On peut concevoir l'utilisation directe de l'hydrogène dans le cas où le moteur thermique utiliserait cette filière énergétique. Les avantages de l'utilisation

de ces générateurs sont le très bon rendement énergétique de la génération électrique (2 à 3 fois supérieur au système moteur thermique + alternateur actuel), la production d'énergie électrique même lorsque le moteur thermique est à l'arrêt, et la capacité de puissance importante (10 kW).

Ils permettront l'introduction dans de bonnes conditions de nouvelles fonctions (pas de limitation due à la capacité de la batterie): stop & go, réchauffage du pot catalytique, climatisation à l'arrêt et pré-conditionnement du véhicule.

Conclusion

Le rêve est en partie devenu réalité puisque quelques véhicules pile à combustible roulent aujourd'hui ; bien entendu, il faudra attendre encore une bonne dizaine d'années

avant de trouver ce type de véhicule dans les concessions automobiles à côté des véhicules thermiques.

La pile à combustible ne réalisera jamais le rêve de la voiture écologiquement parfaite, qui est, comme le mouvement perpétuel, non atteignable. Toutefois, le potentiel de progrès de cette technologie émergente justifie que nous poursuivions des efforts pour l'amener à maturité.

Sa capacité à utiliser une grande diversité de combustibles est un atout pour les années futures. Bien que le combustible idéal aussi bien d'un point de vue énergétique qu'écologique soit l'hydrogène, du fait des contraintes imposées par l'infrastructure et le stockage, une étape intermédiaire utilisant un combustible liquide est inévitable.



Alain GENET (N68)
Directeur Département
Matériel Roulant Bus
RATP

Alain CURTIL
RATP

Pile à Combustible et Autobus

L'autobus peut être rangé dans la famille "automobile" puisqu'il doit avoir la double caractéristique d'autonomie et de mobilité. Une troisième caractéristique lui est demandée: être environnementalement correct, tant en matière de pollution de l'air que de bruit.

Pour répondre à ces trois exigences, la première solution qui vient à l'esprit et qui est souvent exprimée par les citadins, est le bus électrique. Mais celui-ci présente deux points faibles majeurs, son prix et sa faible autonomie due à une capacité énergétique insuffisante des batteries qui impose des modes d'exploitation complexes et contraignants (voir encadré). La solution trolley-bus s'affranchit du problème de stockage de l'énergie mais se heurte en contrepartie à un coût élevé des installations et du véhicule, l'impact esthétique des lignes aériennes et une zone d'évolution relativement limitée.

La pile à combustible (PAC) peut être une réponse aux difficultés de stockage de l'énergie électrique par batteries d'accumulateurs à bord du véhicule en servant de vecteur entre une production d'énergie renouvelable à plus ou moins long terme et l'énergie mécanique nécessaire à la mobilité de l'autobus.

La recherche avance

Alimentée de manière continue par un combustible riche en hydrogène et l'oxygène de l'air, la PAC produit directement de l'électricité par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau avec des rendements énergétiques élevés. Utilisée depuis de nombreuses années dans l'industrie aérospatiale pour l'alimentation en électricité de satellites, les PAC émergent maintenant sur le marché automobile. Une première vague de réalisations a eu lieu au début des années 90 avec des piles d'encombrement et de poids excluant toute possibilité d'ex-

ploitation. Dix ans plus tard, les progrès réalisés font de la PAC une alternative prometteuse au problème de stockage de l'énergie électrique à bord des véhicules.

Les PAC ont été développées notamment par Xcellsis (groupement réunissant DaimlerChrysler AG, Ballard Power Systems et Ford) au Canada, IFC (International Fuel Cells) aux Etats-Unis et Siemens en



L'Oréos 55 électrique du Montmartrobus (7.7 m, 55 places)

Autonomie:

- Sans charge rapide :*
- parcours rectiligne et plat => 60 km
 - parcours sinueux et pentu => 45 km
- Avec charge rapide :*
- parcours rectiligne et plat => 110 km
 - parcours sinueux et pentu => 90 km

Sur le Montmartrobus (Ligne reliant la mairie du 18^e arrondissement de PARIS au quartier de Pigalle en passant par la butte Montmartre), une charge rapide de cinq minutes est effectuée au terminus après chaque boucle (soit 6km, dénivelé 90 m).

L'exploitation d'un tel véhicule est limitée par les caractéristiques thermiques des batteries qui ont un comportement exothermique à la décharge et dont la température de fonctionnement ne doit pas dépasser 55°C ce qui limite leur utilisation quotidienne à 1.8 fois leur capacité nominale.

Prix d'un véhicule: 2 MF -Equivalent Diesel: 0.9 MF- hors installations spécifiques.

Allemagne. Depuis, d'autres industriels ont travaillé également à la mise au point de cette nouvelle technologie : Toyota avec General Motors, De Nora, Air Liquide...

Outre Atlantique, des expérimentations d'autobus fonctionnant avec PAC, menées de 1998 à 2000 à Chicago et Vancouver (3 bus à PAC Ballard dans chaque ville,) ont montré

que l'exploitation de tels véhicules était possible (118000 km parcourus, 205000 voyageurs transportés) mais les problèmes de fiabilité (55% de disponibilité), de coûts (10 MF/véhicule) et d'infrastructures (fabrication, stockage, distribution d'hydrogène) sont encore loin d'être résolus.

En Europe, la plupart des constructeurs ont également développé leurs prototypes: Evobus en 1997 et son "Nébus", Volvo, MAN, SCANIA...

Avec une trentaine de véhicules, Evobus, propose à ce jour, le plus vaste programme d'expérimentation. Ces bus seront mis en circulation dès 2002 dans dix villes différentes : Stuttgart, Hambourg, Londres, Amsterdam, Reykjavik, Oslo, Luxembourg, Barcelone, Porto, Milan.

IRISBUS, deuxième constructeur européen, a lancé pour sa part trois programmes distincts, portant sur trois villes différentes: Paris, Turin, Madrid, et mettant chaque fois en œuvre un unique véhicule de technologie différente en termes de pile, d'architecture, de niveau d'hybridation, et de chaîne de traction. Le but de ce projet est de tester en exploitation réelle le plus grand choix de solutions possibles et de produire le maximum de données comparatives sur la filière PAC pour obtenir une large connaissance des facteurs techniques et d'exploitation.

Une PAC à Paris en 2003

A Paris, le début de l'expérimentation est prévu à partir du deuxième semestre 2003 pour une durée de deux ans. Le véhicule, un Cristalis 12 mètres, allie 3 technologies:



Véhicule CIVIS/CRISTALIS RATP Paris

- plancher bas et plat intégral
- moteurs-roues électriques et traction ALSTOM
- équipement de traction 350 volts
- pile AIR LIQUIDE/NUVERA
- autonomie: environ 250 km (24 kg d'H2 comprimé à 350 bars)
- hybridation par batteries.

- la PAC alimentée en H2 comprimé à 350 bars,
- l'hybridation par batteries pour utiliser une plus petite pile et économiser l'hydrogène,
- le moteur-roue électrique permettant le plancher bas et plat intégral.

La propulsion du futur ?

Avec des performances environnementales identiques au véhicule électrique dans le cas d'une alimentation en hydrogène pur, la PAC représente la plus grande révolution dans la technologie de la propulsion et se positionne comme un concurrent sérieux du moteur à combustion interne conventionnel. Si la PAC offre un grand intérêt énergétique pour le système de propulsion du véhicule, il convient cependant d'étudier le bilan "du puits à la roue" pour une analyse des impacts énergie-environnement, et particulièrement des émissions de gaz carbonique. Le facteur le plus sensible est la production du combustible et l'approvisionnement du véhicule.

En effet, les problématiques sont différentes si l'on utilise l'hydrogène pur ou si l'on fait appel à un autre combustible.

Plusieurs voies peuvent être explorées:

- La fabrication "centralisée" d'hydrogène dans une unité pétrochimique. Cette opération nécessite de gros apports de chaleur et émet de manière significative du gaz carbonique. Se pose ensuite le problème de la distribution et du stockage du carburant.
- La production sur site au moyen de l'électrolyse (par apport d'électricité à 85%

nucléaire et hydraulique en France) ou à partir de gaz naturel (très émetteur de gaz carbonique). Cette solution ne peut s'envisager à l'heure actuelle que pour des flottes de bus de grande capacité (à partir de 50 unités).

- Enfin, la production d'hydrogène à bord du véhicule permet de s'affranchir des infrastructures de production, distribution et stockage sur site et stockage à bord du véhicule. En contrepartie, le rendement énergétique est plus faible qu'avec l'hydrogène et le véhicule émet des produits polluants.

Dans ce contexte, l'autobus tire toutefois son avantage par rapport aux véhicules particuliers du fait que les dépôts d'autobus disposent de leurs propres installations de charge en carburant, ce qui rend plus aisée la distribution de l'hydrogène et la maîtrise des risques associés.

La diversité des solutions techniques, tant pour le carburant utilisé que pour les piles ou encore la chaîne de traction (choix entre hybridation et full power, et tensions d'alimentation), caractérise cette technologie émergente qui nécessite encore quelques années de recherches et expérimentations pour atteindre sa maturité.

Les promoteurs de cette filière annoncent généralement les premiers véhicules de série à l'horizon 2008-2010. Toutefois, les investissements conséquents nécessaires pour les expérimentations et les aspects sécuritaires liés à l'utilisation de l'hydrogène sont tels, qu'un déploiement de cette technologie dans des conditions économiques compétitives pour les autobus est peu probable avant 2015.



Philippe MATHEVON

Ingénieur physicien diplômé de l'Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris. D'abord Ingénieur de recherche en électrometallurgie chez Pechiney (1994-97), il a rejoint en 1997 la division Recherche & Développement d'EDF comme Ingénieur Chercheur et Chef de Projets, dans le domaine des Piles à combustible.



Sylvain VITET (E82)

Recherche & Développement EDF

Première opération de démonstration d'une pile à combustible stationnaire en France

Contexte

Electricité de France et Gaz de France mènent une action de démonstration d'une nouvelle technique de cogénération, la pile à combustible. Il s'agit de la première pile à combustible stationnaire installée et exploitée en France.

Parmi les technologies de piles à combustible existantes, c'est la pile à acide phosphorique (PAFC) qui a été retenue, car c'était à l'époque de la décision la seule technologie à avoir atteint le stade pré-commercial et à permettre une démonstration à un coût acceptable. La pile fonctionne au gaz naturel.

La pile est installée dans un milieu semi-urbain, à Chelles en Seine-et-Marne. L'énergie électrique produite par la pile (200 kW) est fournie au réseau exploité par le Centre EDF GDF SERVICES de Saint-Mandé. La pile est connectée thermiquement au réseau de chaleur local, qui assure le chauffage et l'alimentation en eau chaude sanitaire d'une partie de la ville de Chelles.

Electricité de France et Gaz de France ont créé pour cette opération de démonstration un Groupement d'Intérêt Economique, le GEPPAC, dont le rôle est l'acquisition, l'installation et l'exploitation de la pile à combustible.

Le projet associe la division Recherche et Développement d'EDF, la Direction de la Recherche de Gaz de France, et le centre EDF GDF SERVICES de Saint-Mandé. L'ADEME a souhaité participer à ce projet et a contribué à son financement.

Principes d'une pile à combustible

Le principe de la pile à combustible a été découvert en 1839 par William Grove. Il s'agit de produire de l'électricité et de l'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène. C'est le principe inverse de celui

de l'électrolyse. Les piles à combustible sont donc des générateurs électrochimiques d'électricité, qui à la différence des batteries, n'ont pas besoin d'être rechargées, puisqu'elles fonctionnent tant qu'elles sont alimentées en combustible et en air.

On distingue les piles à combustible stationnaires (cas de la pile de Chelles) et les piles à combustible embarquées (pour des applications telles que la traction automobile). Dans le cas des piles stationnaires, l'hydrogène est généralement obtenu par transformation chimique du gaz naturel. Dans le cas des piles embarquées, le combustible privilégié pourrait être le méthanol ou l'essence. L'oxygène est prélevé dans l'air ambiant.

Il existe différents types de piles à combustible, qui se distinguent principalement par leur température de fonctionnement et la nature de l'électrolyte (liquide ou solide) utilisé pour conduire l'électricité entre les électrodes :

- les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC)
 - les piles à acide phosphorique (PAFC),
 - les piles à carbonates fondus (MCFC)
 - les piles à oxydes solides (SOFC),
- qui fonctionnent respectivement à 80-100°C, 200°C, 650°C et 800-1000°C.

Caractéristiques de la pile installée à Chelles

La pile installée à Chelles est une pile PC25 modèle C fabriquée par la compagnie américaine ONSI, joint-venture créé par United Technology Corporation et Toshiba.

La PC25 est une pile à acide phosphorique, de puissances électrique 200 kW et thermique 200 kW, fonctionnant au gaz naturel. ONSI possède une chaîne de production robotisée de fabrication des modèles PC25. Le modèle C correspond aux piles de seconde génération, issues de la première

génération représentée par les modèles A et B.

Une centaine de piles ONSI de modèles A, B ou C sont en fonctionnement dans le monde, principalement aux Etats-Unis et au Japon. Les premières (modèle A) ont été mises en service il y a 8 ans.

L'ensemble des piles à combustible ONSI ont cumulé plus de trois millions d'heures de fonctionnement. Deux piles installées au Japon ont fonctionné 9.500 heures sans arrêt. Une quarantaine de piles ont dépassé six mois de fonctionnement ininterrompu. Deux piles ont cumulé chacune plus de 40 000 heures de fonctionnement.

Il y a actuellement une quinzaine de piles PC25-C en fonctionnement en Europe. La plupart de ces piles se trouvent en Allemagne (13), mais des opérations ont lieu également en Suède (1), Suisse (1) et France (1).

Entre 1992 et 1995, dix piles PC25-A avaient été mises en service en Europe; ces piles de première génération ne sont plus exploitées à ce jour, car elles ont atteint leur fin de vie.

La pile fournit d'une part de l'électricité sous forme de courant triphasé en 400V/50Hz, et d'autre part de l'eau chaude à une température de 80°C. La puissance électrique est modulable, de 10 à 200 kW. A puissance nominale, la consommation de gaz naturel est d'environ 50 m³(n)/h. Le rendement électrique de la pile est de 40% PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur), et ce sur une large gamme de puissance.

Les équipements permettant la production d'électricité et de chaleur se présentent extérieurement en deux modules. Le premier, le module de production, comporte tous les éléments participant à la transformation du gaz naturel en électricité et chaleur. Le second, le module de refroidissement, a pour but de permettre le fonctionnement normal de la pile (production d'électricité jusqu'à 200 kW) en cas de faible demande d'énergie thermique du réseau de chaleur.

On distingue dans le module de production :

- le système de transformation du gaz naturel en hydrogène intermédiaire, composé principalement d'une unité de désulfuration du gaz naturel et des réacteurs catalytiques de vapo-reformage et de "shift".
- la partie génératrice d'électricité et de chaleur, appelée "cœur de pile". Cette partie est formée de 250 cellules électrochimiques disposées en série. La surface de chaque cellule est de 1 m². La température de fonctionnement des cellules est de 200°C.

- le convertisseur électronique assurant la transformation du courant continu en courant alternatif triphasé 400V/50Hz.

Le module de production est un parallélépipède de 5,5 m x 3 m sur 3 m de hauteur. Le poids de la pile est de 18 tonnes et celui du module de refroidissement est de 850 kg.

Une partie de la chaleur produite par les cellules électrochimiques est récupérée et valorisée. La pile à combustible fonctionne ainsi comme un système de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur pouvant être réutilisée).



Avantages de la pile à combustible

La pile à combustible constitue un système de production décentralisée d'électricité et de chaleur au rendement élevé, très peu polluant et pratiquement sans nuisances sonores :

- les rendements électriques sont plus élevés que pour d'autres systèmes de cogénération : ils sont compris entre 35 et 50% PCI selon les types de piles (jusqu'à 70% si la pile est couplée à une turbine), alors qu'ils sont de 30 à 35% pour les moteurs à gaz de puissance similaire. Le rendement total (électrique + thermique) est d'environ 80%.
- les processus mis en jeu pour la transformation du gaz naturel en hydrogène dans le reformeur puis pour son utilisation dans le cœur de pile (réactions électrochimiques) se déroulent à des températures trop basses pour générer des oxydes d'azote.
- le meilleur rendement électrique se traduit également par une diminution de la quantité de dioxyde de carbone CO₂ produite par kWh par rapport à un autre moyen de production utilisant la même énergie fossile.
- de par leur principe de fonctionnement

(absence de moteur ou de turbine), les piles à combustible génèrent moins de bruit que les autres types de cogénérateurs. Le processus électrochimique ne génère pas de bruit ; les émissions sonores de la pile à combustible proviennent uniquement des auxiliaires du système, comme les ventilateurs, les pompes de circulation et le convertisseur électronique. Sans aucune protection acoustique, le niveau de bruit généré par la pile de Chelles serait de 60 dBA à 10 mètres.

Conditions d'insertion de la pile dans son environnement

Le quartier de Chelles où est installée la pile dispose des atouts indispensables à l'implantation d'une pile à combustible : une densité importante au niveau de l'habitat avec des besoins locaux en électricité et en chaleur. D'autre part, l'existence d'un réseau de chaleur urbain facilitait l'installation de la pile et la valorisation de la chaleur qu'elle produit. L'électricité et la chaleur produites par l'installation servent en apport aux réseaux d'électricité et de chaleur de Chelles.

Le quartier présentait également l'avantage d'être très peu bruyant, en particulier la nuit, et les qualités de silence de la pile peuvent donc y être mises en évidence.

C'est pourquoi EDF et Gaz de France ont proposé à la ville de Chelles d'accueillir cette première démonstration de pile à combustible en France. La ville de Chelles, très intéressée par le projet, a mis à disposition le terrain et s'est associée à la communication sur le projet.

Concernant la pile elle-même, le module de production est fabriqué en pré-série aux Etats Unis par ONSI Corporation. La pile a

donc dû être adaptée et modifiée pour une utilisation en France. Ceci concerne notamment la certification d'un appareil à pression par la DRIRE.

En ce qui concerne les conditions d'installation, la pile est raccordée au réseau de gaz naturel existant (4 bars), par l'intermédiaire d'un poste de détente permettant d'abaisser la pression à 20 millibars. La pile est connectée en basse tension à partir du transformateur HT/BT desservant les habitations proches. L'énergie thermique est récupérée au moyen de l'échangeur de chaleur intégré au module de production de la pile. La pile nécessite également un raccordement en eau (eau de ville), et utilise de l'azote lors des opérations de démarrage et d'arrêt ; l'azote est approvisionné en bouteilles.

La conception du module de production est telle qu'il peut être installé directement en extérieur. A Chelles, un bâtiment a été réalisé afin de mieux intégrer visuellement l'ensemble des équipements de la pile dans son environnement.

L'exploitation de la pile ne nécessite pas de personnel permanent, puisque l'installation

fonctionne automatiquement et peut être contrôlée à distance. Un système de télésurveillance relié à un poste de contrôle fonctionne 24 heures sur 24. Seules les opérations de maintenance nécessitent la présence de personnel sur place, spécialement qualifié pour intervenir sur l'installation.

Perspectives pour la pile à combustible stationnaire

La pile à combustible peut constituer une solution alternative à de nombreuses techniques de productions locales d'électricité et de chaleur à partir de gaz naturel telles que des moteurs à explosion, des turbines à gaz, mais avec un rendement électrique plus élevé (et donc des économies d'énergie) et avec des nuisances très faibles.

C'est pourquoi EDF mène en collaboration avec Gaz de France cette opération de première démonstration d'une pile à combustible stationnaire en France, qui permet d'acquérir une expérience d'exploitation pratique d'une pile à combustible en tant que générateur d'énergie répartie.

Il s'agit aussi de mieux évaluer les rende-

ments énergétiques de la pile, la disponibilité de l'installation, sa durée de vie, les coûts d'exploitation et de maintenance, et de mesurer la qualité de l'énergie électrique fournie.

Chelles a été choisie pour cette opération de démonstration, et ses habitants sont les premiers en France à bénéficier de cette technique prometteuse mais pas encore compétitive qu'est la pile à combustible.

En effet, les qualités de la pile à combustible ne doivent pas faire oublier son coût actuellement très élevé (près de 30 000 F par kW électrique pour les piles les moins chères). Seule une baisse considérable de ce coût d'investissement pourra permettre un développement réel de la pile à combustible.

Les recherches et développements en cours sur les piles à combustible embarquées pourront contribuer à cette baisse du coût d'investissement (de par l'effet de grande série qui résulterait d'une production pour l'automobile) et donc au succès et à la diffusion des piles à combustible stationnaires pour la production décentralisée.

Propos recueillis par
Corinne SUSINI
 Attachée scientifique au
 Consulat Général de
 France à Vancouver
 (Canada)

Présentation du leader mondial des piles à combustible PEM (Proton Exchange Membrane)

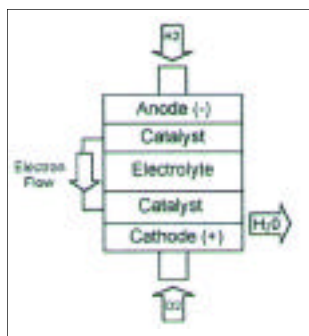
L'entreprise Ballard Power Systems est incontestablement le pionnier des piles à combustibles au Canada et est citée en général comme le leader mondial.

Elle a été fondée en 1979 sous le nom de Ballard Research inc. pour conduire la recherche et le développement des batteries de lithium d'énergie élevée. En 1983, elle a commencé à développer ses piles PEM. Le premier prototype de précommercialisation est dévoilé en 1994.

Elle a connu depuis une expansion spectaculaire et travaille maintenant en partenariat avec de nombreux grands groupes industriels dans les différents domaines d'application de la technologie des piles à combustible. Sa politique est d'abaisser les coûts de fabrication des piles par une production de masse.

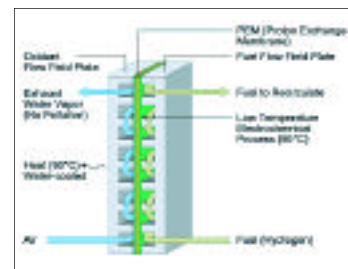
Le fonctionnement d'une pile à combustible PEM

Dans une pile à combustible, l'hydrogène et l'oxygène sont combinés pour former de l'eau. Cette transformation libère de l'énergie convertie en courant électrique.



Tout d'abord, il importe d'empêcher les deux gaz de venir en contact l'un avec l'autre. Pour cela, on utilise une membrane électrolytique. Dans une pile à combustible dite "PEM Fuel Cell", l'hydrogène se dissocie en protons et électrons sous l'action d'un catalyseur. Les électrons sont conduits par le circuit extérieur et constituent le courant électrique produit par la pile. Les protons traversent la membrane électrolytique vers la cathode. Là, l'oxygène de l'air, les électrons provenant du circuit extérieur et les protons se combinent pour produire de l'eau et de la chaleur.

Le cœur d'une pile Ballard est composé de deux électrodes (anode et cathode) séparées par une membrane de polymère électrolytique de quelques millimètres d'épaisseur. Chacune des électrodes est recouverte d'un côté d'une fine couche de platine qui sert de catalyseur. Le rôle du catalyseur est de favoriser l'ionisation de l'hydrogène et la réaction des ions hydrogène avec l'oxygène.



Des plaques de circulation approvisionnent les électrodes en hydrogène (côté anode) et oxygène (côté cathode). Ces plaques sont constituées d'un réseau qui du côté oxygène sert également à éliminer l'eau provenant de la réaction chimique.

La puissance de la pile dépend non seulement de la surface d'échange mais également de la capacité d'échange de la membrane. Cette capacité d'échange constitue un des axes de recherche principaux de la société.

Une pile à combustible associée à un "réformeur"

Electrolyte	Anode	Réaction anodique	Cathode	Réaction cathodique
Polymère H ⁺ conducteur	Graphite + Pt	2H ₂ → 4H ⁺ + 4e ⁻	Graphite + Pt	O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O

Espèce	Combustible	Température (°C)	Efficacité
H ⁺	Hydrogène	80	40-50

de combustible peut utiliser l'hydrogène de n'importe quel combustible hydrocarboné : le gaz naturel, le méthanol et même le carburant automobile.

Les applications de la pile PEM

Au niveau R&D, Ballard propose des piles PEM pour les trois principales utilisations envisageables :

- l'industrie automobile et les bus,
- la production stationnaire d'électricité et la co-génération,
- la production d'électricité pour applications portables (PC, téléphones).

L'entreprise a équipé en piles à combustible tous les principaux prototypes de véhicules utilisant cette technologie dans le monde..

Les véhicules de tourisme

Le prototype THINK FC5 de Ford est le premier véhicule à être équipé du Mark 900, le dernier module pour moteur présenté par la société en janvier 2000.

Alimenté avec du méthanol, ce module

certainement alimentés au méthanol, puisque celui-ci, liquide, peut être stocké de la même manière que le gasoil, permettant donc de ne pas changer radicalement les infrastructures actuelles des stations essence. Les émissions en dioxyde de carbone sont beaucoup moins importantes que le plus propre des systèmes à combustion interne.

De plus, les piles à combustible sont deux fois plus efficaces que les moteurs à combustion interne puisqu'elles convertissent directement le combustible en électricité.

Les bus de transport urbains

Les choix politiques dans ce domaine constituent un facteur prépondérant, les collectivités locales nord-américaines commencent à mettre en place des législations favorisant la vente des véhicules à moindres émissions polluantes.

La campagne des tests grandeur nature des bus à pile PEM est un succès. Le premier bus de ce genre sera commercialisé fin 2001. Il pourra transporter 70 passagers, aura une autonomie de 300 km et une vitesse maximale de 80 km/h.

hôpital ou un ensemble de 60 maisons. La phase test en conditions réelles d'exploitation de cette unité de 250 kW est sur le point de s'achever.

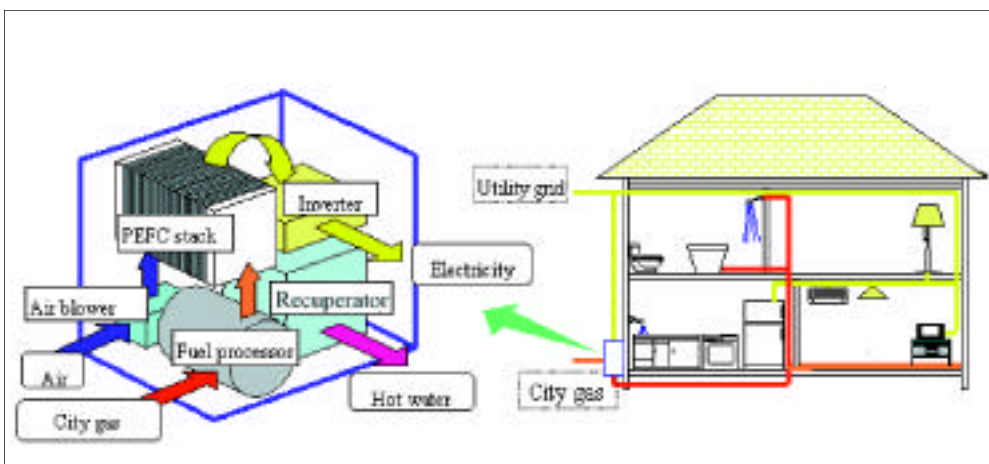
Une autre application est la co-génération résidentielle. Elle développe un "réformeur" pour des piles à combustible de 1kW alimentées au gaz naturel qui permettraient de répondre aux besoins de chauffage d'une maison et d'apporter un apport ponctuel d'électricité lors des pointes de consommation.

Les autres applications (dont les portables) L'entreprise travaille en partenariat avec plusieurs entreprises de premier plan pour développer des applications portatives et de secours avec pile à combustible, et pour mettre au point des piles à combustible destinées à la propulsion des navires commerciaux et des sous-marins. L'avantage pour les sous-marins réside dans le fait que cette technologie est silencieuse et dégage peu de chaleur.

Qu'est-ce qui limite la technologie ?

Le point faible des piles PEM est principalement leur électrolyte. Actuellement très chères, les membranes polysulfonées de type Nafion ou Aciplex seraient à remplacer par des polymères plus économiques, de performance voisine, fonctionnant dès la température ambiante, sans hydratation complémentaire et étant plus sélectifs vis-à-vis des éléments qui les traversent (gaz, cations).

Trois autres composants de la pile PEM empêchent de réduire les coûts de fabrication : la masse du catalyseur en platine encore trop importante, les plaques d'amenée de gaz en graphite usiné et l'ensemble des systèmes périphériques.



délivre une puissance de 75kW (80kW si alimenté avec de l'hydrogène). D'un volume de 77 litres, il peut aisément rentrer dans un compartiment moteur standard. Il peut être utilisé à des températures extérieures allant jusqu'à -25°.

Les véhicules à piles à combustible sont considérés comme viables pour une commercialisation de masse étant donné leurs avantages sur les véhicules actuels à combustion interne. Les futurs véhicules seront

La production stationnaire d'électricité et co-génération

Ballard développe aussi des unités fixes fonctionnant principalement au gaz naturel et d'une puissance inférieure à 1 MW. La première phase consiste à développer une unité de 250 kW qui permettrait d'alimenter un bâtiment industriel, un petit



Propos recueillis par

Jean Thèves

Attaché scientifique au
Consulat Général de
France à Toronto
(Canada)

La production d'hydrogène pour les piles à combustible : positionnement d'une entreprise canadienne

Cet article a été réalisé après un entretien avec William J. Bugyra, Directeur Prospection de la Clientèle chez Stuart Energy Systems, entreprise basée à Toronto. L'entretien porte sur l'évolution récente de l'entreprise, ses liens avec la Recherche et le Développement sur les piles à combustible, et les derniers projets dans lesquels elle est impliquée.

Stuart Energy est une entreprise qui depuis 50 ans, produit de l'hydrogène pour des applications industrielles, mais de plus en plus, depuis plus d'une dizaine d'années, pour alimenter les piles à combustible en carburant.

Sa technologie d'électrolyse de l'eau, qui s'appelle le "Double Electrode Plate (DEP)", permet de produire de l'hydrogène pur à 99.995 % et même davantage.

Voir aussi : <http://www.stuartenergy.com/>

Stuart Energy produit de l'hydrogène pour des entreprises industrielles chimiques, métallurgiques, alimentaires ou pétrochimiques qui toutes utilisent de l'hydrogène à des degrés de pureté différents.

Mais elle est également très impliquée dans le développement de carburant pour piles à combustible. L'hydrogène produit est idéal pour une certaine catégorie de piles, étant donné ses qualités de pureté et la température à laquelle il peut être utilisé.

Les applications dans le domaine des transports

L'entreprise travaille avec de nombreuses compagnies de transport en Amérique du Nord, équipées en piles à combustible. Elle leur fournit des pompes à hydrogène de diverses capacités. Les plus petites pompes, qui correspondent généralement aux besoins d'un véhicule familial par exemple, produisent à peu près 5 m³ par heure. L'utilisation peut être rapide (quelques minutes pour remplir le réservoir) ou lente (rechargement du réservoir pendant la nuit, système plus économique). Les pompes les plus efficaces peuvent produire plus de 50 m³ par heure, et sont celles qui

sont utilisées pour fournir le carburant nécessaire aux lignes de transport en commun.

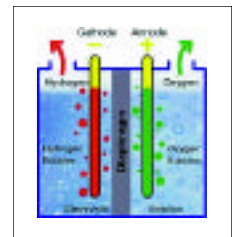
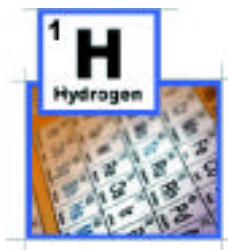
L'entreprise fournit aussi des moyens de stockage de l'hydrogène, afin, par exemple, de permettre aux bus de transporter une recharge de carburant et faire ainsi deux fois plus de distance.

Elle a équipé plusieurs compagnies de transports en commun en pompes à hydrogène : SunLine Transit Agency en Californie, Coast Mountain Transit (ancien BC Transit) en

Colombie-Britannique, Montreal Urban Transit Authority, l'Université de Californie, et Xerox Corporation à Los Angeles. Stuart Energy et SunLine Transit ont participé ensemble à un projet californien pour équiper un bus à pile à combustible XCELLSIS, plusieurs véhicules Ford Ranger à combustion interne à hydrogène et deux bus à hythane (mélange d'hydrogène et de gaz naturel). Tous ces bus fonctionnent très bien et, pour la plupart, ils existent grâce aux incitations gouvernementales en faveur des énergies propres, dès 1995 en Californie par exemple sous l'impulsion de l'état californien.

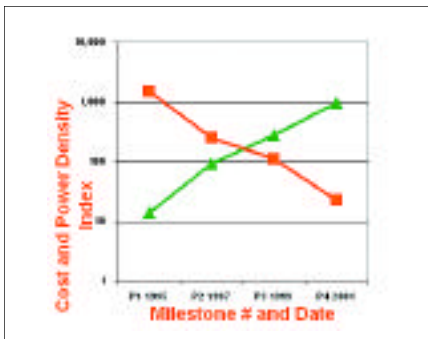
L'entreprise travaille aussi avec des constructeurs automobiles pour faire des démonstrations : en coopération canadienne avec Ballard (pour leur pile PEM), DaimlerChrysler et Ford Motor Company, la mise en service de trois bus à hydrogène dans la ville de Vancouver.

Voir aussi : <http://alt-fuels.nrcan.gc.ca/> (carburants de remplacement, gouvernement du Canada)



Les piles les plus adaptées à l'emploi d'hydrogène de haute pureté

Les piles à combustible PEM (Proton Exchange Membrane) ont besoin d'un hydrogène extrêmement pur, et l'hydrogène électrolytique est le carburant idéal pour ce genre de piles car il ne contient pas de polluants comme les hydrocarbures ou les sulfures, présents dans les hydrogènes de sources fossiles, qui nuisent au bon fonctionnement des piles.



Amélioration de la densité d'énergie des PEM et baisse des coûts

De plus, l'utilisation de métaux non-nobles (acier au carbone, nickel...) pour l'électrolyse de l'eau a permis de réduire le coût de production de 90% depuis la première (P1)

jusqu'à la quatrième génération (P4, unité mise sur le marché en 2001), et d'augmenter l'efficacité des unités de production d'hydrogène de 75%.

Les coopérations dans le domaine de la recherche

Récemment, le CNRC (Conseil National de Recherche du Canada) a équipé ses laboratoires de Recherche et Développement sur les piles à combustible de Vancouver avec les équipements de Stuart Energy, qui leur permettront de produire 20 m³/h d'hydrogène de grande pureté, et 10 m³/h d'oxygène. Le Centre National de la Technologie des Piles à Combustible de Vancouver est l'un des trois principaux centres du programme national de recherche sur les piles à combustible.

L'international et l'avenir

En 2003, les véhicules circulant avec des piles à combustible devraient commencer à apparaître sur les routes californiennes, les fabricants étant incités par le California Air Resources Board (CARB) à développer les

premiers véhicules à un nouveau stade.

En juin 2002, Alexander Stuart présidera la 14^{ème} World Hydrogen Energy Conference (WHEC) qui se tiendra à Montréal, Québec. Ce rendez-vous sera très important pour Stuart Energy car l'entreprise prévoit de créer une branche commerciale en Europe, soit en Allemagne soit en France et de premiers échanges très intéressants ont déjà eu lieu avec TotalFinaElf et le CEA.

Pour plus d'information sur l'hydrogène en Amérique du Nord :

The Hydrogen & Fuel Cell Investor at <http://www.h2fc.com>,

The National Hydrogen Association at www.ttcorp.com/nha,

The Hydrogen Web Page at www.hyweb.de,
The Hydrogen and Fuel Cell Letter at www.hfcletter.com,

The California Air Resources Board at www.arb.ca.gov/homepage.htm,

The California Fuel Cell Partnership at www.drivingthefuture.org

PILES À COMBUSTIBLE



Eric BRESSOT-PERRIN
(E97)

Attaché scientifique à
l'Ambassade de France
à Ottawa (Canada)

Energy Ventures Inc. (EVI) est une entreprise canadienne impliquée dans la recherche et le développement de technologies utilisées dans la fabrication de piles à combustible et de piles rechargeables. Elle possède des brevets sur des technologies liées aux piles à combustible à méthanol direct (DMFC) et aux piles rechargeables lithium / ion, nickel / zinc, zinc / carbone.

Elle a été créée en 1996 par Wayne Hartford qui est son actuel président. Après s'être intéressé aux piles rechargeables et aux piles à combustible alcalines, elle s'est orientée vers le développement des DMFC à partir de 1997. Elle concentre actuellement son activité sur la commercialisation de sa DMFC, comme le montre sa récente expansion à Calgary. Son activité a évolué de la pure R&D au développement, à caractère plus appliqué.

La pile à combustible à méthanol direct chez un constructeur canadien

Cet article a été réalisé après un entretien avec Stephen Yovetich, Assistant General Manager chez Energy Ventures Inc (EVI). Il présente à la fois l'entreprise et la technologie développée : la pile à méthanol directe équipée d'un électrolyte liquide, et de ses applications.

Visitez <http://www.energyvi.com/>

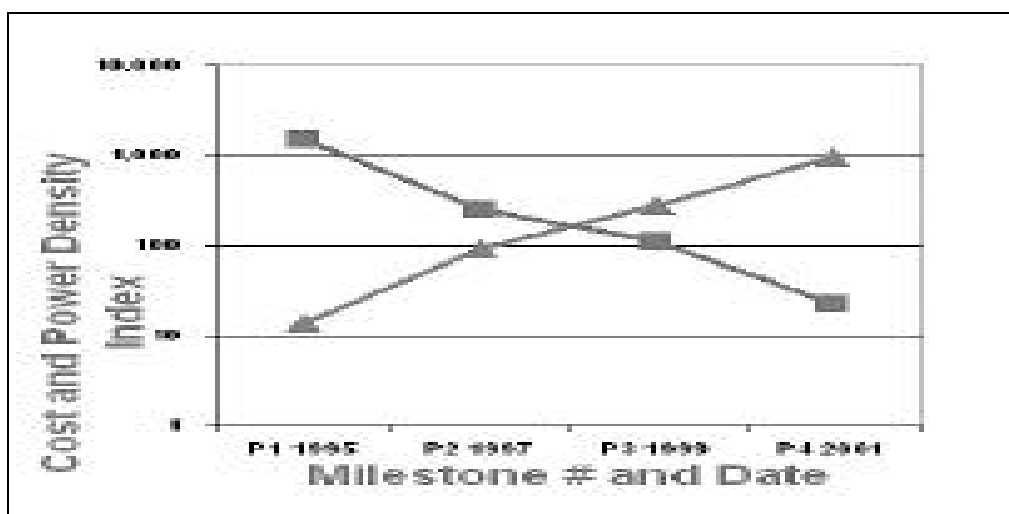
Quelles sont les caractéristiques de la pile DMFC développée par l'entreprise?

La DMFC est basée sur le principe d'électro-oxydation d'une solution aqueuse de méthanol sans reformage du carburant. La réaction d'oxydation du méthanol est catalysée par un mélange de platine et de ruthénium au niveau de l'anode et la réduction du dioxygène de l'air par du platine à la cathode. Des améliorations significatives en matière de densité de puissance, de rendement et de durée de vie ont été réalisées au niveau de la cellule et du cœur de pile au cours des dernières années. Ces avancées dans les performances de la DMFC sont suffisantes pour envisager le développement du système complet qui devrait être compétitif avec les systèmes actuels de pile à combustible à membrane échangeuse de proton. Ces améliorations sont dues à un perfectionnement des techniques de fabrication du couple membrane-électro-

de, à une plus grande activité des catalyseurs et à une optimisation des structures des électrodes.

Le cœur de pile

La DMFC (pile à méthanol direct) a toujours souffert d'un rendement faible à cause du phénomène communément appelé "cross-over", qui correspond à la fuite de méthanol à travers la membrane, puis à la réaction directe de ce méthanol avec l'oxygène à la cathode sans fournir de courant. En décembre 1999, EVI a déposé un brevet sur une technologie qui élimine le cross-over (CA 02290302 1999-11-23). L'électrolyte (H₂SO₄) circule à l'intérieur d'une matrice. Le méthanol qui a échappé à l'anode est évacué avec l'électrolyte et récupéré par condensation. Ainsi, le gradient de méthanol n'a pas le temps de se former et le méthanol n'est pas perdu au niveau de la cathode. La réduction du phénomène de cross-over permet à la pile de travailler dans de meilleures conditions : concentration en méthanol du liquide entrant et



Principe de la pile à méthanol direct avec un électrolyte acide liquide à 70°C

température plus élevées (1 mol/L et 90°C).

Les électrolytes circulants offrent aussi la possibilité d'arrêter la pile à combustible. Les autres systèmes qui fonctionnent par intermittence sont sensibles aux périodes de ralenti sans charge électrique : cela réduit leur durée de vie. Pendant les longues périodes d'arrêt, il y a la possibilité de changer l'électrolyte ou d'effectuer un travail de maintenance. Souvent, une réactivation du catalyseur a lieu. On peut ainsi réduire la quantité de catalyseur et par la même occasion le coût du système, tout en gardant une durée de vie raisonnable. La circulation de l'électrolyte permet enfin le contrôle des concentrations en espèces chimiques, du pH, de l'humidité et de la température dans le cœur de pile. Les débits de circulation ayant été réduits, la membrane a moins tendance à se noyer ou à s'assécher.

Le système DMFC

Les performances globales du système, son poids et son volume dépendent des caractéristiques de plusieurs sous-systèmes et de leurs interactions. Ainsi, des améliorations au niveau du cœur de pile doivent être accompagnées par l'amélioration des autres composants du système.

Le système comprend les boucles de circulation du méthanol et de l'oxygène. Le méthanol pur est dilué dans de l'eau grâce à un mélangeur. Du CO₂ est rejeté au niveau de l'anode et prélevé du flux de carburant grâce à un séparateur gaz/liquide. L'air est amené au cœur de pile grâce à un compresseur. Après réaction, il passe à travers un condenseur qui sert à récupérer l'eau et à éliminer la chaleur excessive. Une partie de l'eau récupérée peut être utilisée pour alimenter la boucle de circulation de méthanol et humidifier la membrane. Une évacuation de la chaleur excessive peut aussi être effectuée au niveau d'un échangeur de chaleur dans la boucle de circulation du méthanol. Ainsi, le cœur de pile peut bénéficier d'une température uniforme et constante. On ajoute un ensemble des capteurs, en particulier de méthanol, pour la bonne gestion du sys-



crédits : www.daimlerchrysler.com
La Necar 5 de Daimler Chrysler fonctionne au méthanol.
Le méthanol est reformé avant d'entrer dans le cœur de pile.

tème. Les travaux de recherche sur ces capteurs ont permis d'obtenir une plus grande précision, un temps de réponse plus court et une durée de vie semblable à celle du cœur de pile. On obtient un système à basse énergie avec un rendement global élevé.

EVI concentre actuellement ses efforts sur l'élimination de la membrane et la réduction de la quantité de catalyseur dans les électrodes.

Quelles sont les applications envisagées ?

La DMFC est considérée comme un système à émission de gaz à effet de serre nulle (ZEV) par la réglementation nord américaine, bien qu'elle produise du CO₂. La première pile produite aura une puissance de 300W et servira de générateur d'électricité auxiliaire sur une application militaire. Ses clients auront en main un premier produit à partir de 2002 auquel ils pourront s'habituer. Ce produit sera fabriqué avec des pièces déjà disponibles sur le marché, aura donc un coût réduit et une large marge de progression. A partir de ce produit, elle s'intéresse à produire un système de 3 kW et des micro-piles à combustible.

Dans le domaine des transports, elle oriente le développement de sa technologie DMFC vers le marché des petits véhicules (voitures de golf, motos) et des systèmes hybrides, le but ultime étant le remplacement du moteur à combustion interne. Elle considère que la technologie DMFC, alimentée au méthanol, bénéficie d'un accès relativement facile au marché automobile : les infrastructures déjà présentes sont réutilisables.

Un autre projet : la fabrication d'une pile stationnaire pour alimenter en électricité un village africain. Le méthanol serait produit à partir de la biomasse environnante.

Quels sont les avantages et les inconvénients du méthanol ?

Le méthanol est un alcool simple que l'on trouve dans un grand nombre de produits de tous les jours tels les plastiques recyclables, la plupart des matériaux extensibles et le liquide pour laver les pare-brises. L'utilisation la plus importante du méthanol se fait dans l'élaboration de l'éther méthyl ter-butyle (MTBE), un additif de l'essence. En fait, le méthanol est le seul carburant utilisé par les coureurs automobiles à Indianapolis en raison de ses propriétés et

de ses caractéristiques sécuritaires.

Actuellement, le méthanol est produit surtout à partir du gaz naturel, bien que ce dernier puisse être remplacé par du pétrole brut, du charbon ou des ressources renouvelables telles le bois et les déchets municipaux solides.

Un des plus grands inconvénients au niveau de la sécurité pour le méthanol est sa flamme invisible à la lumière du jour. Cependant, le méthanol a une volatilité inférieure à celle de l'essence et ne libère qu'un huitième de la chaleur de combustion de l'essence. Le méthanol est très corrosif avec les matériaux employés dans la distribution des produits dérivés du pétrole tels l'aluminium et les composants en caoutchouc. Le méthanol est essentiellement transporté par camion et stocké dans des cuves d'acier inoxydable, d'acier semi-dur ou de fibre de verre. Malgré cela, certains spécialistes estiment que le méthanol pourrait emprunter l'infrastructure déjà en place pour l'essence et le diesel avec seulement quelques modifications pour un coût réduit.

Le méthanol est une neurotoxine qui, même ingérée à faibles doses, produit des effets irréversibles. Une exposition excessive aux vapeurs de méthanol ou un contact avec la peau peuvent provoquer chez l'être humain la cécité, voire la mort. De plus, le méthanol est miscible dans l'eau. Il est donc essentiel qu'aucun contact ne se produise avec l'eau durant la phase de distribution du carburant, toute fuite importante pouvant provoquer une contamination de nappe souterraine indélébile (pas de goût, pas d'odeur, pas de couleur). Cependant, une telle fuite serait rapidement dispersée dans l'eau et dans l'air, ce qui aurait un effet limité sur l'environnement.

Le méthanol est liquide dans les conditions normales de température et de pression. Il a donc une densité énergétique bien supérieure à celle de l'hydrogène sous forme gazeuse et ne nécessite aucun système de stockage lourd, encombrant et gourmand en énergie pour une utilisation dans les transports. De plus, son haut ratio H / C et sa température de combustion relativement peu élevée en fait un bon candidat pour alimenter les piles à combustible. Cependant, le méthanol est beaucoup moins réactif que l'hydrogène. Il est donc nécessaire d'utiliser une grande quantité de catalyseur.

Pour plus d'informations sur l'avenir du méthanol-carburant, visitez www.methanol.org et www.methanex.com