

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.

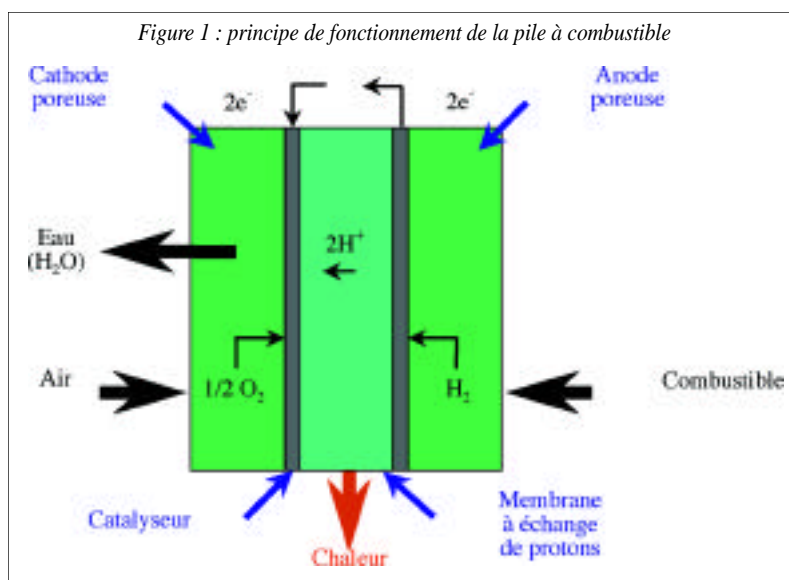
Les piles à combustible présentent plusieurs avantages :

- 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.

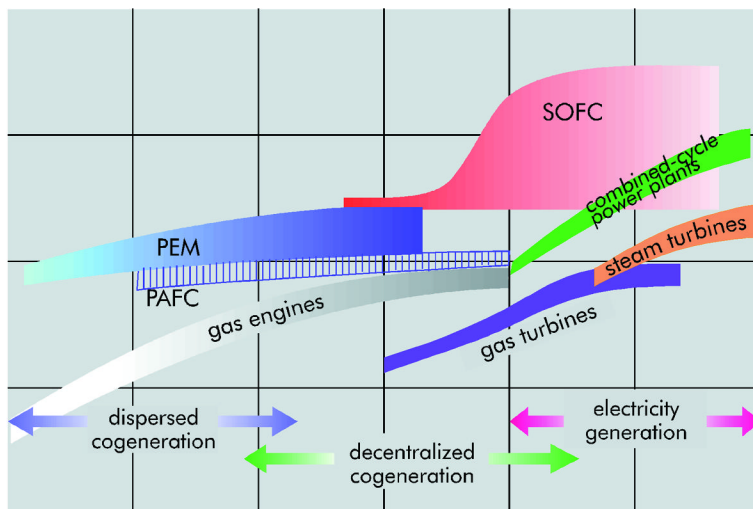
Alstom a déjà réalisé en Europe des uni-



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 Achard, 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 Achard 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).*