

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 127 (2001)
Heft: 14

Artikel: Piles à combustible: état de la question dans le monde
Autor: Olliver, John
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80054>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Piles à combustible: état de la question dans le monde¹

(ÉNERGIE)

Les piles à combustible (PAC) semblent désormais prêtes à jouer un rôle énergétique majeur dans les années à venir. L'évolution des technologies rend leur mise en œuvre économique, celle des réglementations la rendra possible, voire nécessaire. A côté des transports, les applications stationnaires et portables constituent des marchés potentiels considérables. L'industrie des PAC est en train de se structurer, en partenariat avec les fabricants de constituants et les assembleurs.

Les PAC entrent dans la phase pré-industrielle

Les piles à combustible ont aujourd'hui dépassé le stade de la recherche pour entrer dans le développement et bientôt l'industrialisation. La question n'est plus technique, mais économique: comment fabriquer des PAC compétitives et avec quel combustible les alimenter?

Plusieurs technologies sont en lice

Inventées en 1839, les piles à combustible semblent enfin - plus d'un siècle et demi après - sur le point de connaître leur percée commerciale grâce aux progrès considérables réalisés dans le domaine des matériaux (membranes, céramiques), et sous l'impulsion des effets conjugués de la régulation de la pollution et de la libéralisation des réseaux électriques. La **figure 1** montre l'efficacité attendue des piles à combustibles par rapport aux autres technologies.

Plusieurs filières technologiques sont développées. Les piles à basse ou moyenne température sont les plus avancées et sont arrivées au stade commercial ou pré-commercial. Dans cette filière, les piles alcalines (AFC) ont été les plus utilisées dans l'espace, mais aujourd'hui on leur préfère généralement les piles à membrane (PEMFC), plus adaptées à un marché de masse comme l'automobile. Quant aux piles à acide phosphorique (PAFC), elles constituent une solution mature adaptée aux usages stationnaires (co-génération) et il en a été vendu plus de trois cents dans le monde, essentiellement aux Etats Unis et au Japon, à un prix de l'ordre de 3000 \$/kW.

¹ Actualisation d'un article paru dans les Actes du Colloque «Piles à combustible et interfaces pour les transports», 9-10 novembre 2000, Belfort

Les technologies à haute température (MCFC et SOFC) ont le grand avantage de permettre un reformage interne de combustibles comme le gaz naturel, et sont particulièrement bien adaptées aux applications stationnaires, où la production d'électricité s'accompagne de production de chaleur. Ces technologies sont encore au stade expérimental, même si leur commercialisation est prévue vers 2002-2005.

Des marchés diversifiés

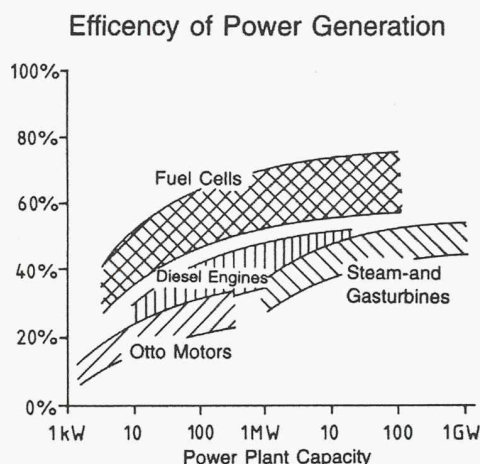
Il y a trois grandes catégories de marchés pour les piles à combustible. L'automobile d'abord, avec la technologie PEMFC, qui constitue un débouché considérable en cas de succès. Cela dit, les conditions de ce succès sont sévères: d'une part, le coût ne doit pas rester durablement plus élevé que celui des automobiles conventionnelles, soit un objectif de 50 \$/kW, alors que les coûts actuels sont plutôt de l'ordre de 3000 \$/kW; d'autre part, la fiabilité devra être la même que celle des véhicules actuels si l'on veut éviter un rejet des consommateurs (**tableau I**).

Année	Fixes	Automobile	Autres	Total
2005	1	0,2*	0,1	1,3
2010	5	4**	1	10
2020	10	24***	6	40

* 60 000 voitures de 40 kW à 100 \$/kW
** 2 millions de voitures de 40 kW à 50 \$/kW
*** 12 millions de voitures de 40 kW à 50 \$/kW

Le second grand marché est celui des applications stationnaires. C'est le domaine privilégié des technologies à haute température, mais les PEMFC visent aussi ce débouché, même si leur faible température de fonctionnement ne permet pas de tirer pleinement parti de la co-génération. Il ne s'agit pas ici de remplacer les grandes centrales électriques par des centrales à piles à combustible, mais d'introduire à la faveur de la dérégulation de nouvelles architectures des réseaux faisant largement appel à la production décentralisée. La co-génération est à même d'offrir d'excellents rendements globaux et la décentralisation permet de réduire considérablement le coût des réseaux de transport et de dis-

Fig. 1: Pour de petites unités comme pour des installations plus importantes, la pile à combustible promet une efficacité nettement supérieure aux technologies concurrentes actuelles.



tribution d'électricité. L'objectif de coût est ici plus facile à atteindre et se situe autour de 1000 \$/kW. Ce marché de la co-génération et de la production distribuée ne concerne pas seulement les industries, les services et les PME, mais inclut le secteur résidentiel. Des installations domestiques sont prévues, fournissant électricité et chauffage ou climatisation dans les maisons individuelles.

Un troisième marché, bien plus hétérogène, est celui des applications portables ou de niche. Comme pour les applications spatiales, ce n'est pas le coût qui est déterminant ici, mais la commodité d'usage. *Motorola* étudie avec un laboratoire américain une pile à combustible pour téléphone portable, alimentée pour une semaine par une cartouche de méthanol de la taille d'une cartouche d'encre de stylo. *Manhattan Scientific* et *Novars*, le *Fraunhofer Institut* et *Energy Related Devices*, entre autres, travaillent aussi dans ce sens. *Siemens* a par exemple installé des PEMFC dans des sous-marins allemands pour augmenter leur autonomie en plongée. Et il existe un grand nombre de marchés pour des applications de niche, telles les sources d'énergie pour le camping, la plaisance, les sites isolés, les stations météo, etc. Quant au laboratoire PNNL², il travaille avec l'armée américaine sur un système portable offrant, pour une puissance supérieure, un gain de poids d'un facteur dix par rapport aux batteries actuelles.

Les transports sont un marché privilégié

Avec des normes d'émission de plus en plus strictes aux Etats-Unis et en Europe, la pile à combustible est devenue un enjeu suffisamment important pour que la plupart des grands constructeurs mondiaux s'engagent dans un consi-

dérable effort de R&D afin de mettre sur le marché des voitures à pile à combustible vers 2003-2005.

Les grands constructeurs ont pris le départ

De grands pôles se sont constitués. D'une part, le groupe *Daimler Chrysler* a formé un partenariat avec *Ford*, *Mazda*, *Volvo* et le fabricant canadien de piles à combustibles *Ballard*. Ce groupe travaille également sur les PEMFC avec son partenaire *Mitsubishi*. D'autre part, *Toyota*, qui a développé sa propre technologie de piles à combustible, s'est allié à *General Motors* avec *Isuzu* et peut-être désormais *Fiat*. Ces deux pôles représentent respectivement 30% et un peu moins de 25% de la production mondiale. Ils ont annoncé la sortie de véhicules commerciaux à pile à combustible pour 2004, avec des programmes d'investissements de l'ordre du milliard de dollars chacun.

Honda semble encore vouloir jouer seul et prévoit également un véhicule pour 2004 avec sa propre technologie.

Quant à *Renault*, il dispose chez *Nissan* d'une technologie de piles à combustibles. Ce constructeur travaille aussi avec *PSA*, *BMW* et *Delphi* sur une solution originale où la pile à combustible servirait de générateur auxiliaire («APU») pour fournir les besoins en énergie électrique de la voiture, mais pas l'énergie de traction.

Le dernier espoir de la voiture électrique?

Personne ne semble plus croire aujourd'hui au véhicule électrique à batteries. Celui-ci n'a pas réussi à offrir une autonomie, une vitesse, un délai de recharge et un coût satisfaisants. Le «ZEV» (Zero Emission Vehicle) imposé par la législation californienne est sans doute mort-né. De toute manière, il s'agissait d'un concept un peu hypocrite, car si la batterie ne produit certes pas de rejets, la centrale électrique qui la recharge est bel et bien à l'origine d'émissions polluantes!

Le véhicule hybride présente moins de difficultés. Combinant un moteur thermique optimisé avec des batteries, il permet de réduire considérablement les émissions tout en conservant l'autonomie et les performances des voitures traditionnelles et en éliminant le problème de la recharge des batteries.

La pile à combustible peut remplacer le moteur thermique dans cette configuration hybride et permettre de réduire encore le niveau d'émissions.

Une technologie propre, mais...

Les piles à combustible ont servi de sources d'énergie dans toutes les missions spatiales habitées américaines (*Apollo*,

² *Pacific Northwest National Laboratory*, Laboratoire rattaché au département américain de l'énergie

Fig. 2: En Suisse, la première installation commerciale faisant appel aux piles à combustible se trouve à Birsfelden. Ce sont des piles de type PAFC, alimentées au gaz naturel, qui délivrent 200 kW_{él} et 200 kW_{th}
(Installation AEB, Photo Peter Morf, Zurich)

Fig. 3: Pré-série de la nouvelle installation de Sulzer Hexis: unité d'un kilowatt, basée sur la technologie SOFC, pour la co-génération à usage domestique
(Photo Sulzer Hexis)

Tableau II: Rendement global d'une pile à combustible automobile
(Source: DECISION)

Gemini, Orbiter). Outre l'électricité, elles produisaient aussi de l'eau potable pour les cosmonautes. Malheureusement, hors du contexte spatial, cette technologie perd un peu de sa pureté.

Les piles à combustible fonctionnent en effet selon le principe inverse de l'électrolyse, où un courant électrique décompose l'eau en oxygène et en hydrogène. Dans une pile à combustible, au contraire, on réunit l'hydrogène et l'oxygène en présence de catalyseurs et il en résulte un courant électrique et de l'eau. Or, tandis que dans l'espace on emporte de l'oxygène et de l'hydrogène purs sans lésiner sur les catalyseurs précieux (platine), les choses se compliquent lorsqu'on veut appliquer cette technologie à l'automobile. En l'occurrence, on fera appel à de l'air plutôt qu'à de l'oxygène pur, mais au prix d'une baisse des performances et de problèmes avec le CO et le CO₂ présents dans l'air. Quant à l'alimentation de piles à combustible avec de l'hydrogène pur, elle pose à la fois des problèmes de stockage, de distribution et de ravitaillement et comme cet élément n'existe pas à l'état naturel, il faut le produire, ce qui - comme dans le cas des batteries - revient à déplacer le problème de la pollution de l'auto vers l'usine d'hydrogène (tableau II).

Dans l'immédiat, on cherche donc à utiliser un combustible plus pratique, en extrayant l'hydrogène qu'il contient dans un reformeur embarqué. L'idéal serait l'essence ou le gasoil, mais ils sont difficiles à reformer et contiennent beaucoup de carbone polluant. Le compromis généralement accepté aujourd'hui en Europe est le méthanol, un combustible liquide facile à reformer. Or sa production actuelle est faible (moins de 30 millions de tonnes par an dans le monde) et, surtout, il faudrait adapter le réseau de distribution. Et, naturellement, le rendement global diminue avec la production de méthanol et son reformage. Les Américains semblent préférer les hydrocarbures traditionnels.

Le développement de piles à combustible qui utilisent directement du méthanol sans reformage préalable semble une solution idéale. Malheureusement, ces piles présentent des performances sensiblement inférieures, ce qui augmente leur encombrement et pèse sur le rendement.

Les applications stationnaires: un débouché très prometteur

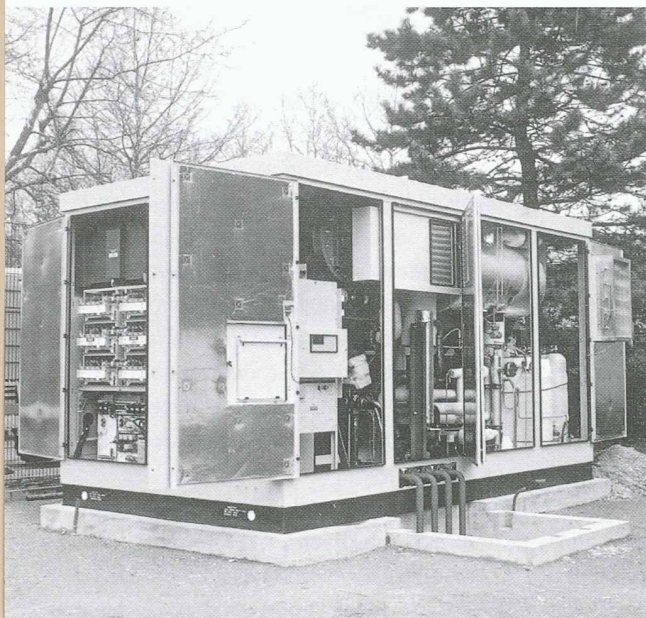
Les applications stationnaires des piles à combustible sont moins médiatiques, mais constitueront probablement un enjeu et un marché de même ordre de grandeur que l'automobile.

À l'aube du XXI^e siècle, deux milliards et demi de personnes dans le monde - soit 40% de la population du globe - n'ont pas accès à l'électricité. La consommation par tête au Nigeria est dix fois inférieure à celle de l'Iran et cent fois inférieure à celle des Etats Unis. Les technologies nouvelles, parmi lesquelles les piles à combustible, devraient contribuer à résoudre ce problème en évitant d'accroître à l'excès le niveau des émissions. La co-génération (production combinée d'électricité et de chaleur) ou la tri-génération (production combinée d'électricité, de chaleur et de froid) peuvent réduire les émissions en améliorant fortement le rendement global qui peut dépasser 80%.

Au cours des dix années à venir, la capacité nouvelle de production d'électricité installée chaque année dans le monde sera de l'ordre de 80 GW, soit un marché d'environ 80 milliards de dollars US. Une part croissante de ce total sera le fait de la production répartie et de la co-génération, domaines où les piles à combustible sont particulièrement avantageuses. Il est fort probable que, si les applications automobiles connaissent le succès et que le coût des piles à combustible s'abaisse autour de 100 \$/kW, elles prendront une part très importante de ce marché. Même si leur coût s'établit entre 100 et 1000 \$/kW, elles demeureront compétitives dans bien des cas.

Etape	rendement de chaque étape	hydrogène liquide	méthanol	hydrogène comprimé
Gaz naturel		100	100	100
Production d'hydrogène à partir de gaz naturel	75%	75	75	75
Liquéfaction de l'hydrogène	60%	45		
Compression de l'hydrogène	90%			68
Production de méthanol	80%		60	
Reformage du méthanol	80%		48	
Pile à combustible	40%			
Rendement global du système		18%	19%	27%
Source: DECISION				

2



La question qui se pose dès lors est celle de leur disponibilité sur le marché. Actuellement, les seules PAC disponibles dans le commerce sont les PAFC de *ONSI* et de certains constructeurs japonais comme *Fuji*.

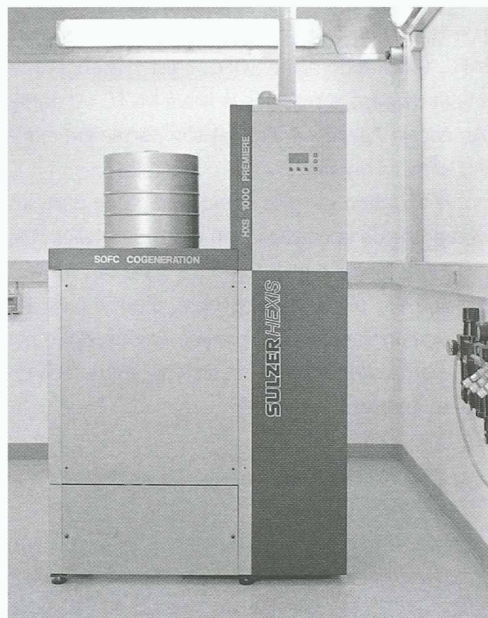
Cette technologie mature a déjà été vendue à plusieurs centaines d'exemplaires dans le monde, surtout aux Etats Unis et au Japon (fig. 2). Mais les technologies suivantes - PEMFC puis SOFC et peut-être MCFC - ne seront pas véritablement disponibles avant 2005. *Alstom*, avec *Ballard*, commence tout juste à livrer ses premiers modules PEMFC de 250 kW. Avec le japonais *Ebara*, *Ballard* explore les applications résidentielles de petite puissance, comme *Plug Power*, *H Power*, *Idatec* ou *Nuvera*.

En SOFC, *Siemens Westinghouse* met en place une installation à grande échelle (1 MW), mais aussi une solution hybride avec microturbine. Le Suisse *Sulzer Hexis* expérimente des systèmes résidentiels de quelques kW (fig. 3), tandis que *FuelCell Energy* (et *MTU* en Europe) met en place des modules MCFC, technologie que les Japonais cherchent également à développer pour des applications de plus grande taille.

Les applications portables

Les applications portables sont peut-être à la fois les plus prometteuses et les plus incertaines de toutes. L'avantage est que le coût y est moins critique - les solutions concurrentes (batteries) étant très chères -, mais les critères de poids, d'encombrement et de commodité sont déterminants. Il est certain que le marché des batteries dans les nouvelles applications portables (ordinateurs, téléphones, caméras, outils)

3



s'élève à plusieurs milliards de dollars par an aujourd'hui et qu'il est en pleine croissance.

Les PEMFC semblent la seule technologie envisagée pour ces applications, soit avec des cartouches d'hydrogène, soit en méthanol direct avec des cartouches de méthanol. *Motorola* avec *Los Alamos*, l'armée américaine avec *Manhattan Scientific* et *NovArs* en Allemagne, le *Fraunhofer Institut* et *Energy Related Devices* travaillent notamment sur cette application. L'une des voies pressenties pour réduire l'encombrement semble passer par des technologies de fabrication semblables à celles appliquées aux circuits imprimés.

Il est clair que les militaires s'intéressent beaucoup aux applications portables. Les besoins d'énergie du «fantassin de l'an 2000» sont en effet considérables et les batteries actuelles peuvent difficilement y répondre. Dans ce domaine, les piles à combustible pourraient remplacer les batteries ou servir de chargeurs.

Une industrie naissante

L'industrie des piles à combustible est en train de se dessiner. Elle est surtout vigoureuse en Amérique du Nord, soutenue notamment par d'importants programmes de R&D gouvernementaux. Le canadien *Ballard* et *IFC* (filiale commune de l'américain *UTC* et du japonais *Toshiba*) dominent dans les PEMFC, avec un certain nombre de challengers, comme *HPower* ou *Plug Power* entre autres. Par ailleurs, *Du Pont* jouit d'un quasi monopole dans la production de membranes pour PEMFC avec son produit *Nafion*. Alors qu'*IFC* mène également le jeu dans la filière AFC, c'est *ONSI* (une autre filiale

Tableau III: La R&D en piles à combustible dans le monde en 1999
(Millions de \$ par an)
(Source: DECISION)

Tableau IV: Les différentes technologies de piles à combustible
(Source: DECISION)

commune de UTC et de Toshiba) qui est le leader incontesté pour les PAFC. Dans le domaine SOFC, c'est Westinghouse qui tient le haut du pavé, tandis que la filière MCFC est dominée par l'Américain FuelCell Energy et son partenaire européen MTU (Daimler Chrysler).

Au Japon, la situation est plus complexe: d'une part, les grandes entreprises de la construction électrique telles Fujii, Hitachi, Mitsubishi, Toshiba et IHI y poursuivent des travaux dans le domaine des piles à combustible, d'autre part, les grands constructeurs automobiles comme Toyota, Honda et Nissan poursuivent le développement de leur propre technologie PEMFC en interne (tableau III).

En Europe, l'effort de R&D est sensiblement inférieur à ce qu'il est aux Etats-Unis et au Japon. Les activités dans la filière AFC ont pour l'essentiel été arrêtées avec l'abandon du projet de navette spatiale européenne Hermès. En PEMFC, Siemens a développé des piles pour les sous-marins non-nucléaires allemands et l'Italien De Nora en a conçu pour équiper notamment le véhicule du programme européen FEVER. De son côté, Alsthom a signé un accord avec Ballard pour développer en Europe des applications stationnaires en technologie PEMFC, tandis que Siemens est devenu leader en SOFC par l'acquisition de Westinghouse, mais les travaux de développement continuent à se faire aux Etats-Unis. Enfin, le suisse Sulzer Hexis travaille sur des SOFC de quelques kW pour applications résidentielles.

Pour le moment, les grandes options prises sur le marché automobile ne sont guère favorables aux fabricants européens de piles à combustible. Daimler Chrysler a choisi Ballard entraînant Volvo dans son sillage et pourrait disposer d'une seconde source chez Mitsubishi. Fiat se rapproche du groupe General Motors-Toyota avec des PEMFC, Toyota et Renault pourraient désormais disposer de ressources internes avec les PEMFC Nissan. Siemens et Nuvera (anciennement De Nora) devront donc se battre avec acharnement, s'ils veulent se tailler une part de ce marché (tableau IV).

III

	Public	Privé	Total
USA	100	200	300
Japon	60	120	180
Europe	30	60	90
Autres pays	10	20	30
Total	200	400	600

Source: DECISION

IV

Type de pile	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Technologie	Alkaline Fuel Cells	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Nom français	Alcaline	Polymère solide	Acide phosphorique	Carbonates fondus	Oxides solides
Température	70-100°C	70-100°C	150-210°C	550-650°C	800-1000°C
Domaine de puissance	1W- 10 kW	1 - 300 kW	1 - 300kW	10 kW - 100 MW	1 kW - 500 MW
Rendement	55-60%	32 - 40%	36 - 45%, 80% en co-génération	50 - 60%	50 - 55%, 70% en cycle combiné
Electrolyte	hydroxyde de potassium	solide à base de fluor	acide phosphorique concentré	carbonates fondus de lithium/potassium	céramique en dioxyde de zirconium
Catalyseur	platine	platine	platine	nickel	perovksites
Etat de la technologie	mature	assez mature	commerciale	prototype	prototype
Applications	- espace - auto	- espace - auto - sous-marins - stationnaire - portable	- stationnaire	- stationnaire	- APU auto - stationnaire
Leader	UTC-Toshiba (IFC), ZeTek	Ballard, IFC, Siemens, Nuvera (ex-De Nora)	UTC-Toshiba (ONSI), Fuji	FuelCell Energy (ex-ERC), MTU (Daimler Chrysler)	Siemens-Westinghouse

Source: DECISION

Fig. 4: Les éléments de base (cellules) d'une pile à combustible SOFC ont la taille d'un disque CD et produisent de 0,6 à 1 V: au premier plan, on distingue l'anode et la plaque bipolaire qui permettent l'empilement de plusieurs cellules. (Photo Sulzer Hexis)

QUELLES CHANCES LA SUISSE A-T-ELLE DE PARTICIPER AU MARCHÉ DES PILES À COMBUSTIBLE?

Entretien avec Ulf Bossel, «Monsieur "Piles à combustible" suisse», organisateur du «European Fuel Cell Forum»

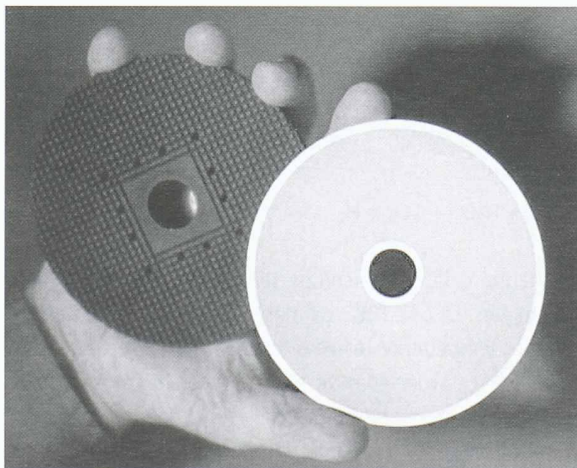
Rédaction IAS : Qu'est-ce qui a motivé votre intérêt pour les piles à combustible?

Ulf Bossel: C'est au sein de ABB (anciennement BBC) que j'ai commencé à prospecter cette technologie. En 1987, je travaillais à la division «Nouvelles technologies» et j'ai lancé une première étude sur les différentes piles à combustible existant alors. Sur la base des résultats récoltés, il m'apparaissait clairement que seules les piles à oxyde solide (SOFC) présentaient un intérêt pour notre entreprise. Elles sont particulièrement bien adaptées aux applications stationnaires et, surtout, elles acceptent n'importe quel combustible capable de s'oxyder, contrairement aux piles fonctionnant à l'hydrogène.

IAS: Cette orientation est-elle toujours valable aujourd'hui ?

UB: Oui, je pense toujours que les seules piles à avoir un avenir, dans un marché large (applications stationnaires, système auxiliaire dans le transport) sont les piles à combustible à oxyde solide. Les piles à polymères, encore trop coûteuses et dépendantes de l'hydrogène, n'ont pas atteint un degré de fiabilité et d'efficacité suffisant pour des applications stationnaires. Cependant, je dois souligner les importants efforts de recherche qui sont actuellement consentis pour développer des systèmes plus performants.

4



IAS: Quel est, à votre avis, le positionnement de la Suisse?

UB: La Suisse mène une recherche de pointe dans ses Hautes écoles en collaboration avec l'entreprise Sulzer (Sulzer Innotec et Sulzer Hexis). Cette dernière conduit actuellement plusieurs expériences pilotes en Europe et aux Etats-Unis destinées à valider son système stationnaire Sulzer Hexis dont l'industrialisation est prévue pour 2002.

A l'étranger, seul Siemens-Westinghouse possède un produit comparable basé sur la technologie à oxyde solide, un excellent produit pour applications stationnaires, qui a fonctionné plus de 16 000 heures avec un rendement de 46%, sans dégradation. Les Japonais, qui détenaient une bonne avance, ont perdu du terrain.

IAS: Quel est l'enjeu de cette technologie pour la Suisse?

UB: La Suisse est un pays de haute technologie, elle possède déjà des équipes compétentes qui ont contribué de manière significative à l'évolution des piles à combustible (fig. 4). Deux lignes principales de recherche y sont menées: celle sur les piles à combustible à oxyde solide (EPFZ, EPFL et Sulzer Hexis), et celle sur les piles à membranes polymère (PSI, EPFZ, Sulzer Innotec). En aval de ces développements, existe la possibilité de créer des produits commercialisables et de lancer des start-up pour autant qu'un marché global soit visé dès le départ.

IAS: Vous organisez depuis quatre ans un forum européen sur les piles à combustible à oxyde solide complété, pour la présente édition, par une manifestation dédiée aux piles polymère, quel rôle tenez-vous sur la scène internationale et quelles retombées en attendez-vous ?

UB: Débordant son ancrage européen, le «European Fuel Cell Forum» jouit maintenant d'une notoriété internationale et la vente des actes des colloques contribue à actualiser les résultats de la recherche et à les diffuser bien au-delà de ces rencontres. C'est ainsi que le forum est devenu une référence incontournable en termes d'échange d'idées dans le domaine des piles à combustible.