



PILES À COMBUSTIBLE

Lynne C. Myers
Division des sciences et de la technologie

Le 10 septembre 2001

**PARLIAMENTARY RESEARCH BRANCH
DIRECTION DE LA RECHERCHE PARLEMENTAIRE**

La Direction de la recherche parlementaire de la Bibliothèque du Parlement travaille exclusivement pour le Parlement, effectuant des recherches et fournissant des informations aux parlementaires et aux comités du Sénat et de la Chambre des communes. Entre autres services non partisans, elle assure la rédaction de rapports, de documents de travail et de bulletins d'actualité. Les attachés de recherche peuvent en outre donner des consultations dans leurs domaines de compétence.

**THIS DOCUMENT IS ALSO
PUBLISHED IN ENGLISH**

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UNE PILE À COMBUSTIBLE.....	2
COMBUSTIBLE CONSOMMÉ PAR LES PILES À COMBUSTIBLE	3
TYPES DE PILES À COMBUSTIBLE	6
A. Piles alcalines.....	6
B. Piles à l'acide phosphorique.....	7
C. Piles à carbonate fondu	7
D. Piles à oxyde solide.....	8
E. Piles à membrane échangeuse de protons	9
F. Autres types de piles.....	10
APPLICATIONS DES PILES À COMBUSTIBLE.....	12
A. Applications stationnaires.....	12
B. Applications mobiles.....	17
CONCLUSION.....	21



CANADA

LIBRARY OF PARLIAMENT
BIBLIOTHÈQUE DU PARLEMENT

PILES À COMBUSTIBLE

INTRODUCTION

La production et la consommation d'énergie croissent au même rythme que l'industrialisation rapide observée à l'échelle mondiale, et, en l'absence d'importantes innovations technologiques, l'utilisation accrue de combustibles fossiles qui découle de cette industrialisation influera considérablement sur la qualité et la durabilité de la vie sur Terre. La technologie des piles à combustible compte parmi les plus prometteuses sur le plan de la production efficace et non polluante d'énergie. Dans une étude récente, le Battelle Memorial Institute prédisait que les piles à combustible constitueraient l'une des dix plus importantes innovations dans le domaine de l'énergie en 2010⁽¹⁾. Ces piles ne dégagent que des quantités extrêmement faibles d'oxydes d'azote (NO_x), d'oxydes de soufre (SO_x), de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures à leur point d'utilisation et présentent un haut niveau d'efficacité permettant de compenser les effets négatifs des efforts visant à satisfaire à la demande de plus en plus grande d'énergie. Toutefois, elles consomment un combustible dont la production dégage des émissions.

On assiste à la mise au point de plus en plus rapide de piles à combustible destinées à diverses applications, dont la plupart peuvent être classées dans l'une de deux catégories, soit les applications *stationnaires*, plus précisément la production d'électricité, et les applications *mobiles*, comme dans les automobiles. Le secteur de la production d'électricité et le secteur des transports produisent collectivement plus de 50 p. 100 des gaz à effet de serre au Canada⁽²⁾, ce qui explique que la technologie des piles à combustible, qui permettrait de diminuer les émissions polluantes dans ces secteurs, retienne tellement l'attention.

-
- (1) *Battelle Experts Forecast the Top Ten Energy Innovations for 2010*, Communiqué de presse de Battelle, <http://www.battelle.org/News/00/07-26-00ENERGY.stm>.
 - (2) Groupe de l'analyse et de la modélisation, Groupe national sur le changement climatique, *Perspectives des émissions du Canada : Une mise à jour*, décembre 1999.

Le présent document :

- explique le principe du fonctionnement des piles à combustible et décrit les combustibles qu'elles utilisent;
- décrit des divers types de piles à combustible actuellement utilisées ou en cours de développement;
- décrit les applications mobiles et stationnaires existantes et nouvelles de la technologie des piles à combustible;
- examine les obstacles que la technologie doit encore franchir avant de réaliser pleinement son potentiel.

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UNE PILE À COMBUSTIBLE

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de convertir efficacement et directement en énergie électrique l'énergie chimique contenue dans un combustible. Elle produit de l'électricité en combinant chimiquement des ions hydrogène, tirés d'un combustible contenant de l'hydrogène, avec des atomes d'oxygène, et ce, sans combustion, c'est-à-dire sans les inefficacités et la pollution qui accompagnent la production classique d'électricité dans une centrale thermique. Ne comportant aucune pièce mobile et produisant très peu sinon aucun polluant au point d'utilisation, la pile à combustible constitue une solution de rechange intéressante aux méthodes actuellement utilisées pour produire de l'électricité.

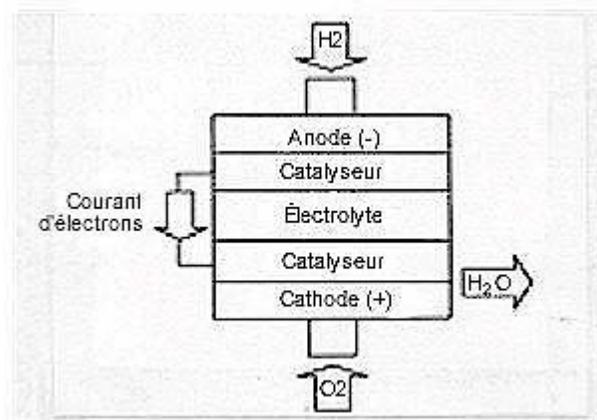
Toutes les piles à combustible fonctionnent suivant des principes semblables, et ce, quel que soit le combustible ou l'électrolyte utilisé. Une pile à combustible comprend deux électrodes – l'anode, chargée négativement, et la cathode, chargée positivement – séparées par un électrolyte. Dans la plupart des types de piles à combustible, on fait passer de l'oxygène – purifié ou contenu dans l'air – sur la cathode et de l'hydrogène sur l'anode. Ces deux électrodes sont revêtues d'un catalyseur, comme le platine, qui facilite les réactions chimiques. Sur l'anode, le proton (positif) et l'électron (négatif) de l'hydrogène sont séparés l'un de l'autre.

Le proton et l'électron sont ensuite acheminés suivant des circuits différents dans la pile (voir figure 1).

- Les *électrons* sont « collectés » et acheminés par un circuit externe jusqu'à la cathode. Le courant d'électrons dans un tel circuit constitue un courant électrique et peut servir à entraîner un moteur, à alimenter une lampe ou à chauffer de l'eau.

- Pendant ce temps, les *protons*, attirés par la charge opposée, traversent l'électrolyte pour atteindre la cathode de la pile, où ils se « lient » de nouveau aux électrons acheminés par le circuit externe, puis se combinent à l'oxygène, qui circule sur la cathode, pour donner de l'eau (H_2O) et de la chaleur.

Figure 1 : Diagramme simplifié d'une pile à combustible



Source : Fuel Cells 2000, *What Is a Fuel Cell?* février 2000.

Une pile à combustible ne produit que quelques volts d'électricité par paire d'électrodes. Il faut donc réunir un certain nombre de piles pour produire l'énergie qu'exigent la plupart des applications. Ces batteries de piles à combustible peuvent ensuite être réunies dans un module de taille appropriée à l'application. La nature modulaire des piles à combustible constitue un avantage, car elle permet de faire correspondre la taille de l'unité de production à la demande d'électricité.

COMBUSTIBLE CONSOMMÉ PAR LES PILES À COMBUSTIBLE

Comme l'indique la description précédente, une pile à combustible alimentée à l'hydrogène et à l'oxygène produit de l'électricité sans combustion, et le seul sous-produit de la réaction est l'eau. L'oxygène utilisé provient de l'air. L'approvisionnement en hydrogène est un processus relativement compliqué et polluant. Sur Terre, l'hydrogène est toujours combiné à un ou à plusieurs autres éléments. Par exemple, l'eau (H_2O) est un composé formé d'hydrogène et

d'oxygène, et le gaz naturel (CH₄ ou méthane) est un composé formé d'hydrogène et de carbone. Pour obtenir de l'hydrogène pur, il faut de l'énergie pour séparer l'atome d'hydrogène des autres éléments du composé. Par conséquent, bien que l'utilisation finale de l'hydrogène par un véhicule ou par une autre application puisse être exempte de pollution, le cycle de vie complet de l'hydrogène ne l'est pas. C'est pourquoi il ne faut pas considérer l'hydrogène comme une source d'énergie, mais plutôt comme un vecteur d'énergie.

De nombreux travaux sont en cours pour déterminer quel sera le combustible de choix pour la production d'hydrogène et, donc, pour l'alimentation des piles à combustible. Ce choix déterminera également la forme que devra prendre l'infrastructure d'approvisionnement. L'hydrogène peut être produit commercialement à partir de combustibles fossiles (tels que le gaz naturel ou l'essence), de produits intermédiaires (tels que les produits des raffineries), d'éléments de la biomasse (tels que les copeaux de bois), de biogaz (tels que l'ammoniac), de déchets, et par l'électrolyse de l'eau. Dans l'avenir, les méthodes employées pour obtenir de l'hydrogène pourraient aussi comprendre l'utilisation d'algues vertes cultivées dans des conditions anaérobies, ou son extraction du glucose.

Manifestement, un certain nombre de méthodes différentes permettent de produire de l'hydrogène, et la méthode choisie influera directement sur la quantité de polluants libérés pendant le cycle de vie complet. Bon nombre des principales méthodes qui sont offertes sur le marché comportent l'extraction de l'hydrogène des combustibles fossiles. Ce procédé – connu sous le nom de reformage à la vapeur – consiste à chauffer un mélange d'eau et de gaz naturel, de pétrole brut ou de méthanol, pour en séparer l'hydrogène pur. La production de la chaleur nécessaire au procédé est une source de pollution. De plus, diverses formes de carbone sont produites comme déchets lorsqu'on extrait l'hydrogène d'un mélange d'hydrocarbures (combustibles fossiles).

L'hydrogène peut également être produit commercialement par électrolyse, un processus qui utilise un courant électrique pour séparer les atomes d'hydrogène et d'oxygène de l'eau (l'inverse de la réaction qui se produit dans une pile à combustible). Dans ce cas, le combustible qui sert à produire de l'électricité détermine la quantité d'émissions pendant la durée du cycle de vie complet du procédé. La production d'électricité à partir d'énergie éolienne, d'énergie solaire ou d'une autre source d'énergie renouvelable non polluante n'entraîne pratiquement aucune émission de gaz à effet de serre. Comme il a été mentionné précédemment, il pourrait être possible dans l'avenir de produire de l'hydrogène pur renouvelable en utilisant une nouvelle méthode de culture d'algues vertes.

Une étude réalisée récemment par la David Suzuki Foundation et par le Pembina Institute en Alberta fait une comparaison instructive des émissions de dioxyde de carbone attribuables à diverses technologies. Cette étude examine la quantité de dioxyde de carbone qui est produit lorsqu'un véhicule (dans ce cas, une Mercedes-Benz de classe A) parcourt 1 000 kilomètres en utilisant six différents systèmes d'approvisionnement en carburant à base de combustibles fossiles. Un résumé des résultats est présenté au tableau 1.

Tableau 1 : Émissions de dioxyde de carbone, par 1 000 km

Système d'approvisionnement en carburant	Émissions (kg)
1. Automobile ordinaire mue par un moteur à combustion interne qui utilise de l'essence	248
2. Automobile mue par des piles à combustible qui utilisent de l'hydrogène produit par une centrale électrique (combustible fossile)	237
3. Automobile mue par des piles à combustible qui utilisent de l'hydrogène produit à bord à partir de l'essence	193
4. Automobile mue par des piles à combustible qui utilisent de l'hydrogène produit à bord à partir de méthanol	162
5. Automobile mue par des piles à combustible qui utilisent de l'hydrogène produit à une station service à partir du gaz naturel	80
6. Automobile mue par des piles à combustible qui utilisent de l'hydrogène produit dans une grande usine à partir de gaz naturel	70

Source : « Fuel Cells; A Green Revolution? » *Executive Summary*, David Suzuki Foundation et Pembina Institute, mars 2000.

Cette étude ne comprenait pas toutes les combinaisons possibles de combustibles et de piles à combustible, mais elle illustre clairement l'incidence du choix de l'infrastructure d'approvisionnement sur les émissions des véhicules mus par des piles à combustible.

TYPES DE PILES À COMBUSTIBLE

Un certain nombre de types de piles à combustible sont en développement; ces piles sont généralement caractérisées par l'électrolyte qu'elles utilisent. L'électrolyte est la substance qui se trouve entre l'anode et la cathode et qui sert de milieu à l'échange d'ions. Chaque type de pile à combustible présente des caractéristiques très différentes, par exemple la température de fonctionnement, la chaleur disponible, la densité de puissance (puissance produite compte tenu de la taille et du poids) et la tolérance aux impuretés dans le combustible. En raison de ces différences, chaque pile convient à une application particulière. Les diverses piles sont rendues à divers stades de développement. Jusqu'à maintenant, la plupart des travaux de recherche et de développement se sont concentrés sur cinq principaux types de piles à combustible : les piles alcalines (AFC), les piles à l'acide phosphorique (PAFC), les piles à carbonate fondu (MCFC), les piles à oxyde solide (SOFC) et les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Tout récemment, plusieurs nouveaux types de piles à combustible ont été l'objet de travaux de recherche et développement, dont la pile directe à méthanol (DMFC) et la pile à régénération (RFC). Cette partie de l'article décrit brièvement chaque type de pile et ses particularités.

A. Piles alcalines

La pile alcaline (AFC) est l'une des premières piles à combustible qui a été mise au point et elle est utilisée depuis longtemps par la NASA dans les missions spatiales – y compris les missions Apollo et celles de la navette spatiale – pour produire de l'électricité et de l'eau. Comme l'indique leur nom, ces piles utilisent un liquide alcalin (l'hydroxyde de potassium) comme électrolyte⁽³⁾. Elles fonctionnent à basse température (80 °C) et sont très efficaces, atteignant des rendements de 70 p. 100. Cependant, jusqu'à récemment, leur coût élevé a restreint leurs applications à des créneaux tels que le programme spatial, dans lequel le sous-produit qu'est l'eau constitue une marchandise de valeur. Un certain nombre de

(3) National Fuel Cell Research Centre, *Fuel Cell Technology Comes of Age*, 2 mai 2000 (<http://www.nfrcr.uci.edu/journal/article/fcarticleEhtm>).

compagnies cherchent des façons de réduire le coût global des AFC, avec l'espoir de trouver un plus grand marché dans l'avenir⁽⁴⁾.

B. Piles à l'acide phosphorique

Dans la pile à l'acide phosphorique (PAFC), dont le rendement est supérieur à 40 p. 100, l'acide phosphorique est l'électrolyte. En comparaison, le moteur à combustion interne le plus efficace a un rendement d'environ 30 p. 100. Parce que ce type de pile fonctionne à la température relativement élevée de 200 °C, elle peut être exploitée en cogénération. Si l'on utilise également la vapeur produite par la pile à combustible, le rendement global peut atteindre 85 p. 100⁽⁵⁾.

La PAFC – le premier type de pile mise au point à l'échelle commerciale – est déjà utilisée dans des applications stationnaires pour produire de l'électricité (et parfois même de la chaleur) dans des hôpitaux, des maisons de soins infirmiers, des hôtels, des immeubles de bureaux, des écoles, des centrales électriques de services publics et des aéroports⁽⁶⁾. Ces piles à combustible pourraient également être utilisées dans de gros véhicules, comme les autobus et les trains, où leur encombrement et leur température de fonctionnement élevée pourraient être tolérés.

C. Piles à carbonate fondu

La pile à carbonate fondu (MCFC) exploite une réaction chimique légèrement plus compliquée que celle qui intervient dans bon nombre d'autres piles à combustible qui existent aujourd'hui. Dans le cas des MCFC, ce sont des ions carbonate – plutôt que des ions hydrogène – qui sont transférés à travers l'électrolyte, lequel est constitué de carbonate qui, à la température de fonctionnement de la pile (650 °C), est à l'état fondu. Au cours des premières années qui ont suivi la mise au point de ce type de pile, certains détracteurs de cette technologie ont souligné que l'utilisation de carbonates hautement corrosifs constituait un problème sérieux

(4) « Types of Fuel Cells », *Fuel Cells 2000* (<http://216.51.18.233/fctypes.html>).

(5) *Ibid.*

(6) *Ibid.*

relativement à la conception et à l'entretien de ce genre d'unités⁽⁷⁾ Cependant, des progrès en science des matériaux ont permis de régler la plupart des problèmes au cours des quatre ou cinq dernières années.

La partie de ce document intitulée « Combustible consommé par les piles à combustible » explique que des combustibles normalement riches en hydrogène – comme le gaz naturel, le méthanol, le gaz des mines de houille ou le gaz de digesteurs, ou encore les hydrocarbures liquides comme l'essence – doivent d'abord être « reformés » – modifiés chimiquement – pour en extraire l'hydrogène qui alimentera les piles à combustible. Ce procédé requiert de la chaleur.

Parce que les MCFC fonctionnent à des températures très élevées, il a été possible de concevoir et de construire un système de piles à combustible à carbonate fondu dans lequel le reformage du combustible et la production d'électricité se font dans la même unité, ce qui a leur valu le nom de « piles à combustible direct ». La chaleur dégagée par le fonctionnement de la pile à combustible sert à produire de la vapeur, qui est ensuite utilisée pour reformer le gaz naturel (ou un autre combustible). Le reformage à la vapeur dans une batterie de piles à combustible produit de l'électricité, de la vapeur d'eau et de la chaleur, mais également une petite quantité de CO₂. Sur le plan du coût, la MCFC possède un avantage sur les autres piles à combustible actuellement en développement, parce qu'elle utilise du nickel comme catalyseur plutôt que du platine (plus coûteux).

D. Piles à oxyde solide

Plus récente que les piles mentionnées précédemment, la pile à combustible à oxyde solide (SOFC) semble gagner du terrain. Son électrolyte est un oxyde métallique solide, sous la forme d'un matériau céramique. L'emploi d'un électrolyte céramique permet d'utiliser le système même à des températures plus élevées – généralement 1 000 °C – que les températures de fonctionnement des piles MCFC.

Le fonctionnement à ces températures permet de reformer le combustible dans la batterie de piles, tout comme dans les piles à carbonate fondu. On a montré que les piles à oxyde solide atteignent des rendements de plus de 60 p. 100. Ces rendements élevés sont en partie

(7) Tim Beardsley, « Beyond Batteries », *Scientific American*, décembre 1996 (www.sciam.com/explorations/122396explorations.html).

attribuables au fait que, en plus de produire de l'électricité, les SOFC produisent de la chaleur à haute température, qui peut être exploitée dans un système de cogénération. Cette chaleur pourrait également être utilisée dans une installation de chauffage centralisée, améliorant encore le rendement global du système. Une compagnie utilise également les gaz chauds sous pression provenant d'une batterie de SOFC pour entraîner un micro-turboalternateur, ce qui lui permet de produire plus d'électricité que celle fournie uniquement par les piles. De plus, le rendement du système peut être grandement amélioré grâce à ce type de conception⁽⁸⁾.

Aux États-Unis, les SOFC font l'objet de beaucoup de recherche en ce moment, et les progrès réalisés en matière de conception et de fonctionnement permettront très bientôt de les commercialiser. Les SOFC les plus récentes fonctionnent à l'inverse d'une pile à combustible à l'hydrogène. L'oxygène capte les électrons qui entrent dans la pile depuis la cathode, ce qui crée des ions oxygène portant une charge négative. Ces ions migrent ensuite à travers la membrane céramique solide (faite d'une substance comme la zircone stabilisée à l'yttria). À l'anode, l'oxygène réagit avec l'hydrocarbure utilisé comme combustible pour produire de l'électricité, de l'eau et du dioxyde de carbone⁽⁹⁾. Le reformage, c'est-à-dire la conversion des hydrocarbures à l'intérieur des piles, n'est pas nécessaire dans ce cas. Toutefois, il a fallu régler certains problèmes liés à la liaison du carbone sur l'anode de nickel à des températures élevées. Les travaux se poursuivent et les nouvelles SOFC semblent fort prometteuses dans des applications stationnaires.

E. Piles à membrane échangeuse de protons

Au lieu d'utiliser un électrolyte liquide ou un électrolyte solide lourd, la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) possède, en guise d'électrolyte, une membrane mince faite d'un polymère solide. En conséquence, les PEMFC sont beaucoup plus légères que les autres types de piles et conviennent donc mieux aux applications mobiles comme les automobiles.

Les PEMFC fonctionnent à basse température (80 °C) et présentent une densité de puissance élevée. Elles peuvent également varier rapidement la quantité d'électricité produite pour s'adapter à des fluctuations de la demande. Pour cette raison, elles conviennent bien aux

(8) « New Tigers in the Fuel Cell Tank », *Science*, vol. 288, 16 juin 2000, p. 1956.

(9) *Ibid.*

exigences des automobiles, où un démarrage rapide est nécessaire⁽¹⁰⁾. C'est une compagnie canadienne qui domine dans le développement et la commercialisation des PEMFC à l'échelle mondiale.

F. Autres types de piles

En plus des principaux systèmes à piles à combustible décrits ci-dessus, un certain nombre de nouvelles technologies font l'objet de recherches en cours. Les plus prometteuses sont la pile directe au méthanol (DMFC) et la pile à régénération (RFC).

La technologie de la DMFC est similaire à celle de la PEMFC du fait qu'elle utilise une membrane en polymère comme électrolyte. Dans la DMFC, toutefois, le catalyseur sur l'anode extrait l'hydrogène directement du méthanol liquide, ce qui élimine la nécessité d'avoir un reformeur de combustible externe. L'élimination du reformeur augmente le rendement de la DMFC d'environ 40 p. 100, et la pile fonctionne entre 50 et 90 °C.

Les RFC, bien que prometteuses, en sont encore au premier stade de développement. Elles possèdent une option de production d'électricité en circuit fermé. On alimente le système avec de l'eau, qui par électrolyse alimentée à l'énergie solaire, est séparée en hydrogène et en oxygène. L'hydrogène et l'oxygène traversent la pile comme dans les piles décrites précédemment en produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. L'eau produite est retournée à l'électrolyseur à énergie solaire et le procédé recommence. Aux États-Unis, la NASA participe à la recherche sur les RFC parce qu'un système en circuit fermé, alimenté à l'énergie solaire, présente un intérêt manifeste pour une utilisation dans l'espace⁽¹¹⁾. Toutefois, jusqu'à maintenant, le coût de ce type de pile limite ses applications possibles sur Terre.

Le rendement des divers types de piles à combustible décrites ci-dessus (à l'exception des RFC) est comparé au tableau 2.

(10) *Ibid.*

(11) *Ibid.*

Tableau 2 : Comparaison du rendement des systèmes à piles à combustible

Type de pile	Rendement maximal (%)	Rendement maximal comprenant la cogénération (%)	Température de fonctionnement maximale (°C)
Alcaline (AFC)	70 ^a	Sans objet	70 ^b
À l'acide phosphorique (PAFC)	37-42 ^c	Presque 85 ^d	200 ^e
À carbonate fondu (MCFC)	55 ^f	80 ^g	650 ^h
À oxyde solide (SOFC)	55 ⁱ	60-80 ^j	980 ^k
À membrane échangeuse de protons (PEMFC)	40-60 ^l	Sans objet	70-80 ^m
Directe au méthanol (DMFC)	40 ⁿ	Sans objet	50-90 ^o

- a « Types of Fuel Cells », *Fuel Cells 2000*, novembre 2000.
- b C. Padro et V. Putche, Survey of Economics of Hydrogen Technologies, National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, Golden, Colorado, septembre 1999.
- c *Ibid.*
- d « Types of Fuel Cells », *Fuel Cells 2000*, novembre 2000.
- e *Ibid.*
- f Tim Beardsley, « Beyond Batteries », *Scientific American*, décembre 1996, (www.sciam.com/explorations/122396explorations.html).
- g *Ibid.*
- h *Ibid.*
- i *Ibid.*
- j *Ibid.*
- k « Types of Fuel Cells », *Fuel Cells 2000*, novembre 2000.
- l C. Padro et V. Putche, Survey of Economics of Hydrogen Technologies, National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, Golden, Colorado, septembre 1999.
- m « Detroit Auto Show: Ballard Announces Production-Ready Fuel Cell Module and Hints at Factory Plans », *Hydrogen and Fuel Cell Letter*, février 2000 (www.hfcletter.com/letter/february00/feature.html).
- n « Types of Fuel Cells », *Fuel Cells 2000*, novembre 2000.
- o *Ibid.*

APPLICATIONS DES PILES À COMBUSTIBLE

A. Applications stationnaires

Les applications stationnaires des piles à combustible, principalement celles reliées aux centrales électriques commerciales, s'intègrent plus rapidement que les applications mobiles (dans les automobiles), parce qu'elles présentent un défi moins important sur le plan de la conception, par exemple en ce qui a trait à l'encombrement et au poids. De fait, des générateurs à piles à combustible de diverses dimensions en sont déjà au stade de la commercialisation. Des systèmes de piles à combustible peuvent fournir de l'électricité dans des endroits non reliés au réseau électrique primaire, ce qui permet de retarder sinon d'éliminer la nécessité d'un branchement au réseau. On observe couramment cette situation dans des régions éloignées de pays industrialisés, de même que dans de nombreux pays en développement. On explore également la possibilité de concevoir un système de piles à combustible qui offre la possibilité de fonctionner avec et sans connexion au réseau électrique⁽¹²⁾.

Les centrales électriques à piles à combustible offrent certains avantages très importants par rapport aux systèmes de production d'électricité traditionnels.

- Il n'y a pratiquement pas de pollution au point d'utilisation finale, ce qui permet d'utiliser ces systèmes dans des endroits comme les régions urbaines densément peuplées, où des systèmes traditionnels ne respecteraient pas les exigences de faibles émissions.
- Étant donné que les piles à combustible sont réunies en batteries, il est possible de construire des systèmes de diverses dimensions. Une telle souplesse permet d'ajuster la production à la demande, alors que la production traditionnelle requiert habituellement la construction de très grandes centrales pour réaliser des économies d'échelle. Cette souplesse pourra être davantage mise à profit au fur et à mesure de la déréglementation de la production d'électricité aux États-Unis, au Canada et dans d'autres pays industrialisés.

Les gouvernements de divers pays ont depuis longtemps reconnu le potentiel de la technologie des piles à combustible; par moments, ils ont offert à l'industrie des incitatifs financiers pour encourager la mise au point et la commercialisation de ces piles. Au Canada, le Centre de la technologie de l'énergie de CANMET (CTEC) de Ressources naturelles Canada cherche, depuis 1983, à rendre les piles à combustible commercialisables. À ce jour, le

(12) National Fuel Cell Research Centre, *supra*, note 3.

gouvernement fédéral a versé plus de 73 millions de dollars pour appuyer le développement des piles à combustible. Par exemple, en Colombie-Britannique, le CTEC travaille avec la Ballard Power Systems au développement de ses piles à combustible de pointe qui comportent une membrane échangeuse de protons. En Ontario, le CTEC a collaboré avec la Hydrogenics Corporation aux efforts de R-D reliés aux générateurs à pile alimentée au gaz naturel. En mars 2001, le fédéral a annoncé l'octroi à la compagnie d'une somme supplémentaire de 2 millions de dollars pour la R-D. De cette somme, 1,6 million de dollars proviendront des Mesures d'action précoce en matière de technologie, une composante du Fonds d'action pour le changement climatique; le reste, soit 400 000 dollars, proviendra de Ressources naturelles Canada. Ces efforts conjugués continueront de faire progresser les technologies qui permettent aux piles à combustible pour les applications stationnaires de produire de l'énergie à des températures extrêmes. La Hydrogenics a modifié des piles à combustibles pour qu'elles puissent fonctionner à des températures aussi basses que -40 °C dans l'Arctique. Elle étudie actuellement la possibilité de faire d'autres modifications pour permettre l'utilisation de ses piles à combustible dans le désert. Certains systèmes sont actuellement mis au point pour alimenter des immeubles de logements multiples et de petits édifices commerciaux⁽¹³⁾.

Le gouvernement américain soutient également depuis longtemps la recherche sur les piles à combustible. Par exemple, en juillet 2000, le département américain de l'Énergie a octroyé une augmentation de 40 millions de dollars et une prolongation de trois ans à la FuelCell Energy Inc. dans le cadre de son Carbonate Fuel Cell Co-operative Program. Le financement accordé depuis le début du programme en 1994 totalise 144 millions de dollars, y compris la part de la FuelCell Energy. Ces sommes ont été affectées à la livraison de centrales à piles à combustible commerciales, autonomes, efficaces et non polluantes, au cours de la période 2001-2002. Le travail en cours se concentrera sur la réduction des coûts, l'évaluation de la façon de prolonger la durée utile et l'amélioration de la conception basée sur des essais menés dans des conditions réelles. Cette technologie, conçue pour le marché des applications stationnaires, utilise directement le gaz naturel comme combustible. Elle permettra d'alimenter des hôpitaux, des écoles, des centres de données et d'autres installations commerciales et industrielles. Au cours d'essais, une centrale de 250 kW a alimenté avec succès les installations de la compagnie

(13) Hydrogenics Corporation, *Hydrogenics Receives Project Funding of Two Million Dollars From the Government of Canada*, communiqué, 26 mars 2001.

pendant un certain temps. Les systèmes qu'on trouve actuellement sur le marché comprennent des modèles d'une puissance de 300 kW, 1,5 MW et 3,0 MW⁽¹⁴⁾.

Les gouvernements contribuent aussi à la commercialisation de la technologie des piles à combustible en offrant une mise en marché préliminaire du produit et une variété d'incitatifs fiscaux. Le gouvernement américain a été un chef de file dans l'achat de cette nouvelle technologie : il exploite 30 unités de cogénération et accorde, dans le cadre du Climate Change Fuel Cell Program, des subventions de 1 000 \$ par kilowatt aux acheteurs de centrales à piles à combustible. Le Canada, le Japon et l'Allemagne accordent un appui aux premiers achats et tentent de faire baisser les coûts de cette technologie au moyen de crédits d'impôt, de prêts à faible taux d'intérêt et de subventions. La Ballard Power, par exemple, a reçu 30 millions de dollars du gouvernement canadien et s'est depuis alliée à une filiale d'une compagnie basée au New Jersey pour faciliter la commercialisation de ses unités de production stationnaires⁽¹⁵⁾.

Le soutien du gouvernement ne se limite pas aux applications stationnaires des piles à combustible, mais vise aussi les applications mobiles, dont traitera ultérieurement ce document. Au Canada, l'industrie des piles à combustible s'est développée depuis une dizaine d'années et, en 1999, le gouvernement fédéral lançait l'Initiative nationale de recherche et d'innovation dans le domaine des piles à combustible. Ressources naturelles Canada (RNCan), le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) collaborent à ce programme mis sur pied en réponse aux demandes d'aide stratégique et opérationnelle à la R-D formulées par l'industrie. Les diverses composantes de l'industrie des piles à combustible se sont également unies et ont formé une association industrielle, Piles à combustible Canada, pour collaborer avec le gouvernement à la promotion du développement global de l'industrie. Selon les termes de l'Initiative nationale, le gouvernement s'est engagé dans un programme d'une durée de cinq ans visant à mettre sur pied un Centre de technologie de la pile à combustible à Vancouver et un Programme de mise en oeuvre de la technologie de la

(14) U.S. Department of Energy, *FuelCell Energy Inc. Receives DOE Award of \$40 Million Increase and Three-Year Extension to DFC-r-Product Design Improvement Program*, communiqué, juillet 2000 (http://fuelcellenergy.com/site/investor/press/releases/2000/07_13_00.html et <http://www.erc.com/site/products/products.html>).

(15) « What is a Fuel Cell », *Fuel Cells 2000* (<http://216.51.18.233/whatis.html>).

pile à combustible. De plus, le CRSNG et RNCAN ont mis sur pied un fonds de partenariat de 14 millions de dollars destiné spécifiquement aux piles à combustible⁽¹⁶⁾.

De nombreuses compagnies s'intéressent maintenant aux piles à combustible et tentent de devancer leurs concurrents sur le marché. Comme de nouveaux projets sont annoncés tous les mois, il est difficile de se tenir au courant des derniers développements. Plusieurs exemples sont présentés ici pour illustrer l'intérêt que suscitent les applications stationnaires des piles à combustible.

La Siemens Westinghouse Power Corporation et la Southern California Edison ont déjà testé avec succès la première combinaison d'une pile à combustible à oxyde solide (SOFC) sous pression et d'un micro-turboalternateur. L'essai en usine de cet hybride a produit assez d'énergie pour alimenter un hôtel ou un mail linéaire – soit 164 kW et 21 kW produits par la SOFC et le micro-turboalternateur, respectivement.

La Siemens Westinghouse a également conclu un accord avec l'Ontario Power Generation (OPG) pour construire un modèle de démonstration de son système de cogénération à SOFC de 250 kW, qui sera alimenté au gaz naturel⁽¹⁷⁾. Le projet de l'OPG est un modèle de partenariat en action. Lorsqu'elle a annoncé le projet en avril 2000, l'OPG a souligné que, en collaboration avec le gouvernement canadien, elle construirait la plus grosse centrale précommerciale à SOFC au monde pour la production d'électricité et de chaleur. Le département américain de l'Énergie et la Siemens Westinghouse Power Corporation contribuent également au financement de ce projet de 18 millions de dollars. L'OPG contribue 3,7 millions de dollars au projet. Le gouvernement canadien investit plus de 2 millions de dollars dans le prototype : 1,1 million de dollars provenant des Mesures d'action précoce en matière de technologie, une composante du Fonds d'action pour le changement climatique, 373 000 dollars de RNCAN, et un financement additionnel du CNRC, dans le cadre de l'Initiative nationale de recherche et d'innovation dans le domaine des piles à combustible. Le système est au stade de la réalisation, et on prévoit que sa mise en service se fera à la fin de 2001 ou au début de 2002.

(16) Pour plus de renseignements, voir Rod McMillan (directeur du Programme des piles à combustible), *NRC/NRCAN/NSERC Fuel Cell Research and Innovation Initiative: An Opportunity*, communication à la 10^e Conférence canadienne sur l'hydrogène, Québec, mai 2000.

(17) « Stationary Power », *Fuel Cell Technology Update*, 2000 (<http://www.fuelcells.org/tu2000.htm#April00>).

En plus des applications reliées aux centrales électriques, les compagnies pensent maintenant à utiliser les piles à combustibles dans le secteur résidentiel. La première application résidentielle de la technologie des piles à combustible aux États-Unis date de 1998. La compagnie qui a dirigé l'essai, la Plug Power, prévoit fabriquer le produit commercialement dans un avenir rapproché, au coût approximatif de 4 000 \$US par résidence. Le département américain de l'Énergie, qui a investi une certaine somme d'argent dans la réalisation de cet essai, a déclaré qu'il prévoit que des milliers de maisons seront alimentées par des piles à combustible dans un proche avenir⁽¹⁸⁾. La Plug Power a franchi une autre étape vers la commercialisation de ses piles à combustible résidentielles en s'engageant dans un programme de 7 millions de dollars US avec la Long Island Power Authority (LIPA) de New York, dans le cadre duquel 75 piles à combustible seront branchées au réseau de distribution d'électricité de cette dernière. Ce programme, qui fait partie de la Clean Energy Initiative de la LIPA, aidera à concevoir et à élaborer des mesures qui permettront d'utiliser sur une grande échelle la technologie non polluante des piles à combustible en guise de complément aux moyens habituels de production d'électricité dans ce milieu urbain.

La crise de l'énergie survenue en Californie en 2001 offre à l'industrie des piles à combustible résidentielle une occasion rêvée d'élargir son marché. Après avoir fait l'expérience de pannes partielles et générales, les consommateurs de l'endroit ont moins confiance dans le réseau de distribution d'électricité et, par conséquent, sont probablement plus intéressés par l'idée d'avoir leur propre générateur à piles à combustible.

L'utilisation des piles à combustibles résidentielles est en train d'atteindre le stade de la commercialisation aux États-Unis, au Canada et en Europe, mais le Japon, prévoit-on, adoptera cette technologie plus rapidement que les autres pays industrialisés, étant donné sa demande d'électricité par ménage plus basse que celle des pays de l'hémisphère occidental. La Ballard Power Systems, chef de file canadien en technologie des piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC), a reconnu la valeur de ce marché potentiel et s'est jointe au Matsushita Electric Works pour adapter son unité portable de un kilowatt (conçue à l'origine pour des services d'urgence tels que l'utilisation sur le terrain par les services de police et d'incendie) pour qu'elle puisse être utilisée dans des chalets et des résidences (urgence et loisir)⁽¹⁹⁾. Dans le

(18) *New York Times*, 17 juin 1998.

(19) Matsushita Electric Works Ltd., *Worlds First Portable Fuel Cell Generator Fuelled by LPG Cassette Cylinders*, dépliant de la compagnie, mars 2000.

cadre de ce projet, la Ballard a déjà vendu de ses PEMFC Mark 900 pour une valeur de plus de 1 million de dollars à la Matsushita. Le système proposé pourra produire suffisamment d'électricité pour satisfaire aux besoins d'une maison japonaise moyenne en électricité, en chauffage et en eau chaude en dehors des heures de pointe, ou pendant les situations d'urgences. La production de l'unité sera augmentée aux heures de pointe par l'apport d'électricité traditionnelle provenant du réseau de distribution d'électricité du Japon⁽²⁰⁾. Les compagnies susmentionnées ne sont que deux parmi les nombreuses compagnies à progresser vers le stade de la commercialisation des applications stationnaires des piles à combustible.

B. Applications mobiles

Les applications mobiles mettent à profit la souplesse qu'offre la technologie des piles à combustible, sur le plan des dimensions et celui de la conception; la baisse des coûts de production sera accompagnée d'une expansion accrue des applications. Étant donné les préoccupations que suscitent la pollution urbaine et le réchauffement de la planète, le secteur de l'automobile est un marché important pour cette technologie.

Les véhicules mus par des piles à combustible offriront de nombreux avantages par rapport aux véhicules mus par un moteur à combustion interne traditionnel. Par exemple, la consommation de carburant de véhicules sera beaucoup plus faible, leur durée de vie plus longue et leur entretien moins cher. Il ne faut plus démontrer que l'utilisation de piles à combustible est possible dans des applications mobiles, mais plutôt créer une demande par l'intégration créative de la technologie dans l'industrie des transports, et ce, à un coût raisonnable.

Une étude menée par l'Allied Business Intelligence prévoit que les piles à combustible pour automobiles accapareront d'environ 4 p. 100 du marché de l'automobile d'ici 2010. Cette étude va jusqu'à avancer que les PEMFC (comme celles produites par la Ballard Power Systems) domineront le marché et représenteront 80 p. 100 de toutes les piles à combustible pour automobiles⁽²¹⁾.

En effet, les applications mobiles des piles à combustible ont maintenant atteint une certaine maturité technologique. L'hypothèse initiale selon laquelle les véhicules lourds perceraient sur le marché avant les véhicules légers pour passagers s'est vérifiée. Les services de

(20) « Fuel-cell generator developed for Japanese market », *Ottawa Citizen*, janvier 2000.

(21) *Fuel Cell Technology Update*, juin 2000 (<http://www.fuelcells.org/tu2000.htm#June00>).

transport en commun de Chicago et de Vancouver ont participé à des projets-pilotes de grande envergure portant sur des autobus mus par des PEMFC de la Ballard. Chacune de ces villes a acheté, à ce jour, trois de ces autobus.

S'inspirant de cette expérience, la Daimler Chrysler est devenue la première compagnie à offrir des autobus commerciaux mus par des piles à combustible aux organismes de transport en commun à l'étranger. Leurs autobus sont munis de moteurs alimentés par des PEMFC de la Ballard. La Daimler-Chrysler a annoncé qu'elle prévoyait construire 30 autobus de ville mus par des piles à combustible pour des compagnies de transport, et que la livraison se ferait en 2002. Les commandes sont arrivées de toute part – y compris 17 provenant de villes européennes – et la demande a rapidement dépassé l'offre. Seules dix de ces commandes, comportant chacune trois autobus, peuvent être exécutées, à moins que la compagnie n'accroisse sa production prévue.

D'autres compagnies devront augmenter leur production pour satisfaire à la demande croissante. En février 2001, les Nations Unies ont annoncé que le feu vert avait été donné à un projet-pilote concernant des autobus de ville alimentés par des piles à combustible. Des sommes provenant du Fonds pour l'environnement mondial (une composante du Programme de développement des Nations Unies) permettront de mettre en service de 40 à 50 autobus alimentés par des piles à combustible entre 2002 et 2003 dans des villes importantes et des capitales où les pires taux de pollution de l'air ont été enregistrés. Grâce à ce projet de 130 millions de dollars, cette technologie se répandra au Brésil, au Mexique, en Égypte, en Inde et en Chine.

Actuellement, d'importants progrès sont réalisés dans le domaine de la mise au point d'automobiles et de véhicules utilitaires légers alimentés par des piles à combustible. Au rythme où cette technologie se développe, on prévoit que plus de 100 000 véhicules alimentés par des piles à combustible seront utilisés dans le monde d'ici 2004.

Tous les grands fabricants d'automobiles mettent maintenant au point des prototypes⁽²²⁾. La Ballard Power Systems a conclu une alliance stratégique avec nombre d'entre eux, et la PEMFC apparaît comme la pile à combustible de choix pour l'automobile. Par exemple, la Ballard fournit actuellement des moteurs à piles à combustible aux sociétés Daimler-Chrysler, Daimler-Benz, Ford du Canada Limitée, General Motors, Nissan, Honda, Volkswagen

(22) National Fuel Cell Research Centre, *supra*, note 3.

et Volvo. Au Japon, la Mitsubishi Electric et la Fuji Heavy Industry (division de la recherche de la Subaru) prennent également part au développement de la PEMFC. Elles vont tester leur nouvelle pile à combustible à électrolyte polymère plat sur le véhicule utilitaire léger Subaru Sambaer⁽²³⁾. En juillet 2001, la Toyota a annoncé son intention de lancer un véhicule commercial alimenté par des piles à combustible en 2003. Le combustible sera l'hydrogène sous haute pression⁽²⁴⁾.

Les moteurs à piles à combustible, munis de PEMFC de la Ballard et d'autres PEMFC, seront comparables aux moteurs traditionnels pour ce qui est de l'encombrement, du poids, de la durée de vie, de la sécurité, de l'accélération, de la vitesse, de l'autonomie et du temps de ravitaillement. La Ballard continue d'améliorer la densité de puissance, le rendement du combustible, la conformité à la réglementation environnementale et la fiabilité. Cette compagnie concentre maintenant ses efforts sur la réduction des coûts de production et sur l'augmentation du volume de production. En fait, elle a annoncé, au début de 2000, qu'elle construirait la première unité de production en grandes quantités pour son modèle le plus récent – le Mark 900 – du module qui comprend une batterie de piles à combustible et une unité de propulsion⁽²⁵⁾. Connue sous le nom de Plant One, cette unité de production est maintenant en service et la compagnie acquiert une précieuse expérience dans la fabrication commerciale de piles à combustible.

La pile à combustible n'est pas la seule technologie qu'il faille développer avant que les véhicules mus par de telles piles n'apparaissent sur le marché. La question de l'infrastructure reliée au combustible fait toujours l'objet d'un débat. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le degré de pollution associé à l'utilisation de piles à combustible est déterminé par la façon dont l'hydrogène est produit. Certains préconisent l'utilisation d'hydrogène pur, produit dans des usines centralisées qui effectuent le reformage du gaz naturel, du méthanol ou d'autres carburants, ou qui produisent de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. L'hydrogène devrait alors être stocké à bord du véhicule, ce qui suscite chez certains de l'inquiétude au sujet de la sécurité. Cependant, des essais ont montré que les technologies

(23) *Fuel Cell Technology Update*, mai 2000.

(24) « Toyota Plans to Start Selling Fuel Cell Cars in 2003 in Japan, Announces New FC bus », *Hydrogen and Fuel Cell Letter*, juillet 2001.

(25) « Detroit Auto Show: Ballard Announces Production-Ready Fuel Cell Module, Hints at Factory Plans », *Hydrogen and Fuel Cell Letter*, février 2000
(<http://www.hfcell.com/letter/february00/feature.html>).

relatives au stockage d'hydrogène à bord des véhicules présentent moins de risques que celles reliées au stockage classique de l'essence dans des réservoirs. Comme l'hydrogène se dissipe plus rapidement que l'essence, le risque d'explosion s'en trouve diminué. De plus, des dispositifs automatiques couperont l'alimentation en hydrogène et en électricité, réduisant ainsi les risques d'incendie. En fait, les réservoirs recouverts de couches de fibre de carbone ont été conçus pour laisser fuir l'hydrogène qu'ils contiennent plutôt que d'exploser, lorsqu'ils sont percés par une balle de fusil ou d'une autre façon; ils sont également conçus pour demeurer intacts lors d'une collision.

D'autres tentent de mettre au point une technologie permettant d'effectuer le reformage du combustible (p. ex. l'essence ou le gaz naturel) à bord du véhicule. Pour eux, cette façon de faire offre l'avantage d'utiliser l'infrastructure d'approvisionnement déjà en place et, par conséquent, rend les véhicules alimentés par des piles à combustible davantage concurrentiels.

De nombreux partenariats entre fabricants de piles à combustible, producteurs d'énergie et fabricants d'automobiles sont en train de se constituer en vue de résoudre la question de l'approvisionnement. Par exemple, la Ballard et la Methanex, le plus important promoteur mondial de produits du méthanol, ont conjugué leurs efforts pour éliminer les obstacles à l'utilisation du méthanol. La Ford et la Mobil Corporation ont travaillé ensemble pour mettre au point un nouveau reformeur d'essence installé à bord, qui serait plus petit et moins cher que les reformeurs actuels⁽²⁶⁾. En août 2000, la General Motors et l'Exxon Mobil Corporation annonçaient une percée importante dans la technologie du reformage de l'essence. Leur processeur possède un rendement supérieur à 80 p. 100. On travaille maintenant à son intégration dans un véhicule mû par un moteur alimenté par des piles à combustible⁽²⁷⁾.

Dans le cadre du Plan d'action 2000 sur le changement climatique, le gouvernement canadien investira 23 millions de dollars dans le programme de l'Alliance canadienne pour la pile à combustible dans les transports (ACPCT), en vue d'évaluer et de

(26) Mobil, *Ford and Mobil to Develop New Gasoline Reformer for Fuel Cell Vehicles*, communiqué, 16 août 1999.

(27) General Motors, *GM and ExxonMobil Collaboration Develops Gasoline Processor for Fuel Cell Vehicles*, communiqué, 10 août 2000.

démontrer une variété d'options d'approvisionnement en combustible pour les véhicules alimentés par des piles à combustible⁽²⁸⁾.

CONCLUSION

La technologie de la pile à combustible est parvenue à maturité. On annonce quotidiennement de nouvelles applications, de nouveaux projets de démonstration et de nouveaux plans de développement. La diversité de cette technologie en évolution et la vitesse à laquelle elle progresse se reflètent dans les éditions mensuelles du *Fuel Cell Technology Update* publiées par Fuel Cells 2000. Chaque mois, il faut de 6 à 10 pages seulement pour énumérer les progrès les plus récents et les décrire brièvement. Des centrales électriques à piles à combustible font leur apparition dans de nombreuses communautés, des autobus alimentés par piles à combustible commencent à circuler dans les rues des villes partout dans le monde, et des automobiles alimentées par des piles à combustible apparaîtront très bientôt dans les salles d'exposition.

Certains problèmes techniques restent encore à régler et les coûts de production doivent être abaissés, mais de constants progrès sont réalisés. D'ici peu, les piles à combustible prendront leur place parmi les plus grandes innovations dans le domaine de l'énergie de ce nouveau millénaire, et les industries canadiennes sont bien placées pour faire partie de cette nouvelle avancée technologique.

(28) Ressources naturelles Canada, *Alliance canadienne pour la pile à combustible dans les transports*, précis d'information, Ottawa, 11 juin 2001.