

N° 3216

N° 426

**ASSEMBLÉE NATIONALE**

**SÉNAT**

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

ONZIÈME LÉGISLATURE

SESSION ORDINAIRE DE 2000-2001

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale  
le 3 juillet 2001

Annexe au procès-verbal de la séance  
du 28 juin 2001

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION  
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

**RAPPORT**

SUR

**LES PERSPECTIVES OFFERTES PAR LA TECHNOLOGIE  
DE LA PILE A COMBUSTIBLE**

PAR MM. Robert Galley et Claude Gatignol,  
Députés.

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale  
par M. Jean-Yves LE DÉAUT,  
*Premier Vice-Président de l'Office*

Déposé sur le Bureau du Sénat  
par M. Henri REVOL,  
*Président de l'Office.*

Energie et carburants

**SOMMAIRE**

Introduction .....	5
<b>I – La nécessité de préparer notre avenir énergétique.....</b>	<b>9</b>
<b>1 – La consommation mondiale d'énergie.....</b>	<b>9</b>
A – Le bilan global .....	9

B – La croissance de la population mondiale .....	9
C – Les conséquences en matière de consommation d'énergie.....	10
D – La prépondérance des énergies fossiles .....	12
<b>2 – Les conséquences inquiétantes de l'utilisation des énergies fossiles .....</b>	<b>13</b>
A – Dépendance et incertitudes de l'approvisionnement .....	13
B – Les pollutions engendrées par leur combustion.....	16
C – Les conséquences en matière d'environnement.....	17
D – Les conséquences en matière de santé humaine .....	18
E – Préparer la diminution du recours à ces énergies.....	19
<b>3 – Une énergie quasiment idéale : l'électricité .....</b>	<b>20</b>
A – L'électricité.....	20
B – Les difficultés de cette énergie.....	21
C – La nécessité de s'orienter vers de nouveaux modes de production d'énergie.....	23
<b>II – La pile à combustible.....</b>	<b>25</b>
<b>1 – Historique et principe .....</b>	<b>25</b>
A – Historique.....	25
B – Le principe .....	29
C – Les différentes sortes de piles .....	32
<b>2 – Une source d'énergie aux multiples possibilités d'applications .....</b>	<b>34</b>
A – La génération stationnaire d'énergie.....	34
B – La propulsion des véhicules .....	36
C – L'alimentation d'appareils portables.....	37
<b>3 – Quel est le niveau réel de mise au point de la technique des piles à combustible ?         .....</b>	<b>38</b>
A – La pile à combustible à membrane (P.E.M.).....	38

B – La pile à combustible direct .....	53
C – La miniaturisation des piles à combustible.....	55
D – Le fonctionnement d’un système générateur à pile à combustible.....	60
E – Quel prix pour les piles à combustible ? .....	65
<b>4 – Les autres types de piles à combustible.....</b>	<b>67</b>
A – Les piles à électrolyte solide .....	67
B – Les piles alcalines.....	71
C – Les piles à carbonates fondus .....	72
D – Les piles à acide phosphorique .....	73
<b>5 – La politique de la recherche en matière de pile à combustible .....</b>	<b>76</b>
A – Une intense activité en Amérique du Nord.....	76
B – Le Japon .....	87
C – L’Union européenne.....	89
D – L’action de différents Etats.....	92
E – La recherche en France.....	95
<b>6 – La pile à combustible, une technologie nouvelle... parmi d’autres.....</b>	<b>113</b>
A – L’évolution des batteries.....	114
.....	
B – L’évolution des véhicules à moteur à combustion interne.....	118
C – Vers les véhicules hybrides.....	122
<b>III – Vers la civilisation de l’hydrogène.....</b>	<b>123</b>
<b>1 – Les caractéristiques et les utilisations de l’hydrogène .....</b>	<b>124</b>
A – Les caractéristiques de l’hydrogène.....	124
B – Les utilisations industrielles de l’hydrogène .....	125
<b>2 – L’hydrogène, carburant des piles à combustible.....</b>	<b>126</b>
A – La fabrication de l’hydrogène.....	126
B – Le bilan environnemental de la production de l’hydrogène.....	128
<b>3 – Les différents modes de fabrication de l’hydrogène.....</b>	<b>130</b>
A – Le reformage <i>in situ</i> .....	130

B – la production centralisée d’hydrogène .....	133
C – Le stockage de l’hydrogène .....	134
D – Les problèmes de sécurité posés par l’hydrogène.....	139
E – La réglementation de l’hydrogène.....	141
<b>Conclusion</b> .....	145
<b>Recommandations</b> .....	149
<b>Examen du rapport par l’Office</b> .....	153
<b>Personnalités auditionnées</b> .....	155

## Introduction

Le principe de la pile à combustible a été découvert en 1839.

Depuis cette époque l'intérêt porté à cette technique a été l'objet de mouvements de flux et de reflux.

Nous sommes incontestablement à l'heure actuelle dans une période de « redécouverte » de cette technique.

Ce nouvel intérêt s'est confirmé au début des années 1990, époque à laquelle notre collègue sénateur Pierre Laffitte évoquait cette technologie dans le rapport de notre Office sur « l'intérêt du véhicule électrique au regard de la protection de l'environnement ».

Cette redécouverte est due en partie aux échecs rencontrés dans l'élaboration des véhicules électriques à accumulateurs. Ceux-ci fonctionnent bien techniquement mais leur coût est trop important et il est impossible d'obtenir une autonomie et des vitesses satisfaisantes comme le notait alors Pierre Laffitte.

Cette recherche dans le domaine du véhicule électrique était motivée par des considérations d'environnement.

En effet l'évolution de l'atmosphère est devenue un problème majeur.

On a longtemps considéré celui-ci comme limité à des zones restreintes, essentiellement celles qui sont urbanisées et industrialisées. Mais on s'est progressivement rendu compte que c'était un phénomène global concernant soit de régions entières (pollutions photochimiques et pluies acides), voire la planète dans son ensemble (diminution de la couche d'ozone, accroissement de l'effet de serre).

L'accroissement de la pollution photochimique a, pour certains auteurs, des conséquences qui paraissent appréciables au niveau de la santé publique, en particulier dans le domaine des allergies respiratoires.

De plus en plus d'autorités scientifiques établissent une corrélation entre l'effet de serre et le réchauffement indiscutable de la planète. On relie mal cet échauffement à des conséquences climatiques mais un certain nombre de répercussions à long terme peuvent d'ores et déjà être envisagées comme par exemple la fonte des glaciers, l'élévation du niveau moyen des océans ou la modification des courants marins, voire l'aggravation des perturbations météorologiques.

Cet accroissement de l'effet de serre est dû à l'augmentation considérable des émissions de certains gaz, au premier rang d'entre eux, le dioxyde de carbone et le méthane mais également les oxydes d'azote.

L'émission de gaz carbonique et d'oxydes d'azote trouve son origine dans la combustion des énergies fossiles.

Parmi celles-ci, le pétrole a été au moins jusqu'en 1973 si prépondérant dans nos économies qu'on a pu parler d'« économie du tout pétrole ».

Certes des changements très importants ont eu lieu depuis cette date. C'est ainsi que la France est l'un des pays qui, grâce à son effort et à sa réussite dans le domaine nucléaire, a su le mieux desserrer cette contrainte pétrolière.

Mais il est un domaine où le pétrole n'a pas cédé de terrain : c'est celui des transports où il couvre 95 % des besoins.

La consommation des carburants automobiles est en augmentation du fait de la croissance du nombre des véhicules au niveau mondial et de l'accroissement des distances parcourues malgré les progrès des moteurs en termes de consommation.

Une autre préoccupation s'est faite jour : celle de l'épuisement, à terme inéluctable, de ces énergies fossiles et, notamment, du pétrole ; celui du gaz naturel étant sans doute plus lointain.

Il est peut être alors temps de réfléchir à la possibilité de remplacer cet extraordinaire produit qu'est le pétrole dans ses utilisations les plus frustes, comme de le brûler dans des moteurs au rendement énergétique médiocre, pour le réserver à l'élaboration de produits à haute valeur ajoutée.

Il n'est certainement pas trop tôt pour engager cette réflexion, d'autant que dans un délai plus court qu'on ne l'imagine généralement, sa rareté risque de provoquer une élévation de son prix qui en attestera la valeur.

Il faudra inévitablement pouvoir ménager une transition assez longue pour changer l'assise énergétique du monde entier au profit d'une autre énergie qui serait renouvelable et moins polluante.

Cette énergie du futur pourrait être l'hydrogène.

Cet hydrogène pourrait être employé comme carburant comme il l'est d'ailleurs déjà pour la propulsion des fusées et engins spatiaux. Mais la combustion de l'hydrogène a un rendement relativement faible, et, de plus, ce gaz, quoiqu'extrêmement répandu dans la nature mais sous forme combinée avec l'oxygène ou le carbone, doit être produit à partir de plusieurs précurseurs.

L'hydrogène peut être utilisé avec un rendement beaucoup plus élevé dans ce qu'on appelle couramment une « pile à combustible ». C'est en fait un générateur d'électricité à hydrogène. Le principe de base n'est plus une combustion mais une conversion électrochimique, inverse de l'électrolyse.

Cette pile à combustible, continuons de l'appeler comme cela, est devenue depuis quelques années un sujet relativement médiatisé.

On nous en annonce de façon régulière la mise au point puis l'irruption dans notre vie quotidienne sous des délais très brefs... qui passent sans que rien n'apparaisse réellement.

La saisine de l'Office est donc particulièrement opportune. Elle permettra de faire un point le plus complet possible sur cette technique qui est très complexe.

Après avoir brossé l'environnement énergétique dans lequel cette technique retrouve une grande actualité, on rappellera l'ancienneté du principe à la base de son fonctionnement.

Nous nous interrogerons ensuite sur le niveau réel de la mise au point de ce générateur d'énergie et présenterons les activités de recherche conduites dans le monde sur cette technique.

Mais cette pile à combustible devra affronter la concurrence de technologies bien en place comme les batteries et le moteur à combustion interne qui n'a pas encore atteint ses limites de développement.

Enfin nous nous demanderons si les piles à combustible ne vont pas être les premières applications de grande diffusion de l'hydrogène, celles qui ouvriront les portes de la civilisation de ce gaz.

Nous souhaitons chaleureusement remercier toutes les personnalités qui ont bien voulu prendre sur leur temps pour nous faire part de leur opinion. Elles nous ont permis de construire notre propre réflexion sur ce sujet passionnant.

Notre gratitude va également à tous ceux qui nous ont apporté une aide précieuse pour la préparation et le déroulement de nos missions.

## I – la nécessité de préparer notre avenir énergétique

Il convient tout d'abord de rappeler la situation actuelle de la consommation mondiale d'énergie qui fait apparaître la part importante des énergies fossiles.

### 1 – la consommation mondiale d'énergie

#### A – Le bilan global

La consommation énergétique mondiale repose à 80% sur les trois grandes énergies fossiles : pétrole, gaz et charbon.

Le tableau ci-dessous présente la répartition de la consommation énergétique mondiale et l'évolution attendue en 2020 :

	1997	2020
Gaz naturel	23,2%	27%
Pétrole	39,9%	37%
Charbon	26,9%	24,5%
Nucléaire	7,3%	3%
Energies renouvelables (1)	5,5%	8%

(1) hydroélectricité, bois, solaire, éolien, biomasse

Sources : International Energy Outlook et BP statistical review of world energy 1998

Selon le Conseil mondial de l'énergie, avec 3,3% de croissance annuelle, le gaz naturel pourrait devenir en 2050 la première source d'énergie.

Cette croissance s'explique principalement par le développement accéléré de son utilisation pour la production d'électricité, grâce au progrès technologique que représentent les cycles combinés et la cogénération. De plus le gaz naturel présente des avantages décisifs pour la protection de l'environnement.





Amérique du Nord	503	455	816	799	510	541	277	362	67	196	2172	2353
Amérique latine	23	61	214	495	82	285	89	334	174	275	582	1451
Europe O.C.D.E.	327	365	573	514	241	345	268	393	32	84	1442	1701
Europe centrale	158	99	52	70	64	106	14	32	7	16	295	322
C.E.I.	327	210	355	316	557	730	97	127	35	67	1372	1449
Afrique du N. – Moyen-Orient	7	17	165	374	98	351	5	16	22	50	297	807
Afrique subsaharienne	69	142	38	176	5	22	9	36	147	317	267	693
Japon, Australie, Nouv. Zélande	117	131	284	255	67	95	62	91	13	34	543	606
Asie du Sud	127	530	62	201	24	118	22	143	214	463	449	1454
Asie du Sud-Est	630	2095	200	879	42	354	73	461	365	741	1309	4530
Total Monde	2288	4105	2759	4079	1689	2948	916	1995	1076	2243	8728	15366

Les consommations d'énergie devraient donc se modifier de façon considérable.

Le plus notable est la croissance de la part de l'Asie, hors Japon, dans la consommation mondiale : de 20 % en 1990 à 40 % en 2020. Cette demande émanera essentiellement de la Chine, de l'Inde, de l'Indonésie et de la Corée. Les consommations seront très concentrées dans des agglomérations de très grande taille.

Si l'Amérique latine et l'Afrique représenteront chacune environ 10 % de la consommation mondiale d'énergie en 2020, il faut noter que la progression de l'Afrique subsaharienne sera plus faible que celle de l'ensemble Afrique du Nord – Moyen-Orient.

Ces pays consommeront essentiellement des énergies d'origine fossile.

#### D – La prépondérance des énergies fossiles

La part des énergies fossiles croîtra de 84,5% du bilan énergétique global en 1995 à 89% en 2020

La part du pétrole va rester importante. La production de pétrole conventionnel se concentre au Proche-Orient, avec tous les risques que cela implique. Le pétrole non conventionnel (huiles lourdes) devra être produit à grande échelle.

Le pétrole est utilisé par la pétrochimie, pour la production de chaleur (en concurrence avec le gaz et l'électricité), et surtout par les transports où il n'a actuellement pas de concurrent.

La contribution du gaz devrait augmenter. Sa part dans la couverture des besoins mondiaux pourrait passer de 22% actuellement à près de 30% en 2020, voire plus encore si les contraintes environnementales incitent à produire beaucoup plus d'électricité à partir du gaz.

La demande de gaz devrait croître six fois plus vite que celle des autres énergies dans leur ensemble, particulièrement en Asie pour la production d'électricité.

On pourrait imaginer que, pour respecter les engagements de Kyoto, la part du charbon, 25% actuellement, diminue de façon importante. C'est pratiquement impossible car l'Inde et la Chine qui en sont producteurs en ont besoin pour leur développement. Dans ces pays la consommation de charbon devrait donc s'accroître.

La part des pays industrialisés dans la demande primaire d'énergie décline rapidement. Ces pays consommaient au début des années 1970 près de 63% de l'énergie utilisée dans le monde. Cette part pourrait diminuer jusqu'à 30% d'ici 2050.

Dans les pays en voie de développement, qui représentent 80% de la population mondiale, la consommation d'énergie par tête est aujourd'hui faible.

Le rythme de croissance de leurs besoins énergétiques dépendra du choix du modèle économique (mode de transport, urbanisation, maintien d'une activité rurale, forte industrialisation...).

La part des pays en développement dans l'ensemble des besoins en énergies primaires pourrait passer de 34% en 1990 à 48-55% en 2020 et 58-67% en 2050.

L'Asie consommera près de 30% de l'énergie mondiale en 2015.

Se pose le cas particulier de la Chine et l'évolution de sa consommation d'énergie dans l'avenir.

Actuellement une part très importante de sa consommation est le fait de ses industries de base. Leur activité se maintiendra tant que la Chine devra développer ses infrastructures de base. A long terme, on peut s'attendre à un remplacement progressif des activités industrielles lourdes par des infrastructures plus économes en énergie. La demande de transport, faible actuellement (9% des besoins en énergie du pays), risque d'exploser dans l'avenir.

Les besoins énergétiques de l'Amérique du Sud progressent aussi rapidement. La libéralisation des marchés en cours dans cette zone stimule la consommation d'énergie.

La part de l'Afrique reste modeste dans les besoins mondiaux en énergie. Sa demande d'énergie primaire a crû de 3% en moyenne au cours des dix dernières années.

## **2 - les conséquences inquiétantes de l'utilisation des énergies fossiles**

Celles-ci ont trait à la dépendance et à l'incertitude de l'approvisionnement, aux pollutions engendrées par leur combustion, aux conséquences en matière d'environnement et de santé humaine. Ce constat doit amener à préparer des solutions visant à diminuer le recours à ces énergies.

### **A – Dépendance et incertitudes de l'approvisionnement**

Nous examinerons les situations respectives du pétrole, du gaz et du charbon.

#### **a - Le pétrole**

Le premier choc pétrolier de janvier 1974 a entraîné une hausse brutale de 368% sur un an : le baril est ainsi passé de 5,2 dollars à 11,7 dollars.

A la fin de 1998, le baril était à 10 dollars pour remonter à près de 27 dollars en juin 2000, soit une hausse de 245% sur cette période.

Actuellement le prix du baril de pétrole se maintient entre 22 et 28 dollars.

Mais le pétrole n'a plus autant d'importance dans l'économie occidentale : en 20 ans, sa part dans les échanges mondiaux est passée d'environ 20% à 5%.

La flambée des cours du brut ne provoque plus comme autrefois récession et poussée inflationniste. Avec l'essor des services, le développement et la maturité du nucléaire, l'augmentation de l'efficacité énergétique, les économies sont devenues un peu moins dépendantes du pétrole.

Le pétrole ne représente plus que 37% des approvisionnements énergétiques mondiaux. La dépendance pétrolière de l'Union européenne est tombée de 98% à 53% en 30 ans.

Compte tenu de son emploi dans les transports, le pétrole reste cependant une énergie des plus sensibles.

L'origine des importations a beaucoup changé depuis 1973 comme le montre le tableau suivant (en %) :

<b>Origine</b>	<b>1973</b>	<b>1997</b>
Moyen-Orient	71,5	38,7
Afrique	21,4	15,9
Mer du Nord	0,2	35,5
U.R.S.S.ex- U.R.S.S	3,4	9,6
Autres	3,5	0,3

Nous avons donc considérablement réduit notre dépendance à l'égard du Moyen-Orient et accru celle envers les pays de l'ex-U.R.S.S dans des proportions qui semblent très raisonnables.

La diversification de nos sources de pétrole s'est finalement faite quasiment seulement au bénéfice de la zone européenne et même communautaire. On ne peut que se réjouir de cette situation, notamment du point de vue de la sécurité régionale qui règne en Europe du Nord.

Cependant, l'état des réserves mondiales de pétrole actuellement prouvées incite à un peu plus de prudence.

En effet, celles-ci peuvent être estimées de la façon suivante en années de réserve :

Afrique	25
Amérique du Nord	17
Amérique latine	36
Europe	8
Ex-U.R.S.S	26
Asie et Océanie	16
Proche Orient	93

*Source* : BP Statistical review

Il y a donc une grande inégalité dans la répartition des réserves de pétrole et l'Europe est particulièrement vulnérable en matière de réserves propres.

Certes il y a des débats sur le niveau de ces réserves car d'une part, la hausse du prix du pétrole incite à mettre en production un plus grand nombre de puits et d'autre part, le progrès technique permet de récupérer plus de pétrole dans des conditions économiques satisfaisantes.

Mais notre approvisionnement en pétrole risque dans un avenir plus ou moins proche de redevenir très dépendant de zones pouvant être politiquement instables ou imprévisibles. Il n'est certainement pas prématuré de s'en soucier.

#### b - Le gaz

Aujourd'hui les réserves prouvées de gaz sont estimées à 145 000 milliards de m<sup>3</sup>, les réserves économiquement exploitables à 300 000 milliards de m<sup>3</sup>, et les réserves totales à 600 000 milliards de m<sup>3</sup>. Les réserves prouvées devraient atteindre 90 ans de consommation en 2030. Il faut ajouter à cela les nouvelles réserves : gaz des couches peu perméables, des gisements sous-marins, des mines de charbon et à plus long terme des hydrates sous-marins (gisement supérieur à toutes les réserves connues) et du méthane produit par séquestration du CO<sub>2</sub>.

Les réserves de gaz connues se concentrent dans l'ex Union soviétique, au Moyen-Orient, en Asie du Pacifique et en Amérique du Nord.

L'Union européenne produit de moins en moins de gaz et sa dépendance extérieure va s'accroître. Nous retrouvons là une vulnérabilité analogue à celle existant dans le domaine du pétrole et qui s'ajoute à cette dernière.

Le prix du gaz suit celui du pétrole avec un décalage dû à la nature des contrats d'achat. Mais pour cette énergie, c'est la partie « transport » qui représente l'essentiel du coût. Les deux moyens de transports traditionnels sont les gazoducs terrestres ou sous-marins et les navires méthaniers.

#### c - Le charbon

Il représente aujourd'hui 30% du marché énergétique mondial. Le charbon comme source d'énergie a encore de belles perspectives devant lui. Les gisements prouvés de houille et de lignite atteignent 3 500 milliards de t.e.p. (tonnes équivalent pétrole). Son coût d'extraction est faible. Depuis 30 ans, la tonne de charbon coûte entre 30 et 50 dollars.

De plus, les gisements sont bien répartis et se trouvent principalement dans des pays politiquement sans risques comme l'Australie et les Etats-Unis. La Chine est également un pays très gros producteur mais personne ne peut savoir quel est son avenir politique.

Le charbon pose cependant potentiellement de gros problèmes d'environnement, car sa combustion entraîne de fortes pollutions. Il est donc nécessaire soit d'épurer les fumées soit d'employer des techniques de combustion très sophistiquées, soit de combiner les deux procédés.

### B - Les pollutions engendrées par leur combustion

La pollution atmosphérique a longtemps été perçue comme un problème limité à des zones restreintes, urbaines et industrialisées.

Mais on s'est progressivement rendu compte que la pollution atmosphérique ne peut pas être, en fait, considérée comme un phénomène local. Elle concerne en réalité des régions entières (pollutions photochimiques, pluies acides), voire la planète dans son ensemble (diminution de la couche d'ozone, accroissement de l'effet de serre).

Nous évoquerons plus particulièrement l'effet de serre.

Les gaz dits à effet de serre empêchent la dissipation de la chaleur de la Terre. Ils exercent de ce fait un effet similaire à celui des vitres d'une serre qui, si elles laissent passer la lumière visible, retiennent de l'intérieur le rayonnement thermique. Sans la présence de ces gaz, la température moyenne à la surface de notre planète serait de  $-18^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $+15^{\circ}\text{C}$ .

Les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone, le méthane, qui a cinquante fois plus d'action que le  $\text{CO}_2$ , et l'oxyde d'azote (ou protoxyde d'azote).

Les oxydes d'azote sont émis par tous les systèmes de combustion à haute température. Les transports en sont donc les principales sources d'émissions.

Concernant les autres polluants, entre 80% et 90% des composés organiques volatiles anthropiques (C.O.V.) et 90% du monoxyde de carbone (CO) émis dans les villes proviennent des véhicules motorisés. Les transports et l'industrie sont responsables de l'émission de particules fines.

Des progrès ont néanmoins été accomplis depuis quelques années. C'est ainsi que les émissions de CO et de plomb, métal lourd toxique contenu dans le pétrole, ont été progressivement réduites dans la plupart des villes européennes depuis 5 à 10 ans, grâce à l'introduction du pot catalytique et de l'essence sans plomb.

Les émissions de  $\text{NO}_x$  de C.O.V. et de particules fines diminuent par contre beaucoup plus lentement car le nombre d'automobiles et le kilométrage parcouru sont en constante augmentation.

### C- Les conséquences en matière d'environnement

L'accroissement des gaz à effet de serre est une évolution qui a commencé voilà déjà environ un siècle.

C'est ainsi qu'au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, la température moyenne globale de l'air en surface a augmenté d'une valeur comprise entre  $0,3$  et  $0,6^{\circ}\text{C}$  selon certains auteurs et  $1^{\circ}\text{C}$  selon d'autres. Parallèlement, on a observé que le niveau moyen des océans a, quant à lui, monté de 10 à 25 cm. Dans certaines régions, des modifications dans la variabilité et les extrêmes climatiques sont également intervenues. Un certain nombre de simulations ont estimé que l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe serait de  $2^{\circ}\text{C}$  entre 1990 et 2100, le niveau de la mer s'élevant dans le même temps de 50 cm.

Ces augmentations des émissions de gaz à effet de serre sont, pour une part très importante, certainement d'origine anthropique comme le montre la diminution de la concentration en oxygène de l'air et les analyses de la composition isotopique du gaz carbonique.

Le volume mondial des émissions de gaz à effet de serre s'est accru de 8,2% entre 1990 et 1997.

L'évolution régionale est plus inquiétante encore : l'accroissement est d'un tiers pour la Chine, de 56% pour l'Asie, de 15 à 20% pour l'Afrique. Les émissions de ces gaz pourraient, selon l'O.C.D.E., tripler d'ici 2050.

Le sommet de Rio, en 1992, a permis de ratifier la convention cadre de l'O.N.U. sur le changement climatique, avec pour objectif la stabilisation des émissions en l'an 2000 au même niveau qu'en 1990. En 1997, au sommet de Kyoto, ces engagements ont été prolongés pour la période 2008-2012, les pays industriels s'engageant à réduire en moyenne de 5,2% leurs émissions et l'Union européenne de 8%.

L'objectif de réduction des émissions des pays industrialisés peut paraître modeste face aux enjeux. Les pays développés doivent en effet parvenir à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et cesser d'offrir aux pays du Sud le modèle de développement reposant sur une consommation d'énergie toujours plus importante.

L'échec de la conférence de La Haye en décembre 2000 a de quoi inquiéter, ainsi que les déclarations du Président Bush. En effet, le protocole de Kyoto ne pourra entrer en vigueur que lorsque 55 pays représentant 55% des émissions mondiales de gaz à effet de serre l'auront ratifié. Il est évident que les Etats-Unis, qui émettent 36% du CO<sub>2</sub> du monde industrialisé, représentent un poids particulièrement lourd.

L'effet de serre n'est donc pas simplement un sujet d'études scientifiques. C'est également un problème politique à l'échelle de la planète qui a des répercussions en termes de santé publique, d'aménagement du territoire, de transports et de choix énergétiques.

#### D- Les conséquences en matière de santé humaine

La pollution de l'air est reconnue responsable d'une action défavorable sur les affections et les troubles respiratoires, asthme, affections pulmonaires obstructives chroniques, maladies cardio-vasculaires et cancer du poumon.

On estime que trois millions de personnes meurent chaque année des conséquences de la pollution atmosphérique, soit 5% des 55 millions de décès annuels dans le monde.

De nombreuses études mettent en évidence le lien direct qui existe entre les taux de mortalité et les concentrations journalières ambiantes de produits chimiques. Il faut en effet conserver à l'esprit qu'une personne respire chaque jour 15 000 litres d'air.

Les polluants atmosphériques comprennent les particules en suspension, les gaz et les vapeurs présents dans l'atmosphère à des concentrations anormalement élevées.

Les particules les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures, alors que les plus fines peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires inférieures, contribuant à une irritation de la muqueuse bronchique. Cet effet peut être particulièrement important chez les enfants dont les mécanismes de défense sont soit immatures soit particulièrement fragiles.

Les particules affectent continuellement un plus grand nombre de personnes que tout autre polluant. Ce sont des poussières grossières (sol et cendres minérales) ou des poussières fines provenant de la fumée du bois ou de l'échappement des moteurs.

Les polluants atmosphériques gazeux sont principalement les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>), l'oxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), et les composés organiques volatiles.

L'ozone est un gaz très agressif pour les muqueuses oculaires et respiratoires. Il pénètre facilement jusqu'aux voies respiratoires les plus fines.

Le dioxyde de soufre provient de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre (mazout, charbon). Il forme en présence d'humidité de l'acide sulfurique qui est très irritant. Celui-ci peut déclencher un spasme bronchique chez les asthmatiques, augmenter la fréquence et l'intensité des symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux, gêne respiratoire). Il peut également encore altérer la fonction respiratoire chez l'enfant.

Le dioxyde d'azote peut pénétrer dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Il peut, dès 200 microgrammes par m<sup>3</sup> d'air, entraîner une altération de la fonction respiratoire. Il provient des véhicules et des installations de combustion.

Le monoxyde de carbone a la propriété de se fixer à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang, conduisant ainsi à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. Il peut provoquer des maux de tête, des vertiges... Le monoxyde de carbone provient des combustions incomplètes des carburants et des combustibles.

Les composés organiques volatiles proviennent notamment des hydrocarbures. Leurs effets vont de la simple gêne olfactive jusqu'à des risques mutagènes et cancérigènes. C'est notamment le cas du benzène dont les émanations sont importantes lors des innombrables opérations de remplissage des réservoirs d'hydrocarbures.

Les concentrations de dioxyde de soufre et de particules en suspension diminuent dans les pays industrialisés tandis que celle de NO<sub>x</sub> et d'ozone sont constantes ou en augmentation.

Dans les pays en développement, l'augmentation de la circulation routière et des gaz d'échappement et des émissions industrielles accroît les concentrations de dioxyde de soufre, de particules en suspension, de NO<sub>x</sub> et de O<sub>3</sub>.

### E- Préparer la diminution du recours à ces énergies

Les pouvoirs publics français ne peuvent répondre entièrement seuls. Beaucoup de questions qui ont une incidence directe sur la politique énergétique sont maintenant traitées dans le cadre de l'Union européenne : ouverture des marchés électriques et gaz, normes environnementales, taxation des carburants.

Compétitivité, sécurité d'approvisionnement et environnement : ces choix stratégiques seront de plus en plus élaborés en concertation avec nos partenaires.

La France est le pays industrialisé qui émet le moins de dioxyde de carbone par habitant, grâce à la place importante du nucléaire et de l'hydraulique dans son bilan énergétique. Mais cette structure de la production limite fortement ses possibilités de réduire ses émissions par substitution de combustibles.

Il lui sera ainsi particulièrement difficile de se conformer aux engagements de Kyoto, qui exigent de ramener les émissions de 2010 au niveau de celles de 1990.

L'industrie paraît en mesure de stabiliser ses émissions d'ici 2010. Mais les risques d'augmentation sont réels dans le résidentiel et le tertiaire et très importants dans le transport. Les consommations d'énergie (donc les émissions de CO<sub>2</sub>) du secteur des transports sont en croissance en raison notamment de la progression du trafic marchandises sur longue distance.

La stagnation des émissions apparaît possible, mais elle requerra non seulement des politiques publiques volontaires, mais encore une forte adhésion de l'opinion à la politique de sobriété énergétique.

Le développement des énergies nouvelles et renouvelables doit donc être envisagé et encouragé.

Cependant la couverture des besoins énergétiques, sans augmenter l'effet de serre, ne pourra être atteinte que par le nécessaire maintien et certainement par l'augmentation de notre parc de centrales nucléaires.

## 3 – Une énergie quasiment idéale : l'électricité

### A – L'électricité

L'électricité joue un rôle essentiel dans notre civilisation. Dans les pays industrialisés, elle est omniprésente, toujours disponible et apportée aux multiples points d'utilisation par un réseau de distribution ramifié.



Celle-ci est essentiellement produite dans de grandes centrales, thermiques ou hydrauliques, utilisant soit des combustibles fossiles (charbon, hydrocarbures), soit des combustibles nucléaires (uranium), soit l'énergie hydraulique. Des générateurs (alternateurs) y produisent de l'électricité sous forme alternative. Cette énergie est transportée vers les centres de consommation grâce à des réseaux filaires.

Lorsque l'énergie doit être produite sur place, endroits d'accès difficile, balises marines... on a recours à d'autres modes de production : groupes électrogènes à moteur Diesel, convertisseurs photovoltaïques, éoliennes.

## B – Les difficultés de cette énergie

### a – En matière de prix

Un précédent rapport de l'Office a étudié les coûts de production de l'électricité et a comparé les différentes filières dans tous les pays. Une des conclusions est que comparativement aucune technologie ne l'emporte sur les autres. Les conditions économiques et réglementaires de chaque pays déterminent les hiérarchies de compétitivité des filières au plan national.

Depuis plusieurs années, les installations de cycles combinés à gaz ont fait des progrès techniques importants. Les rendements ont augmenté de façon considérable : depuis 1996, le gain dépasse les 50%. Les progrès de cette filière sont plus importants et plus rapides que ceux du nucléaire. Enfin la compétitivité de cette filière est soutenue par la diminution du prix du gaz depuis dix ans d'une part et l'apparition de nouveaux types de turbines d'autre part.

La technologie des centrales à charbon a aussi considérablement évolué en termes d'épuration des effluents gazeux et les prix du charbon sont stables depuis trente ans.

Le coût du kWh produit avec un cycle combiné à gaz pourrait se situer entre 16,5 et 20,5 centimes alors que le coût du kWh nucléaire se situerait entre 12 et 20 centimes, après amortissement.

Le coût du combustible est important. Il représente de 60 à 70% du coût total pour le gaz et seulement 20% pour le nucléaire. Les vulnérabilités des deux filières sont donc très différentes face à des perturbations sur les prix ou les approvisionnements.

Les coûts du kW/h produit par les énergies renouvelables sont beaucoup plus élevés.

Lorsque l'on prend en compte les coûts externes, c'est à dire les émissions de polluants des différentes filières, le nucléaire est le mode de production de l'électricité le plus compétitif.

Par contre la production d'électricité par des installations à cycle combiné à gaz devient compétitive dans un certain nombre de pays.

Le nucléaire s'impose donc pour tous les grands pays industrialisés pour la production de masse d'électricité.

### b – En matière de transport

Une caractéristique fondamentale de l'électricité est qu'elle ne peut pas être stockée. Il faut donc organiser son transport. Il est nécessaire d'ajuster la production et la livraison d'électricité à la demande des consommateurs et pouvoir compter sur un réseau fiable.

Pour des raisons économiques, la production d'électricité est concentrée sur quelques sites du territoire, il faut ainsi transporter de très fortes puissances sur de longues distances. On utilise de très hautes tensions, afin d'éviter le maximum de pertes en ligne lors du transport.

Pour aller d'un point à un autre, l'électricité emprunte plusieurs lignes différentes. Quand une ligne est endommagée, on reporte la charge sur les autres. Le maillage coûte cher mais permet de pallier des défaillances du réseau et permet aussi d'exploiter au mieux les sites de production les plus rentables.

La fiabilité du réseau est donc très importante. Les tempêtes de décembre 1999 ont montré à la fois les graves conséquences des coupures d'électricité, la vulnérabilité de ce transport et la nécessité d'un fort maillage. On a aussi envisagé d'enterrer les lignes, ce qui est fort coûteux et difficile pour les lignes à très haute tension.

L'exploitation du réseau français est en pleine transformation. La directive européenne du 19 décembre 1996 organise l'ouverture progressive des marchés de l'électricité. Elle prévoit l'arrivée de nouveaux producteurs sur le marché national et la liberté d'accès au réseau de transport et de distribution.

La loi française du 20 février 2000 a transposé cette directive. Elle a créé un gestionnaire du Réseau de transport d'électricité, (R.T.E.) qui a pour mission d'exploiter, d'entretenir et de développer les réseaux de transport.

#### c – En matière de stockage

L'électricité est transportée sur de grandes distances avec de faibles pertes, mais il est difficile de la stocker efficacement. La production électrique doit donc s'adapter à la demande.

Le stockage de l'électricité facilite la décentralisation de la production d'énergie, ce qui évite d'investir dans de grosses infrastructures, et permet une plus grande souplesse d'utilisation.

Les possibilités de développement des technologies de stockage de l'électricité restent très importantes et représentent un enjeu capital au niveau mondial.

On peut stocker de l'électricité en transformant l'énergie électrique en une autre forme d'énergie, qui peut être emmagasinée puis récupérée.

Les barrages stockent ainsi l'énergie potentielle de l'eau qui est utilisée selon les besoins voulus.

L'énergie électrique peut être stockée sous forme d'énergie chimique. C'est le cas des accumulateurs.

Les piles représentent la méthode de stockage d'électricité la plus répandue. La flexibilité et la facilité de ces méthodes chimiques leur ont donné une position importante sur le marché. Elles sont fiables et sont utilisables au moment précis où l'on en a besoin. Elles présentent quelques limites : elles sont lourdes, pas assez puissantes, trop longues à charger et trop chères à fabriquer. Elles ont de faibles performances et posent des problèmes de recyclage en fin de vie.

Une autre possibilité de stocker l'énergie de façon indirecte est de procéder à l'électrolyse de l'eau pour fabriquer de l'hydrogène, mais ce n'est pas compétitif par rapport au « cracking ».

### C – La nécessité de s'orienter vers de nouveaux modes de production d'énergie.

Il existe d'autres modes de production d'énergie fondés notamment sur l'utilisation des énergies renouvelables. On n'en fera qu'un très rapide survol dans la mesure où elles font l'objet d'un rapport en cours de l'Office.

#### a – L'énergie éolienne

Pour qu'une éolienne produise de l'énergie, il faut que le vent souffle le plus régulièrement possible à une vitesse supérieure à 15 km/h. Ces conditions se retrouvent en bordure du littoral et sur les reliefs. Les pales ne résistent pas à des vents supérieurs à 100 km/h et sont très sensibles à la corrosion du sel et du givre.

Le rendement d'une éolienne varie de 15 à 35%. En moyenne le kW/h éolien français coûte entre 33 et 42 centimes. La production par éolienne ne cesse d'augmenter mais ne pourra concerner qu'une faible proportion de la production nationale d'électricité.

La politique française éolienne à l'horizon 2010 s'est fixée un objectif de production d'électricité de 250 à 500 MW.

La production d'électricité par éolienne progresse actuellement. Sa capacité installée dans le monde a doublé entre 1995 et 1998.

### b – L'énergie photovoltaïque

Le principe de la production d'électricité photovoltaïque est bien connu, mais difficile à mettre en œuvre. Le rendement de telles piles est assez faible par rapport à l'apport d'énergie. Les pertes d'énergie sont importantes et on n'obtient qu'une conversion de 15 à 26% de l'énergie électromagnétique. Le fonctionnement des piles est peu polluant, mais la production et le recyclage des composants sont assez délicats.

Cependant des recherches sont menées pour évaluer de nouvelles architectures cristallines et de nouveaux matériaux.

Le solaire photovoltaïque est actuellement l'énergie renouvelable la plus coûteuse. L'usage du photovoltaïque se limite aux endroits où il n'est pas économiquement viable d'amener l'énergie produite dans une centrale (habitation isolée, bornes de téléphone, signalisation...)

En France, l'objectif de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (A.D.E.M.E.) est d'atteindre 50 MW installés supplémentaires en 2005, la puissance installée étant de 8 MW en 1999.

### c – Les biocarburants

Le biocarburants sont des carburants obtenus à partir d'une matière première végétale. Le gros avantage de ce type de carburant est d'être utilisable avec des moteurs traditionnels sans modification et de manière interchangeable avec les carburants classiques.

Les coûts de production sont largement supérieurs à ceux des carburants fossiles. Ils bénéficient actuellement d'une forte détaxe dans de nombreux pays. Ils permettent de lutter contre la pollution automobile et d'utiliser à des fins non alimentaires des terres agricoles mises en jachère.

Ces modes de production sont encore très marginaux compte tenu de leur coût de revient. Ils ne sont naturellement en aucune façon susceptibles de remplacer les énergies fossiles.

Une seule technique est susceptible de le faire à terme : la pile à combustible.

## II – La pile à combustible

### 1 – Historique et principe

Les piles à combustible ont mis plus de 150 ans pour évoluer du stade de l'invention à l'innovation, ce qui est un phénomène assez rare dans l'histoire des technologies.

Leur aventure a été ponctuée par des mouvements itératifs de développement, d'abandon puis de redéveloppement. Nous le verrons en évoquant leur historique avant d'en décrire le principe.

#### A - Historique

Après l'âge des précurseurs et un relatif abandon, succède une période de premier développement au début des années 1960, celle-ci étant suivie d'un temps de ralentissement de la recherche. La redécouverte de cette technique s'est faite au début des années 1990.

#### a – Les précurseurs

En 1802, Sir Humphry Davy découvre le principe de l'électrochimie en construisant une cellule en carbone fonctionnant à haute température avec de l'acide nitrique comme électrolyte.

La première cellule hydrogène-oxygène fut construite en 1839 par Sir William Grove, qui réalisa la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau en utilisant des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte.

Cette technique fut mise en sommeil devant le développement plus rapide des générateurs thermiques et des accumulateurs et piles électriques aux environs des années 1860.

En 1889, L. Mond et C. Langer apportent des perfectionnements dans la pile notamment avec l'introduction de catalyseurs (noir de platine) ou des électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre ou en amiante.

En 1921, E. Baur met en évidence l'importance de la cinétique. Il met au point une cellule fonctionnant à haute température (1000°C), avec une anode de carbone, une cathode à base d'oxyde de fer et des carbonates alcalins comme électrolytes.

A la base de cette technologie, on note plusieurs avancées scientifiques et techniques concernant l'utilisation des différents matériaux comme électrolytes, notamment l'acide phosphorique au Royaume-Uni au XIX<sup>ème</sup> siècle.

Pendant les années 1920, des études effectuées en Allemagne ont trait aux piles à carbonates fondus et aux piles à oxydes solides. Le progrès le plus important a été effectué ensuite par Francis T. Bacon qui a remplacé l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes.

Vers 1935, il réalise la première pile hydrogène-oxygène, qui aboutira en 1953 à la fabrication d'un premier générateur de 1 kW électrique. Cette réalisation mit en évidence les différents avantages de cette pile : fonctionnement silencieux, rendement très élevé par rapport aux autres générateurs thermiques et possibilité d'utilisation en stationnaire ou en traction.

Le principe physique étant démontré, les recherches et développements se sont poursuivis dans le monde.

#### b – Le premier développement des piles à combustible

Dans les années 1950-1965, des dizaines de laboratoires et d'industriels se lancèrent dans les piles à combustible.

Les premières applications ont concerné les domaines spatiaux et océanographiques. Il y eut notamment l'essai d'une pile de 20 kW par l'U.S. Navy capable de fonctionner à une profondeur de 6 000 m.

La pile à combustible a été adoptée par la N.A.S.A. pour les engins spatiaux dans les années soixante. Les premières applications spectaculaires ont été effectuées sur les véhicules spatiaux habités Gemini (1963) et Apollo (1968). Ce type de pile est d'ailleurs encore employé par la navette américaine.

Dans le domaine spatial, la pile à hydrogène-air a fait la preuve de son efficacité en minimisant grâce à son haut rendement le poids des réactifs transportés.

Pour ces applications le prix est secondaire. Le but est de disposer de sources électriques fiables, performantes et sans rejets de gaz toxiques.

Aux Etats-Unis, Allis-Chalmers Manufacturing Company fabriqua une pile alcaline de 15 kW pour un tracteur électrique. Karl Kordesch, chez Union Carbide, réalisa une pile alcaline de 6 kW qui, associée à des batteries plomb/acide, alimenta une Austin A40 à propulsion électrique. Cette voiture, d'une autonomie de 300 km pour 2 kg d'hydrogène embarqué dans des bouteilles sous pression, a fonctionné pendant 3 ans en effectuant plus de 16 000 km.

La réussite technologique de ces programmes encouragea un grand nombre de recherches, principalement aux Etats-Unis, mais aussi en Europe, sur des piles utilisant aussi bien l'hydrogène que d'autres combustibles.

Les recherches sur les piles à combustible ont été très importantes en France dans les années 1960-1975.

Pendant cette période, plusieurs firmes industrielles ont mené des recherches fondamentales et technologiques, aboutissant à la réalisation de prototypes de piles à méthanol et à hydrazine de 1 kW (Alstom) et de piles alcalines (A.F.C.) à hydrogène/air (Electricité de France et Institut français du pétrole).

Les travaux portèrent sur le concept même de la pile, sur les membranes, sur l'amélioration du rendement, sur les différents types de piles et le développement des auxiliaires indispensables comme les pompes et les vannes.

Les systèmes obtenus donnèrent toute satisfaction pour leurs applications, mais on utilisait comme seul carburant et comburant de l'hydrogène et de l'oxygène, tous deux très purs.

Les premiers travaux sur l'emploi du méthanol, comme combustible embarqué, avec reformeur, sont lancés à cette période.

En 1970, Du Pont met au point, pour un usage autre, la membrane *Nafion*, qui a permis de relancer les piles à combustible acides. Dans le même temps, les Etats-Unis ont développé les piles à potasse.

Le très fort développement des recherches sur les piles à combustible dans les années 1970 résulte de la première crise du pétrole de 1973. A ce moment, les premières préoccupations environnementales font leur apparition.

Une enquête des autorités fédérales américaines sur les conséquences de la forte croissance de la pollution automobile incite tous les laboratoires et les industriels américains, mais aussi européens et japonais à se lancer dans de nombreux travaux sur l'amélioration des véhicules (amélioration des moteurs à essence, véhicules hybrides et électriques...).

Dans le même temps, des travaux sur l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs thermiques, le stockage de l'hydrogène embarqué et l'utilisation d'un combustible avec reformage se développent.

Dès 1969, ces travaux bénéficient de contrats très importants et nombreux. En 1972, plus de 30 projets de recherche sont menés aux Etats-Unis sur le stockage de l'hydrogène embarqué ou sur sa fabrication embarquée.

L'objectif initial n'est pas les piles à combustible, mais l'emploi de l'hydrogène dans les moteurs thermiques pour réduire la pollution.

En Europe, des travaux similaires sont menés par tous les constructeurs, les laboratoires et les fabricants de carburants. En France l'Institut français du pétrole (I.F.P.), le Commissariat à l'énergie atomique (C.E.A.) et Air Liquide travaillent sur plusieurs programmes de ce type.

Le premier choc pétrolier relance les travaux sur la pile. En 1973, des prototypes roulants de General Motors et Ford font leur apparition avec une pile à hydrogène et stockage d'hydrogène.

Des projets de réalisations de puissantes centrales électriques (de 1 à 500 MW) utilisant des piles à combustible sont élaborés (Alstom, Exxon), mais ne se réalisent pas.

On bute encore à l'époque sur des problèmes d'industrialisation, de fourniture et de stockage de carburant. Le bilan énergétique global et le prix de revient à l'usage ne sont pas encore satisfaisants. De plus, durant la période 1965-1980, les rendements des moteurs thermiques progressent et les moteurs Diesel font l'objet de nombreuses améliorations.

### c – Le ralentissement de la recherche

A la suite du deuxième choc pétrolier de 1979, une étude sur l'évaluation des possibilités techniques et économiques du développement de la pile à combustible pour la

traction fut menée en France. De très nombreuses incertitudes sur l'avenir des piles n'ont pu être levées et cette étude a conclu à la non-poursuite des programmes de recherche.

En 1980, on constate l'échec des efforts pour utiliser cette technologie.

Elle reste très coûteuse et la durée de vie des piles est encore très limitée. La durée de fonctionnement de ces piles était faible car les électrodes fonctionnant généralement avec un électrolyte liquide avaient tendance à se dessécher ou se noyer.

Fin 1981, la plupart des équipes travaillant sur des applications des piles pour la traction chez les constructeurs, équipementiers et dans les laboratoires sont démantelées. Seules quelques personnes continuent à faire de la veille technologique.

Durant ces années, deux pays continuent pourtant à travailler sur cette technologie : les Japonais sur les utilisations stationnaires et les Allemands sur les piles pour sous-marins.

En France, vers le milieu des années 1980, se poursuivent quelques travaux universitaires sur les catalyseurs tandis que le C.N.E.S. réfléchissait aux applications de cette technologie dans le cadre de la préparation du programme de navette spatiale Hermès.

E.D.F. et G.D.F. commencent à accorder un nouvel intérêt à cette technique : E.D.F. songe à la production d'hydrogène pour utiliser son électricité d'origine nucléaire tandis que G.D.F. souhaite vendre du gaz.

A partir du début des années 1990, les préoccupations environnementales liées au développement de l'effet de serre relancent la recherche dans le domaine des piles à combustible.

Cette période de redémarrage fait partie intégrante de l'histoire actuelle et sera évoquée dans le chapitre consacré à la recherche.

## B - Le principe

Nous n'évoquerons ici que le principe général de fonctionnement d'une pile à combustible. Son organisation détaillée sera décrite au chapitre trois de cette partie.

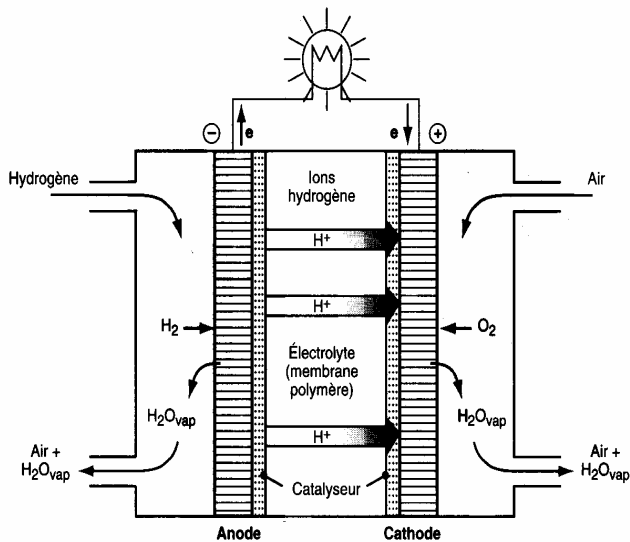
Une pile à combustible est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions.

Le principe de fonctionnement est tout à fait similaire à celui d'une pile conventionnelle avec un oxydant et un réducteur séparés par un électrolyte.

Dans la pile conventionnelle, l'oxydant et le réducteur sont progressivement consommés. La pile à combustible, quant à elle, fonctionne continuellement tant qu'elle est alimentée. Le comburant et le combustible sont stockés à l'extérieur de la pile.

Le réducteur le plus approprié est l'hydrogène ( $H^2$ ) et l'oxydant est l'oxygène de l'air ( $O^2$ ).

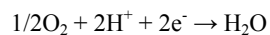


Source : Michel Prigent, « Les piles à combustible : état du développement et des recherches en cours à l'aube de l'an 2000 »

A l'anode (pôle négatif), l'hydrogène va se transformer en ions  $H^+$  en libérant des électrons selon la réaction :

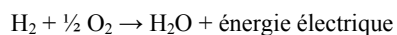


A la cathode (pôle positif), les ions  $H^+$  se combinent aux ions  $O^-$  constitués à partir de l'oxygène de l'air pour former de l'eau selon la réaction :



C'est le transfert des ions  $H^+$  et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu et de l'eau à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

La réaction globale s'écrit donc :



La production d'électrons à l'anode et leur consommation à la cathode assurent la différence de potentiel qui permet la circulation du courant lorsque la pile est alimentée en air et en hydrogène et qu'elle est placée en générateur dans un circuit électrique.

La réaction est déclenchée à l'aide d'un catalyseur. Il s'agit en général d'une fine couche de platine disposée sur les électrodes.

Cette pile est totalement solide. Elle comprend deux plaques bipolaires en carbone munies de canaux distributeurs qui amènent l'hydrogène et l'oxygène et assurent l'évacuation de l'eau. Les plaques assurent également les contacts électriques entre les cellules de base dans le cas d'un empilement.

La membrane constitue le « cœur de pile » et assure la fonction d'électrolyte. Elle est recouverte sur ses deux faces d'une fine couche de platine, le catalyseur.

Ce générateur électrochimique utilise l'hydrogène comme réducteur, mais d'autres composés, tels que le gaz naturel ou le méthanol peuvent être utilisés.

Comme dans une combustion classique, la pile à combustible utilise un combustible (hydrogène, méthane, méthanol...) et l'oxygène de l'air, mais l'énergie chimique contenue dans le combustible est directement convertie en électricité, sans passer par le stade thermique. Il n'y a également aucune pièce en mouvement.

En général la tension d'une cellule est de l'ordre de 1 volt (V). Pour obtenir la quantité désirée d'électricité, il est nécessaire d'assembler plusieurs cellules en série.

Le courant fourni par une pile à combustible est continu. Il est donc nécessaire de placer en aval de la pile un onduleur permettant la transformation du courant continu en courant alternatif.

La majorité des piles à combustible utilisent l'hydrogène comme combustible.

Comme nous le verrons plus en détail dans le dernier chapitre de ce rapport, l'hydrogène peut être soit produit *in situ* par un reformeur embarqué à partir d'un certain nombre de carburants, soit être contenu dans un réservoir classique. Dans ce dernier cas, l'hydrogène doit être produit dans une usine et acheminé jusqu'au réservoir.

Le rendement d'une pile à combustible, sans reformage, varie selon le type de pile et peut être supérieur à 50%.

Dans une pile à combustible, l'énergie non convertie en électricité est émise sous forme de chaleur et est évacuée sous forme d'eau chaude ou de vapeur.

Cette perte énergétique peut-être limitée si l'on utilise la chaleur émise par la pile à des fins de cogénération, en chauffant de l'eau ou de l'air. Le rendement global va alors pouvoir atteindre 80 à 90%.

La pile à combustible présente aussi l'avantage d'avoir un rendement élevé à bas régime, ce qui n'est pas le cas des moteurs à combustion interne.

### C- Les différentes sortes de piles

Il existe cinq grandes catégories de piles à combustible.

Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :



Type de pile	AFC	PEMFC Pile à membrane échangeuse de protons	PAFC Pile à acide phosphorique	MCFC Pile à carbonates fondus	SOFC Pile à oxyde solide
Température de fonctionnement	70-100°C	70-100°C	150-210°C	650-1000°C	800-1000°C
Domaine de puissance	1W-10kW	1W-300kW	1W-300kW	10kW-100MW	1kW-500MW
Rendement	55-60%	32-40%	36-45% 80% en cogénération	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		
Electrodes				Nickel	Nickel
Combustible le plus probable	H2 pur	H2 pur Méthanol	Méthanol Gaz naturel H2 (CO<1%)	Gaz naturel H2 Biomasse	
Etat de la technologie	Mature	Assez mature	Aboutie	Pas encore mature	Encore expérimentale
Avantages	- matériaux bon marché - tolère CO	- technologie de fabrication simple - temps de démarrage rapide - basse température et petite taille	- relativement tolérante au CO	- excellent rendement - tolère le CO - supporte le gaz naturel - pas de métaux précieux - reformage interne	- excellent rendement - reformage interne - fabrication potentiellement simple - pas de métaux précieux
Limites	- utilise H2 et O2 purs - ne tolère pas CO2	- asphyxie par le CO - composants	- composants coûteux - problèmes de corrosion	- problèmes de corrosion - catalyseurs	- les hautes températures nécessitent des matériaux non-standards

Commentaire :

	- électrolyte corrosif	coûteux	- faible densité d'énergie	précieux	- supporte mal les variations de température
Applications	- militaire - espace	- véhicules - sous-marins - espace - générateurs stationnaires - applications portables	- cogénération (10-250kW)	- cogénération - alimentation de sites isolés	- cogénération - centrales domestiques
Chef de file	IFC	Ballard, IFC, Siemens, DeNora	IFC, Fuji	ERC, MC Power	Siemens

## 2 - Une source d'énergie aux multiples possibilités d'applications

Les piles à combustible, à la différence des piles classiques dont on se débarrasse lorsque la matière active est épuisée, ou des accumulateurs que l'on recharge électriquement, sont alimentées en continu. Cela leur confère une souplesse d'emploi équivalente à celle d'un moteur thermique.

Les piles à combustible présentent, par rapport aux machines thermiques, des caractéristiques générales très intéressantes pour la production d'électricité :

- utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène elles ne rejettent que de la vapeur d'eau,
- elles sont silencieuses. A l'exception des pompes il n'y a pas de pièces mobiles dans les piles. La maintenance est donc très peu coûteuse,
- elles ont un rendement énergétique élevé. Le rendement électrique peut atteindre 60%. Le rendement global peut aller jusqu'à 80% lorsqu'il y a cogénération,
- elles ont une grande souplesse d'utilisation compte tenu de la possibilité de fabrication modulaire d'éléments de dimension et de formes variées, et de démarrage et arrêt quasi - instantanés pour les piles à basse température,
- elles ont une grande densité massique d'énergie, ce qui est un avantage particulièrement important pour les applications spatiales et les véhicules terrestres,
- elles peuvent utiliser une grande variété de combustibles (hydrogène, gaz naturel, méthanol, naphta, gaz de biomasse...).

On évoquera les trois types d'applications actuellement envisagées : la génération stationnaire d'énergie, la propulsion de véhicules et l'alimentation d'appareils portables.

### A – La génération stationnaire d'énergie

La génération stationnaire d'énergie peut s'effectuer dans des centrales électriques et par la mise en œuvre de la cogénération électricité-chaleur.

#### a - Les centrales électriques

Les piles à combustible peuvent constituer d'excellentes sources d'énergies délocalisées. L'intérêt qu'elles suscitent est renforcé par la constante augmentation de la demande d'électricité et par l'ouverture du marché de la fourniture d'énergie électrique.

La production massive d'électricité ne devrait toutefois pas être concernée, notamment dans un pays comme la France qui s'est dotée d'une industrie nucléaire très performante.

Les piles à combustible peuvent être aussi une solution à la difficulté d'implanter de nouvelles lignes électriques spécialement dans les endroits isolés.

Les piles à combustible permettent une économie de transport et une sûreté de distribution très grande.

Elles peuvent constituer des systèmes de secours qui devraient avoir une grande fiabilité.

Le rendement électrique d'une pile à combustible ne dépend pas de la taille de l'installation. Cela permet la construction de petites unités qui peuvent être placées à proximité des utilisateurs et notamment des particuliers. L'eau chaude produite par un tel dispositif peut assurer à la fois le chauffage et la réfrigération d'une maison.

Les piles à combustible pourraient remplacer à terme les centrales thermiques d'une puissance de quelques centaines de mégawatts. Les piles à haute température, comme les piles à carbonates fondus (M.C.F.C.) et les piles à oxyde solide (S.O.F.C.), auxquelles on peut adjoindre une turbine à gaz sont les mieux adaptées. On estime le marché américain des systèmes pile à oxyde solide – turbine à gaz à 500-600 MW par an dans 10 ans.

### b - La cogénération chaleur - électricité

Les systèmes de cogénération se révèlent intéressants lorsque l'utilisation simultanée d'électricité et de chaleur ou de froid est requise, par exemple pour les hôpitaux ou les piscines. Elle peut-être envisagée même pour les particuliers. Toutefois une réduction des coûts est encore nécessaire pour assurer une pénétration importante de ce type de marché.

La pile à combustible offre un meilleur rapport électricité – chaleur que les groupes électrogènes à moteur Diesel et les turbines, mais ceux-ci offrent des coûts de revient incomparablement plus bas.

La cogénération avec une pile à combustible est actuellement très étudiée. De nombreux essais pour des puissances allant de quelques kW à quelques MW sont en cours dans le monde.

La taille et le poids des piles à combustible ayant peu d'importance dans les applications stationnaires, de nombreux types de piles sont utilisables.

La pile à acide phosphorique (P.A.F.C.) est celle qui fonctionne le mieux actuellement dans ce type d'application.

Mais les autres types de pile, M.C.F.C., S.O.F.C. et P.E.M. peuvent aussi être intéressantes pour des systèmes de cogénération.

Le marché des piles stationnaires pourrait représenter à terme un marché d'environ 1 à 2 milliards de dollars.

Il y a ainsi des projets de commercialisation de piles P.E.M. de 250 kW de la part de Ballard, ainsi que de petites piles de 7 kW destinées aux maisons individuelles par Plug Power en collaboration avec GE Microgen, filiale de GE Power Systems.

Toutefois les coûts de revient et, nous le verrons, des difficultés de fonctionnement non réellement résolues, permettent de douter de la réalité de la commercialisation imminente.

### B – La propulsion des véhicules

La propulsion des véhicules par pile à combustible est une idée extrêmement séduisante car elle permettrait de s'affranchir des sujétions des moteurs à combustion interne.

Ceux-ci ont fait, comme on le verra, d'énormes progrès et possèdent encore de grandes possibilités d'améliorations. Mais inévitablement, il arrivera un moment où il ne sera plus possible de réduire leurs émissions.

La pile à combustible s'imposera probablement un jour pour la propulsion des véhicules même s'il n'est pas possible d'indiquer un délai.

Les premiers véhicules à en être équipés pourraient être les véhicules de transport en commun. Deux raisons motivent cette opinion : les préoccupations environnementales dans les centres villes (pollution, bruit) et la place disponible pour installer à bord de ce type de véhicule l'encombrante pile à combustible.

Mais il nous semble que le coût de revient empêchera, encore plus que pour les applications stationnaires, une diffusion rapide de ce mode de propulsion.

En effet, il faudra certainement un gain d'un facteur dix en coût de revient pour que les piles à combustible puissent être utilisées dans l'automobile. La production en série ne devrait pas suffire pour abaisser de façon significative les prix de revient actuels. Il faudra pour cela certainement encore réaliser des progrès techniques importants.

La fiabilité de ces piles devra aussi être considérablement augmentée car les exigences du fonctionnement sur un mobile sont beaucoup plus importantes qu'à poste fixe.

Le fonctionnement des auxiliaires, notamment du reformeur dans un tel environnement, devrait aussi poser des problèmes importants.

Enfin une autre difficulté devra être résolue : l'alimentation de la pile en hydrogène.

Le choix devra être fait entre la fabrication de l'hydrogène à bord par reformage ou le stockage du gaz dans un réservoir. Nous reviendrons sur ces questions dans le dernier chapitre de ce rapport.

Il y aura donc plusieurs étapes successives à franchir, dont celle des véhicules hybrides, avant d'obtenir une propulsion électrique utilisant seule une pile à combustible.

### C – L'alimentation d'appareils portables

Les piles à combustible trouveront sans aucun doute des perspectives intéressantes de développement sur le marché en pleine croissance des équipements électroniques portatifs.

Les équipements électroniques portables sont actuellement handicapés par la faible autonomie de leur source d'énergie. Il faut les recharger régulièrement. Avec une pile à combustible, l'autonomie ne sera limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol.

Comme nous le verrons dans le troisième chapitre, un certain nombre de difficultés techniques demeurent dans ce domaine.

Ces micropiles devraient très rapidement concurrencer les batteries actuelles de ces équipements portables.

Ce marché pourrait être ainsi le premier à apparaître réellement alors que les principaux développements ont été menés jusqu'à présent dans le domaine de l'automobile et de la génération stationnaire d'énergie.

Toutes ces applications sont parfois présentées comme imminentes. Il convient donc de s'interroger sur le niveau réel de mise au point des piles à combustible.

### **3 – Quel est le niveau réel de mise au point de la technique des piles à combustible ?**

Nous focaliserons notre intérêt sur le type de pile le plus étudié à l'heure actuelle : la pile à membrane échangeuse de protons (P.E.M.).

Nous examinerons une variante de celle-ci, la pile à méthanol direct qui utilise directement le méthanol comme carburant. La dénomination anglaise de cette dernière est *Direct methanol fuel cell (D.M.F.C.)*.

Nous évoquerons également *in fine* de ce chapitre le niveau d'évolution des autres sortes de piles.

## A – La pile à combustible à membrane (P.E.M.)

On évoquera le cœur de pile et les auxiliaires.

### a – Le cœur de pile

Le cœur de cette pile est composé de l'électrolyte, des électrodes et des plaques.

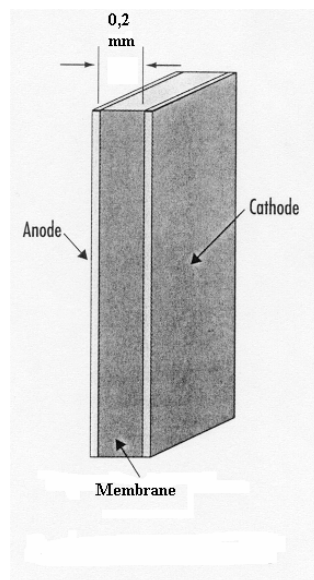
#### 1 - L'électrolyte

Un électrolyte est une substance qui permet la dissociation, en présence d'eau, d'un élément en ions chargés négativement et positivement. Cette solution aqueuse est ainsi rendue électriquement conductrice.

Dans les piles mises au point dans les années 1975 – 1980, l'électrolyte était liquide, ce qui entraînait soit la noyade des électrodes en cas d'excès de celui-ci soit leur assèchement en cas de fuite. L'avancée technologique décisive a été effectuée au début des années 1990 par la mise au point d'électrolytes solides polymères à la suite de travaux réalisés au Los Alamos National Laboratory, aux Etats-Unis. C'est cela qui a permis de pouvoir mettre au point des piles à combustible à durée de vie importante.

Dans les piles P.E.M., l'électrolyte est un type particulier de polymère plastique.

Il s'agit d'une membrane polymère perfluorée sur laquelle sont greffés des groupements sulfonates  $\text{SO}_3^-$ . Cette membrane est « prise en sandwich » entre l'anode et la cathode selon le schéma suivant :



Un certain nombre de fabricants produisent ce type de membranes : Asahi Glass, Asahi Chemicals, Gore, Dow Chemicals. Mais le modèle qui fait référence et, actuellement, le plus employé, est celui fabriqué par la firme Du Pont et connu sous le nom de marque déposée, *Nafion*.

Ce type de membrane mis au point au début des années 1970 n'a pas été élaboré pour les piles à combustible. C'est en réalité un dérivé de produits utilisés dans l'industrie de fabrication par électrolyse du chlore et de la soude. Elle a été ensuite transposée telle quelle dans la fabrication des piles à combustible.

Très hygroscopique, la membrane doit toujours rester saturée d'eau pour permettre le déplacement des ions  $H^+$  associés aux groupements sulfonates.

Ce type d'électrolyte n'est pas d'un type courant dans la mesure où, en présence d'eau, les ions négatifs sont retenus à l'intérieur de sa structure. Seuls les ions positifs, les ions hydrogène, sont mobiles et libres de transporter la charge positive à travers celle-ci. Ces ions hydrogène ne se meuvent que dans une seule direction, de l'anode vers la cathode. Sans le mouvement de ces ions à l'intérieur du cœur, le circuit électrique resterait ouvert et aucun courant électrique ne serait généré.

La structure de la membrane de type *Nafion* est en Téflon.

La membrane est en fait une substance stable et relativement solide due à la combinaison des caractéristiques physiques et chimiques des perfluorocarbones sulfonés.

Ces membranes présentent une très importante stabilité chimique dans un environnement à la fois oxydant et réducteur. Elles sont très résistantes et elles peuvent fonctionner plusieurs milliers d'heures.

L'épaisseur de cette membrane est habituellement d'environ 200 $\mu m$ . Il y a un travail continu de recherche pour diminuer cette épaisseur qui, d'après les spécialistes, devrait pouvoir atteindre 100 $\mu m$ . Il n'est pas impossible qu'elle puisse devenir encore plus mince.

Bien que fine, elle sépare de façon efficace les gaz : l'hydrogène peut ainsi être séparé de l'air, ce qui est la condition impérative de fonctionnement. Aucune discontinuité ne pouvant exister à sa surface, cela entraîne une fabrication très délicate et la nécessité de contrôles de qualité très stricts lors du processus d'élaboration.

Les électrons produits ne pouvant pas franchir la membrane, ils doivent passer à l'extérieur pour fermer le circuit. C'est en suivant ce chemin qu'ils peuvent alimenter un appareil électrique extérieur comme on peut le voir sur le schéma de fonctionnement.

La membrane est, si l'on peut dire, le « cœur du cœur » du générateur à pile à combustible. Les surfaces nécessaires dans une pile sont fonction de sa puissance : ainsi une pile de 30 kw doit posséder une surface de membrane de 10 m<sup>2</sup>.

L'usage des membranes actuelles présente un certain nombre de difficultés techniques. Celles-ci sont, notamment, la limitation de température de fonctionnement et la gestion de leur humidité.

La première difficulté concerne la température de fonctionnement.

Les piles à combustible actuelles à membranes protoniques de type *Nafion*, ne peuvent travailler qu'à une température maximale de 90°C. En pratique, la température de fonctionnement est le plus souvent comprise entre 60 et 80°C.

A des températures supérieures à ces niveaux, les membranes ne peuvent plus assurer une conductivité convenable des protons à cause de leur inaptitude à retenir l'eau. Leur rendement diminue donc en fonction de l'élévation de la température.

Il serait pourtant fort utile de pouvoir augmenter cette température de fonctionnement car tous les chimistes savent que plus la chaleur augmente plus certaines réactions se font facilement.

Concernant ces piles l'enjeu technique n'est pas mince. En effet si les membranes pouvaient supporter des températures plus élevées, l'activité des catalyseurs en platine de l'anode et de la cathode pourrait être augmentée. Cette température plus élevée permettrait d'éviter l'encrassement de l'anode par le monoxyde de carbone : à partir d'une température de fonctionnement de 170°C, ce problème ne se poserait plus.

Une température plus élevée de fonctionnement contribuerait aussi à améliorer le rendement en électricité des carburants. Elle permet également d'accroître le rendement thermique par la possibilité d'exploiter en sortie de pile à combustible un système de cogénération. Nous verrons que cela est possible pour les piles S.O.F.C. mais ne l'est pas à l'heure actuelle pour les piles P.E.M.

Il apparaît donc nécessaire de pouvoir faire atteindre une température de fonctionnement beaucoup plus élevée aux piles à membrane. Mais on mesure le chemin qui reste à parcourir : il faudrait à terme obtenir au moins un doublement, des températures qu'il est actuellement possible d'atteindre de façon usuelle, c'est-à-dire environ 160°C – 180°C.

Un certain nombre de techniques pourrait être utilisée pour faire croître cette valeur. Il semble, notamment, qu'on pourrait assez facilement atteindre une température de l'ordre de 120°C en faisant travailler la membrane sous pression, c'est-à-dire en l'alimentant en air comprimé. Mais l'inconvénient de cette pressurisation est qu'elle diminue l'espérance de vie de la pile.

La meilleure voie serait sans conteste de mettre au point de nouvelles membranes supportant des températures de l'ordre de 170 – 180°C à la pression ambiante.

Des instituts de recherches et d'entreprises travaillent activement sur ce problème. On conçoit que la compétition soit très âpre. Il ne fait en effet pas de doute que le détenteur d'une membrane adéquate serait assuré d'un avantage industriel tout à fait important. De fait actuellement, tous les fabricants de ce type de piles obtiennent tous des performances à peu près semblables dans la mesure où ils emploient tous, ou quasi tous, la même membrane en *Nafion*.

Il ne nous a pas été très facile de trouver des informations sur les recherches en cours dans ce domaine. Un certain nombre d'éléments peuvent néanmoins être trouvés à la lecture attentive des comptes rendus des colloques et congrès qui se tiennent de plus en plus fréquemment sur ces piles à combustible.

Sans avoir l'ambition d'être exhaustifs, nous pouvons cependant donner néanmoins une certaine idée des travaux en cours sur ces membranes concernant leur température de fonctionnement.

Se sont lancées dans ces recherches des entreprises, comme W.L. Gore, 3M, Celanese, Ionics et Dow aux Etats-Unis, Asahi chemical and Asahi glass au Japon, Sanofi en France ainsi que des organismes de recherche comme le Commissariat à l'énergie atomique (Grenoble) qui travaille sur une membrane polyimide et des Universités comme celle de Poitiers.

Les recherches se focalisent essentiellement sur différents polymères (polysulfones, polyéthers-cétone, polyimide...) généralement sulfonés afin d'assurer le transfert protonique. Des éléments minéraux en tant que charges conductrices protoniques ou renfort mécanique y sont parfois associés.

On peut également noter qu'au niveau européen, des recherches tendant à conférer aux polymères thermostables des propriétés de conduction élevées tout en conservant de bonnes caractéristiques mécaniques ont été explorées dans le cadre du programme Brite-Euram. Au sein de ce dernier ont été conduits des travaux sur des membranes organiques – inorganiques formées par l'association de polymères sulfonés et de matériaux inorganiques conducteurs protoniques.

Malgré ces différents efforts en cours et plusieurs prototypes de laboratoires, aucune solution de rechange réellement opérationnelle à l'utilisation du *Nafion* ne semble exister à l'heure actuelle.

La deuxième difficulté a trait aux problèmes de l'humidité nécessaire.

Il est absolument nécessaire que la membrane soit constamment humide, la gestion de l'eau étant en effet un point clé de la membrane d'une pile de type P.E.M.

L'eau est un produit du fonctionnement de la pile et doit être évacuée à l'extérieur. Mais, dans le même temps, il est primordial que l'air et le carburant soit correctement humidifiés pour maintenir la membrane convenablement hydratée. Cela est nécessaire, comme on l'a déjà noté, pour permettre le déplacement des ions  $H^+$ , faute de quoi la production de courant électrique cesse. Par contre si la membrane devient trop sèche, elle se rompt.

Cette nécessité de contrôler l'humidité de la membrane sans que celle-ci ne devienne excessive ni insuffisante est une contrainte très forte. Elle ne semble pas encore complètement maîtrisée surtout dans la perspective de la mise sur le marché de piles qui devront fonctionner sans la surveillance constante de techniciens.

Ces deux difficultés ne nous apparaissent pas être proches d'être résolues.

La membrane de l'avenir réellement performante reste donc encore très largement à mettre au point.

Il est donc nécessaire d'effectuer encore dans ce domaine une ample recherche fondamentale.

C'est un domaine qui nous semble éminemment stratégique.



En effet l'inventeur d'une nouvelle membrane qui fonctionnerait à haute température et dont la sensibilité à l'humidité ne serait pas trop forte obtiendrait un avantage déterminant pour la mise au point d'une pile à combustible réellement opérationnelle.

## 2 – Les électrodes

Les électrodes sont des conducteurs électroniques au travers desquels des électrons sont échangés avec les réactifs chimiques dans une réaction électrochimique.

Toutes les réactions électrochimiques comportent deux parties : une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode.

Dans une pile à combustible de type P.E.M. fonctionnant à la température relativement basse d'environ 80°C, ces deux réactions n'ont normalement lieu qu'à une vitesse très lente. Elles dépendent de la nature des éléments constitutifs des électrodes et de leur état de surface et donc de la plus ou moins grande difficulté à réaliser les échanges électroniques au niveau de l'interface électrode-électrolyte (polarisation d'activation).

Pour réduire cette polarisation d'activation à ce niveau, on met en œuvre des « catalyseurs » (ou « électrocatalyseurs ») spécifiques. Ils ont pour rôle de faciliter les échanges électroniques lorsque ceux-ci constituent l'étape lente du processus.

Les meilleurs catalyseurs anodiques et cathodiques pour les piles de type PEM sont à base de métaux précieux et, notamment, de platine.

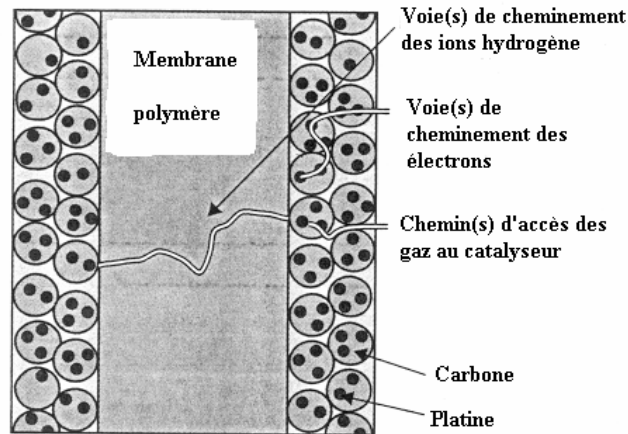
Celui-ci est mis en œuvre à l'état dispersé sur du charbon actif à très grande surface spécifique comme, par exemple, du noir d'acétylène. La taille très réduite des particules de platine, de l'ordre de deux nanomètres de diamètre, autorise la création d'une surface de contact très importante pour les molécules de gaz. Cela permet de n'utiliser qu'une quantité relativement modeste de platine. Les réactions peuvent ainsi se développer en de multiples endroits et, en conséquence, générer un flux significatif d'électrons, c'est-à-dire de courant électrique.

La réaction physique et électrochimique aux électrodes est assez complexe.

A l'anode, l'hydrogène diffuse à travers le matériau jusqu'à ce qu'il rencontre une particule de platine. Le platine dissocie alors par catalyse la molécule d'hydrogène ( $H_2$ ) en deux atomes d'hydrogène (H) qui se lient avec les deux atomes de platine les plus proches.

Chaque atome d'hydrogène « relâche » ensuite un électron pour donner un ion hydrogène ( $H^+$ ). Ces ions ( $H^+$ ) traversent ensuite la membrane vers la cathode pendant que les électrons migrent de l'anode vers le circuit extérieur et enfin vers la cathode.

Le schéma suivant montre le cheminement de cette réaction :



A la cathode, la réaction mettant en œuvre une molécule d'oxygène ( $O_2$ ) est une réduction suivant un processus à étapes multiples.

L'acidité du milieu ne permet pas d'utiliser un métal comme par exemple le nickel. Les catalyseurs à base de platine semblent actuellement les seuls à pouvoir réduire l'oxygène en grandes quantités et donc permettre l'obtention de densités de courant importantes aux températures relativement basses d'environ  $80^\circ C$  auxquelles fonctionnent les membranes des piles à combustible du type P.E.M.

Ces électrodes ne participent pas directement aux réactions électrochimiques et ne sont donc pas consommés, à la différence des piles classiques ou des piles au lithium. Cependant leur structure peut évoluer par suite du frittage progressif des particules de catalyseur.

Si la pile est alimentée par de l'hydrogène pur, son oxydation ne pose pas de problème particulier au niveau des électrodes.

Par contre l'alimentation en hydrogène issu d'un reformeur placé en amont de la pile entraînera la présence de monoxyde de carbone (CO) résiduel.

Il apparaît qu'en dessous de  $100^\circ C$  il suffit d'une centaine de ppm de CO dans l'hydrogène pour aboutir à l'empoisonnement progressif des sites actifs des électrodes. La présence de soufre entraîne les mêmes difficultés.

Cet empoisonnement entraîne un amoindrissement de la surface réelle active des électrodes et donc une diminution de l'intensité du courant et de la puissance. Les solutions pour obvier à ces problèmes résident dans l'augmentation de la stabilité des électrodes, cette question étant au centre d'un grand nombre de recherches.

Compte tenu du prix du platine on cherche bien entendu à diminuer l'emploi de ce métal.

Un certain progrès a eu lieu de ce point de vue. Ainsi en 1986 une pile à combustible utilisait 16 grammes de platine par kilowatt de puissance produite. Actuellement il faut 1 gramme de platine par kilowatt de puissance. On mesure ainsi l'amélioration considérable qui a été effectuée en quinze ans.

Mais il semble très problématique à beaucoup de spécialistes que l'on puisse diminuer encore beaucoup cette quantité nécessaire. La recherche s'oriente actuellement vers la rationalisation des dépôts de platine par la modification de l'architecture des électrodes, car il a été démontré qu'environ 20 à 30% de ce métal était vraiment actif.

Une autre possibilité est de faire fonctionner les piles sous une pression de plusieurs atmosphères. Cela accroît les vitesses de diffusion et de réaction de l'hydrogène et de l'oxygène et diminue donc les quantités de platine nécessaires. Cependant il semble que les gains soient assez faibles. La pressurisation alourdit les piles compte tenu du poids du compresseur qui, par ailleurs, a tendance à faire diminuer le rendement.

Mais les améliorations les plus importantes sont recherchées par l'emploi d'alliages de platine avec d'autres métaux, le remplacement du platine par des métaux plus stables et l'augmentation de la température de fonctionnement de la pile.

Il y a actuellement des projets de remplacement du platine par du ruthénium. Une autre voie de recherche suivie notamment en Grande-Bretagne serait de fabriquer des électrodes à base de nickel et de tungstène qui présentent des propriétés physiques intéressantes et sont peu coûteux.

Mais tous les projets de remplacement complet du platine sont encore du domaine du laboratoire.

A l'anode, où a lieu la réaction d'oxydation, on a pu mettre en évidence la possibilité d'employer certains alliages de platine. Ces alliages platine/ ruthénium, platine/molybdène et platine/étain donnent des résultats encourageants. Ils semblent cependant nécessiter une température plus élevée, aux alentours de 120°C, avec une adjonction d'air de 0,5 % au gaz issu du réformage. Ces nouveaux catalyseurs permettraient des tolérances de l'ordre de 500 ppm de monoxyde de carbone dans l'hydrogène.

Des essais sont également en cours avec des terres rares comme le lanthane. Celui-ci est un métal blanc malléable, premier de la série des lanthanides ou terres rares. Ils sont utilisées comme catalyseurs dans de nombreuses réactions chimiques comme l'hydrogénation, la polymérisation ou l'isomérisation. L'emploi de la pérovskite, un titane naturel de calcium, est également étudié.

A la cathode, pour la réduction de l'oxygène, il est envisagé d'utiliser des alliages avec des métaux comme le chrome, le nickel ou le molybdène.

La température de fonctionnement des piles à combustible est donc un problème important qui n'a pas encore trouvé de solution.

### 3 – Les plaques

On peut distinguer les supports de cathode et d'anode et les plaques bipolaires.

#### - Les supports de cathode et d'anode

Disposés de part et d'autre de la cathode et de l'anode, ces supports ont une épaisseur de 100 à 300 microns. Ils sont généralement fabriqués en tissu imprégné de carbone car ils doivent permettre le passage des électrons de l'anode à la cathode.

La nature poreuse de ces supports permet aux gaz de diffuser, ce qui leur permet, en se dispersant, d'entrer en contact avec la surface entière de la membrane.

Ils jouent également un rôle important dans la gestion de l'eau. Ils doivent assurer à la fois l'humidification de la membrane et l'évacuation de l'eau excédentaire. Ces pièces sont donc généralement recouvertes d'un matériau de type Téflon afin que l'eau ne les mouille pas.

#### - Les plaques bipolaires

Accolées aux supports d'anode et de cathode, elles ont le double rôle de canaliser les flux de gaz en provenance de l'extérieur et de collecter le courant. Dans une pile à combustible à cellule unique, elles sont les composantes extérieures de la pile.

Elles sont fabriquées avec un matériau léger, rigide, imperméable aux gaz et conducteur de l'électricité. C'est le plus souvent du graphite.

La première tâche de ces plaques est de canaliser les flux de gaz en provenance de l'extérieur de la pile.

La face connexe du support d'anode ou de cathode est parcourue par des canaux intérieurs dont la hauteur, la profondeur et l'espacement sont de l'ordre de 0,8 mm. Ils servent à faire transiter les gaz à travers la pile. La structure intérieure de la plaque, la largeur et la profondeur des canaux, sont des caractéristiques déterminantes de la bonne distribution des gaz. Cette structure a aussi une grande importance en ce qui concerne la fourniture d'eau à la membrane et l'évacuation de l'eau à partir de la cathode.

Le deuxième rôle de ces plaques est d'être un collecteur de courant.

Les électrons produits par l'oxydation de l'hydrogène sortent par l'anode, traversent le support d'anode et ensuite la plaque. Ils quittent ensuite la pile et alimentent le circuit extérieur.

Les piles à combustible sont en fait formées d'un empilement de ces structures primaires qui sont accolées les unes aux autres par l'intermédiaire des plaques, plaques positives au contact des plaques négatives, assurant ainsi la connexion électrique en série de la totalité de la pile. C'est pour cette raison que ces plaques sont parfois appelées « plaques bipolaires d'interconnexions ».

Ces multiples fonctions doivent être remplies simultanément. Il y a donc, en termes de matériaux, des contraintes importantes de construction.

Les plaques doivent avoir un bon niveau de conductivité, une bonne inertie chimique notamment par rapport à l'eau et aux acides ainsi qu'une perméabilité très faible à

l'hydrogène. Elles doivent également être très résistantes à la corrosion et être légères afin que les empilements nécessaires pour réaliser une pile à combustible ne soit pas trop lourds.

Les matériaux couramment employés à l'heure actuelle sont à base de graphite haute densité. Les dizaines de canaux nécessaires doivent être usinés avec beaucoup de soins car les tolérances sont très faibles.

Ces plaques sont donc difficiles à réaliser. Il ne sera certainement pas possible d'en rester à l'usinage comme mode de fabrication. Une percée technologique dans le mode de fabrication de ces plaques sera nécessaire.

Il faudrait d'abord employer des matériaux moins coûteux et moins difficiles à travailler que le graphite, comme par exemple l'inox. Il sera certainement nécessaire de mettre au point des procédés de fabrication comme l'emboutissage ou la thermocompression qui permettraient la fabrication automatique à la chaîne.

Les résines thermodurcissables riches en charges conductrices et, particulièrement celles à base de polyesters conducteurs, pourraient être une des solutions pour la fabrication de ces plaques. Un certain nombre de sociétés américaines se sont lancées récemment dans ces réalisations.

Le Commissariat à l'énergie atomique s'intéresse également à ces techniques de fabrication des plaques pour piles à combustible. Il étudie ainsi des matériaux organiques dans lesquels sont dispersés, à cause de la nécessité d'obtenir un matériau inerte chimiquement, des charges non métalliques de type graphite ou noir de carbone.

Ces problèmes de fabrication relèvent essentiellement de la science des matériaux.

#### b – Les auxiliaires

Le cœur de pile doit être entouré par un certain nombre d'auxiliaires.

Il est nécessaire de disposer autour de lui des appareils qui assureront son alimentation en hydrogène, son refroidissement, l'évacuation de la chaleur et de l'électricité, le compresseur afin d'augmenter le rendement...

Tous ces appareils auxiliaires sont en fait banals dans la mesure où ils sont employés couramment notamment dans l'industrie chimique et pétrolière. Ils ont donc simplement été adaptés aux piles à combustible.

Leur fonctionnement nécessite de l'énergie. Ainsi le compresseur d'air à la cathode peut consommer jusqu'à 12 kilowatts à pleine puissance.

Avant d'examiner un auxiliaire très important, le reformeur, et la nécessaire présence d'accumulateurs on évoquera le problème de la commande et du contrôle de cet ensemble.

#### 1 – La commande de cet ensemble

L'ensemble du système générateur à pile à combustible doit faire l'objet d'un contrôle et d'une gestion appropriés. Il est naturellement fait appel à l'électronique pour ces tâches.

Les informations sont très lacunaires dans ce domaine. Néanmoins il semble que l'on ne dispose pas encore d'une électronique de puissance satisfaisante dans ce domaine.

En effet le travail de recherche dans ce domaine s'est longtemps focalisé sur le contrôle des fortes puissances alors que les piles à combustible se situent plutôt dans les petites et moyennes puissances. Cette situation est telle que toute l'expérience et les réussites enregistrées dans ce domaine dans notre pays, notamment pour des applications telles que le T.G.V., ne sont pas transposables au niveau de la pile à combustible.

Ce domaine pourrait certainement intéresser des firmes comme Valeo. Cette entreprise est déjà impliquée dans l'étude d'équipements pour la gestion thermique et de l'eau des piles à combustible. Une nouvelle division vient d'être créée pour les compresseurs électriques.

Valeo participe aussi aux programmes des constructeurs automobiles dans ce domaine et à des actions au sein du Réseau « pile à combustible ».

Le contrôle-commande des piles à combustible est certainement un enjeu stratégique.

En effet, ayant pris avec quelque retard le départ dans les différents composants de pile à combustible, nos entreprises et nos laboratoires pourraient trouver là une possibilité de nous positionner comme des interlocuteurs irremplaçables.

Il serait en effet peut-être possible de valoriser dans ce domaine tous le savoir-faire qu'un certain nombre d'acteurs français, et notamment le C.E.A., ont pu acquérir dans la gestion électronique des systèmes complexes.

Cet axe de recherches nous paraît d'autant plus nécessaire à explorer de façon approfondie que les Japonais et les Américains seraient en train de faire des efforts très importants dans ce domaine.

## 2 – La nécessaire présence d'accumulateurs classiques

Ce système générateur à pile à combustible a besoin de classiques accumulateurs pour fonctionner.

Ils sont tout d'abord indispensables pour le démarrage à la fois du reformeur, du système de contrôle commande et de l'ensemble des auxiliaires.

Ces accumulateurs seront aussi nécessaires pour stocker la production d'électricité de la pile à combustible dans les moments où ce courant ne sera pas employé, le fonctionnement de la pile n'étant pas interrompu. Celle-ci a alors une fonction de recharge de la batterie.

Les changements de phases requerront également un tel équipement. En effet une pile à combustible est assez longue à changer de gradient de puissance. Ce sont des batteries qui se mettront en route pour assurer les transitions. Elles seront aussi nécessaires pour pallier les variations de puissance de sortie de la pile en fonction de la température du milieu.

## 3 – Le reformeur

C'est un auxiliaire nécessaire quand la pile n'est pas alimentée par de l'hydrogène stocké dans un réservoir. Il permet de stocker l'hydrogène qui sera consommé par la pile.

Les technologies de reformage sont utilisées de façon courante pour la production de gaz de synthèse dans l'industrie chimique et pétrolière.

Comme l'indique un rapport récent de l'Institut français du pétrole (I.F.P.), la production d'hydrogène s'effectue en trois étapes : génération du mélange initial, réaction du monoxyde de carbone et de l'eau et purification finale de l'hydrogène.

### – La génération du mélange initial

La première opération est la production de gaz de synthèse. Il existe trois méthodes majeures : le vaporeformage, l'oxydation partielle et les procédés autothermes.

- Le vaporeformage

Le vaporeformage, est le procédé possédant le meilleur rendement énergétique, le plus économique et le plus répandu. Il peut convertir une large gamme d'hydrocarbures, du gaz naturel au naphtha. La réaction de base est la décomposition du méthane en ses éléments. Celle-ci produit du carbone solide que l'on transforme en gaz par utilisation de la vapeur d'eau.

Il y a la nécessité d'un apport externe de chaleur compte tenu du caractère fortement endothermique, c'est-à-dire avec absorption de chaleur, de cette réaction.

Dans le cas de piles à combustible de type P.E.M., cette chaleur doit être apportée par une combustion additionnelle de carburant, ce qui nécessite un brûleur complémentaire. Il convient de noter que les échanges de chaleur et les montées en température nécessitent des temps de réponse et de mise en marche importants.

C'est ce système qu'ont choisi un certain nombre de firmes automobiles, notamment, Toyota, DaimlerChrysler et General Motors pour leur prototype de voiture à pile à combustible.

- L'oxydation partielle

L'oxydation partielle est un procédé essentiellement thermique. Il est surtout utilisé dans des installations industrielles pour produire de l'hydrogène à partir de produits plus lourds que le naphtha bien qu'il puisse aussi fonctionner avec des hydrocarbures légers.

Par rapport au vaporeformage, cette méthode autorise un plus grand choix de carburant, qui peut aller du gaz naturel au gazole.

Ce procédé offre une plus grande compacité, une simplification importante du système de gestion de l'eau et un temps de démarrage et de réponse réduits du fait de l'absence de brûleur externe et des échanges de chaleur.

Par contre ces aspects positifs sont compensés par :

- une forte exothermicité et un rendement en hydrogène plus faible,
- une possible dilution de l'hydrogène produit par des gaz comme l'azote en cas d'alimentation en air du réacteur, ce qui peut affecter le rendement de la pile.

On notera que, entre autres, l'Argonne national laboratory a choisi l'oxydation partielle comme système de génération d'hydrogène embarqué. Ce laboratoire vient d'ailleurs de présenter un reformeur très compact fonctionnant selon cette technique.

- Le procédé autotherme

Le procédé autotherme utilise une combinaison des deux réactions décrites. Il s'agit de tirer avantage de l'exothermicité de l'oxydation partielle pour combler l'endothermicité du vaporeformage.

C'est l'entreprise britannique Johnson Matthey qui semble la plus avancée dans cette voie.

Au démarrage, le réacteur est alimenté en carburant et en air (fonctionnement en oxydation partielle). Lorsque la température est suffisamment élevée, un mélange eau, méthanol et air est introduit dans le réacteur et permet un fonctionnement autotherme. Dans les zones endothermiques (vaporeformage), la chaleur additionnelle peut être fournie par combustion de l'hydrogène résiduel non converti dans la pile et par un éventuel appoint en carburant.

Comme le note le rapport précité de l'I.F.P., « ce réacteur est tout à fait original [...] [dans la mesure où] les réactions endothermiques et exothermiques ont lieu sur les mêmes particules de catalyseurs, ce qui entraîne des transferts de chaleur sur des distances très courtes (microscopiques) [...] ».

On obtient ainsi, quelque soit le procédé choisi, un mélange gazeux à base de monoxyde de carbone et d'hydrogène dont il est nécessaire d'éliminer le monoxyde de carbone et les impuretés.

– La réaction du monoxyde de carbone et de l'eau

Il s'agit là de faire réagir le monoxyde de carbone et l'eau pour obtenir de l'hydrogène supplémentaire.

C'est une réaction exothermique qui s'effectue généralement en deux étapes successives : d'abord à haute température (340 à 450°C) puis à basse température (200 à 250°C).

– La purification de l'hydrogène

Il est indispensable de purifier le mélange dans la mesure où il contient encore du monoxyde de carbone qui constitue un poison pour le platine employé dans les piles.

Trois méthodes peuvent être ici utilisées : la méthanation, l'oxydation sélective, l'adsorption, l'utilisation de membranes en alliage de palladium.

• La méthanation

Cette méthode utilise trois moles d'hydrogène pour chaque mole de monoxyde de carbone éliminé. Elle produit du méthane et de l'eau. Elle est couramment employée dans l'industrie mais n'apparaît pas comme devant être utilisée dans les véhicules.

Cette réaction est en effet difficile à contrôler en présence d'un excès de dioxyde de carbone qui requiert une unité de décarbonatation en amont de la purification, ce qui est peu compatible avec la nécessité d'une installation compacte.



- L'oxydation sélective

Différents catalyseurs sont connus pour leurs propriétés d'oxydation sélective du monoxyde de carbone en présence d'hydrogène. Leur utilisation nécessite par contre un contrôle précis de la température compte tenu de leur sensibilité thermique.

- L'adsorption

Cette méthode est basée sur le principe d'adsorption des impuretés sur des lits de tamis moléculaires. L'opération a lieu à température ambiante dans le cas du vaporeformage à une pression de 20 ou 25 bars. Mais il est nécessaire d'employer des compresseurs supplémentaires, ce qui est pénalisant d'un point de vue encombrement.

- L'utilisation de membranes en alliage de palladium

Le palladium et ses alliages sont très efficaces pour isoler l'hydrogène des autres espèces chimiques. Mais les procédés à membranes nécessitent des pressions (10 – 20 bars) et des températures relativement élevées (300-400°C). Il est nécessaire d'utiliser des compresseurs et un système de chauffage, ce qui réduit naturellement le rendement énergétique de l'ensemble.

La technologie des reformeurs est donc une opération compliquée. Le reformeur est en réalité une usine chimique à part entière. Si l'utilisation d'un reformeur ne pose pas de problème dans une raffinerie de pétrole, il n'en est évidemment pas de même si on doit l'installer sur un châssis d'automobile.

Aussi de nombreux travaux de recherche sont-ils consacrés à la possibilité de le miniaturiser comme vient de le faire le laboratoire d'Argonne.

Une direction de recherche est d'essayer de se passer de ce reformeur.

Il est alors nécessaire de pouvoir réaliser la conversion électrochimique directe du combustible.

#### B - La pile à combustible direct

Comme l'indique M. Michel Prigent dans le rapport sur les piles à combustible de l'Institut français du pétrole de janvier 1999, « à part l'hydrogène il existe très peu de combustibles présentant une vitesse d'oxydation anodique suffisante dans la plupart des piles à combustible fonctionnant à base ou à moyenne température ». Il cite comme exemples l'hydrazine, l'ammoniac, le méthanol et le glycol. Ceux-ci sont assez difficiles à employer compte tenu de leur toxicité.

Le méthanol fait cependant l'objet d'un certain nombre de recherches car c'est le seul qui soit suffisamment réactif pour justifier des recherches approfondies.

Dans ce cas, le combustible est un mélange d'eau et de méthanol qui est consommé directement par la pile par oxydation directe à l'anode, sans transformation en hydrogène. L'oxygène de l'air est l'oxydant. C'est le seul système de pile à combustible à faible température fonctionnant sans utilisation d'hydrogène.

C'est un type de pile à combustible relativement nouveau.

L'électrolyte de ce type de pile est acide, et non pas alcalin, afin que le gaz carbonique produit par la combustion totale du méthanol puisse se dégager.

La température de fonctionnement est de 60°C afin d'éviter une pression de vapeur trop élevée, la température d'ébullition du méthanol étant de 65°C à la pression atmosphérique.

Dans ce milieu acide, les seuls électrocatalyseurs capables d'oxyder le méthanol qui soient suffisamment actifs et stables sont constitués d'alliages métalliques à base de platine. Un grand nombre de systèmes bimétalliques sont envisagés pour accroître de manière importante l'activité électrocatalytique comme par exemple des couples platine-ruthénium ou platine-étain.

Les performances de ce type de pile sont intéressantes. Mais elles restent tout de même très faibles, notamment en termes de densité de puissance maximum, à cause de la réactivité du méthanol, plus faible que celle de l'hydrogène. Les électrodes doivent environ être 10 à 20 fois plus chargées en métaux précieux, ceci constituant bien entendu un obstacle dirimant dans la perspective de la commercialisation.

Les recherches portent donc sur le mécanisme de catalyse à l'anode pour remplacer les catalyseurs à base de métaux précieux.

Il semblerait que l'acide et l'aldéhyde formiques jouent un grand rôle dans ce processus. Des études théoriques ont en effet permis de relier l'activité catalytique et la tolérance au monoxyde de carbone à la structure électronique du platine pur ou de ses alliages avec des métaux de transition comme le fer, le nickel, le cobalt ou le molybdène.

Comme le signale M. Michel Prigent dans le rapport précité, «une autre difficulté réside dans la grande solubilité du méthanol dans les électrolytes utilisés y compris dans les membranes perfluorées, et son transfert vers la cathode».

Le méthanol diffuse donc vers la cathode par un phénomène dit de «*cross over*». Il s'oxyde à cet endroit en dioxyde de carbone et eau sans production d'énergie. Il y a donc là une perte de combustible estimée à 10%. Pour obvier à ce phénomène on alimente maintenant l'anode non pas avec du méthanol pur mais avec une solution aqueuse diluée contenant environ 3% d'alcool.

Mais il semble qu'aucune des membranes actuellement commercialisées n'est réellement satisfaisante de ce point de vue.

Un récent rapport de notre attaché scientifique à Tokyo a donné quelques informations sur des essais de fabrication, au Japon, de membranes composites.

Ces essais s'orientent d'abord vers des compositions de zéolithe et de polymère styrène/butadiène plus étanches au méthanol et possédant une conductivité ionique convenable et une bonne tenue mécanique.

Une autre voie est la greffe d'ions sulfonates à un polymère d'hydrocarbure partiellement fluoré. Cela fournit une excellente conductivité ionique et une moins grande perméabilité au méthanol mais, par contre, des caractéristiques intensité/potentiel moins bonnes que celles du *Nafion*.

Enfin se pose le problème des effluents de ce type de pile. Ils nécessitent une épuration des gaz d'échappement par traitement post catalytique avant leur rejet à l'atmosphère. Dans les nouvelles piles alimentées par une solution aqueuse de méthanol, le gaz carbonique des effluents est lavé par de l'eau prélevée en condensant celle qui se trouve dans l'oxygène ou l'air en sortie de pile.

On voit que ce type de pile pose un certain nombre de problèmes techniques dont on ne possède pas, à l'heure actuelle, les solutions.

Cependant c'est ce type d'alimentation qui est retenu afin de parvenir à miniaturiser les piles à combustible.

#### C – La miniaturisation des piles à combustible

Notre époque est caractérisée par la considérable croissance du nombre et de la variété des appareils portables nécessitant de l'énergie électrique. C'est naturellement le cas des téléphones cellulaires, des ordinateurs portables, des assistants de poche... mais aussi des jeux de poche, des appareils personnels de contrôle de la santé, de diverses télécommandes.

La conséquence de la multiplication de ces appareils est la croissance de la demande d'énergie. Celle-ci est considérable : on a ainsi calculé que les ordinateurs et des téléphones portables vendus en 2000 requéraient une énergie totale de 2,5 Gw/h.

L'énergie électrique de ces appareils est actuellement fournie par des accumulateurs, des batteries.

Il y a trente ans, seule la technologie nickel-cadmium était disponible pour l'alimentation des systèmes électroniques. Au cours de la dernière décennie trois nouvelles technologies sont apparues : nickel métal hydrures, lithium ion et lithium polymère. Nous évoquerons plus loin les perspectives de possibilités de développement de ces technologies.

Les attentes des utilisateurs d'appareils électroniques portables portent sur l'augmentation de l'autonomie, la miniaturisation des systèmes, la puissance délivrée, la réduction du temps de charge, la facilité de remplacement et, enfin, le prix. La demande porte de façon principale sur l'autonomie pour répondre à ce qu'on nomme aux Etats-Unis, la « *battery anxiety* », l'angoisse de se trouver à court d'énergie en plein milieu d'une conversation téléphonique ou en cours de travail sur un ordinateur portable. Le prix n'est pas alors considéré comme un problème important.

L'intérêt des piles à combustible est donc tout à fait évident sur ces marchés.

En effet elles sont capables d'avoir des densités d'énergie de 3 à 5 fois plus élevées que les accumulateurs, ce qui permettrait à un téléphone portable d'avoir une autonomie de plus de trente jours en veille et de plus de vingt heures de communications pour un encombrement identique à celui que nous connaissons aujourd'hui.

Il faut aussi prévoir que ces appareils portables devront disposer de plus en plus d'énergie compte tenu des innombrables fonctions nouvelles qui y seront installées. La consommation des téléphones portables est aujourd'hui d'environ 2,5 w/h, elle devrait être multipliée par deux et atteindre 5 w/h pour pouvoir, notamment, recevoir des images.

Les piles à combustible n'ont enfin pas besoin d'être rechargées mais simplement réalimentées en combustible, ce qui peut se faire en un laps de temps très court, de l'ordre de quelques secondes, si l'on doit seulement ajuster une capsule de carburant.

Mais la réalisation de ces micro piles à combustible ne s'avère pas être une tâche facile. Il faut en effet parvenir à réduire à l'échelle une technologie qui a été principalement élaborée pour la gamme du kilowatt.

Il faut donc effectuer une miniaturisation des technologies. Cela entraîne un certain nombre de difficultés car on retrouve, rendus encore plus ardues à résoudre, les problèmes de gestion de la chaleur et de l'eau ainsi que les questions de stockage et de circulation du combustible.

La réalisation d'une micro pile peut emprunter deux voies : soit réduire de façon homothétique l'architecture d'une pile classique, soit adopter une conception différente.

La première voie est celle choisie par un certain nombre de fabricants comme Ballard et H Power. Il semble que cette direction devrait rencontrer assez rapidement des limites.

L'autre axe est l'adoption d'une architecture différente de la technique classique d'empilage avec la réalisation d'électrodes en mode plan.

C'est le choix du C.E.A. Cet organisme a en effet décidé de développer sur fonds propres un programme « micro piles à combustible ». A cette fin, le nombre des personnels qui y ont été affectés est passé de trois en septembre 2000 à actuellement dix. Ce projet vise à utiliser les importantes capacités internes de cet organisme en matière de micro électronique développées au sein du L.E.T.I. qui vont être ainsi réunies aux compétences en électrochimie.

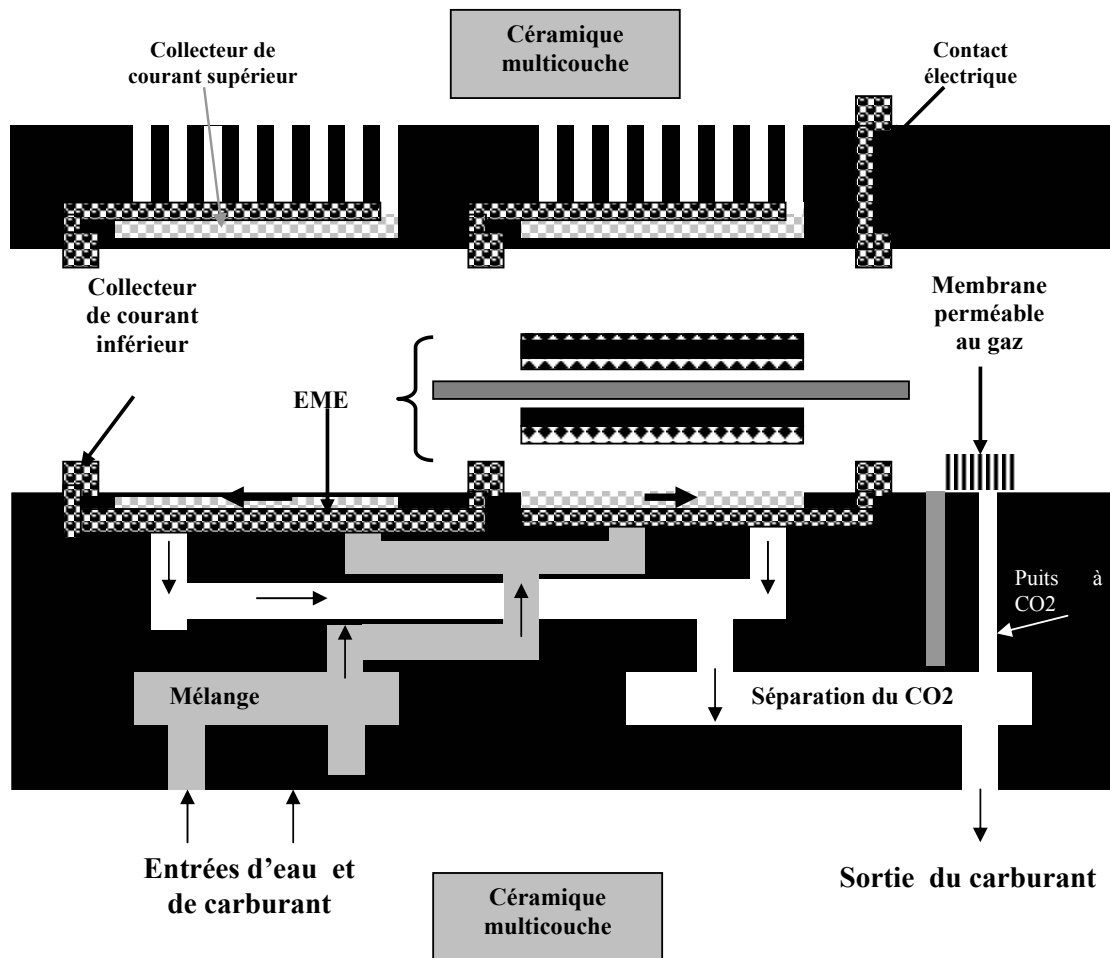
De très nombreux projets réunissant ainsi électrochimie et micro électronique sont actuellement en cours de développement dans le monde, les Etats-Unis étant particulièrement actifs dans ce domaine.

Parmi ceux-ci on peut noter la réalisation d'une pile d'un volume de 5 mm<sup>3</sup> par la Case Western University aux Etats-Unis qui fonctionne pour l'instant à l'hydrogène ainsi que les travaux de Bell Laboratories (Lucent), de Sandia National Laboratory, de l'Université du Minnesota, d'Energy Related Devices...

Les entreprises engagées dans ces travaux restent plutôt discrètes. Seule la firme Motorola a donné quelques informations sur son activité.

Chez Motorola qui travaille en collaboration sur ce thème avec le Los Alamos National Laboratory, le choix a été fait de travailler à la réduction à l'échelle d'une pile. Motorola travaille sur les aspects autres que la membrane de la pile qui est du ressort de son partenaire, et, notamment, sur l'intégration et la miniaturisation de l'environnement du cœur de la pile.

Ces recherches ont abouti à la réalisation d'un module de pile se présentant sous la forme d'un carré d'environ 3 cm de côté et d'environ 1 cm d'épaisseur. Le schéma suivant, élaboré d'après un document de Motorola, montre la coupe d'un module de pile :



*Note* : EME : Ensemble membrane-électrolyte

Il s'agit là d'une réalisation tout à fait remarquable.

On imagine la complexité du travail nécessaire pour l'élaboration, à l'intérieur des épaisseurs des couches céramiques, des canaux de distribution des gaz et du carburant. A n'en pas douter la maîtrise des techniques de miniaturisation sera une compétence clé de la mise au point de ces micro piles.

Il est possible d'empiler et de connecter électriquement ces modules de base afin d'obtenir la puissance électrique souhaitée.

Quatre modules peuvent fournir une puissance d'environ 100 à 120 milliwatts soit environ cinq fois la densité d'énergie d'un accumulateur conventionnel de technologie lithium-ions.

La technologie céramique choisie simplifie les interconnexions des modules. Les modules de base sont disposés dans un plan horizontal plutôt que vertical, comme pour les autres modèles de piles à combustible. Cette construction simplifie la conception du système « pile à combustible » et dispense de doter celui-ci d'un système de refroidissement par ventilateur ou pompe dans la mesure où toutes les cellules sont en contact direct avec l'air ambiant.

Cependant des auxiliaires extérieurs au système restent nécessaires. Des micro pompes doivent notamment être utilisées pour l'alimentation du système de la pile en solution aqueuse de méthanol à 3 – 5%. Ces micro pompes peuvent fournir ce carburant selon des quantités pouvant varier entre 5 et 100 µl/minute. Il faut également ajouter le convertisseur de courant et la batterie.

Ce type de micro pile est d'ores et déjà fonctionnelle et est capable de faire fonctionner des appareils comme des agendas électroniques de poche.

Leur taille rend aussi possible leur utilisation sur des téléphones portables. Pour ce type d'appareil, la micro pile pourrait être intégrée directement dans le combiné. Elle pourrait l'être également dans un boîtier portable pouvant être porté en bandoulière (*holster*) ou à la ceinture sur lequel s'accroche le combiné quand il n'est pas utilisé et sur lequel il se recharge. C'est le projet de Manhattan Scientific, Inc.

L'alimentation de ces micro piles serait faite par le simple changement d'une capsule contenant du méthanol comme on change la cartouche d'encre d'un stylo plume. Il serait possible d'acquérir ces capsules par exemple auprès des débitants de tabac. Cette perspective est naturellement très séduisante du fait de son extrême simplicité et de la rapidité de la recharge en énergie des différents appareils portables.

Il est évident que la possibilité de produire en masse ces micro piles rendraient quasi instantanément obsolètes les piles actuellement utilisées. Par contre un problème pourrait peut-être se faire jour en matière de transport aérien dans la mesure où la réglementation actuelle interdit de transporter par avion des liquides inflammables.

C'est néanmoins encore un prototype de laboratoire mais les responsables de Motorola estiment que la commercialisation pourrait intervenir dans les cinq ans.

Motorola semble avoir acquis une remarquable maîtrise de la miniaturisation des systèmes nécessaires au fonctionnement des micro piles. Ainsi outre les micro pompes déjà citées, cette firme a également mis au point un micro reformeur de méthanol.

Motorola souhaite demeurer dans ses domaines d'excellence traditionnelle c'est-à-dire la miniaturisation en développant ses compétences en matière de travail de la céramique.

La politique de cette firme montre qu'il est possible d'être présent dans ce domaine de la pile à combustible tout en se consacrant seulement à une seule partie de cet ensemble, mais une partie-clé.

Le système « pile à combustible » requiert encore suffisamment d'innovations pour que des entreprises puissent trouver un domaine d'intervention. Il est néanmoins nécessaire de trouver un ensemblier, un chef d'orchestre, qui intègre l'ensemble des compétences de façon rationnelle.

Outre la miniaturisation, un certain nombre d'autres problèmes se posent quant au fonctionnement de ces piles.

#### D – Le fonctionnement d'un système générateur à pile à combustible

Le fonctionnement d'une pile à combustible est susceptible d'être affecté d'un certain nombre de difficultés.

Dans ce paragraphe nous nous proposons d'évoquer les problèmes de fonctionnement propres au système générateur à pile à combustible complet et, parmi ceux-ci, le rendement, la fiabilité et la durabilité d'une pile à combustible.

##### a – Le rendement d'une pile à combustible

Comme on le sait le fonctionnement des moteurs à combustion comme celui de toutes les machines thermiques en général, est régi par les deux lois de la thermodynamique. Celle-ci enseignent que, même dans des conditions idéales, seulement une fraction de la quantité d'énergie fournie par le combustible peut être transformée en travail, le reste devant être cédé à la source froide.

La conversion électrochimique n'obéit pas quant à elle à ces contraignantes lois de Carnot. Elle obéit à d'autres lois conduisant à des rendements supérieurs.

Nous nous appuyerons pour ce paragraphe très technique sur le rapport élaboré par M. Michel Prigent à l'Institut français du pétrole et publié en 1999 sous le titre « Les piles à combustible, état du développement et des recherches en cours à l'aube de l'an 2000 ».

Selon cet auteur, le rendement énergétique d'une pile à combustible peut se définir comme le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie thermique qui serait libérée par la réaction chimique effectuée.

Le rendement énergétique maximal est le rapport entre le travail maximal théorique fourni par une pile à combustible fonctionnant de manière réversible et la variation d'enthalpie, c'est-à-dire de la quantité totale de chaleur, au cours de la réaction.

M. Prigent estime ainsi que le rendement théorique maximum d'une pile hydrogène – oxygène à 25°C est de 83 ou 95% selon que l'eau est produite sous forme liquide ou gazeuse.

Le rendement électrique réel obtenu dépend du fait que la tension d'une pile en fonctionnement est toujours inférieure à sa tension maximale. Cette situation résulte notamment de l'irréversibilité des réactions (polarisation d'activation), des défauts d'alimentation en réactifs des électrodes (polarisation de concentration) et des résistances s'opposant au passage des charges électriques au sein de l'électrolyte et dans les électrodes (chute ohmique). Nous avons déjà fait allusion à ces difficultés notamment lors de l'examen du fonctionnement des électrodes.

Mais il ne s'agit pas là des seuls obstacles au rendement d'un système générateur d'électricité à pile à combustible.

En effet d'autres effets doivent être pris en compte pour déterminer le rendement réel d'une pile à combustible. Il s'agit essentiellement des problèmes liés au taux d'utilisation des réactifs et à la dépense d'énergie entraînée par leur conditionnement préalable.

Doivent donc être considérés : le rendement faradique, le rendement matière et le rendement système.

- Le rendement faradique

Il concerne le nombre d'électrons effectivement obtenu par quantité de combustible ou de comburant consommée. Il n'est pas toujours conforme aux prévisions théoriques. Par exemple on peut noter qu'à l'anode, avec l'hydrogène, on obtient en général deux électrons par mole consommée : le rendement faradique est alors de 1. Mais il n'en est pas de même avec le méthanol où on n'obtient pas de façon normale six électrons quand l'oxydation s'arrête au formaldéhyde (deux électrons par mole) ou à l'acide formique (quatre électrons par mole). De la même façon, concernant la réduction de l'oxygène, la formation d'eau oxygénée limite quelquefois le nombre d'électrons échangés à deux au lieu de quatre.

Le rendement faradique peut également être limité par des court-circuits électriques ou chimiques internes à la pile.

Le court-circuit électrique peut être dû à la coexistence d'un certain taux de conduction électronique en plus de la conduction ionique dans certains électrolytes solides.

Le court-circuit chimique est entraîné par le transfert d'une partie du combustible vers la cathode ou de l'oxygène vers l'anode. Cette situation peut se produire dans différentes situations. C'est le cas avec le méthanol dans les piles directes compte tenu de sa grande solubilité dans les électrolytes aqueux ou polymères ou avec l'hydrogène ou l'oxygène dans les piles à membranes.

- Le rendement matière

Celui-ci a plus particulièrement trait au taux réel d'utilisation des réactifs au niveau d'un bloc de pile.

Dans un bloc toutes les électrodes doivent être alimentées en gaz avec, de façon stricte, le même débit. De même la répartition des gaz, c'est-à-dire la pression partielle des réactifs en tout point de chacune d'elles, doit être identique. La conséquence du non respect de ces contraintes est que lorsqu'une seule électrode est insuffisamment alimentée dans un assemblage, ce sont les performances globales du bloc qui sont dégradées. Il est donc généralement indispensable en pratique d'alimenter les blocs avec un excès plus ou moins important de réactifs. Il devient alors souvent difficile d'atteindre un taux d'épuisement total en espèces actives dans les effluents. Cette situation doit être d'autant plus surveillée qu'il s'agit d'un combustible ou de ses dérivés qui sont toxiques. C'est le cas dans les piles à méthanol direct avec le méthanol imbrûlé ou le formaldéhyde. Un traitement catalytique des gaz d'échappement est alors nécessaire.

- Le rendement système

Celui-ci prend en compte l'énergie qu'il est en général nécessaire de consommer pour le préconditionnement des réactifs, leur compression, leur recyclage, l'extraction des calories, l'électronique de contrôle, etc. Tous ces systèmes consomment une part plus ou moins grande de l'énergie produite par la pile et entraînent une perte de rendement.

Toutes ces contraintes font que le rendement d'une pile à combustible donnée ne peut être déterminé qu'en fonction des caractéristiques du système complet.

Pour donner néanmoins une idée du rendement d'un tel système générateur on reprendra l'exemple donné par M. Michel Prigent dans son rapport pour une pile hydrogène – oxygène (air) :

- fonctionnant à 25 °C sous 0,7 volt en rejetant l'eau formée à l'état gazeux,
- avec un rendement faradique sur l'hydrogène égal à 1,
- ne consommant que 90% de l'hydrogène admis pour éviter l'accumulation d'un taux trop élevé d'impuretés dans la pile,
- ayant une autoconsommation de 20% de l'énergie produite pour l'alimentation des accessoires, compression de l'air principalement.

L'auteur détermine le rendement d'un tel système comme égal à 38,9%.

Nous donnerons les évaluations des rendements des autres types de piles dans la présentation de ceux-ci.

b – La fiabilité et la durabilité des piles à combustible



C'est un sujet très difficile à traiter à l'heure actuelle dans la mesure où les piles actuelles, à l'exception de celles utilisées dans le domaine spatial, ne sont encore que des appareils de laboratoire gérés et entretenus par des spécialistes.

La théorie voudrait qu'elles soient d'une grande fiabilité et durabilité dans la mesure où, notamment, leur cœur ne comprend pas de pièces mobiles. Il y en a par contre dans les nombreux auxiliaires tels que les pompes et les compresseurs. Des possibilités de pannes existent donc à ces niveaux mais celles-ci ne sont pas considérées comme graves dans la mesure où il sera toujours possible de changer l'appareil défaillant. Par exemple il faudrait certainement, au moins à titre préventif, remplacer les filtres et les pompes tous les ans.

Il est plus difficile par contre de se prononcer quant à la fiabilité du fonctionnement du cœur de pile dans la mesure où on ne dispose encore que de peu de recul dans ce domaine. Il semble de surcroît qu'il ne soit pas possible de faire vieillir en laboratoire de façon accélérée un tel cœur de pile, et donc de faire de telles études de fiabilité.

Le cœur d'une pile à combustible de type PEM devrait pouvoir fonctionner environ pendant 40 000 heures. Cette dernière durée représenterait en fait un objectif à atteindre dans cinq ans, la longévité actuelle étant plutôt de l'ordre de 20 000 à 30 000 heures.

Un certain nombre de nos interlocuteurs nous ont indiqué que la technique des piles à combustible de type P.E.M. était très fiable et avait certainement une espérance de vie très longue. On pourrait voir une preuve de cette fiabilité à long terme dans le fait que la N.A.S.A. a retenu cette énergie pour les futures stations spatiales fixes en demandant 100 000 heures de fonctionnement sans nécessité de réparation, soit environ dix ans.

Il nous semble évident qu'il sera nécessaire que les piles à combustible qui fourniraient l'énergie à des biens de grande consommation comme l'automobile ou les téléphones portables soient d'une grande fiabilité. On ne peut pas espérer en effet que les consommateurs plébiscitent une technologie qui leur offrirait, au moins techniquement, moins que ce dont ils peuvent disposer actuellement. On peut penser que les usagers de téléphones et d'ordinateurs portables auront le même point de vue.

Il faut sans doute effectuer une distinction entre les piles à combustible qui seront utilisées dans des appareils portables individuels ou des automobiles, essentiellement de type P.E.M. de faible puissance et celles, de type P.E.M. ou S.O.F.C. de moyenne ou de forte puissance, qui fonctionneront dans un environnement que l'on peut appeler industriel avec des possibilités d'intervention rapide de personnels spécialisés.

Les conditions de fonctionnement des unes et des autres peuvent être radicalement différentes.

Ainsi il n'y a pas de commune mesure entre la pile à combustible qui serait installée dans une automobile et soumise aux trépidations de la route, aux poussières, à l'eau, au froid, au chaud et aussi aux chocs et une autre installée dans la cave d'une maison à l'abri de tous ces désagréments.

Ainsi l'expérience a été faite à l'Institut des transports de l'Université de Davis d'installer une pile à combustible de type P.E.M. dans un de ces gigantesques camions américains qui effectuent des voyages transcontinentaux aux Etats-Unis.

Cette pile a été installée comme auxiliaire de puissance pour faire marcher le réfrigérateur, le congélateur, le récepteur de télévision... de bord suite à l'observation que, même à l'arrêt, les moteurs de ces camions devaient continuer à marcher pour alimenter ces divers appareils. Mais cette pile expérimentale n'a pas fonctionné à bord de ces camions à cause des trop fortes vibrations engendrées par le roulage.

La Chicago Transit Authority, compagnie de bus urbains de la ville de Chicago a expérimenté pendant environ deux ans trois bus à pile à combustible de type P.E.M.

La fiabilité de ces véhicules a été plutôt satisfaisante. Mais il s'est avéré nécessaire qu'entre trois et cinq techniciens s'occupent en permanence, et en exclusivité, de ces trois bus qui restaient des véhicules expérimentaux. Naturellement il ne serait pas envisageable qu'à partir du moment où ce type de véhicule se répandrait, une assistance technique d'une telle ampleur soit nécessaire.

Il nous semble que la fiabilité des piles à combustible ne soit pas encore vraiment démontrée à ce jour, pour ces usages.

Il convient donc de poursuivre et de multiplier les expériences qui, seules, permettront de trancher. Celles-ci sont nécessaires pour ne pas mettre sur le marché de façon précipitée un produit à la fiabilité incertaine. Cela risquerait de ruiner de façon durable les chances de cette technique. De ce point de vue, on ne peut être que dubitatif vis-à-vis des projets de certains constructeurs automobiles qui prévoient de commercialiser des véhicules à pile à combustible dès 2004.

Mais la fiabilité et la durabilité des piles à combustible ne sera pas le seul argument. Le problème du prix de revient ou du coût pour les utilisateurs sera naturellement primordial. Cette dimension ne pourra d'autant moins être éludée que cette technique arrive sur des marchés très concurrentiels.

E – Quel prix pour les piles à combustible ?

Il est encore difficile de répondre à cette question compte tenu du caractère encore très largement expérimental des piles à combustible.

On n'a en fait à l'heure actuelle qu'une notion tout à fait succincte du prix de revient du kilowatt/heure produit par ces piles à combustible.

Les indications de prix de revient que nous avons pu recueillir ne sont pas très précises. Cela est compréhensible car les prix de revient dépendent du type d'installation, de sa puissance, de sa durée de fonctionnement espérée, du couplage ou non avec une installation de cogénération, etc.

Il n'est donc possible de donner que des ordres de grandeur et des estimations.

Le prix de revient en investissement pour une installation stationnaire serait de 500 \$ le kw/h. Ce chiffre semble faire l'objet d'un certain consensus. Il faut d'ailleurs le nuancer car c'est en réalité non pas le prix de revient actuel mais celui basé sur une construction en grande série. Un très net progrès a cependant été enregistré car le prix équivalent était de 5 000 \$ le kw/h il y a dix ans.

Les constructeurs automobiles souhaitent un prix de revient de 50 \$ le kilowatt pour une durée totale de fonctionnement de 4 000 heures. On mesure l'importance du chemin restant à faire pour atteindre ce niveau de prix sans qu'aucun délai soit d'ailleurs précisé.

Une indication du prix de revient actuel de véhicule à pile à combustible est donné par le coût des autobus à pile à combustible qui ont été exploités à Chicago. Le prix de chacun de ces trois autobus atteignait ainsi 1,4 million de dollars contre 260 000 dollars pour l'équivalent à moteur Diesel.

Concernant les piles à combustible de type P.E.M., trois domaines sont responsables des coûts élevés : les membranes, le platine et les plaques d'interconnexions.

#### a - Les membranes

Comme on l'a noté il y a encore un quasi monopole de la firme Du Pont et de sa membrane *Nafion* malgré les tentatives d'un certain nombre de constructeurs d'entrer sur ce marché crucial pour le développement des piles à combustible. Le coût de celle-ci est de l'ordre de 300 à 400 \$ le m<sup>2</sup>, soit environ 2 000 – 3 000 F le m<sup>2</sup>.

Pour une pile adaptée à la propulsion d'une automobile d'environ 30 kw et d'une puissance spécifique de 200 mW/cm<sup>2</sup>, il faut environ 15 m<sup>2</sup> de membrane. Il faut aussi tenir compte du fait qu'une partie de la membrane est située en périphérie, et donc inutilisée : il faut en réalité une surface d'environ 20 m<sup>2</sup>. Le prix total de la membrane utilisée est donc de l'ordre de 40 000 à 60 000 F.

Le niveau de 100 F par m<sup>2</sup> de membrane est souvent cité comme une des conditions du développement de ces piles à combustible. Il faut donc encore une considérable diminution du prix de revient. Pour atteindre cet objectif, de grands espoirs sont placés dans la grande série, l'optimisation des procédés de fabrication ainsi que dans la fabrication de membranes non fluorées.

#### b - Le platine

La charge moyenne en platine d'une pile de 30 kw étant d'environ 1 mg/cm<sup>2</sup>, il faut environ 200 g de ce matériau dans ce cas.

Les cours du platine fluctuent naturellement en fonction de la demande. Actuellement ce métal précieux est plutôt orienté à la hausse. Son prix se situe en ce moment aux alentours de 140 F le gramme. Pour le type de pile envisagé, il faudrait donc environ 28 000 F de platine.

Les débouchés pour ce métal précieux sont essentiellement la bijouterie mais les experts observent depuis quelque temps une tendance très nette à la hausse de ses cours.

Il semble qu'il y ait une anticipation sur le développement des piles à combustible, débouché que de plus en plus d'investisseurs semblent prendre au sérieux, notamment aux Etats-Unis. Les progrès en matière de réduction de l'emploi du platine ont été très importants mais ce poste risque de demeurer, au moins dans un avenir prévisible, un élément important du coût de revient des piles à combustible, au moins celle de type P.E.M.

#### c - Les plaques d'interconnexion

Ces pièces sont réalisées actuellement en graphite et on a déjà souligné que leur coût de revient était très important.

Mais il ne nous est pas possible d'indiquer un ordre de grandeur de prix. Il faudrait certainement pouvoir mettre au point une fabrication par moulage ou injection se prêtant bien à une industrialisation en continu et ne faisant pas appel au très onéreux graphite.

Ces indications de coût ne concernent que le cœur de la pile. Il faut tenir compte également du prix des auxiliaires qui représenteraient environ 30% de la valeur totale du système complet.

### **4 – Les autres types de piles à combustible**

Nous ferons la présentation des autres types de piles à combustible en donnant des indications sur leur mode de fonctionnement ainsi que sur les difficultés techniques rencontrées.

#### A – Les piles à électrolyte solide

Ce type de pile suscite un très grand intérêt actuellement compte tenu de ses performances actuelles et potentielles.

En effet, le haut niveau de température des rejets, de l'ordre de 800°C, autorise une valorisation très intéressante par l'addition en sortie de pile, d'un cycle combiné de cogénération.

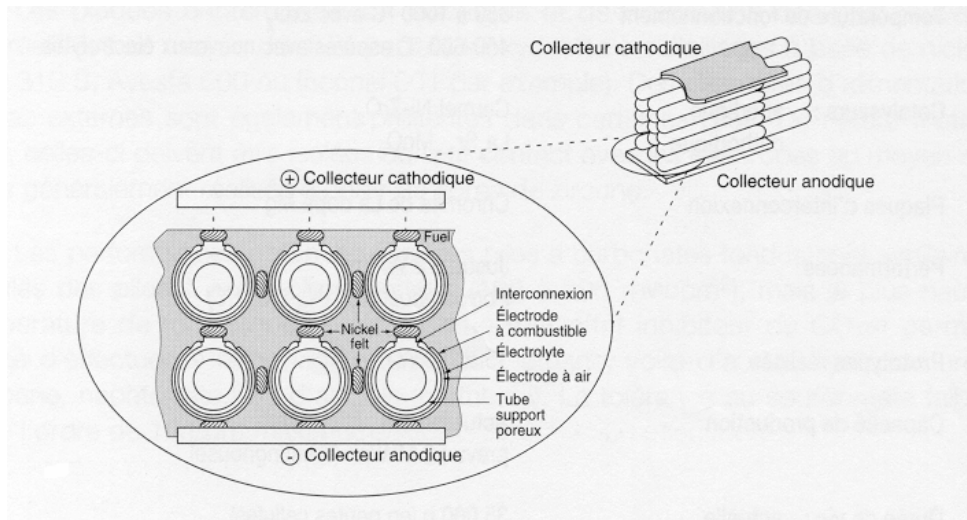
La pile elle-même a un rendement en électricité voisin de 50%. Si on la couple à une turbine à gaz avec un alternateur, le rendement de l'ensemble atteint 55 à 60% et 70% si l'on pressurise les gaz à l'entrée de la pile. Il est également possible d'utiliser les calories des gaz en sortie de pile pour cogénérer de la vapeur et de l'électricité. Le rendement global, thermique et électrique, peut être alors supérieur à 80%.

Ce type de pile fonctionne à une température très élevée, de l'ordre de 900 à 1 000 °C. Cela permet le reformage du carburant, par exemple le méthane, sous l'action de la vapeur d'eau à l'intérieur de la pile elle-même. Le rendement de cette opération de reformage est alors bien meilleur qu'avec un reformeur extérieur comme dans le cas des piles à combustible de type P.E.M.

Il existe deux technologies différentes pour ce type de pile : la technologie tubulaire et la technologie planaire.

#### - La technologie tubulaire

Celle-ci est développée par Westinghouse selon le schéma suivant extrait de l'ouvrage de M. Michel Prigent :



Il s'agit d'un empilement de tubes en zircon stabilisée au calcium d'une longueur de 1,5 m et de 22 mm de diamètre se connectant en batterie. Ils sont fermés à l'une de leurs extrémités.

Ces tubes sont recouverts de plusieurs couches successives : catalyseur cathodique, électrolyte en zircon stabilisée à l'yttrium, métal rare utilisé en petites quantités dans des alliages avec d'autres métaux pour accroître leur résistance à l'oxydation aux hautes températures, puis catalyseur anodique.

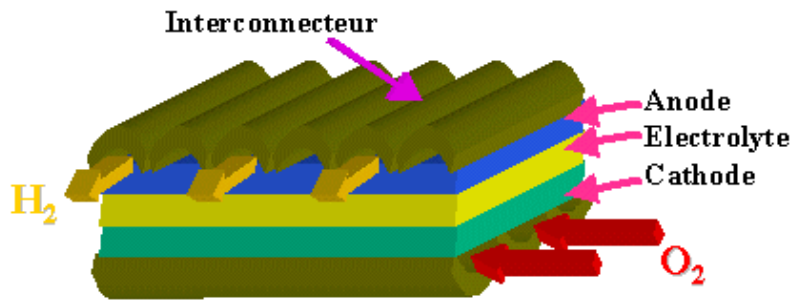
Dans cette technologie, le courant ionique ( $O^{2-}$ ) s'établit de l'intérieur du tube où circule l'air vers la périphérie, le carburant, hydrogène ou méthane, étant à l'extérieur.

#### - La technologie planaire

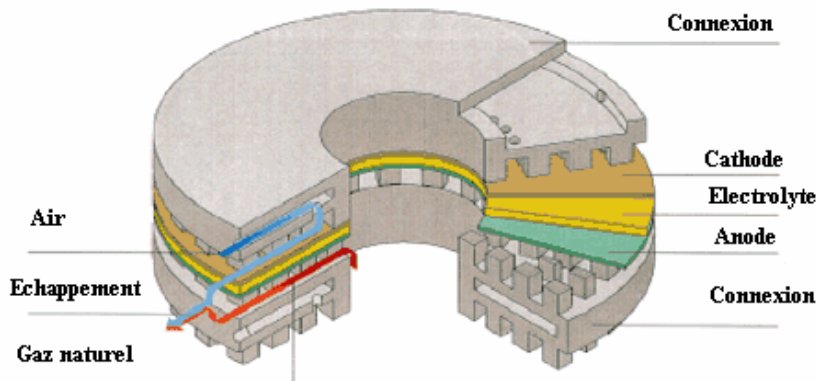
La technologie planaire est plus récente et est développée par Siemens et Sulzer. Elle consiste en un sandwich de plaques céramiques reliées par l'interconnecteur séparant le combustible du comburant.

Deux variantes existent :

- la technologie « *cross flow* » où le combustible et le comburant circulent de façon perpendiculaire comme le montre le schéma ci-après extrait du site Internet personnel de M. Nicolas Audinot :



• La technologie « *counter flow* » avec une circulation du carburant et du comburant à contre sens comme illustré dans le schéma suivant extrait du site Internet de la firme Sulzer :



C'est en fait une conception planaire mais le cœur est circulaire et évidé en son centre par lequel arrive le combustible, du gaz naturel. Le comburant, l'air, arrive par l'extérieur du tube. Les gaz sont distribués aux électrodes par les canaux de l'interconnecteur.

Les principales difficultés de fonctionnement des piles de type S.O.F.C. proviennent de leur haute température de fonctionnement. En effet il se pose alors des problèmes de coût des interconnecteurs et de tenue chimique et mécanique des matériaux en température.

La tenue mécanique du cœur est rendue très difficile par les différences entre les coefficients de dilatation des matériaux, situation accentuée par la température.

Une solution serait de diminuer la température de fonctionnement de ce type de pile. Il faudrait pouvoir descendre aux alentours de 600 ou de 800°C, et même à un niveau de 450 – 600°C avec de nouveaux

électrolytes, ce qui permettrait par exemple d'utiliser des aciers inoxydables pour la fabrication des interconnecteurs.

C'est naturellement à la résolution de ce problème que s'attachent de nombreuses équipes de recherches dans le monde et notamment les firmes Allied Signal, Ceramtec et Westinghouse aux Etats-Unis, Sulzer et Siemens en Europe, CFCL en Australie. Siemens a racheté Westinghouse et est devenu ainsi le chef de file au niveau mondial dans ce type de pile.

La durée de vie d'une pile S.O.F.C. est actuellement de l'ordre de 35 000 heures, l'objectif étant d'atteindre aux environs de 2005 une durée de vie de l'ordre de 40 000 à 50 000 heures. Les prix de revient sont encore très importants : de l'ordre de 3 000 à 3 600 \$, soit environ entre 21 000 et 25 000 F, le kilowatt, pour une pile stationnaire. Un objectif envisageable serait d'arriver à un prix de 1 000 \$, environ 7 000 F, le kilowatt.

Les piles S.O.F.C. sont prévues pour des gammes de puissance commençant à 1 MW et pouvant dépasser 100 MW en génération stationnaire.

Malgré ces ordres de puissance, la firme B.M.W. a annoncé qu'en partenariat avec la société d'équipement automobile Delphi, elle étudiait la mise au point d'une pile S.O.F.C. d'une puissance de 5 kw fonctionnant à 800°C. Cette pile est destinée à équiper des automobiles dont le moteur s'arrêterait automatiquement dès que le roulage cesserait. C'est la nécessité d'alimenter pendant ces moments des auxiliaires comme, par exemple, la climatisation, qui a entraîné l'étude de cette pile qui fonctionnerait sans interruption. Renault a décidé de rejoindre ce programme.

Le choix d'installer une pile de type S.O.F.C. sur une automobile peut sembler étonnant compte tenu des contraintes de températures. Néanmoins il convient de suivre avec intérêt cette étude et notamment voir si elle sera réellement installée à terme sur une automobile vendue normalement.

Ce type de démarche paraît très intéressant car c'est une approche progressive de la commercialisation d'une pile à combustible. Cela n'implique en effet aucun bouleversement à court terme du marché de l'équipement électrique des automobiles. Le public pourrait ainsi se familiariser progressivement avec cette technique.

La miniaturisation de ce type de pile est aussi envisagée.

On notera la réalisation par le Lawrence Livermore National Laboratory américain d'une micro pile de technologie S.O.F.C. appelée *Thin Film Solid Oxide fuel cell*. Ce laboratoire a étudié plusieurs méthodes de dépôt, dont une technique dérivée de dépôt colloïdal, pour réaliser des couches d'électrolyte de zircon - yttrium d'épaisseur inférieure à 10 µm, réduisant ainsi la température de fonctionnement de la pile de 900°C à moins de 300°C.

## B – Les piles alcalines

Comme on l'a vu les piles alcalines sont utilisées comme générateurs d'électricité à bord des véhicules spatiaux et dans les sous-marins.

Elles utilisent un électrolyte liquide constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium circulant entre l'hydrogène et l'oxygène ou l'air. Elles fonctionnent à une température d'environ 70°C à la pression atmosphérique ambiante.

Les catalyseurs employés dans ce type de pile ne nécessitent pas de métaux précieux. On utilise un alliage à base de nickel (nickel de Raney ou borure de nickel) pour l'anode et de charbon actif, seul ou argenté, pour la cathode.

Un inconvénient majeur de la pile alcaline est la sensibilité de l'hydroxyde de potassium au dioxyde de carbone. Il est donc nécessaire d'utiliser de l'hydrogène très pur lorsque celui-ci est obtenu par vaporeformage d'un combustible hydrocarboné. Il faut aussi éliminer ce dioxyde de carbone de l'air fourni à la cathode afin d'éviter la carbonatation de la potasse.

L'entreprise ZeTek Power Corporation a mis au point un procédé pour éliminer le CO<sub>2</sub>. Il s'agit d'une fibre en composite de carbone dont la surface absorbe ce CO<sub>2</sub> par accumulation sélective du gaz avant qu'il ne pénètre dans la pile. Ce dispositif peut aussi être employé pour éliminer le CO<sub>2</sub> de l'hydrogène obtenu par reformage du gaz naturel. Mais c'est encore une recherche en cours de développement.

Les plaques d'interconnexion de ce type de pile sont en nickel ou en acier inoxydable. Des recherches sont en cours chez ZeTek Power Corporation pour arriver à produire ces plaques de façon peu coûteuse.

Les piles alcalines semblent tout à fait convenables pour des applications exigeantes et coûteuses mais pas pour des applications de masse malgré les possibilités d'améliorations marginales.

Aujourd'hui seule l'entreprise ZeTek Power Corporation semble poursuivre des recherches sur ces piles alcalines. Elle a pris la suite de l'entreprise belge Elenco qui avait été fondée pour la mise au point de la pile du projet de navette spatiale européenne Hermès.

Cette entreprise a construit des prototypes d'automobiles, de petits bateaux et de camionnettes équipés d'une pile alcaline. Elle est même en train de construire à Cologne et dans l'Etat du Tennessee, aux Etats-Unis, deux installations de production de cœurs et de générateurs.

#### C – Les piles à carbonates fondus

Ces piles utilisent un électrolyte constitué par un mélange de carbonates de lithium et de potassium, ces carbonates fondus étant maintenus dans une matrice poreuse à base d'alumine. Leur température de fonctionnement se situe entre 600 et 700°C, les ions carbonates assurant le transfert électronique.

Les électrodes sont du type poreuses à gaz. Elles sont constituées de nickel fritté. A l'anode, le nickel est sous forme réduite et généralement mélangé avec du chrome. A la cathode, le nickel est sous forme oxydée et mélangé avec des ions lithium. Ces électrodes ne requièrent pas la présence de métaux précieux.

Les plaques d'interconnexion électrique et de distribution des gaz peuvent être réalisées avec divers aciers inoxydables ou d'alliages à base de nickel.

Les difficultés majeures de ce type de pile sont d'ordre technologique. En effet fonctionnant dans un milieu très corrosif à température assez élevée, on rencontre des problèmes de corrosion de l'oxyde de nickel par l'électrolyte. Des métaux plus résistants sont recherchés pour remplacer cet oxyde de nickel. Il se pose également des problèmes d'étanchéité des cellules sur ce type de pile.

Par contre un des avantages de la haute température se rencontre également ici : le combustible peut être directement reformé sur l'anode.

De nombreux prototypes de quelques dizaines de kilowatts à 2 MW ont été construits et sont expérimentés depuis plusieurs années.

Le Japon a beaucoup investi dans ce type de pile mais les fonds engagés dans cette filière par ce pays sont en diminution.

Un certain nombre de piles de ce type sont installées de par le monde : une installation de 280 kW en République fédérale d'Allemagne, deux unités de 2 MW en Californie utilisées pour assurer le chauffage de pavillons, une unité de 1MW au Japon...

Compte tenu de leurs caractéristiques on estime quelquefois que les piles à carbonates fondus pourraient entrer en concurrence avec les piles de type S.O.F.C. pour des applications stationnaires.

#### D – Les piles à acide phosphorique

L'électrolyte de ce type de pile est de l'acide phosphorique et la température de fonctionnement se situe entre 180°C et 210°C. L'évaporation de l'électrolyte ainsi que la corrosion du carbone et du platine dans le milieu très agressif de fonctionnement de ces piles



limitent les températures susceptibles d'être atteintes. On contrôle la chaleur au moyen d'un fluide : air, eau ou huile circulant dans des plaques de refroidissement intercalées entre les cellules.

Les électrodes sont constitués de films minces d'une épaisseur de quelques dizaines de microns élaborés à partir de charbon actif, la plupart du temps du noir d'acétylène, recouvert de platine. Du polytétrafluoroéthylène est utilisé comme liant. Les teneurs en platine sont de l'ordre de 0,1 mg/cm<sup>2</sup> à l'anode et de 0,5 mg/cm<sup>2</sup> à la cathode. Ces piles tolèrent la présence d'une faible quantité de monoxyde de carbone dans l'hydrogène.

L'interconnexion électrique et l'alimentation en gaz des électrodes est réalisée par des plaques nervurées d'épaisseur de l'ordre de 1,5 à 2 mm réalisées par moulage de fibres de carbone liées par une résine phénolique.

Un inconvénient des piles à acide phosphorique est que celui-ci se solidifie à 42°C en augmentant de volume. Il est donc nécessaire, en cas d'arrêt, de maintenir la pile à une température minimale de 45°C pour éviter l'endommagement des électrodes.

Ce type de pile semble posséder une grande fiabilité, le fonctionnement pendant 40 000 heures étant avéré. Par contre les développements potentiels de cette technologie ne sont pas considérés comme très importants.

Les piles de cette filière sont les seules qui soient actuellement commercialisées, notamment par la firme O.N.S.I., filiale de International Fuel Cell (I.F.C.) et de Toshiba. Celle-ci a installé dans le monde entier et notamment aux Etats-Unis et au Japon environ 200 exemplaires de ce type de pile.

C'est une pile O.N.S.I. qui a été installée à Chelles par E.D.F. et G.D.F., réunis dans un Groupement d'intérêt économique avec une participation de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (A.D.E.M.E.), dans le cadre d'une action de démonstration.

Cette pile consomme du gaz naturel fourni par le réseau urbain de Gaz de France. Elle fournit d'une part de la chaleur à une température allant jusqu'à 80°C et de l'électricité sous forme de courant triphasé de 400 V à 50 Hz. La puissance thermique maximale est de 200 kilowatts et puissance électrique de 200 kilowatts également. Le prix de revient du kilowatt produit est d'environ 25 000 F.

La chaleur et l'électricité produites par l'installation sont dirigées sur le réseau de chaleur et d'électricité de Chelles.

Cette pile qui demeure expérimentale, vise à permettre aux deux partenaires d'acquérir une expérience d'exploitation d'une pile à combustible, de faire connaître cette technologie en France et d'effectuer un certain nombre d'essais portant sur la qualité du courant à la sortie de la pile, le temps de réponse, le rendement, la disponibilité, le coût de maintenance, le coût d'exploitation...

Il est assez remarquable de constater que la grande majorité des commentateurs imputent aux seuls problèmes de coûts de revient la difficulté de la commercialisation des piles à combustible.

Le prix de revient ne constitue pas une explication suffisante.

Nous estimons qu'aucun de ces types de piles à combustible n'est encore véritablement techniquement au point. C'est là la raison fondamentale du fait qu'elles n'ont pas encore débouché sur la commercialisation.

Le principe de fonctionnement des piles à combustible est bien connu. Mais il reste sans doute encore bien du travail de recherche à effectuer.

On rappellera par exemple que les problèmes de gestion de la chaleur dans le cœur des piles de type P.E.M. ne semblent pas encore avoir reçu de réponses complètement satisfaisantes.

La gestion de l'eau ne semble pas non plus encore bien maîtrisée. C'est un problème important puisqu'une pile à combustible de 75 kilowatts qui peut être destinée à un usage automobile produit 7 litres d'eau aux 100 kilomètres, eau qu'il va falloir littéralement extraire du cœur de la pile qui est un système clos.

De même le fonctionnement des membranes n'est pas parfait eu égard aux problèmes de leur humidification. Dans les piles à méthanol direct nous avons aussi vu que la perméabilité des membranes au méthanol causait un certain nombre de difficultés.

Les plaques d'interconnexion posent aussi des problèmes de fabrication compte tenu de leur sophistication et des rôles importants qu'elles jouent dans le fonctionnement de la pile à combustible.

Les indispensables auxiliaires du cœur des piles semblent peu retenir l'attention des chercheurs. Ils sont visiblement un peu considérés comme constituant la partie non noble de la pile à combustible. Peu de ces auxiliaires semblent avoir été conçus spécialement pour le fonctionnement d'un système générateur à pile à combustible. C'est certainement une faiblesse importante.

Les mécanismes de contrôle commande ne semblent pas attirer non plus les recherches.

Les piles de type S.O.F.C. présentent d'importants problèmes de tenue des matériaux compte tenu des hautes températures de fonctionnement.

Deux voies s'offrent pour résoudre cette difficulté : soit réussir à élaborer des matériaux relativement peu coûteux adaptés à ces conditions de fonctionnement soit faire fonctionner ce type de pile à des températures plus basses. C'est apparemment cette dernière orientation qui semble avoir la préférence des chercheurs. Mais il ne semble pas que des progrès importants aient encore été accomplis dans ce domaine.

Les autres types de piles à combustible (alcaline, à carbonates fondus et à acide phosphorique) ne semblent pas avoir à l'heure actuelle, sauf percée technologique toujours possible, les potentialités reconnues des types P.E.M. et S.O.F.C.

On peut d'ailleurs de ce point de vue s'étonner que E.D.F. et G.D.F. aient choisi d'expérimenter à Chelles une pile à acide phosphorique.

Il faut noter cependant qu'E.D.F. et G.D.F. se sont de nouveau associés pour installer au début de l'année prochaine, à Forbach, une nouvelle pile expérimentale de 250 kilowatts, cette fois-ci une P.E.M. fabriquée par Ballard. Le choix de ce type de pile nous paraît plus judicieux car potentiellement plus porteur d'avenir.

Le problème des coûts se pose de façon très aiguë pour tous les types de piles.

La façon de le résoudre devra certainement faire appel à des solutions différentes. Ainsi on peut concevoir sans peine que la fabrication en très grandes séries pourra abaisser le prix de certains constituants. Ce sera certainement le cas par exemple pour les plaques d'interconnexion. Un certain nombre d'entreprises y travaillent.

Par contre on peut estimer que sur d'autres points la fabrication en série n'aura aucune influence sur une baisse du prix des piles à combustible. Il en est ainsi de la nécessité de la présence de platine sur les électrodes d'un certain nombre de types de piles. Là seul un effort de réduction de la quantité utilisée ou, mieux, son remplacement par d'autres matériaux meilleur marché pourra induire des diminutions de coûts.

Il nous semble qu'il y a encore à faire d'important efforts tant de recherche fondamentale que de recherche-développement.

## **5 – La politique de la recherche en matière de pile à combustible**

Un certain nombre de pays sont impliqués dans cette politique de la recherche en matière de pile à combustible. Il n'est pas toujours facile de savoir exactement quelles sont les activités dans ce domaine compte tenu de sa confidentialité. La concurrence semble également être très forte compte tenu des très importants enjeux commerciaux en cause.

Une typologie des pays peut être effectuée selon leur engagement dans ce domaine.

Une intense activité règne dans ce domaine en Amérique du Nord ainsi qu'au Japon. L'Europe par contre ne s'y engage que relativement peu.

### **A – Une intense activité en Amérique du Nord**

#### **a – Le Canada**

Ce pays s'est vraiment fortement engagé dans ce domaine. En effet le Canada peut être considéré comme un pays pionnier dans le secteur des piles à combustible, notamment grâce à la présence et à l'activité de l'entreprise Ballard en Colombie Britannique.

Le Canada doit affronter des conditions naturelles qui peuvent être très difficiles et qui isolent des communautés humaines une partie importante de l'année. Cette situation rend naturellement d'autant plus attractifs des systèmes générateurs d'énergie autonomes. Compte tenu de la fragilité de ses écosystèmes, le caractère pas ou peu polluant des piles à combustible présente un certain nombre d'avantages.

La caractéristique principale est que dans ce domaine, le gouvernement fédéral, les gouvernements provinciaux, les universités et l'industrie, petites et grandes entreprises, y travaillent en partenariat.

Pratiquement tous les domaines relatifs de la pile à combustible sont abordés. Sont également explorés les domaines connexes et essentiels pour le succès de cette technique : production et stockage d'hydrogène, mise en place de réseaux de distribution du combustible, intégration de la pile à combustible elle-même dans son environnement.

Toutes les applications possibles sont étudiées au Canada : automobiles, cogénération, production stationnaire ou portative d'électricité...

- **L'action des pouvoirs publics**

Le gouvernement fédéral canadien a lancé il y a moins d'un an « l'Initiative nationale de recherche et d'innovation » dans le domaine des piles à combustible.

Dotée de 30 millions de dollars canadiens, cette « Initiative » comprend plusieurs volets :

- un programme de recherches, de démonstration et d'application de technologies appuyé par le Centre national de recherches Canada (C.N.R.C.), Ressources Naturelles Canada (RNCan) et le Fonds d'action contre le changement climatique,

- la création d'un Fonds de recherches universitaires ciblées pour mettre en valeur les travaux menés par le C.N.R.C. et le Conseil de recherches en sciences naturelles et génie (C.R.S.N.G.),

- la mise en place du Centre canadien de recherches sur les piles à combustible au sein du Centre national de recherches Canada.

La création ce dernier Centre semble particulièrement remarquable puisqu'il permettra d'offrir une vitrine aux technologies canadiennes. Il servira également pour favoriser les échanges et les partenariats entre les chercheurs publics des organismes de recherche publique, ceux de l'industrie et l'Université. Il offrira aussi des installations de recherche de pointe sur ce thème ainsi que des possibilités d'information et d'apprentissage.

L'organisation de ce Centre répond à la nécessité d'apporter un support à l'innovation industrielle qui requiert, notamment pour des petites entreprises de haute technologie :

- l'accès à des services de haute qualité pour les tests, démonstrations et assistance technique,
- l'accès à l'expertise en recherche et développement des universités et des laboratoires publics,
- l'information sur la technologie, l'industrie et le marché,
- l'accès à du personnel ayant les compétences techniques et scientifiques.

Cette analyse des besoins des petites entreprises innovantes n'est bien sûr pas propre au secteur des piles à combustible mais nous semble très pertinente. En effet elle permet à ce type de petite entreprise de disposer de l'indispensable soutien logistique pour développer ses idées.

Le gouvernement fédéral canadien ne se contente pas de ce soutien mais apporte par diverses autres voies environ 70 millions de dollars canadiens supplémentaires en aides à la recherche sur les piles à combustible.

Un grand nombre d'universités travaillent sur les piles à combustible au sens large. On peut mentionner ici les universités de Toronto, de Victoria et de Sherbrooke, l'Université Laval, l'Université Simon Fraser ...

Les gouvernements provinciaux ne sont pas en reste.

Ainsi les pouvoirs publics de Colombie Britannique ont-ils investi dans cette recherche 21 millions de dollars canadiens. Le Québec a lui aussi financé de nombreux projets de piles à combustible avec Ressources Naturelles Canada. Le gouvernement de l'Ontario s'est aussi lancé dans le soutien à cette recherche.

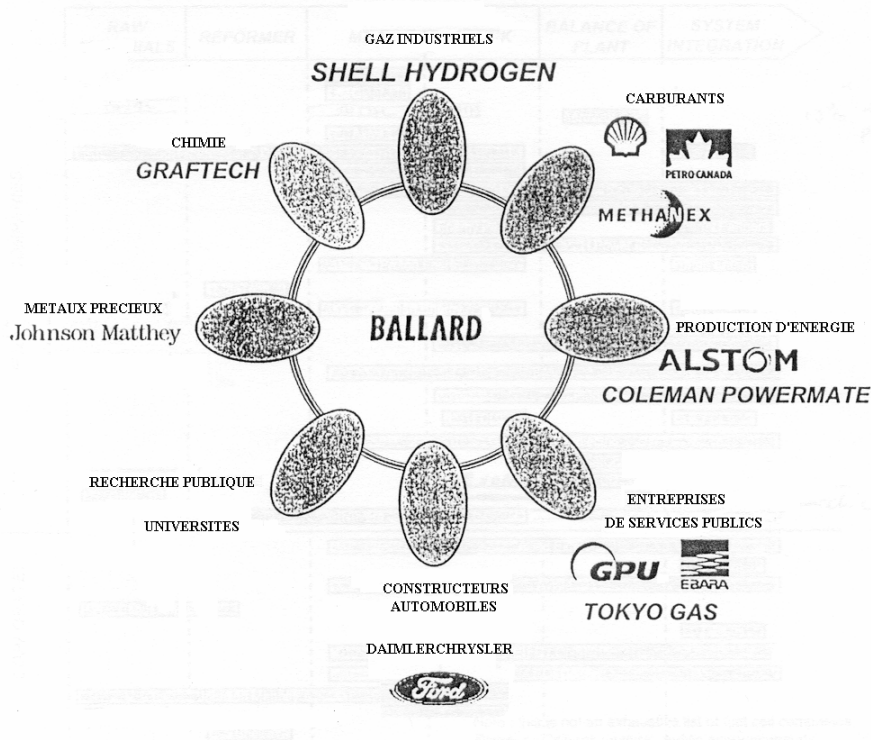
● L'action du secteur privé

L'action du secteur privé est dominée par l'entreprise Ballard établie à Vancouver.

Elle a été créée en 1979 et a commencé à développer ses piles de type P.E.M. en 1983. Cette entreprise a connu depuis cette époque une expansion très importante. Elle est gérée comme une *start up* c'est-à-dire qu'elle ne fait pas de bénéfices, ce qui n'empêche d'ailleurs pas son cours de bourse de monter. Elle a ouvert son capital à DaimlerChrysler et à Ford.

Cette entreprise est à l'heure actuelle en quelque sorte « le centre du monde » de la pile à combustible.

Le schéma de la page suivante reproduit d'après un document de la Citibank montre bien la position centrale qu'a su acquérir cette entreprise qui travaille en partenariat avec de nombreux groupes industriels.



Tous les domaines ayant un rapport avec la pile à combustible ont donné lieu à la constitution de sociétés mixtes ou à la conclusion d'accords.

Pour la production stationnaire d'électricité, a été créée la société mixte Ballard Generation Systems avec GPU International Inc. (Etats-Unis), Alstom SA (France) et Ebara Corp. (Japon).

Dans le secteur automobile, Ballard possède 27% de la société XCELLSIS Fuel Cell Engines créé avec DaimlerChrysler (51% du capital) et Ford (22% du capital). L'objet de cette société est la commercialisation de moteurs à pile à combustible pour les bus, les camions et les automobiles particulières.

Elle possède également 21% de la société mixte Ecostar créée également en partenariat avec DaimlerChrysler (17 % du capital) et Ford (62% du capital) dont l'objet est de

commercialiser des systèmes de commande électrique pour des véhicules équipés de piles à combustible, de batteries ou des hybrides.

Enfin une autre entité, Ballard Automotive, partagée entre Ballard Power Systems, XCELLSIS et Ecostar commercialise indifféremment des systèmes à piles à combustible « clés en mains » ou des composants de ces systèmes.

Ballard était jusqu'à récemment centré sur la réalisation de piles de type P.E.M. « classique » .

Cette entreprise s'intéresse maintenant aux piles à méthanol direct. Elle a en effet acquis une licence détenue par le California Institute of Technology (CalTech).

Ballard vient de décider une nouvelle orientation de sa politique en mettant en place d'importantes lignes de fabrication de piles à combustible de type P.E.M. Cette firme se rapproche ainsi d'une activité plus « industrielle ».

Cette entreprise communique très peu avec l'extérieur et pratique une politique de grand secret sur ses activités. Celles-ci sont d'ailleurs très bien protégées car Ballard a une stratégie de propriété industrielle.

Elle pratique en effet de façon systématique le dépôt de brevets sur de nombreux aspects des technologies de conception et de fabrications des produits. Ainsi cette entreprise a-t-elle déposé 70 brevets en 1999. Elle en possède 350 au total pour protéger 110 innovations différentes.

Ballard domine de façon très importante le secteur de la pile P.E.M. Cette situation entraîne une certaine restriction quant à l'accès à la connaissance. En effet des organismes de recherche peuvent obtenir des piles de démonstration mais celles-ci sont soigneusement scellées, ce qui empêche tout accès au cœur de pile et donc toute familiarisation avec cette technique.

Cette société est présente dans tous les domaines d'application de cette technologie.

Ses piles équipent ainsi tous les principaux prototypes de véhicules utilisant cette technologie, que ce soit les véhicules légers, Necar 1, 2 3 et 4 de DaimlerChrysler, P2000, P2000 SUV et Think FC5 de Ford, FCX V1 de Honda, FCV de Nissan ou les véhicules de transport en commun comme le NEBUS ou le CITARO de DaimlerChrysler.

De même Ballard commercialise des piles à combustible de 250 kilowatts pour la génération stationnaire d'électricité. Elle a ainsi des accords dans ce domaine avec Alstom. Elle est également présente dans le secteur des générateurs portatifs au travers d'un partenariat avec Coleman Powermate, un des chefs de file nord américain des générateurs d'électricité portatifs.

Enfin cette société travaille également à la mise au point de piles à combustible destinées à l'équipement des navires commerciaux et des sous-marins.

On ne peut que saluer la très grande réussite présente de cette société.

Les clés actuelles de celle-ci sont d'abord sa très importante activité de recherche. C'est aussi sa politique de tisser des liens solides non seulement, en aval, avec les utilisateurs de piles à combustible mais aussi, en amont, avec ses fournisseurs par exemple avec les fabricants de produits chimiques et, également, avec les fabricants d'hydrogène et de ses précurseurs comme le méthanol ou le gaz naturel.

Ballard pèse actuellement d'un poids très lourd sur la scène mondiale des piles à combustible. Elle possède, tout au moins d'après ce que l'on peut savoir, une avance technique certaine. Il est donc très difficile à l'heure actuelle d'« exister » dans le domaine de la pile à combustible de type P.E.M. en dehors de Ballard.

Malgré son importance, Ballard ne représente pas la seule entreprise canadienne s'intéressant aux piles à combustible.

Sans vouloir être exhaustifs, nous citerons un certain nombre d'autres entreprises canadiennes :

- Global Thermoelectric Inc. développe des piles de type S.O.F.C. en collaboration avec le centre de recherche allemand de Jülich,

- Hydrogenics Corp.Ltd est spécialisée dans les piles P.E.M. et les périphériques pour piles à combustible,

- Fuel Cell Technologies Corp. conçoit et fabrique des piles S.O.F.C. pour la cogénération résidentielle, la génération de courant pour les sites isolés et également des piles à combustible alcalines,

- H Power Entreprises Canada Inc., présent au Canada et aux Etats-Unis fabrique des systèmes d'alimentation d'appoint à pile à combustible, ...

Il convient également de citer des entreprises fabricant de l'hydrogène comme le géant de l'hydroélectricité Hydro-Québec et, à une échelle beaucoup plus réduite, Stuart Energy Systems Inc, fabricant des électrolyseurs de toute taille, Questair Industries Inc. spécialisé dans les systèmes de séparation/purification d'hydrogène.

On mentionnera également : Ontario Power Technologies, département fonctionnel d'Ontario Power Generation, entreprise de production et de vente d'électricité .

En effet cette entreprise s'est lancée, en partenariat avec Siemens Westinghouse et le Département de l'énergie des Etats-Unis (DoE) dans l'expérimentation d'une centrale thermoélectrique à pile S.O.F.C. à structure tubulaire d'un rendement total de 85% compte tenu d'un système de cogénération.

L'impression prévalent au Canada est celle d'un très grand engagement, public comme privé d'abord en faveur du système de production d'énergie à pile à combustible et ensuite en faveur de l'hydrogène, présenté d'ores et déjà comme le futur de l'énergie avec un dynamisme et un enthousiasme considérables.

L'engagement du secteur du secteur privé s'est concrétisé récemment par la création de Fuel Cell Canada, organisme privé à but non lucratif regroupant les entreprises privées et

chargé de mener à bien des opérations de démonstrations. Cette structure permettra de fournir en plus des facilités offertes par le C.N.R.C. des moyens d'expertise et d'expériences notamment aux petites et moyennes entreprises innovantes du secteur.

La situation canadienne est aussi caractérisée par une pénétration très importante des intérêts des Etats-Unis comme en témoignent l'allocation d'aides à l'industrie canadienne des piles à combustible du Département de l'énergie américain. Cette situation n'est d'ailleurs pas s'en poser des problèmes aux Etats-Unis mêmes.

#### b – Les Etats-Unis

Il n'est pas possible de broser une situation exhaustive de ce pays en matière de pile à combustible compte tenu de la très grande multiplicité des acteurs, entreprises, laboratoires de recherches, Universités...

Concernant les entreprises, ce sont parfois de simples départements de celles-ci qui ont une activité dans ce domaine. On citera de ce point de vue l'entreprise Du Pont dont les activités embrassent un très grand nombre de secteurs de la chimie.

Phénomène classique aux Etats-Unis, c'est un domaine où existent un assez grand nombre de petites entreprises fondée sur le développement d'une idée (*start up*) qui lorsque vient l'heure du succès sont rachetés par les « grands » du secteur.

Mais il y a aussi des financiers, des brasseurs d'affaires, pour qui les piles à combustible sont un des secteurs technologiques suffisamment prometteurs pour y risquer une partie des fonds qui leur sont confiés. C'est le cas de la firme Manhattan Scientifics Inc. tout à fait représentative de cette catégorie de financiers intervenant dans ce domaine.

Il a été créé un U.S. Fuel Cell Council dont l'objectif est de promouvoir les applications des piles à combustible aux Etats-Unis. Cette association regroupe 50 entreprises travaillant directement sur les piles à combustible ainsi que les fabricants de composants s'y rapportant.

Cette association donne ainsi des conseils techniques, informe les usagers potentiels, mène des actions de sensibilisation du public, établit des liens entre les entreprises travaillant dans ce domaine aux Etats-Unis et à l'étranger...

Le secteur privé aux Etats-Unis dépense aux environs de 200 millions de dollars par an pour la recherche concernant les piles à combustible.

Les pouvoirs publics américains participent activement à l'action dans le domaine des piles à combustible.

- La politique des pouvoirs publics

Selon le cabinet spécialisé Décision Etudes & Conseils, le financement public de la recherche – développement en matière de piles à combustible aux Etats-Unis est de l'ordre d'environ 100 millions de dollars par an.

La politique des pouvoirs publics peut en fait être appréhendée à la fois au niveau fédéral et au niveau des Etats.



- Le niveau fédéral

Le cadre politique fondamental est le Clean Air Act qui régleme les taux de rejets de polluants dans l'atmosphère.

Cette loi ne concerne pas directement les piles à combustible mais constitue pour elles un puissant outil de promotion dans la mesure où elle peut désavantager des technologies économiquement concurrentes qui n'auraient pas de bonnes performances environnementales.

L'action publique en faveur des piles à combustible est principalement conduite, en dehors des recherches à but militaire, par le département de l'énergie (U.S. Department of Energy,) par l'intermédiaire de l'Office of Transportation Technology.

A l'intérieur de ce dernier, c'est l'Office of Advanced Automotive technologies qui concentre ses efforts sur le développement de technologies plus propres et plus efficaces en matière d'utilisation de l'énergie pour les automobiles du futur.

Un certain nombre de programmes ont été créés autour de ce thème sans être consacrés exclusivement aux piles à combustible :

- le Partnership for a new generation of vehicles (P.N.G.V.),
- le Alternative Fuels Research and Development Programm,
- le Cooperative Automotive Research for Advanced Technology (CARAT)
- le Graduate Automotive Technology Education Programm (GATE).

Parmi ceux-ci, le plus intéressant est sans conteste le P.N.G.V.

Le P.N.G.V. existe depuis 1993 et constitue un programme de recherche soutenu par différentes entreprises et organisations membres de l'United States Council for Automotive Research (U.S.C.A.R.). Cette organisation a été créée pour mettre au point les techniques permettant de tripler le rendement énergétique des combustibles.

Participent à celle-ci : le Department of Energy à travers dix laboratoires nationaux, le Department of Transportation, l'Environmental Protection Agency (E.P.A.), la National Aeronautics and Space Administration (N.A.S.A.) et la National Science Foundation (N.S.F.).

A l'heure actuelle l'essentiel du financement de ce programme provient directement du budget fédéral américain.

A travers ce programme DaimlerChrysler, Ford, General Motors, plusieurs agences fédérales américaines, des universités collaborent sur les technologies du futur dont celles permettant de réduire les émissions de polluants. Cette coopération stratégique s'est traduite pour tous les participants à ce programme par une croissance importante de leurs budgets de recherche et de développement.

Tous les départements ministériels participent à ce programme sous la direction du U.S. Department of Commerce. Le budget a évolué comme suit dans les trois dernières années :

- 1998 : 219 millions de dollars

- 1999 : 240 millions de dollars
- 2000 : 263 millions de dollars

Les piles à combustible ne sont pas la seule technique concernée par ce programme. Il s'agit de faire des recherches et de développer toutes les techniques permettant d'atteindre les buts visés.

Dans ce cadre les piles à combustible se sont vues attribuer, à elles seules une somme d'environ 41 millions de dollars, ce qui en fait le budget thématique le plus important du programme, devant le thème « moteurs à injection directe ».

Les prototypes devraient être prêts en 2004 mais on peut estimer qu'il y aura sans doute un peu de retard.

Il faut souligner que toute l'industrie américaine de l'automobile explore en fait grâce à ce programme toutes les solutions qui permettront de réduire les consommations de carburant et de rendre les véhicules moins polluants. Sont notamment étudiés dans ce cadre, tous les matériaux qui permettront l'allègement des structures, les modes de gestion des moteurs, etc...

C'est en fait un véritable programme d'étude du véhicule du futur dans sa globalité, comme l'annonce d'ailleurs son intitulé, qui s'est ainsi mis en place. Des techniques mises au point dans ce cadre pourront certainement être transposées dans d'autres secteurs, avec ou sans adaptation.

C'est ainsi que par exemple que le Département de l'Energie a préparé un nouveau programme couvrant les années 2001 à 2006 et mettant l'accent, pour les véhicules, sur la filière des reformeurs destiné à fabriquer l'hydrogène.

Comme on l'a vu, le reformeur est un auxiliaire crucial pour une pile à combustible : on peut penser que si ce nouveau plan était couronné de succès, des débouchés seraient rapidement trouvés en dehors du secteur automobile.

Ce département de l'Energie possède un nombre important de laboratoires de réputation internationale travaillant sur cette question et, notamment : Argonne National Laboratory qui vient notamment de mettre au point un mini reformeur à essence, le Federal Energy Technology Center (F.E.T.E.C), le Lawrence Livermore National Laboratory, le Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, Sandia National Laboratories...

- Le niveau des Etats

La Californie s'est voulue en pointe sur le problème de la pollution émise par les automobiles.

Il a été en effet annoncé au début des années 1990 par les autorités de cet Etat qu'aucun constructeur automobile ne pourrait commercialiser de véhicule en Californie en 2001 s'il ne pouvait justifier de la vente de 3% de *Zero emission vehicle* (*Z.E.V.*) (véhicule à émission zéro). Le *Z.E.V.* doit par ailleurs être garanti comme pouvant parcourir 150 000 miles, soit environ 250 000 kilomètres. Cette obligation avait été portée à 10% en 2003.

Depuis les responsables californiens sont quelque peu revenus sur ces obligations suite aux pressions dont ils ont été l'objet et ont annulé la norme prévue pour 2001 tout en maintenant celle de 2003. Cette dernière obligation semble en fait parfaitement irréaliste. Elle ne sera sans doute d'ailleurs pas plus respectée que celle qui avait été fixée pour 2001.

Il est toutefois notable que les auteurs de ces obligations n'ont pas prescrit de technique particulière en ne fixant qu'une obligation de résultat.

Mais, de fait, seule la technique de la pile à combustible permet d'obtenir un tel résultat tout au moins de façon ponctuelle puisqu'il est nécessaire de produire de l'hydrogène, de le transporter...

Le 20 avril 1999 a été annoncé la création du California fuel cell partnership.

C'est une structure rassemblant à la fois les constructeurs automobiles (DaimlerChrysler, Ford Motor Company), les fournisseurs d'énergie (Arco, Shell, Texaco), un fabricant de piles à combustible (Ballard) et l'Etat de Californie à travers le California Resources Board et la California Energy Commission.

Les objectifs de ce programme sont les suivants :

- Démonstration de la faisabilité d'une technologie automobile dans des conditions réelles d'utilisations,
- Démonstration de la faisabilité de la création d'une infrastructure de distribution d'un nouveau carburant,
- Exploration des possibilités de commercialisation d'une telle technologie
- Sensibilisation du public

La réaction des constructeurs automobiles a d'abord été de prendre peur devant ce concept de « Z.E.V. ».

Puis, de 1990 à 1998, ils se sont efforcés d'explorer la piste des véhicules électriques à batteries qui se sont révélés, comme en France, techniquement au point mais très chers et d'utilisation peu commode. Depuis deux ans c'est la technique de la pile à combustible qui a été retenue et qui a fait l'objet de développement au sein de ce programme.

Un certain nombre de nouveaux membres, des constructeurs automobiles, ont rejoint le programme : Honda, Nissan, Volkswagen.

Il est indubitable que les constructeurs automobiles ainsi que les autres partenaires ont préféré entrer dans le programme et faire ainsi preuve d'une certaine bonne volonté envers les autorités de l'Etat qui ont le pouvoir de fixer le niveau des émissions polluantes.

Les obligations posées risquent d'être certainement un peu « oubliées » compte tenu des difficultés de mise au point de ce type de véhicule. Il n'en reste pas moins que ce travail en coopération entre constructeurs et pouvoirs publics peut, à terme, représenter un atout important pour tous les partenaires du programme. Cela facilite à l'évidence la circulation de l'information et des innovations.

- Les Universités

Compte tenu de leur tradition de recherche, les Universités américaines sont très présentes sur ce thème de la pile à combustible.

Elles travaillent en partenariat avec les entreprises selon le modèle classique américain dans ce domaine. Ainsi, par exemple, 3M, Du Pont et Gore financent de nombreux programmes de recherche et d'évaluation de leurs produits au sein du milieu universitaire.

Un grand nombre d'Universités ont une activité dans ce domaine de la pile à combustible, que ce soit au niveau du cœur, des auxiliaires ou des carburants, la plupart du temps en partenariat soit avec les industriels, soit avec les laboratoires du Département de l'énergie.

Ainsi l'Université de Californie (Davis) par l'intermédiaire de son Institut des études sur le transport (*Institute of transportation studies*) participe en partenariat avec l'industrie automobile à un certain nombre d'expérimentations. On peut citer comme exemple, parmi tous les travaux en cours, l'étude d'une unité de puissance auxiliaire à pile à combustible pour les camions, la réalisation de trois taxis à pile à combustible pour la ville de Londres ou des projets concernant les carburants de pile à combustible.

#### B – Le Japon

Historiquement, l'intérêt du Japon pour les piles à combustible a été motivé par les problèmes récurrents d'approvisionnement énergétique et son attitude envers l'énergie nucléaire.

Dans le passé le travail sur cette technique a été réalisé essentiellement sur les piles à acide phosphorique.

La seule société à commercialiser des piles à combustible, des piles à acide phosphorique, est O.N.S.I., filiale de Toshiba et de I.F.C. Mais les investissements dans cette technique, compte tenu de ses difficultés et des impasses, semblent diminuer au profit des techniques à électrolyte solide polymère et céramique.

L'activité du secteur privé est très importante dans ce domaine.

Ce sont les grandes entreprises de construction électrique comme Fuji, Hitachi, Mitsubishi ou Toshiba, Sanyo qui interviennent dans ce secteur. Il faut remarquer que les fabricants et distributeurs d'énergie comme Tokyo Gas ou Osaka Gas participent à la mise au point des piles à combustible en procédant à des expérimentations. Le souci de ces entreprises est naturellement de pouvoir, à terme, se placer sur le marché de l'alimentation de ces piles en fournissant le gaz nécessaire à la production d'hydrogène par reformage.

Les grands constructeurs automobiles de leur côté, Toyota, Honda, Nissan et Mitsubishi ont pendant longtemps développé leurs propres technologies de pile à combustible, de type P.E.M.

Après l'entrée de DaimlerChrysler dans son capital, Mitsubishi a adopté la pile Ballard. Renault a, de son côté, développé une coopération avec Nissan sur un programme de recherches doté de 950 millions d'euros sur cinq ans.

Des deux importants constructeurs restés indépendants, Toyota a adopté la pile de Ballard et a conclu une alliance avec General Motors, Isuzu et FIAT. Honda semble par contre persister à développer son propre système de pile pour ses modèles.

Pour avoir un aperçu sur les aides publiques allouées à la recherche sur les piles à combustible, nous nous appuyerons sur une note élaborée récemment par le service Science et Technologie de notre ambassade au Japon concernant le secteur des piles à combustible stationnaires.

Les pouvoirs publics japonais soutiennent les projets de recherche des industriels japonais dans le cadre du programme *New sunshine programm* financé par l'Agency of industrial science and technology.

En 1999, le budget total de soutien à cette technique se montait à 3,8 milliards de yens, soit environ 228 millions de francs.

Ce budget était réparti de la façon suivante selon les différentes piles à combustible :

- 2,5 milliards de yens (environ 150 millions de francs), soit 66%, pour la filière « carbonates fondus »
- 1 milliard de yens (environ 60 millions de francs), soit 26%, pour la filière P.E.M.,
- 0,3 milliard de yens (environ 18 millions de francs), soit 8%, pour la filière S.O.F.C.

Pour 2000 le budget consacré aux piles à combustible a atteint 7 milliards de yens, soit environ 420 millions de francs. L'augmentation est de presque 85% par rapport à 1999. La progression de ce chiffre traduit tout à fait l'attention soutenue qui est accordée au développement de cette technique.

La répartition du budget pour 2000 était la suivante :

- pile à carbonates fondus : 2 milliards de yens (environ 120 millions de francs), soit 28% du total
- S.O.F.C. : 0,5 milliard de yens (environ 30 millions de francs), soit 7% du total,
- P.E.M. : 4,5 milliards de yens (environ 270 millions de francs), soit 65% du total.

On peut faire plusieurs observations à la lecture de ces chiffres.

Outre la part constante affectée aux S.O.F.C., on remarque le transfert effectué au détriment des piles à carbonates fondus et en faveur des P.E.M. dont les fonds ont multipliés par 4,5.

La filière à carbonates fondus qui est jugée généralement sans beaucoup d'avenir diminue certes mais conserve néanmoins des moyens.

On peut s'étonner par contre de voir que les S.O.F.C. n'augmentent pas leur part dans les subventions publiques compte tenu des bonnes perspectives que semble avoir ce type de pile. Une des raisons serait que les pouvoirs publics japonais ont décidé de redéployer leur

effort sur les S.O.F.C. vers la recherche fondamentale de préférence au financement de démonstrateurs.

Enfin on voit que les piles à acide phosphorique ne figurent pas dans les projets aidés et, ce, depuis 1998. Cela est dû au fait que les pouvoirs publics japonais estiment que le développement de cette technique est passé dans une phase purement commerciale et qu'il doit donc être assumé par les entreprises.

Le soutien public à la recherche sur les piles à combustible stationnaires est donc tout à fait appréciable au Japon. Depuis dix ans, elles se montent en effet à environ 3,1 milliards de francs, soit en moyenne environ 300 millions de francs par an.

### C – L'Union européenne

En Europe une activité de recherche avait été lancée sur les piles alcalines dans l'optique de la construction de la navette spatiale européenne « Hermès ». Son abandon a arrêté quasiment toutes les activités dans ce domaine.

C'est en 1986 que les recherches ont redémarré au sein de l'Union européenne. Les investissements en recherche et développement ont cru de façon assez importante puisqu'ils sont passés de 8 millions d'euros pour la période du deuxième programme cadre de recherche et de développement (P.C.R.D.) 1986 – 1990 à 95 millions d'euros pour le quatrième P.C.R.D.

Les actions européennes de recherche concertée, au nombre de 44, ont été menées dans trois cadres distincts : Brite-Euram pour les matériaux et les procédés industriels, Joule pour la recherche fondamentale et Thermie pour les démonstrateurs technologiques.

Dans le cadre du cinquième P.C.R.D., la Commission européenne a retenu 12 projets lors de l'appel d'offres de juin 1999 « Energie ».

Ces 12 projets sont les suivants :

- démonstration d'un système de production d'électricité d'une puissance de l'ordre d'un mégawatt utilisant une pile à combustible à haute température combinée avec des générateurs à micro turbines,

- développement de membranes pour pile à membrane fonctionnant à des températures élevées (180°C),

- production d'électricité décentralisée à partir d'une pile S.O.F.C. « plane »,

- intégration d'une pile à carbonates fondus avec alimentation en biogaz,

- mise au point d'un système de cogénération avec une pile à carbonates fondus,

- production d'hydrogène pur pour pile à combustible à partir de bioéthanol,

- projet de démonstration à Berlin, Copenhague et Lisbonne d'un bus à pile à combustible,

- développement d'une pile S.O.F.C.,
- production embarqué d'hydrogène pour pile à combustible destinée au transport,
- développement d'un système hybride pile à combustible – cellules photovoltaïques pour la production d'électricité et de chaleur en sites isolés,
- mise au point d'un système à pile à combustible pour alimenter des installations de télécommunication,
- recherche générale sur les composants des piles à combustible pour une application au transport.

Le coût total de ces 12 projets est de 100 millions et demi d'euros avec un financement européen de 29 millions d'euros.

En 1999, la Commission européenne, les gouvernements des pays membres et les entreprises ont investi dans des actions de recherche l'équivalent de 90 millions de dollars. En 2000, 100 millions d'euros ont été consacrés à la recherche sur les piles à combustible.

Comparé aux 300 millions de dollars investis aux Etats-Unis, cette somme est relativement modeste. Une autre difficulté est que beaucoup d'acteurs européens se sont associés dès le départ avec des entreprises non européennes et, essentiellement américaines et canadiennes.

Les rapprochements intercontinentaux ne sont pas systématiquement négatifs. Cependant le problème est que ces firmes européennes se sont dans la très grande majorité des cas associées avec plus puissants qu'elles, à l'exception, bien entendu, de DaimlerChrysler et de Siemens qui ont procédé à des acquisitions importantes en Amérique du Nord.

Il y a donc une tendance, en conséquence, à adopter la technologie en quelque sorte déjà disponible sans peser d'un poids réel dans l'association. Parfois, d'ailleurs, celle-ci se résume à de simples accords de distribution de matériels sans intervention sur le savoir-faire.

Une autre conséquence est que cela empêche des entreprises européennes disposant de moyens relativement importants de soutenir par leurs commandes ou des contrats d'études les petites entreprises européennes disposant d'un réel savoir faire dans ce domaine mais manquant cruellement de moyens financiers. C'est le cas par exemple de la SORAPEC qui n'arrive pas à intéresser à son avenir un groupe important.

Il nous semble donc qu'il serait extrêmement judicieux de procéder à la réalisation d'un état précis des moyens et des compétences européens.

Cela permettrait que les grandes entreprises européennes souhaitant se diversifier ou développer leurs activités dans ce domaine puissent avoir connaissance des compétences existant sur place. Il nous semble que tous les pays de l'Union européenne devrait effectuer ce travail sous la direction de la Commission européenne qui en publierait les résultats.

Le problème de l'importance du financement public européen, inférieur aux financements publics existant en Amérique du Nord, se pose certainement.

Cependant avant de recommander son éventuelle augmentation, il convient d'abord de déterminer quels domaines concernant la pile à combustible devrait faire l'objet de soutien. Cette nécessaire réflexion pourrait se nourrir de l'« état des lieux » européen que nous préconisons. Il s'agirait ensuite de décider s'il convient de soutenir les activités existantes ou d'aider à la création de nouvelles.

L'objectif n'est sans doute pas pour l'Europe de vouloir tout faire dans le domaine des piles à combustible. Il faut en effet tenir compte des situations déjà établies. Il importe surtout d'essayer de se placer sur les créneaux les moins encombrés et ceux qui permettront à terme d'occuper quelques positions stratégiques.

Cette stratégie permettrait d'aborder d'éventuelles futures négociations avec des partenaires comme l'Amérique du Nord et le Japon, notamment si des discussions sur un certain nombre de standards devaient s'engager.

Il convient aussi de veiller à l'articulation entre les programmes européens et nationaux car aucune mesure de coopération entre ceux-ci n'est prévue. Il nous paraît pourtant évidemment indispensable de veiller à éviter les dédoublements de programmes.

La situation est peut-être en train de bouger de ce point de vue. En effet la Commission européenne a annoncé en juin dernier sa volonté de créer un espace cohérent de recherche entre les actions du P.C.R.D. et les programmes nationaux des différents Etats.

Nous estimons qu'il est tout à fait indispensable de développer une sorte de « bloc de compétences » européen dans ce domaine des piles à combustible. Le modèle réussi d'Airbus pourrait d'ailleurs servir de guide.

Il semble également inévitable qu'à l'instar de cette grande réussite européenne un partage des tâches devra se faire au niveau de l'Union européenne. C'est sans doute la seule voie qui permettra à l'Europe d'exister réellement dans ce domaine de la pile à combustible.

#### D – L'action de différents Etats

Nous évoquerons les actions conduites en République fédérale d'Allemagne, en Grande-Bretagne, et au Japon.

##### a – La République fédérale d'Allemagne

La République fédérale d'Allemagne est incontestablement très en pointe en Europe en matière de piles à combustible.

En effet ce pays possède des firmes qui ont fait de cette technique un des axes affirmés de leur politique, tant au niveau national qu'au niveau mondial comme notamment DaimlerChrysler et Siemens.



Lors du quatrième programme de développement de la recherche et de la technologie une somme d'environ 2 millions de marks, soit environ 9 % des moyens totaux de ce programme, a été affectée à la recherche sur les piles à combustible.

La recherche en République fédérale d'Allemagne, aussi bien dans les instituts de recherche spécialisés que dans l'industrie, s'oriente plus spécialement sur les thématiques suivantes :

- performances et comportements des composants des cœurs de pile (membranes, électrodes),
- alimentation en carburant de la pile,
- sécurité, notamment du système de stockage,
- évaluation socio-économique des différentes filières.

DaimlerChrysler a noué un partenariat de développement d'un véhicule à pile à combustible avec la société Ballard et Xcellsis dont elle possède une partie du capital. DaimlerChrysler a ainsi présenté en 1999 son prototype « Necar 4 » en 1999.

Mais toute la recherche de cette firme ne se fait pas en Europe.

En effet une partie de celle-ci est localisée en partie en Amérique du Nord. Ainsi par exemple ses unités de recherche sur les techniques de l'hydrogène se trouvent à San Diego et sur les bus à pile à combustible à Vancouver. DaimlerChrysler participe également au programme californien de recherche sur les voitures à pile à combustible.

En matière de recherche sur la pile à combustible et l'automobile, il faut noter que si B.M.W. a plutôt fait le choix de faire fonctionner un moteur à combustion interne directement à l'hydrogène, cette firme participe avec Renault et Delphi à la mise au point d'une petite pile de type S.O.F.C. comme auxiliaire de puissance.

Enfin Opel, filiale de General Motors, a également présenté un prototype de voiture particulière mue par une pile à combustible.

Siemens est l'autre exemple d'une firme allemande menant une recherche à la fois dans son pays d'origine et en Amérique du Nord.

Cette firme s'est en effet spécialisée dans la construction de piles à combustible pour les sous-marins. Elle développe aussi avec la firme de constructions de camions et de bus M.A.N. un prototype de bus à pile à combustible d'une puissance de 100 kilowatts.

Mais elle a aussi procédé au rachat de la firme américaine Westinghouse et poursuit en Amérique du Nord le développement de la technologie des piles à combustible de type S.O.F.C.

Un certain nombre d'autres firmes conduisent des recherches sur ce thème. On peut citer Bewag, la compagnie d'électricité de Berlin, qui travaille sur une centrale stationnaire de 250 kilowatts de type P.E.M. Sur le même créneau, R.W.E., à la tête d'un groupe international comprenant Siemens, projette la construction d'une centrale à pile à combustible de démonstration de 300 kilowatts. E.D.F. est également présent en République fédérale d'Allemagne en association avec Energie Baden-Württemberg.

La République fédérale d'Allemagne possède également un certain nombre d'instituts de recherche de très bon niveau sur ce thème : Institut de thermodynamique technique, de l'université de Stuttgart, Centre de recherche sur l'énergie solaire et l'hydrogène d'Ulm, Institut Max-Planck de Berlin, Institut Fraunhofer (travail sur les micro piles)...

L'internationalisation des firmes allemandes et, surtout, leur présence en Amérique du Nord, leur confèrent sans nul doute un atout décisif dans ce domaine en leur permettant d'être des acteurs là où la recherche est à la fois la plus dynamique et la plus avancée.

#### b – La Grande-Bretagne

La Grande-Bretagne a créé en juin 1998 le « *Network for processing fuel cells* », réseau visant à rassembler les chercheurs et les industriels travaillant dans le domaine des piles à combustible.

Son but est de promouvoir et d'encourager les échanges d'informations et d'idées entre tous les acteurs de ce domaine sans privilégier une technique en particulier.

La recherche dans l'industrie est soutenue par l'« *Advanced fuel cells programm* » qui a été créé en 1992. Depuis cette date ce programme a contribué à financer 127 projets de recherche. Les fonds publics consacrés aux piles à combustible se situent entre 1 et 2 millions de livres par an.

Une entreprise possède une importance et un savoir-faire appréciable, la firme Johnson-Matthey.

Celle-ci est spécialisée dans la chimie et produit divers composants et matériaux pour les piles à combustible : catalyseurs, électrodes, reformeurs. C'est notamment un spécialiste reconnu du platine. Comme on l'a déjà vu, cette firme est associée avec Ballard, DaimlerChrysler et Ford au sein d'une société mixte.

Il faut également citer Rolls-Royce qui s'intéresse à la cogénération par couplage d'une pile S.O.F.C. avec des turbines.

Un certain nombre d'autres sociétés d'autres pays européens interviennent dans ce domaine.

On peut citer à cet égard la firme suisse Sulzer Hexis qui développe depuis la fin des années 1980 une technologie de pile SOFC planaire circulaire et Nuvera en Italie.

Nuvera est la nouvelle société créée par fusion de De Nora fuel cells et la filiale du groupe américain de conseil Arthur D. Little spécialisées dans les piles à combustible, Epyx. De Nora fuel cells était la filiale de De Nora qui est le premier producteur mondial d'anodes pour l'industrie du chlore et de la soude.

#### E – La recherche en France

Comme on l'a vu la pile à combustible a fait l'objet de travaux de développement en France entre 1960 et 1975, ce qui avait permis d'obtenir une certaine avance dans ce domaine.

En 1980 par contre on a abouti à un constat d'échec et à l'abandon de toutes recherches d'envergure notamment au niveau industriel.

Ce quasi abandon a résulté essentiellement du manque de débouchés intérieurs pour les piles de puissance à l'époque où, pour faire face aux chocs pétroliers successifs, la France avait choisi de s'équiper de façon massive en centrales nucléaires. Il faut ajouter que cette technique apparaissait à l'époque comme coûteuse et de durée de vie limitée dans la mesure où elle présentait un certain nombre de difficultés.

Lors de sa création en 1982, l'Agence française de la maîtrise de l'énergie (A.F.M.E.), ancien nom de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (A.D.E.M.E.), s'était vue confier par le ministère de la recherche la responsabilité du soutien au développement des générateurs électrochimiques civils.

Une petite activité de recherche, essentiellement universitaire, s'était maintenue en France entre 1980 et 1990. A partir de 1985 on commence à trouver trace de quelques travaux sur le sujet : études exploratoires sur de nouvelles filières, par exemple utilisation directe de l'éthylène glycol, et sur des verrous technologiques de base, comme les catalyseurs de réduction de l'oxygène. Les montants financiers restent pendant toute cette période à un niveau très modeste, de l'ordre de 300 à 500 000 francs par an.

En 1988 le choix est effectué de se limiter à la filière de la pile de type P.E.M. Des études sur les deux versions de ce type de pile, à hydrogène et à méthanol, sont engagées. Pendant que les travaux de base sur les catalyseurs se poursuivaient, un projet était lancé sur les membranes.

A cette époque les montants financiers restent modestes bien qu'en augmentation, aux alentours de 1 million de francs par an.

En 1990 les piles à combustible sont une des actions du thème « véhicule propre et économe » du programme national « PREDIT » de recherche sur les transports. Cette action débute véritablement au début de 1992. Elle réunit les constructeurs automobiles, Peugeot et Renault, le Commissariat à l'énergie atomique, le Centre national de la recherche scientifique et la SORAPEC, petite entreprise installée à Fontenay-sous-Bois. Le financement attribué est de 50 millions de francs sur cinq ans.

De leur côté, depuis le début des années 1990, E.D.F. et G.D.F. avaient repris une activité de veille technologique sur les piles à combustible et, notamment, sur les piles à haute température, S.O.F.C.

A partir de 1994, des industriels français ont coordonné un certain nombre de programmes mettant en œuvre des piles à combustible. C'est le cas des projets « Fever » avec Renault et « Hydro Gen » avec PSA et Renault menés dans le cadre du programme communautaire « Joule ». De même Air Liquide est-il, en 1997, partenaire dans un projet d'implantation d'une pile dans une installation industrielle dans le cadre du programme communautaire « Thermie ».

Dans le même temps, Alstom, Rhône-Poulenc, E.D.F., G.D.F. et le C.N.R.S. participent à des programmes européens sur les piles à carbonates fondus et S.O.F.C.

Un nouveau programme « PREDIT II », démarré au début de 1997, poursuit le soutien aux travaux dans le domaine des piles à combustible.

Cependant malgré tout leur mérite, ces activités ne pouvaient dissimuler la faiblesse des efforts et des perspectives face au développement des recherches notamment en Amérique du Nord.

Le constat devait être aussi lucidement fait que la France avait un très grand retard dans ce domaine. Le tissu industriel ainsi que la recherche étaient et sont encore très faibles dans notre pays dans ce domaine.

Un certain regroupement des actions ainsi qu'une incitation financière publique devenaient nécessaires sauf à perdre complètement pied dans ce domaine.

Dans un certain nombre de secteurs industriels, et notamment dans l'automobile, le renouveau de cette technologie pouvait entraîner une remise en cause des techniques traditionnelles et donc bouleverser à terme les conditions de la concurrence.

Aussi le 25 juin 1999, M. Claude Allègre, alors ministre chargé de la recherche, installait-il le Comité d'orientation du Réseau « pile à combustible ».

a – Le Réseau « pile à combustible »

- Les objectifs

Le réseau a pour vocation de travailler à la préparation d'une technologie « piles à combustible » qui soit commercialement viable.

Il doit :

- stimuler l'innovation technologique en matière de produits, de procédés et de services dans le domaine énergétique,
- répondre à la demande du monde économique sur deux types d'utilisations : propulsion automobile et production d'énergie,
- participer à la création et à la croissance d'entreprises.

Ses objectifs sont les suivants :

- Identification des marchés
- Préparation du contexte réglementaire et normatif
- Soutien à la recherche
- Actions de démonstration
- Promotion de collaborations internationales
- Réflexion prospective

- L'organisation générale

Le Réseau est organisé autour d'un Comité d'orientation, d'un bureau et d'une cellule d'animation et de coordination.

- Le Comité d'orientation

S'appuyant sur les résultats des recherches nationales ou internationales et sur la demande socio-économique, le Comité d'orientation :

- propose les thèmes de recherche et de démonstration qu'il souhaite voir particulièrement soutenus et assure la réflexion prospective,
  - identifie les défis technologiques,
  - définit les modalités d'animation scientifique et technique du réseau, contribue tant à développer les réseaux de collaboration et les pôles de compétence nécessaires qu'à la structuration de la recherche dans le domaine et suscite de nouvelles initiatives,
  - organise l'évaluation *a priori* des projets de recherche en s'appuyant notamment sur des experts extérieurs reconnus et labellise les projets. L'évaluation doit porter tant sur les aspects scientifiques et techniques que sur les aspects stratégiques et économiques,
  - reçoit un rapport périodique sur les projets financés et donne un avis sur leur exécution,
  - fait réaliser l'évaluation externe *a posteriori* des actions de recherche et de développement.
- Le bureau

Le bureau est composé des représentants du Comité d'orientation ainsi que des représentants des financeurs, c'est-à-dire le ministère de l'industrie et celui de la recherche, l'A.D.E.M.E. et l'A.N.V.A.R. Il effectue pour le Comité d'orientation le suivi régulier du Réseau. C'est également le bureau qui engage les procédures d'évaluation des dossiers en désignant des rapporteurs au sein du Comité.

- La cellule d'animation et de coordination

La cellule d'animation et de coordination assure le fonctionnement et l'animation scientifique et technique du Réseau. Elle assure la permanence des relations avec les partenaires industriels et académiques.

- Les modes d'action

Ceux-ci sont les suivants :

- favoriser les liens entre les entreprises et la recherche publique afin de créer une communauté de réflexion et d'objectifs sur les piles à combustible et le combustible,
- dégager les priorités en matière de recherche et de développement en fonction des verrous technologiques identifiés et de l'évolution des technologies,
- encourager le transfert des technologies développées vers le marché,
- proposer, par la labellisation, aux financeurs institutionnels des projets répondant aux objectifs stratégiques du Réseau.

- Un premier bilan

Dès sa création le Réseau a lancé un appel à propositions. Une soixantaine de pré-propositions ont été alors reçues qui ont conduit après restructuration de celles-ci au dépôt de 34 projets. A la fin du mois de juin 2000, 28 projets étaient labellisés.

Ceux-ci sont répartis de la façon suivante suivant leurs objectifs :

- 50% : pile à combustible (matériaux, systèmes, démonstrateurs),
- 25% : combustibles,
- 25% : actions transversales : sûreté, veille, analyse technico-économique.

Le montant global de ces projets est de 365 millions de francs, dont 143 millions de francs de demandes d'aides.

Cette somme est un peu supérieure à l'enveloppe initialement prévue de 105 millions de francs pour la période 1999 – 2000 et provenant à raison de 45 millions de francs du ministère de la recherche, 40 millions de celui de l'industrie et 20 millions de l'A.D.E.M.E.

Les organismes intervenant sur ces projets se répartissent de la façon suivante :

- C.N.R.S. et Universités 27%
- C.E.A. : 10%,
- Grandes entreprises : 19%,
- Petites et moyennes entreprises : 25%
- Collectivités locales : 5%.

On trouvera ci-après un tableau donnant le détail des actions à la fin de l'année 2000 et l'état d'avancement des financements :

### Les projets « combustible » : production et stockage

Coordonnateur	Titre du projet	Organisme financeur	Date labellisation	Financement
SODETEG dépt. SRTI SYSTEM	L'Ethanol comme carburant alternatif des piles à combustible (BIOPAC)	ADEME	8/6/00	Notifié déc. 2000
CEA Valduc	Optimisation et qualification de réservoirs économiques en polymère thermoplastique pour le stockage de gaz hydrogène et concernant des applications autonomes et mobiles de série (PHYSE)	MEFI	26/10/99	Notification en cours
RBC	Développement d'un nouveau réformeur utilisant des mousses métalliques	MR	16/11/00	En instruction
DALKIA/CREED	Production locale et unité de stockage d'hydrogène pour une optimisation des systèmes stationnaires de pile à combustible (PLUSPAC)	MEFI	8/12/99	Notification en cours
ALPHEA	Comparaison de systèmes de stockage d'hydrogène pour piles à combustible	ADEME	16/11/00	En instruction
TECHNICATOME	Développement d'un système de production d'hydrogène à partir de gaz commercialement distribués. Intégration sur PAC type PEM pour application aux véhicules de transport en commun	MEFI	26/01/00	Projet en attente
AIR LIQUIDE	Chaîne fixe de production et de stockage d'hydrogène pour alimenter une pile à combustible	MR	26/10/99	Oct. 2000

### Les projets transversaux

Coordonnateur	Titre du projet	Organisme financeur	Date labellisation	Financement
GIE PR	Système de traction à pile à combustible	MR	8/10/99	Déc. 1999
Réseau	Action transversale de veille et d'animation du réseau PAC	MR	26/1/00	En cours d'instruction
ELYO	Evaluation technico-économique des systèmes piles à combustible	MR	26/10/00	Déc. 1999
	Plate-forme 200 kW pour système à			

INRETS	piles à combustible adaptée aux applications transports ; modélisation et validation	MR	26/01/00	Notifié déc. 2000
INERIS	Sûreté des systèmes à piles à combustible SEREPAC	ADEME	26/04/00	Notifié déc 2000
IDAE	Projet de transport urbain à pile à combustible		26/04/00	En cours d'instruction

### Les projets « Piles et systèmes »

Coordonnateur	Titre du projet	Organisme financeur	Date labellisation	Financement
SAGEM	Fabrication de membranes de PEMFC par extrusion (ECOPAC)	MEFI	26/01/00	En cours d'instruction
EDF & GDF	Démonstration d'une pile à combustible à Forbach	ADEME	8/12/99	Notifié déc. 2000
CEA – Le Ripault	Une nouvelle génération de pile à combustible à oxyde solide intégrant un reformage interne progressif	ADEME	26/01/00	Notifié déc. 2000
CNAM – LEI	Nouvelles Piles à Combustibles Alcalines	MR	26/10/99	Nov. 1999
SORAPEC	Atelier pilote de production de polyéléments (stacks) de pile à combustible type PEM	MEFI	26/10/99	En cours d'instruction
SORAPEC	Etude et réalisation d'électrodes à haute puissance surfacique pour pile PEM	MR	8/12/99	Août 2000



CEA Grenoble	Réalisation par coulée de membranes composites et des EME associées pour une utilisation en pile à des températures supérieures à 120°C	MR	8/12/99	Juin 2000
SRTI SYSTEM SODETEG	Optimisation de la conception d'une pile à méthanol direct	MR	8/12/99	Notification en cours
ALSTOM Transport SA	Contribution au pilotage d'une source d'énergie à pile à combustible pour application embarquée (COPPACE)	MEFI	16/11/00	En cours d'instruction
IFREMER	Prototype de pile à combustible PEMFC de 2 Kwe pour application sous-marine (PICOS)	MEFI	26/01/00	En cours d'instruction
HOUVENGHEL HENNEQUIN	Etude de conception d'un système d'énergie pile à combustible stationnaire	ANVAR	26/10/99	Notifié Janvier 2001
EDF – Division R&D	Réalisation d'une cellule complète de pile à combustible SOFC fonctionnant à température intermédiaire (600-800° C)	ADEME	26/01/00	Notifié déc. 2000
ARMINES	Etude et réalisation par coulage en bande et cofrittage de cathodes en manganite de lanthane pour piles à combustible à oxyde solide	ADEME	8/12/99	Notifié déc. 2000
AIR LIQUIDE	Optimisation des gestions hydrauliques, thermiques et électriques du concept de pile à poreux de type De Nora	MR	26/10/99	Déc. 1999
Université de Poitiers (Faculté des Sciences)	PACTOL-DIRECT	ADEME	16/11/00	En instruction

On remarque que sur ces 28 dossiers labellisés, la moitié (14) concerne des travaux axés sur le cœur de pile. Sept projets portent sur les problèmes de production et de stockage de l'énergie. Par contre un seul projet est consacré à la gestion d'un système générateur à pile à combustible, celui d'Alstom transport SA, et un seul également à la conception d'ensemble d'un tel système.

Les auxiliaires des piles à combustible dont nous avons souligné la très grande importance n'exercent visiblement pas une grande séduction sur les chercheurs : un seul projet, celui de RBC, concerne le développement d'un nouveau reformeur.

On peut se féliciter de la création et de l'existence du Réseau qui peut certainement être un outil très intéressant pour donner de la cohérence aux actions et de développer les échanges d'informations.

Quelques observations doivent cependant être faites.

Comme on le voit un certain nombre de dossiers sont notés « en cours d'instruction » c'est-à-dire en cours d'examen par les organismes de financement. Cette situation est due au fait que la labellisation n'ouvre pas droit de façon automatique au financement.

Cette labellisation est un point de passage obligé permettant de juger de la validité technique d'un projet et, surtout, de sa compatibilité avec la stratégie du Réseau. Mais le label est donné sans demander l'avis des financeurs auxquels appartient en dernier ressort la

décision de financement. Cela implique de nouvelles démarches de la part des demandeurs sans garantie de résultats.

C'est là une critique qui est faite de façon quasi unanime à cette règle du Réseau.

Cet aspect est d'autant plus critiquable que les financeurs appliquent de leur côté leurs propres règles.

Il y a ainsi des différences dans les aides selon l'organisme financeur .

Le ministère de la recherche et l'A.D.E.M.E. subventionnent les projets alors que le ministère de l'industrie et l'A.N.V.A.R. accordent des avances remboursables en cas de succès.

Les aides publiques sont trop hétérogènes. Cette situation entretient une certaine incompréhension parmi les bénéficiaires.

Compte tenu du caractère encore très largement novateur du domaine, il conviendrait que toutes les aides publiques accordées aux projets soutenus par le Réseau soient des subventions. Une évolution vers des aides remboursables ne devrait se faire que lorsque les innovations concernent des produits plus proches du marché, ce qui n'est pas encore du tout le cas.

Au surplus un certain nombre d'autres règles s'imposent aux financeurs notamment celles de la comptabilité publique.

Selon celles-ci il n'est pas possible d'accorder des aides supérieures aux fonds propres des demandeurs. Ce sont, de fait, les entreprises créées avec peu de capitaux qui sont pénalisées, quel que soit leur dynamisme et leur inventivité. Par contre les grandes entreprises sont favorisées.

S'il est évidemment nécessaire que des règles existent en matière d'attribution des fonds publics il est très souhaitable que l'aspect plus qualitatif possède un certain poids dans l'attribution de ces aides.

Concernant plus spécialement les subventions, les taux d'aides peuvent atteindre 50% pour les opérateurs privés et 100% des coûts marginaux pour les organismes de recherche publics. Les petites entreprises privées sont là aussi désavantagées.

Sur la base des dossiers financés jusqu'à présent, le taux d'aide est compris entre 30 et 40% pour les entreprises, ces attributions respectant bien entendu les règles européennes en matière de recherche et développement.

On peut être un peu déçu devant l'ampleur limitée de ces aides. Les petites entreprises ne sont pas vraiment avantagées par un tel système.

Il conviendrait sans doute de réexaminer le mécanisme de ces aides afin de le redéployer vers les petites entreprises innovantes pour leur donner les moyens de développer leurs idées.

Il faudrait peut-être tout simplement envisager de mettre à la disposition du Réseau « une enveloppe » destinée à subventionner, dans le respect des règles européennes sur les aides à la recherche les projets labellisés. Des modalités devraient être définies pour proportionner réellement l'aide au caractère innovant et aux moyens des entreprises.

En considérant les premiers projets retenus, on peut également se demander si ce type de procédures n'a pas tendance à favoriser des actions plutôt pointillistes de laboratoires au détriment d'un travail d'ensemble.

La question se pose donc de savoir s'il ne serait pas plus utile, plutôt que de vouloir aider le maximum de petits projets, de concentrer les financements sur quelques programmes en nombre certes plus restreints mais s'avérant cruciaux pour le développement d'une industrie de la pile à combustible en France.

b – L'activité dans le domaine des piles à combustible d'un certain nombre d'acteurs

Nous présenterons l'activité des industriels, de quelques acteurs du secteur énergétique et de la recherche.

- L'activité des industriels

Nous évoquerons successivement les constructeurs automobiles et quelques industriels.

- Les constructeurs automobiles

Nous avons déjà évoqué l'action de Renault par sa participation aux différents programmes PREDIT I et PREDIT II ainsi que son programme de recherche engagé avec Nissan.

L'activité de Renault dans ce domaine est également liée avec celle de PSA dans la continuation du projet « HYDRO GEN » et dans le projet « FUERO » de recherche sur les piles à combustible et ses composants pour une application automobile dont l'objectif est pour PSA d'« apprendre le fonctionnement d'une pile à combustible embarquée ».

Il semble que pour les responsables de PSA, la pile à combustible suscite des interrogations non encore levées.

Les difficultés techniques, notamment celles présentées par le fonctionnement des membranes et du reformeur, les incertitudes en matière de carburant pour alimenter ces piles à combustible ainsi que les prix de revient de cette technique sont les raisons d'une attitude que l'on peut qualifier de « réservée ».

Cependant les responsables de cette entreprise sont très attentifs aux nécessités imposées par la très vive concurrence régnant sur le marché automobile.

Ils sont en effet tout à fait conscients du fait qu'il y a un réel danger à être, selon leur expression, des « suiveurs » du fait de la difficulté ensuite de pouvoir entrer au moment opportun dans des groupements déjà constitués. Ils ont donc considéré, avec justesse, qu'il

faut continuer à travailler sur le sujet pour, le jour venu, pouvoir éventuellement s'intégrer dans un consortium dans de bonnes conditions.

· Quelques autres acteurs : Alstom et Technicatome

- Alstom

Alstom est présent dans les piles à combustible à la suite du rachat de la division d'énergie de A.E.G.. En effet A.E.G. s'était engagé dans ce secteur en liaison avec Daimler-Benz qui travaillait déjà en collaboration avec Ballard.

Alstom a donc poursuivi cette action, celle-ci relevant de son département « Transport-distribution d'énergie » et non de celui consacré à la production d'énergie.

L'activité propre d'Alstom sur ce marché est d'être partenaire de Ballard pour l'importation et la fabrication de systèmes d'origine Ballard sur le marché européen. Depuis 1997, quatre unités de 250 kilowatts de puissance ont été ainsi vendues en Suisse, en République fédérale d'Allemagne, aux Pays-Bas et en Belgique. Une usine de fabrication doit être installée en République fédérale d'Allemagne.

Alstom participe à deux projets du Réseau « pile à combustible ».

Il nous semble quelque peu regrettable qu'une société comme Alstom qui occupe des positions très importantes dans la fourniture d'énergie et la construction de moteurs électriques de grande puissance ne s'engage que de façon assez marginale dans ce secteur.

Certes, il est possible qu'un licencié puisse s'affranchir de sa dépendance. Mais, outre la politique de protection rigoureuse de ses brevets par Ballard, il faut pour cela avoir une attitude dynamique de recherche, ce qui ne semble pas être le cas de la part d'Alstom.

· Technicatome

Technicatome, compte tenu de ses compétences en ingénierie du domaine nucléaire, nous semble devoir pouvoir être un acteur essentiel d'une stratégie « pile à combustible » en France.

En effet ce groupe possède une excellente connaissance dans des domaines importants pour les piles à combustible :

- énergie et propulsion des navires, spécialement dans les sous-marins,
- énergétique : électricité, échanges thermiques, conversion et distribution d'énergie, systèmes fluides, systèmes mécaniques,
- contrôle – commande de systèmes complexes.

Technicatome possède de façon indubitable une très grande capacité à maîtriser la conception et la réalisation d'ensembles complexes ainsi qu'une expertise de premier ordre compte tenu d'un effectif de 500 ingénieurs confirmés dans tous ces domaines.

Technicatome est présent dans un certain nombre de programmes menés en coopération concernant la pile à combustible : projet PREDIT, projet d'étude et de développement d'une plaque bipolaire optimisée, développement d'une source d'énergie de secours à pile à combustible de 10 kilowatts et d'une chaîne de traction hybride de 2,5 kilowatts pour scooter.

Très récemment, une entreprise de type « *start up* » dénommée « Helion » a été créée dans laquelle la part de Technicatome est de 95%. L'intérêt de cette nouvelle société devrait se porter sur la réalisation d'une pile de type P.E.M. d'environ 50 kilowatts. En raison, notamment, des liens avec le C.E.A. et Nuvera cette entreprise devrait s'implanter près d'Aix-en-Provence.

Cette entreprise est aussi coordonateur d'un projet du Réseau « pile à combustible ». Celui-ci vise à développer un système de production d'hydrogène à partir de gaz commercialement distribués et à l'intégrer sur une pile à combustible de type P.E.M. pour une application aux transports en commun.

L'engagement de Technicatome dans cette nouvelle technique ne paraît pas être à la mesure de son indéniable capacité intellectuelle et technique.

Celle-ci lui permettrait sans aucun doute de réaliser les études et les essais de tous les systèmes de production d'énergie mettant en œuvre les piles à combustible et également de faire réaliser à l'intérieur du groupe ou dans l'industrie les composants du système.

Certes Technicatome n'est pas un électro-chimiste. Mais la place à prendre est celle d'un fédérateur industriel à vocation européenne, d'un intégrateur, d'un chef d'orchestre. Technicatome pourrait certainement jouer ce rôle avec une grande compétence comme semblait l'envisager, il y a quelques mois, sa direction. Mais il serait certainement nécessaire que cette décision ne tarde pas.

- Quelques acteurs du secteur énergétique

Nous évoquerons l'action d'Electricité de France et de Gaz de France, et également l'association très récente d'Air Liquide et de Nuvera.

- L'action d'Electricité de France

E.D.F. conduit une action de recherche et de développement selon deux axes principaux : les activités de recherche appliquées et les actions de démonstration.

La recherche appliquée s'effectue de façon principale dans le cadre d'actions du Réseau « pile à combustible ».

Elle est consacrée au développement de nouvelles membranes haute température pour des piles à combustible de type P.E.M. et au développement de nouveaux matériaux pour des piles à combustible de type S.O.F.C. afin d'en réduire la température de fonctionnement jusqu'aux alentours de 750°C.

E.D.F. procède également à des essais en laboratoire de performances de membranes et de cellules de piles à combustible de type P.E.M. et S.O.F.C.

Les actions de démonstration sont les suivantes :

- installation et exploitation, comme cela a déjà été évoqué, en partenariat avec G.D.F. de la première pile à acide phosphorique de moyenne puissance implantée en milieu urbain en France à Chelles (Seine-et-Marne),
- participation à l'expérimentation d'une pile de type PEM de 250 kw électriques à Berlin dans le cadre d'un projet mené par la compagnie d'électricité allemande Bewag,
- préparation avec G.D.F. du projet de démonstration d'une pile de moyenne puissance à Forbach,
- participation au projet de l'électricien allemand EnBW de démonstration d'une pile de 1 mégawatt électrique couplée avec des micro turbines avec possibilité de mise en service en 2003.

· L'action de Gaz de France

Outre la participation avec E.D.F. à l'installation et à l'exploitation de la pile de Chelles et de celle de Forbach, G.D.F. a lancé un programme de test et de démonstration concernant une petite pile de type PEM de 5 kilowatts installée dans un pavillon expérimental de son centre de recherches de Saint-Denis.

Concernant les piles de type S.O.F.C., G.D.F. conduit des actions de recherche et de développement sur de nouveaux types d'anodes pouvant fonctionner vers 850°C, sur la comparaison des méthodes de production de ces piles et sur la durée de vie des cœurs de ce type de pile.

Pour cela, a été mis en place un laboratoire ouvert aux fabricants de piles pour étudier leurs performances sur une large gamme de gaz et de mélanges. L'intérêt de G.D.F. pour les piles à combustible est lié uniquement à leur fonctionnement éventuel au gaz. G.D.F. intervenant alors en tant que fournisseur de combustible. G.D.F. n'est pas et ne sera pas constructeur de piles.

G.D.F. participe au projet de EnBW.

Enfin il convient de noter que G.D.F. vient de passer commande, à la fin du mois de mai dernier auprès de H Power, de six piles à combustible d'une puissance unitaire de 3 kw destinées à un usage résidentiel expérimental.

· La récente association d'Air Liquide et de Nuvera

Air Liquide et Nuvera viennent très récemment, au début de mars 2001, d'annoncer leur intention de créer une société commune qui sera installée à Grenoble.

Les deux partenaires prévoient d'y investir une centaine de millions de francs et de mobiliser une cinquantaine de chercheurs pour développer à l'échelon mondial des systèmes d'équipement complets de production d'énergie à partir de piles à combustible et de reformeurs pour des applications portatives, stationnaires ou dans le domaine des transports.

L'objectif est de parvenir à l'industrialisation et à la commercialisation de piles à combustible.

Le développement sera fait en concertation avec le Commissariat à l'énergie atomique et son laboratoire le L.E.T.I., mais aussi avec d'autres industriels de la région comme Schneider Electric, Photowatt et des constructeurs automobiles.

Nous ne pouvons que nous féliciter de cette création. Elle peut être le regroupement que beaucoup attendaient et souhaitaient dans ce domaine. L'association avec le C.E.A. et le L.E.T.I. permettra de grandement valoriser le travail déjà accompli par ces organismes dans ce domaine.

- Quelques acteurs du secteur de la recherche

Nous présenterons l'action du Commissariat à l'énergie atomique, de la SORAPEC et du Centre national de recherche technologique (C.N.R.T.).

- Le Commissariat à l'énergie atomique

Le C.E.A. poursuit une activité dans le domaine des piles à combustible depuis le début des années 1990. A partir de 1992 il coopère avec Renault et Peugeot et participe à des actions de recherche européennes dans le cadre respectivement du programme PREDIT et des 4ème et 5ème Programmes cadres de recherche et de développement.

En juin 1999, le C.E.A. s'est vu confier par le ministère chargé de la recherche et de la technologie en partenariat avec l'A.D.E.M.E. l'animation du Réseau « pile à combustible ».

Dans le cadre des directives du Comité interministériels du 1er juin 1999, le C.E.A. a mis en place son plan d'action « nouvelles technologies de l'énergie ». Celui-ci prévoit d'ici 2003 le triplement des moyens, effectifs et budgets, affectés principalement aux recherches sur les technologies liées à l'hydrogène avec application notamment aux piles à combustible.

Le C.E.A. concentre ses actions dans ce domaine sur les piles de type P.E.M. et S.O.F.C.

Les études concernent aussi bien le problème des membranes avec les recherches portant, en liaison avec le C.N.R.S., sur un matériau polyimide pour, éventuellement, remplacer le *Nafion* que les combustibles et les problèmes de sûreté.

Cet organisme est également coordonnateur de trois projets du Réseau « pile à combustible ».

Le C.E.A. vient de décider de lancer une recherche sur fonds propres sur les micro piles à méthanol direct, comme nous l'avons déjà évoqué.

Ce secteur de la micro pile est certainement l'un des plus judicieux à explorer pour le C.E.A. compte tenu de ses compétences en micro électronique et en électro-chimie. De fait le L.E.T.I. de Grenoble est ainsi intimement associé à ce programme qui vient de débiter.

L'objectif du C.E.A. est d'aboutir à un modèle de démonstration afin de pouvoir trouver un indispensable partenaire industriel pouvant agir comme relais, cet organisme n'ayant naturellement aucune vocation à industrialiser.

Le cadre du C.E.A. nous paraît tout à fait privilégié pour les recherches sur les piles à combustible dans la mesure où existent à l'intérieur même de cet organisme de multiples compétences tels que électrochimie, maîtrise des matériaux métalliques, céramiques, polymères, physique des écoulements et thermique.

· La SORAPEC

Cette petite société de recherche en électrochimie dont l'effectif est actuellement de 10 personnes a été créée en 1974 par des chercheurs du C.N.R.S.

Elle s'est spécialisée dans l'étude et la réalisation de solutions innovantes dans le domaine du stockage et de la production d'énergie électrique et la mise au point de matériaux spéciaux par procédés électrolytiques. Elle a été acquise par la société américaine EC Power en 1998 à la suite d'un certain nombre de difficultés financières.

La SORAPEC est membre du Réseau « pile à combustible » et est présente dans quatre projets retenus. Elle est coordonateur de deux projets : l'un concerne l'étude et la création d'un atelier pilote d'industrialisation de polyéléments de cœur de pile de type P.E.M. et l'autre l'étude et la réalisation d'électrodes à haute puissance surfacique pour pile de type P.E.M.

Elle participe également :

- au projet coordonné par l'I.F.R.E.M.ER de réalisation d'une pile de 2 kilowatts électriques utilisable dans les grands fonds marins pour actionner en cas de besoin les vannes de sécurité des puits de pétrole en exploitation,

- au projet coordonné par le C.E.A. de réalisation par coulées de membranes composites utilisables dans des piles à des températures supérieures à 120°C.

Cette petite société semble connaître des difficultés financières chroniques et être continuellement à la recherche de contrats de recherche et de fonds afin de pouvoir investir.

- Le Centre national de recherche technologique

Le 12 juillet 2000 ont été installés les douze premiers Centres nationaux de recherche technologique (C.N.R.T.) dont l'un est consacré aux piles à combustible.

Les Centres nationaux de recherche technologique se fondent sur une collaboration étroite entre la recherche publique, organismes publics de recherche, laboratoires universitaires, et la recherche privée, centres industriels, P.M.E. – P.M.I. Cette liaison, outre le développement local, vise à accroître la capacité d'innovation et la compétitivité de l'industrie française dans un certain nombre de secteurs, et notamment dans les piles à combustible.



Le C.N.R.T. « piles à combustible » est en cours d'installation à Belfort et devrait être opérationnel en juillet 2002. Un accord cadre a d'ores et déjà été signé avec l'Université de technologie de Belfort – Montbéliard et le Commissariat à l'énergie atomique. Il est prévu que sera développée une plate-forme d'essais pour expérimenter l'usage de la pile à combustible dans les bus et les automobiles particulières. A cet égard la proximité des centres de production de Peugeot à Sochaux et d'Alstom à Belfort constitue un avantage important.

Quatre groupes de travail seront créés :

- reformeurs et phénomènes de catalyse
- auxiliaires : compresseurs, détendeurs, échangeurs,
- convertisseurs et dispositif de stockage d'électricité,
- groupe stratégique de réflexion.

L'aspect « système » et électronique de puissance sera également abordé pour étudier la marche en dynamique du système générateur à pile à combustible et pendant les phases transitoires, ce qui est une orientation très positive.

Enfin, il convient de signaler qu'un certain nombre de pôles universitaires mènent une action de recherche dans ce domaine, notamment :

- le laboratoire d'électrochimie et de physicochimie des matériaux et des interfaces de Grenoble,
- l'université de Poitiers,
- le Conservatoire national des arts et métiers,
- l'Ecole de chimie de Paris.

Contrairement à ce que l'on dit parfois, la France n'est pas un désert en matière de recherche concernant les piles à combustible.

Cependant il faut bien convenir que notre pays ne peut pas être considéré comme à l'avant garde de la recherche dans ce domaine.

Un certain nombre d'acteurs potentiels de cette recherche semblent manifester une grande prudence, si ce n'est une certaine réserve. C'est notamment le cas de nos deux constructeurs automobiles.

Il ne faudrait pas que se répète, en ce qui les concerne, l'affaire du pot d'échappement catalytique. Celui-ci a en effet été quasiment imposé par la République fédérale d'Allemagne quand ses équipementiers ont été prêts.

Il est vrai que depuis PSA s'est bien rattrapé avec la mise au point du filtre à particules et du moteur HDI.

Il faut être conscient que l'enjeu potentiel, concurrentiel et financier, de la pile à combustible pour les automobiles est d'une toute autre échelle que celui du pot d'échappement catalytique.

Il nous semble tout à fait évident que si ce nouveau mode de propulsion parvient, à terme peut-être de dix ou quinze ans, à s'imposer, tous les constructeurs automobiles devront obligatoirement l'adopter quitte à en équiper leur gamme de façon progressive.

Une certaine protection contre cette évolution est pour l'instant fournie par le fait que la pile à combustible pour des applications automobiles n'est pas encore complètement au point quant à son usage pour la motorisation.

En tout état de cause on ne peut que recommander à nos constructeurs automobiles de rester très vigilants sur ce dossier.

Il nous semble nécessaire qu'apparaissent au niveau français, une ou deux entreprises ayant vocation à être des ensembliers. Celui-ci qui serait investi de la confiance de tous les intervenants pourrait coordonner l'ensemble des travaux menés dans notre pays.

A notre avis, Technicatome est un de ceux qui possèdent le plus d'atouts pour être celui-ci.

Nous estimons qu'une branche « pile à combustible » pourrait fort bien être ajoutée au pôle « nouvelles technologies » en compagnie de ST Microelectronics de Framatome Connector International (F.C.I.) dans le futur schéma d'organisation de ce qui s'appelle pour l'instant TOPCO. Une entente avec Technicatome serait d'ailleurs certainement possible.

Dans ce domaine, nous estimons qu'il serait utile de faire se rencontrer les chercheurs, les partenaires industriels et les financiers.

Cela pourrait se faire au cours d'un congrès national consacré aux piles à combustible où chacun viendrait exposer ses possibilités et ses attentes. On disposerait ainsi d'une connaissance précise des moyens dont dispose le pays en la matière qui permettrait de réfléchir ensuite à la structure à adopter.

#### **6 – La pile à combustible, une technologie nouvelle... parmi d'autres**

Cette technologie a de nouveau attiré l'attention principalement à la suite de l'échec des accumulateurs pour la propulsion automobile, des besoins énergétiques en très forte croissance d'un nombre toujours plus considérable d'appareils électroniques portatifs, des normes devenues de plus en plus sévères en matière d'émissions de polluants par les automobiles et aussi par la réflexion sur la diminution inéluctable des sources d'énergie fossile.

Mais ces mêmes contraintes qui ont permis le redéveloppement de la pile à combustible ont aussi fait progresser, et feront encore certainement progresser, les techniques plus classiques.

La pile à combustible ne réapparaît donc pas dans un monde où toutes ces techniques qui ont maintenant plus d'un siècle de développement derrière elles seraient devenues complètement obsolètes. Elle devra donc affronter cette concurrence.

Dans les très faibles puissances pour l'alimentation des appareils électroniques portables, les piles à combustible seront concurrentes des accumulateurs.

A un niveau supérieur, jusqu'à des puissances de l'ordre de 10 kilowatts, ce sont les batteries qui seront les concurrentes.

A partir de 10 kilowatts jusqu'aux alentours de 100 kilowatts, les moteurs et les mini turbines seront concurrencés par les piles à combustible de type P.E.M., A.F.C. et P.A.F.C.

Au niveau des 100 kilowatts de puissance arrivera la concurrence des M.C.F.C. et des S.O.F.C.

Pour les puissances de 1 Mw et au delà, ce sont les turbines qui font concurrence aux M.C.F.C. et aux S.O.F.C., ces dernières pouvant être couplées avec des turbines.

Pendant que les piles à combustible continuent à se perfectionner, les piles, les batteries et les moteurs à combustion interne poursuivent leur évolution et font de nouveaux progrès. D'ailleurs il est probable que les progrès des piles à combustible auront peut-être comme conséquence de faire progresser encore plus vite toutes ces techniques traditionnelles.

Nous évoquerons l'évolution des batteries et des moteurs à combustion interne qui sont les concurrents les plus redoutables des piles à combustible.

#### A – L'évolution des batteries

Dans une batterie, l'électricité doit être conservée dans les composants chimiques, généralement des solides non organiques, qui doivent être emballés sous la forme la plus appropriée.

On peut faire une distinction entre les batteries non rechargeables et rechargeables.

##### a - Les batteries non rechargeables

Ce sont les batteries utilisées dans les petits appareils électriques comme les jeux et jouets, le matériel de photographie, les calculatrices ou les montres. Techniquement, ce sont des batteries au carbone/zinc, alcaline/manganèse, au mercure ou zinc/air.

Il ne semble pas que des progrès technologiques très substantiels soient actuellement sur le point de déboucher à l'heure actuelle pour ce type de batteries.

##### b - Les batteries rechargeables

Il s'agit là d'un ensemble comprenant essentiellement les batteries au plomb/acide, au lithium-ion, nickel-hydrure, nickel-cadmium et polymère.

Les batteries rechargeables sont essentiellement utilisées pour l'équipement des automobiles et des systèmes d'alimentation de secours et pour l'alimentation des petits appareils électroniques.

Nous évoquerons successivement les possibilités d'évolution de ces deux catégories.

· Les batteries au plomb/acide

Cent quarante ans après son invention ce type de batterie équipe encore la totalité des automobiles commercialisées.

Pourtant elle n'a pas, et de loin, un excellent rendement comparé à ses rivales comme le montre le tableau suivant :

Type	Energie spécifique en wh/kg
Acide-plomb	30 - 35
Nickel-cadmium	50
Nickel-métal-hydrure	60 – 80
Lithium-ion	150 – 160

Source : d'après l'Usine Nouvelle

Par contre les prix de revient sont, de façon massive, à son avantage :

Type	Prix en F/kWh
Acide-plomb	500 - 750
Nickel-cadmium	1 650
Nickel-métal-hydrure	plus de 5 000
Lithium-ion	plus de 5 000

Source : d'après l'Usine Nouvelle

Comme on le sait, ces batteries sont constituées d'un empilement de plaques positives et négatives intercalées et isolées par des séparateurs et baignant dans un électrolyte composé d'acide sulfurique et d'eau. Une grille collecte le courant pour chaque plaque et sert de support à la matière active. Celle dernière est constituée de dioxyde de plomb pour la plaque positive et de plomb spongieux pour la plaque négative. Elle réagit avec l'acide sulfurique lors de l'oxydoréduction.

La première amélioration qui s'est généralisée depuis deux ou trois ans a consisté à remplacer l'alliage des grilles constitué de plomb et d'antimoine dont la corrosion rapide entraînait une forte consommation d'électrolyte. Pour remédier à cet inconvénient on lui substitue maintenant un alliage plomb – calcium auquel on ajoute de l'étain pour améliorer la conduction.

Une autre voie d'amélioration consiste à mieux exploiter la matière active positive en augmentant, par de nouveaux procédés de fabrication, le pourcentage de dioxyde de plomb de 30%, ce qui fait augmenter d'autant le rendement de la matière active.

Une autre technologie est la batterie étanche à recombinaison de gaz.

Celle-ci possède des séparateurs en fibre de verre imbibés d'électrolyte permettant à l'oxygène et à l'hydrogène de se recombinaison en eau à l'intérieur. Mais le prix de revient de ce

type de batterie est d'environ 30% plus élevé que les modèles classiques, ce qui freine son développement.

Enfin la compagnie américaine Exxide vient de commercialiser à la fin de l'année dernière une nouvelle batterie dite « spiralee ».

Dans ce nouveau type, les faisceaux de plaques rectangulaires sont remplacés par six cellules contenant chacune trois longues couches fines - l'anode, le séparateur et la cathode – enroulées sur elles-mêmes. La faible épaisseur de la plaque enroulée permet une collecte plus rapide des électrons par la grille de la cathode. Cela permet d'augmenter la puissance massique et d'atteindre ainsi 400 w/kg contre 80 pour les modèles classiques. Cependant le prix de ce type de batterie est de l'ordre de trois fois le prix d'un modèle courant.

Cependant une menace pèse sur elle car il y a et il y aura de plus en plus dans l'avenir une demande croissante des automobiles en puissance électrique.

Actuellement malgré l'abondance des équipements électriques, une voiture actuelle peut encore se contenter d'une batterie de 12 volts.

Mais dans les années à venir cette tension sera insuffisante pour alimenter des fonctions de plus en plus gourmandes en énergie. Aujourd'hui la puissance de la consommation électrique d'une voiture haut de gamme est proche de 1,5 kilowatt.

A partir de 2005 le même modèle devrait consommer environ 5 kilowatts. Cette consommation supplémentaire sera entraînée par la multiplication des nouvelles fonctions qui feront appel à l'électricité comme, par exemple, les soupapes électromagnétiques, la direction et les freins électriques, la boîte de vitesse robotisée ou le contrôle des suspensions.

Il faudra alors pouvoir disposer d'une batterie de 42 volts tout en réduisant son poids, compte tenu de l'impératif de diminuer la consommation. Cette évolution qui sera inéluctable obligera sans doute les fabricants de batteries traditionnelles qui ont perçu cette menace, à faire faire de très grands progrès techniques à leurs produits.

Néanmoins on peut estimer que ce type de batterie est encore appelé à être très utilisé dans l'avenir.

Son premier atout est son prix relativement bas qui pourra lui permettre de conserver pendant encore assez longtemps de larges marchés et, surtout, celui de l'automobile classique, compte tenu de l'importance du critère de compétitivité/prix de cette dernière par rapport non seulement aux piles à combustible mais aussi aux autres types de batteries rechargeables.

Son second atout est qu'il restera toujours utile dans le fonctionnement d'un système générateur à pile à combustible dans la mesure où il sera nécessaire pour le démarrage des auxiliaires et du cœur de pile lui-même, pour gérer les changements de phase et pour pouvoir récupérer l'énergie du freinage dans le cas des applications automobiles.

#### · Les autres batteries rechargeables

Il y a trente ans, seule la technologie nickel-cadmium était disponible pour l'alimentation des systèmes électroniques portatifs.

Au cours de la dernière décennie, trois nouvelles technologies sont apparues : nickel-métal-hydrures, lithium-ions et lithium-polymère.

Le marché de ce type de batteries rechargeables atteignait une valeur de l'ordre de 4,3 milliards de dollars et devait croître de 30% en 2000.

Les deux premiers marchés d'application de ces batteries sont ceux du téléphone portable (48% du marché) et des ordinateurs portables et les répertoires électroniques (40%). Ces deux applications sont en forte croissance.

En 1998 les batteries nickel-cadmium représentaient 31 % du marché, les nickel-métal-hydrures 21% et les lithium-ions 48%.

Les projections estiment que le marché de ces dernières devrait croître de 50% dans les deux ou trois prochaines années.

Il y a donc à l'heure actuelle un très vaste marché pour ce type de batteries.

La batterie lithium-ions pourrait peut-être trouver une application dans la propulsion des automobiles à moteur électrique qui, jusqu'à présent, ont été un échec du fait d'une autonomie et d'une vitesse de pointe trop faibles et d'un temps de rechargement des batteries prohibitif.

En effet une expérience réussie de véhicule électrique à batteries lithium-ions de nouvelle génération fabriquées par la société SAFT vient d'avoir lieu en Poitou-Charentes dans le cadre du programme VEDELIC.

Ce véhicule a parcouru plus de 200 kilomètres, sans devoir recharger ses accumulateurs. L'autonomie ainsi atteinte est le double de celle d'une automobile à batteries cadmium-nickel.

Cependant la technique lithium-ions, la plus performante, a atteint aujourd'hui une énergie spécifique, de l'ordre de 150 – 160 wh/kg, ce qui semble être sa limite supérieure.

Elle pourra cependant concurrencer les batteries au plomb dans un certain nombre d'utilisations à la condition que son coût diminue très fortement.

Or, il apparaît que pour faire progresser les batteries, il est nécessaire d'employer, avec une tension de plus en plus élevée, des éléments de plus en plus légers.

En considérant le tableau périodique des éléments, on s'aperçoit ainsi que le lithium est le troisième élément le plus léger, après l'hélium et l'hydrogène. En continuant vers le haut de ce tableau on débouche ainsi sur... la pile à combustible !

Cette technologie de batteries risque cependant d'être très rapidement concurrencée par les micro piles à combustible dès qu'un certain nombre de problèmes techniques affectant encore celles-ci seront résolus. En effet, comme on l'a vu, leur prix ne sera vraisemblablement pas un obstacle compte tenu de l'ampleur de la demande potentielle sur le marché des appareils électroniques portables.

B – L'évolution des véhicules à moteur à combustion interne

Selon la mission interministérielle de l'effet de serre, les transports sont les premiers producteurs de gaz à effet de serre et notamment de dioxyde de carbone.

Le moteur à explosion, plus que centenaire maintenant, est sur la sellette de ce point de vue depuis maintenant plus de vingt ans. A maintes reprises de nombreux augures pronostiquaient sa fin rapide pour cause d'augmentation de la pollution.

Aujourd'hui ce moteur est toujours bien vivant et on peut estimer qu'il se porte plutôt bien. Il a fait d'énormes progrès tant du point de vue de la consommation que de la diminution de ses émissions polluantes.

Face à la technologie de la pile à combustible, il ne pourra survivre que s'il est capable de relever le défi des émissions polluantes.

L'évolution des véhicules à moteur à combustion interne s'est faite et continuera sous l'influence des réglementations restreignant les émissions polluantes.

#### a - L'évolution de la réglementation des émissions polluantes

La réglementation européenne des émissions polluantes a évolué comme le montre les valeurs suivantes en g/kWh :

	EURO 1 1er juillet 1992	EURO 2 1er octobre 1995	EURO 3 1er octobre 2000	EURO 4 2005	EURO 2008
Oxyde de carbone (CO)	4,5	4	2,1	1,5	1,5
Hydro- carbures (HC)	1,1	1,1	0,66	0,46	0,46
Oxyde d'azote (NO <sub>x</sub> )	8	7	5	3,5	2
Particules (puissance du moteur ≤ 85 kw)	0,63	0,25	0,13	0,02	0,02
Particules (puissance du moteur > 85kW)	0,36	0,15	0,1	0,02	0,02
Fumées en m <sup>-1</sup>	-	-	0,8	0,5	0,5

On voit qu'avec les normes EURO 3 maintenant applicables, il y a une importante réduction des émissions de gaz et de particules ainsi que des fumées.

Les futures normes EURO 4 et EURO 5 devraient poursuivre cette réduction, notamment au niveau de l'oxyde d'azote.

Pour satisfaire à ces normes, les constructeurs d'automobiles ont mis au point des solutions techniques très élaborées.

#### b - Des solutions techniques très élaborées

Ces techniques font massivement appel à l'électronique pour la gestion des systèmes d'injection très sophistiqués qui permettent le fonctionnement du moteur en charge stratifiée.

Ce type de combustion est un mode de fonctionnement très économique pendant la majorité du temps d'utilisation de l'automobile, statistiquement plus de 70%.

Le système piloté par le calculateur adapte la richesse du mélange à la demande de puissance. Quand celle-ci est minimale, on fonctionne en mélange ultra pauvre et inversement en cas de demande de puissance maximale.

Cette technique présente l'avantage d'améliorer le rendement de la combustion et de diminuer les pertes thermiques. Mais, en revanche, ce type de moteurs émet, compte tenu des excès d'air, un niveau d'oxydes d'azote qu'aucun catalyseur classique n'est capable de réduire. Aussi doit-il être complété par un catalyseur à accumulation de  $\text{NO}_x$  qui a besoin d'être fréquemment régénéré.

De nouvelles techniques sont aussi mises en œuvre pour le moteur Diesel dont la réduction des émissions polluantes est au cœur des préoccupations des constructeurs.

Là encore c'est l'électronique qui est à la base des nouvelles technologies. Ainsi de nouveaux systèmes d'injection à rampe commune ont remplacé les anciennes pompes en ligne, les gaz d'échappement sont désormais recyclés et la gestion « tout électronique » a été généralisée.

Cependant les émissions de particules handicapent fortement les moteurs Diesel.

Il convient de rappeler que Peugeot est le premier à avoir mis au point un filtre brûlant les particules particulièrement performant. Ce filtre à particules est sans doute appelé à devenir dans un futur proche un équipement standard des moteurs Diesel modernes.

Mais d'autres améliorations des véhicules actuels sont actuellement à l'étude chez un grand nombre de constructeurs.

#### c - Les améliorations à venir

Toutes les études en cours dans ce domaine vont dans le sens d'une diminution encore plus importante des émissions polluantes afin de respecter les futures normes européennes.

Un certain nombre de domaines font l'objet d'études approfondies.



On citera d'abord toutes les recherches liées à l'aérodynamisme essentiellement des carrosseries bien que d'autres éléments soient étudiés de ce point de vue comme, par exemple les roues.

Les travaux d'allègement des véhicules qui permet la diminution de la consommation sont aussi activement poursuivis avec, par exemple, l'emploi croissant de l'aluminium pour les carrosseries.

Mais les améliorations les plus spectaculaires vont concerner les moteurs.

Les systèmes d'injection de carburant vont continuer à focaliser l'attention des chercheurs.

Au delà des injections à rampe commune qui se répandent, des systèmes d'injection multiples séquentielles sont étudiés pour les moteurs Diesel.

Leur principe est de disperser le carburant de façon progressive et variable en fonction du régime de rotation et des sollicitations du moteur. La combustion du mélange air/carburant s'effectue ainsi plus complètement et devrait permettre de réduire de 30% les émissions polluantes. Ce type de système devrait aussi pouvoir s'appliquer aux moteurs à essence.

Un autre domaine de recherche concernant le moteur à essence est la recherche d'une gestion plus sophistiquée des soupapes pour les rendre plus autonomes.

On devrait parvenir ainsi à régler avec autant de précision la quantité d'air injectée dans la chambre de combustion que le volume de carburant.

Au delà de ce réglage, il est d'ores et déjà envisagé, pour parvenir à un fonctionnement réellement sélectif des soupapes, de supprimer l'arbre à cames. Chaque soupape serait alors commandée par un électro-aimant individuel permettant un mouvement optimal en fonction des sollicitations du moteur. Ce système, étudié notamment par Renault, supprimerait également tous les frottements inhérents à l'arbre à cames, ce qui ferait encore diminuer la consommation, donc la pollution.

On peut également évoquer comme piste de recherche la fusion de l'alternateur et du démarreur sous forme d'un « alerno-démarreur » à la fois absorbeur et fournisseur d'électricité.

Il actionnera en effet tous les accessoires électriques du véhicule tout en étant capable d'assister le moteur thermique, notamment en cas de fortes accélérations. Il sera donc possible, à performances égales, d'utiliser un moteur de plus faible cylindrée, donc plus économe en carburant.

Enfin l'alternateur-démarreur pourra assurer seul la propulsion du véhicule aux basses vitesses.

Le développement de ce type de fonction devrait assurer la transition vers les véhicules hybrides.

## C - Vers les véhicules hybrides

Le principe de la motorisation hybride est connu en fait depuis maintenant une dizaine d'années.

Il comprend deux variantes principales : le mode « série » et « parallèle ».

Dans le mode « série », un groupe thermique entraîne un générateur qui charge les batteries. Celles-ci alimentent à leur tour un ou plusieurs moteurs électriques assurant la propulsion.

Dans le mode « parallèle », le véhicule est équipé d'un moteur électrique et d'un groupe motopropulseur à explosion fonctionnant en tandem. Les deux motorisations ont été utilisées soit alternativement, soit simultanément en fonction de la puissance demandée.

Naturellement la gestion d'un tel véhicule nécessite un équipement électronique de commande assez complexe pour le transfert de puissance entre les parties thermiques et électriques de la chaîne de traction.

Comme on le sait, la firme Toyota a été la première à commercialiser un tel véhicule, la Prius, à la fin de 1997 au Japon et à la fin de l'année dernière en France.

Nous ne pensons pas que le moteur à combustion interne disparaîtra dans un laps de temps très bref, compte tenu de ses grandes potentialités de développement et de sa très grande facilité d'utilisation.

Mais il sera certainement confronté un jour à une impossibilité de progresser notamment en terme de réduction d'émissions polluantes, ce dont les prochaines normes européennes tiennent compte, par exemple en matière d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures imbrûlés.

Il n'est évidemment pas possible de déterminer quand ce moment arrivera.

Mais l'arrivée sur le marché de la Toyota Prius et les projets des autres constructeurs, dont Renault et PSA, dans ce domaine des véhicules hybrides montrent, à notre avis, le sens de l'évolution.

Il est probable que l'on assistera à un développement significatif de ce type de véhicule car il représentera certainement la transition vers l'avènement de l'automobile à pile à combustible.

Les architectures hybrides pourraient trouver un terrain particulièrement propice à leur développement dans les véhicules de transport collectif dans la mesure où la demande de véhicules « propres » devrait être de plus en plus importante dans les centres villes. De plus la notion de coût est moins sensible pour ce type de véhicules que pour les automobiles particulières.

Les perspectives d'avènement de la pile à combustible conduisent à réfléchir à la nécessité de la préparation d'une transition énergétique vers le développement de la production d'hydrogène qui pourrait être l'énergie des années futures.

### III - Vers la civilisation de l'hydrogène

Les perspectives de développement des piles à combustible ouvrent des débouchés potentiellement très importants à l'hydrogène.

Il est donc particulièrement important et nécessaire d'aborder les questions liées non seulement à l'utilisation de ce gaz mais aussi à sa production.

Cependant les problèmes qu'il est nécessaire d'évoquer à ce propos sont à la fois très vastes et assez complexes.

Nous ne pensons donc pas que ceux-ci peuvent être traités de la façon la plus complète possible dans le cadre de ce rapport consacré à la pile à combustible.

Il conviendrait en fait que l'Office puisse consacrer à cette question un rapport complet.

Nous proposerons donc que l'Office, à la suite de ce rapport sur la pile à combustible, soit saisi d'une étude sur les perspectives de l'emploi de l'hydrogène.

On évoquera cependant, de façon non exhaustive, un certain nombre de questions concernant ce gaz.

#### 1 – Les caractéristiques et les utilisations de l'hydrogène

##### A – Les caractéristiques de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz connu depuis fort longtemps. En effet les alchimistes l'appelaient l'«air inflammable» et l'obtenaient par traitement de la limaille de fer avec de l'acide sulfurique. Ses propriétés furent précisées par Cavendish en 1766. C'est Lavoisier qui lui donna son nom en 1783 en constatant que sa combustion avec l'oxygène donnait de l'eau.

C'est un gaz incolore, inodore et non toxique. Il est le plus léger de tous les corps dans des conditions normales de température et de pression. Il est quatorze fois moins lourd que l'air, sa densité par rapport à l'air étant de 0,07. En conséquence il a une grande facilité de diffusion à travers les parois métalliques et d'effusion à travers les substances poreuses.

C'est probablement l'élément le plus abondant de l'univers mais ne représente que 0,9% en poids de la croûte terrestre.

La molécule d'hydrogène est très stable thermiquement, ce qui explique sa faible réactivité à basse température. Il est donc nécessaire d'amorcer les réactions à chaud ou utiliser un catalyseur qui favorise sa dissociation.

Il possède le pouvoir calorifique massique le plus élevé : 3,39 thermies par kilogramme, c'est-à-dire sensiblement trois fois celui des hydrocarbures et quatre fois et demie celui du charbon.

C'est après l'hélium, le gaz le plus difficile à liquéfier : sa température de liquéfaction est en effet de - 253 °C. C'est un assez bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.

L'hydrogène présente trois inconvénients majeurs :

- son pouvoir calorifique volumique est faible : à l'état gazeux et à la pression atmosphérique, ses rapports avec le méthane et l'essence sont respectivement de 1 à 3 et de 1 à 290. A l'état liquide, ces rapports sont encore de 1 à 2,3 avec le méthane liquide et à 3,5 avec l'essence. Ces caractéristiques engendrent des difficultés de stockage,

- son emploi exige certaines précautions en raison de sa faible énergie d'inflammation (0,02 mJ contre 0,44 mJ pour le méthane), en raison de l'étendue de son domaine

d'inflammabilité, de 4 à 75 %, et de son aptitude à diffuser par suite de la petitesse de sa molécule,

- son domaine d'inflammabilité est très vaste, de 4 à 75 % en volume.

Enfin il convient de noter que l'hydrogène natif n'existe pas sur la Terre. Il est donc nécessaire de l'extraire d'un certain nombre de corps pour pouvoir en disposer. Ce n'est donc qu'un vecteur secondaire d'énergie.

Les travaux de recherches sur l'hydrogène se répartissent autour de trois axes principaux : production, stockage, application au fonctionnement des piles à combustible.

Ils sont pour l'essentiel effectués dans les laboratoires du C.N.R.S., de l'Université, des Grandes Ecoles, du C.E.A. qui vient d'annoncer la création d'un programme de recherche « hydrogène ». E.D.F. et G.D.F. ont également une activité de recherche dans ce domaine. Enfin il faut aussi mentionner les travaux de recherche de certains industriels, comme par exemple Air Liquide en France.

L'hydrogène est d'ores et déjà un gaz industriel de la première importance.

## B – Les utilisations industrielles de l'hydrogène

Il est produit environ 45 millions de tonnes d'hydrogène par an dont 10% en Europe. Un certain nombre de grands producteurs d'hydrogène sont des firmes européennes : Air Liquide, Air Products, Linde, Messer Griesheim.

L'hydrogène est couramment utilisé dans un grand nombre de secteurs industriels : dans l'industrie des corps gras, en électronique, comme carburant et dans les industries chimiques.

### a - L'industrie des corps gras

Les corps gras insaturés alimentaires (colza, soja, tournesol,...) doivent être hydrogénés afin de les rendre solides à la température ambiante et augmenter leur aptitude à la conservation.

Les corps gras non alimentaires sont également hydrogénés pour fabriquer du savon, des lubrifiants, des peintures et des vernis.

### b – L'industrie électronique

L'hydrogène est utilisé pour l'élaboration de cristaux de semi conducteurs de silicium.

### c – L'hydrogène carburant

La température de flamme très élevée (2 700°C) atteinte avec l'oxygène l'a fait choisir sous forme liquide comme propulseur des fusées et engins spatiaux.

### d – Les industries chimiques

Les utilisations de l'hydrogène sont très variées dans ce domaine :

- synthèse de l'ammoniac par réaction avec l'azote pour fabriquer essentiellement des engrais, mais aussi des explosifs, des matières colorantes ou des résines,

- raffinage : hydrosulfuration des fuels pour éliminer le soufre, hydrosulfuration pour améliorer les lubrifiants et pour produire des essences spéciales,

- synthèse du méthanol par réaction du gaz à l'eau pour la fabrication de caoutchoucs, de résines et de produits de base pour la synthèse chimique comme l'acide acétique, le chlorure de méthyle, les esters...

- chimie organique : hydrogénation d'une part d'un certain nombre de matières pour la production de colorants et d'autre part de précurseurs des sulfamides ou des vitamines.

- chimie minérale : production d'eau oxygénée.

Les utilisations de l'hydrogène dans l'industrie sont donc très diversifiées.

Les piles à combustibles ouvrent à ce gaz des perspectives importantes de développement en tant que carburant.

## **2 – L'hydrogène, carburant des piles à combustible**

### A – La fabrication de l'hydrogène

L'hydrogène est actuellement fabriqué par électrolyse ou par reformage qui sont maintenant des techniques bien connues.

L'électrolyse est le procédé de décomposition chimique de l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un courant électrique.

La production économique de l'hydrogène par ce procédé exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. C'est notamment le cas au Canada où HydroQuébec est devenu un important producteur d'hydrogène compte de l'excellente rentabilité de ses centrales hydroélectriques. La France est également très bien placée de ce point de vue grâce à son équipement en centrales nucléaires.

Le reformage pose le problème du produit primaire à transformer en hydrogène.

Un grand nombre de produits pourraient être utilisés : le méthanol, le gaz naturel, l'essence, le gazole, le naphta...

Le méthanol contient beaucoup d'hydrogène et offre un certain nombre d'avantages.

En effet, il possède la molécule la simple chimiquement et qui se « casse » le mieux. Il peut être produit n'importe où et à bon marché. Il est également facile à obtenir à partir de la biomasse.

Mais cette réaction chimique consomme une énergie assez importante et produit du monoxyde et du dioxyde de carbone.

Il présente également l'inconvénient d'être un fluide dangereux et potentiellement toxique pour l'environnement, notamment pour les nappes phréatiques.

Pour ces raisons il ne semble pas pour l'instant être favorablement considéré comme un précurseur possible pour la production de l'hydrogène destiné aux piles à combustible. Cet emploi est ainsi formellement exclu aux Etats-Unis.

Parmi les constructeurs automobiles qui se sont lancés dans la construction de prototypes de véhicules à pile à combustible, seul, apparemment, DaimlerChrysler préconise le reformage du méthanol à bord.

Le choix du produit primaire fera certainement intervenir un certain nombre de considérations comme les contraintes d'environnement, la disponibilité de la matière première, la facilité et la sécurité de son transport, les coûts divers...

On peut estimer qu'il n'y aura sans doute pas «un meilleur » et unique précurseur de l'hydrogène.

Il y en aura certainement plusieurs en fonction d'abord des situations locales et ensuite des choix effectués entre production centralisée et production sur les lieux de consommation.

Outre les deux méthodes classiques de production de l'hydrogène, des recherches sont en cours sur d'autres procédés de fabrication de ce gaz.

On peut ainsi citer les possibilités de production directe à partir de la biomasse, par la dissociation thermique de l'eau dans des réacteurs nucléaires à haute température et par la photosynthèse.

Concernant cette dernière, des scientifiques californiens viennent en effet de démontrer que l'algue verte (*Chlamydomonas reinhardtii*) peut produire de l'hydrogène.

Comme toutes les plantes vertes, cette algue utilise la photosynthèse pour transformer l'eau et la lumière du soleil en sucres contenant de l'oxygène et de l'hydrogène. Quand la photosynthèse devient impossible, cette algue puise dans ses stocks d'énergie sucrée, ce qui libère l'hydrogène.

Les chercheurs ont montré que ce blocage pouvait être provoqué par un manque en soufre. Il suffirait donc de manipuler la teneur en soufre du milieu de ces algues pour obtenir de l'hydrogène. Cette opération a actuellement un rendement dérisoire et reste expérimentale. De même on peut imaginer que des végétaux modifiés génétiquement soient d'excellents producteurs d'hydrogène.

Compte tenu de la nécessité de produire l'hydrogène en consommant de l'énergie, il faut porter l'attention sur le bilan environnemental de ces différentes filières.

## B – Le bilan environnemental de la production d'hydrogène

C'est une question très importante dans la mesure où il serait envisagé de développer cette production d'hydrogène afin de la substituer de façon progressive aux actuelles sources d'énergie fossiles.

En effet dans cette perspective, il serait primordial de déterminer quelle est (ou sont) la ou les meilleure(s) filière(s) de production dans la mesure où il s'agirait de développer un appareil de production qui n'existe pas à l'heure actuelle. Cette analyse devrait se faire à la fois dans le cas de la France mais aussi dans le cadre européen.

Il faudrait ainsi établir les outils d'analyse qui permettraient de nourrir un débat le plus objectif possible quant aux impacts sur l'environnement mais aussi aux coûts des différentes filières hydrogène prise dans leur ensemble.

Cette comparaison devrait non seulement être effectuée au niveau de la France mais également au niveau des pays européens.

Cette question devrait être tout à fait au centre d'une éventuelle étude de l'Office sur les perspectives du développement de l'utilisation de l'hydrogène.

En attendant cette éventuelle étude complète nous allons donner quelques indications en la matière en nous appuyant sur une étude de l'Institut français du pétrole publiée voilà quelques mois.

Les tableaux suivants présentent le bilan des émissions de différents polluants issus des filières d'hydrogène comprimé et d'hydrogène liquéfié destiné à un usage dans un véhicule.

Il s'agit ici du cas de la France. L'étude a été menée « du puits au réservoir ».

Emissions de différents polluants issus des filières hydrogène comprimé  
« du puits au réservoir »  
en g/MJ

	Emissions de CO <sub>2</sub>	Emissions de NO <sub>2</sub>	Emissions de HC	Emissions de CO	Emissions de SO <sub>2</sub>
Hydrogène issu de gaz naturel	99	0,04	0,11	0,02	0,03
Hydrogène issu de naphta	140	0,17	0,21	0,03	0,18
Hydrogène issu de charbon	209	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Hydrogène issu de l'électrolyse	42	0,10	0,02	0,0085	0,16
---------------------------------	----	------	------	--------	------

Source : d'après I.F.P.

Emissions de différents polluants issus des filières hydrogène liquéfié  
« du puits au réservoir »  
en g/MJ

	Emissions de CO <sub>2</sub>	Emissions de NO <sub>2</sub>	Emissions de HC	Emissions de CO	Emissions de SO <sub>2</sub>
Hydrogène issu de gaz naturel	158	0,10	0,166	0,037	0,09
Hydrogène issu de naphta	232	0,29	0,335	0,050	0,31
Hydrogène issu de charbon	343	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hydrogène issu de l'électrolyse	66	0,164	0,027	0,020	0,246

Source : d'après I.F.P.

On constate le considérable avantage en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> et de CO de la production d'hydrogène réalisée par électrolyse avec de l'électricité d'origine nucléaire par rapport aux autres modes de production.

La filière de production à partir du gaz naturel est également bien placée, notamment au niveau des émissions des oxydes d'azote et du soufre où elle se révèle même plus avantageuse que la voie précédente.

On remarque aussi que la liquéfaction est une opération plus « coûteuse » en termes d'émissions de polluants que la compression.

### 3 – Les différents modes de fabrication de l'hydrogène

L'hydrogène posera des problèmes différents selon qu'elle sera produite sur les lieux d'utilisation par reformage ou dans des unités centralisées. Se poseront en outre des problèmes de sécurité.

#### A – le reformage *in situ*

Il faut distinguer le cas de la génération stationnaire et celui de la génération à bord d'un véhicule.

##### a – Le reformage stationnaire

La génération stationnaire ne pose pas de gros problèmes dans la mesure où le reformeur du générateur est soit approvisionné en carburant primaire par une dérivation d'un réseau existant ou par des livraisons régulières avec éventuellement un stockage tampon pour assurer la permanence de l'alimentation de l'installation.

La première de ces situations est par exemple celle de la pile de Chelles qui est approvisionnée en gaz naturel par le réseau de Gaz de France comme n'importe quel abonné ordinaire. Dans la seconde, des livraisons du carburant primaire par exemple par camions peuvent être organisées comme sont approvisionnées les stations-service de carburants le long des routes.

##### b – La reformage à bord d'un véhicule

La génération embarquée d'hydrogène à bord d'un véhicule permet de s'affranchir de la mise en place d'une infrastructure de production, de distribution et de tout système de stockage de ce gaz à bord.

Mais le développement des véhicules équipés d'un reformeur posera le problème de la distribution du carburant précurseur de l'hydrogène.

Il faut cependant distinguer le cas des flottes « captives » qui ont un point de passage ou de stationnement obligés, comme par exemple les bus, et les véhicules des particuliers.

S'agissant des flottes captives, le problème peut être aisément résolu par l'existence d'un dépôt de carburant auquel tous les engins se ravitaillent. On peut utiliser à peu près n'importe quel précurseur pour la fabrication de l'hydrogène par les reformeurs embarqués.

Par contre l'alimentation des véhicules des particuliers nécessiterait un réseau dense de points de ravitaillement.

Les produits actuellement distribués, l'essence et le gazole, pourraient être facilement employés pour faire fonctionner des reformeurs embarqués. Cette disponibilité immédiate n'entraînerait pas de modification du réseau actuel de distribution des carburants. Compte tenu de sa facilité cette solution serait certainement adoptée au moins provisoirement en attendant que soit choisi un autre précurseur de l'hydrogène.

Mais l'adoption de cet autre précurseur rendrait alors nécessaire de créer un réseau de distribution, ce qui entraînerait des investissements considérables.

Le développement des véhicules à pile à combustible conduirait également soit à modifier les raffineries pour produire davantage d'hydrogène ou des essences spécialement adaptées pour le reformage, ou encore tout autre produit comme le méthanol.



De ce point de vue, les distributeurs de produits pétroliers sont les premiers concernés et ils devront obligatoirement être associés à ce choix.

Les compagnies pétrolières et les distributeurs de carburant sont d'ores et déjà très intéressés par les technologies impliquées par le développement des piles à combustible.

Actuellement les compagnies pétrolières poursuivent les actions suivantes :

- partenariats de recherche et de développement avec les constructeurs automobiles,
- participation à des projets de démonstration de véhicules à pile à combustible, par exemple aux Etats-Unis dans le cadre du California Fuel Cell Partnership,
- participation à des travaux de réflexions stratégiques comme par exemple en France dans le cadre du Réseau « pile à combustible » (projet transversal « Système de traction à pile à combustible ») et en République fédérale d'Allemagne dans le cadre du projet « Transportation energy safety » regroupant le ministère allemand des transports, Aral, B.M.W., DaimlerChrysler, M.A.N., Shell et Volkswagen.

La plus dynamique de toutes les compagnies pétrolières et la plus impliquée dans ces projets semble être Shell qui a créé une société filiale spécialisée, Shell Hydrogen.

Enfin il faut noter que cette affaire requerrait bien évidemment l'intervention de la puissance publique.

Il sera également nécessaire de pouvoir disposer du même carburant au moins en Europe pour des raisons évidentes de mobilité. Une harmonisation y sera donc obligatoire. Le choix du ou des carburants devra donc faire l'objet d'une concertation et d'une prise de décision à ce niveau.

Il sera par ailleurs obligatoire, dans ce cas de l'adoption d'un nouveau carburant automobile, de maintenir en parallèle, pendant un très grand nombre d'années, le réseau de distribution des carburants classiques compte tenu du temps nécessaire au renouvellement complet du parc européen de véhicules particuliers.

Ce seront donc des décisions particulièrement difficiles à prendre dont l'échéance est pour l'instant impossible à déterminer.

La production centralisée d'hydrogène est l'autre branche de l'alternative.

#### B - La production centralisée d'hydrogène

Cette production centralisée peut être réalisée soit dans de grandes unités centralisées soit dans des unités plus petites. L'hydrogène devra ensuite être transporté et pouvoir être stocké.

##### a – La production en grandes unités centralisées

Une grande centrale de production d'hydrogène comprend trois unités :

- une unité de production, vaporeformeur ou unité d'oxydation partielle,
- une unité de conversion du CO,
- une unité de purification de l'hydrogène.

Les unités actuelles de production d'ammoniac et de méthanol utilisent déjà de telles installations avec de très grandes capacités.

L'hydrogène doit ensuite être transporté et distribué.

##### b – Le transport de l'hydrogène

L'hydrogène est déjà transporté par voie routière sous forme gazeuse dans des conteneurs et sous forme liquide par camions citernes par tous les producteurs et distributeurs de gaz industriels.

C'est ainsi qu'un camion semi-remorque citerne transporte chaque semaine une cargaison de 50 m<sup>3</sup> d'hydrogène entre l'usine d'Air Liquide située à Waziers dans les Ardennes et l'usine de semi-conducteurs de ST Microelectronics de Milan.

Le transport d'hydrogène par canalisations est également une opération courante. Elle permet d'assurer l'approvisionnement de complexes pétrochimiques à partir de sites produisant des excès d'hydrogène.

Il existe de nombreux exemples de telles canalisations en Europe et aux Etats-Unis. Ils sont particulièrement adaptés à l'acheminement de grosses quantités d'hydrogène sur des distances de quelques centaines de kilomètres. On peut ainsi citer à titre d'exemple le réseau de 1 500 kilomètres existant dans le Nord-Est de la France. La République fédérale d'Allemagne possède également plusieurs réseaux de distribution d'hydrogène par canalisations

Des études de faisabilité sur le transport maritime d'hydrogène liquide ont été réalisées. Les navires utilisés auraient de fortes similitudes avec les actuels méthaniers.

#### c – La distribution de l'hydrogène

Les stations-service d'hydrogène peuvent être alimentées par un des modes de transport qui a été évoqué.

La mise au point de ce type de station-service ne semble pas poser de problèmes techniques particuliers. Plusieurs de celles-ci ont déjà été construites à l'occasion de projets de démonstration de véhicules à pile à combustible, notamment en République fédérale d'Allemagne.

Les stations-service pourraient aussi constituer de petites unités de production d'hydrogène soit par reformage soit par électrolyse.

Ce type de petite production d'hydrogène est déjà réalisé de façon courante par un certain nombre d'industries utilisatrices de ce gaz comme les verreries, la métallurgie ou l'agro-alimentaire.

#### C – Le stockage de l'hydrogène

En matière de stockage, la légèreté de l'hydrogène entraîne des densités massiques, c'est-à-dire un rapport masse d'hydrogène/masse du contenant de l'ordre de quelques pour cent, ce qui est un facteur très pénalisant en poids.

Dans la perspective du développement de véhicules à pile à combustible, si l'on veut éviter les problèmes inhérents au reformage, il sera nécessaire de mettre au point un système de stockage de l'hydrogène sûr et performant.

La masse d'hydrogène à stocker dans ce cas est de l'ordre de 5 kg, ce qui est nécessaire pour une autonomie classique d'environ 500 kilomètres. L'hydrogène doit être stocké avec des contraintes sévères de volume et de masse pour rester compatible avec les dimensions des véhicules.

Le stockage de l'hydrogène peut se faire sous forme comprimée, liquide, dans des micro-billes, par absorption dans un hydrure, enfin par adsorption dans du charbon actif et dans des nanotubes de carbone.

#### a – Le stockage de l'hydrogène sous forme comprimée

Le stockage sous pression constitue un dispositif très simple, peu coûteux en énergie et capable de délivrer le gaz stocké avec une dynamique et une cinétique largement supérieures aux besoins. Il relève des mêmes techniques que celles utilisées pour le gaz naturel.

Les réservoirs sont techniquement au point. Ils sont constitués d'une vessie servant de barrière à l'hydrogène. Celle-ci est généralement en alliage d'aluminium renforcé par de la fibre de verre imprégnée de résine époxy.

Dans le cadre du programme européen « HYDRO GEN », dont les partenaires sont le C.E.A., P.S.A., Renault et Air Liquide, a été mis au point un réservoir pour le stockage à haute pression, à une pression de 700 bars. La capacité massique de stockage obtenue est de l'ordre de 5,7%, c'est-à-dire 5,7 kg d'hydrogène gazeux stocké pour 100 kg de structure.

#### b – Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide

Du fait de la faible densité de ce gaz, 70,8 kg/m<sup>3</sup>, le volume correspondant à 5 kg d'hydrogène est d'environ 70 litres. Ce mode de stockage peut donc paraître séduisant d'autant plus que l'hydrogène liquide est aisément disponible dans les pays industrialisés.

Néanmoins, plusieurs inconvénients existent :

- il est nécessaire de maintenir l'hydrogène à une température de - 253 °C. Il faut donc une isolation thermique extrêmement soignée et donc encombrante. Cela n'empêche pas une évaporation parasite mais qui reste cependant contrôlable à un niveau admissible de l'ordre de 3% par jour. Cette évaporation peut ne pas être permanente en réalisant une enceinte pressurisée dotée d'une vanne de décharge : c'est la solution qui a été retenue dans le cadre du projet européen « FEVER »,

- l'énergie nécessaire à la liquéfaction de l'hydrogène représente environ 40% de l'énergie contenue dans le gaz.

- la manipulation de l'hydrogène liquide exige des stations de remplissage automatique complexes et onéreuses mais cependant tout à fait techniquement réalisables.

On possède maintenant des connaissances étendues sur les problèmes posés par le stockage liquide de l'hydrogène grâce au développement des activités spatiales. Mais il faut reconnaître que les coûts et les sujétions de cette voie sont très difficilement applicables à l'automobile.

#### c – Le stockage de l'hydrogène dans des micro-billes

Ce type de stockage repose sur la double propriété de certains verres d'être étanches à l'hydrogène à froid et poreux à chaud. La résistance mécanique du verre permet d'atteindre des pressions d'éclatement de l'ordre de 1 500 bars avec des micro-billes creuses de 12 microns de diamètre et d'environ 2 microns d'épaisseur.

Cette technique a été essayée dès le début des années 1980. Des essais ont été conduits ont été réalisés par le C.E.A. au début des années 1990.

Pour remplir ces micro-billes, il faut les porter à environ 350°C dans une atmosphère d'hydrogène à une pression d'environ 1 000 bars puis de les laisser refroidir. Les billes peuvent ensuite être sorties de l'enceinte et conservées aussi longtemps que souhaité.

Il est possible avec cette technique de satisfaire au cahier des charges des constructeurs automobiles. Le stockage de 5 kg d'hydrogène peut être réalisé de cette façon avec une enceinte de masse inférieure à 100 kg et de volume inférieur à 300 litres.

Par contre, l'énergie nécessaire pour effectuer ce remplissage représente environ 30% de l'énergie contenue dans le gaz.

Ce type de stockage est intrinsèquement sûr puisqu'il n'y a pas de fuite et que l'éclatement accidentel d'une bille n'entraîne pas de réaction en chaîne.

Le déstockage de l'hydrogène peut se faire soit par réchauffage progressif de tout ou d'une partie des billes soit par leur broyage progressif en particulier par vibrations.

Les densités d'énergie qu'il est possible d'atteindre sont de l'ordre actuellement de 4%. Ce type d'approche pourrait peut-être, compte tenu de ses qualités, se révéler intéressante à terme.

#### d - Le stockage de l'hydrogène dans des hydrures

Ce type de stockage qui apparaît très prometteur est fondé sur la propriété de certains solides d'absorber des quantités importantes d'hydrogène et de le restituer par dépression ou légère élévation de température. Les recherches sont orientées vers les terres rares, le lanthane notamment, le nickel et le magnésium.

La proportion d'hydrogène absorbé est de l'ordre d'un atome de gaz pour un atome de métal. C'est une réaction réversible exothermique à l'absorption et endothermique à la libération de l'hydrogène.

La capacité gravimétrique du stockage dépend principalement du poids atomique du métal utilisé. De ce point de vue l'utilisation des terres rares est plus intéressante pour une utilisation sur des applications stationnaires que mobiles car elles sont très lourdes. Enfin la chaleur et les énergies d'activation de l'absorption varient en fonction du type d'alliage.

Un grand intérêt de cette technique est que la pression de libération de l'hydrogène peut être calibrée en fonction de l'application.

Malheureusement les alliages capables d'absorber le plus d'hydrogène par unité de poids sont aussi ceux qui demandent des températures très élevées.

Il en est ainsi par exemple pour tous les composés à base de magnésium.

Le magnésium est très intéressant car il a une capacité d'absorption massique de 7%, ce qui est un avantage considérable pour les applications mobiles. Mais il se pose un problème de réversibilité car il est alors nécessaire de chauffer à 500 ou 600°C. Un gain important en température peut être fait en alliant le magnésium au nickel mais on perd alors de la capacité massique. D'autres alliages font l'objet de recherches comme ceux à base de zirconium-manganèse-chrome.

Une autre difficulté est qu'il faut stocker de l'hydrogène très pur car les hydrures ne supportent pas le monoxyde de carbone.

Des hydrures chimiques sont également développés. On peut citer par exemple le sodium borohydride. Les densités théoriques peuvent atteindre 10% en incluant l'eau. Toutefois ces hydrures seraient assez instables. De plus certains de ces hydrures chimiques sont corrosifs ce qui entraîne des difficultés de manipulation. Enfin le contrôle de la réaction pour obtenir l'hydrogène serait très délicat.

Ces hydrures font l'objet de recherches un peu partout dans le monde : aux Etats-Unis mais aussi en France au C.N.R.S. qui possède un laboratoire de chimie métallurgique des terres rares.

On ne peut que regretter que l'entreprise qui s'appelait alors Rhône-Poulenc, devenue Aventis, qui était un spécialiste des terres rares ait maintenant abandonné cette activité.

#### e - Le stockage de l'hydrogène par adsorption dans du charbon actif

L'adsorption de l'hydrogène dans du charbon actif est connu depuis assez longtemps et donne d'assez bons résultats.

Mais cette technique de stockage ne peut pas être retenue pour une application automobile.

En effet il serait nécessaire de conserver le réservoir à une température de 77 K, ce qui obligerait à le maintenir dans une enceinte sous azote liquide ou à le coupler avec un groupe froid, ce qui deviendrait une contrainte excessive pour cette utilisation.

Des problèmes de sécurité pourraient se poser puisqu'une remontée accidentelle de température libère rapidement l'hydrogène.

#### f - Le stockage de l'hydrogène dans des nanotubes de carbone

Ce mode de stockage de l'hydrogène est actuellement au centre de beaucoup de publications et aussi de controverses.

Les nanotubes de carbone ont été découverts en 1991 au Japon.

Ces matériaux sont composés de chaînes de molécules de carbone formant ensemble des tubes graphitiques, ceux-ci pouvant s'organiser en couches simples ou multiples.

Ils semblent dotés de capacités exceptionnelles en terme d'absorption de l'hydrogène. Leurs capacités massiques d'absorption pourraient atteindre, selon certains auteurs, jusqu'à 65%. Mais la controverse est très vive à ce propos entre les spécialistes.

Il faut toutefois considérer avec une grande prudence ces nanotubes compte tenu de la méconnaissance de la plupart des mécanismes en jeu lors de l'absorption de l'hydrogène.

L'activité de recherche est en pleine effervescence sur ce thème.

Un certain nombre de domaines sont encore entachés de grandes incertitudes.

Il faut notamment approfondir les connaissances concernant les procédés d'élaboration pour améliorer le rendement de production, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de nanotubes synthétisée et la quantité de carbone utilisée initialement et aussi le matériau obtenu.

Il reste aussi à élucider complètement au niveau théorique l'aptitude étonnante de ces nanostructures carbonées au stockage de l'hydrogène.

Les questions portent aussi sur la faisabilité à terme d'une production en masse de ces matériaux qui est aujourd'hui limitée à quelques grammes obtenus en laboratoire.

Au terme de cette rapide revue des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène, il apparaît clairement que le mode idéal de stockage de ce gaz n'existe pas encore.

Nous pensons qu'une étude de l'Office sur l'hydrogène pourrait permettre d'étudier plus en détail ces techniques afin de pouvoir aboutir à des recommandations, notamment en terme de priorité de recherches qu'il ne nous paraît pas possible de faire à la fin de ce paragraphe.

Non seulement le stockage mais aussi l'emploi de l'hydrogène sont souvent considérés comme dangereux. Il convient donc d'évoquer les problèmes de sécurité posés par l'emploi de ce gaz.

#### D – Les problèmes de sécurité posés par l'hydrogène

L'hydrogène est un produit qui a objectivement mauvaise réputation. Celui-ci déclenche généralement des appréhensions liées à la fois à la « bombe à hydrogène » et au désastre du dirigeable géant « Hindenburg » aux Etats-Unis le 6 mai 1937.

D'après de récentes études mené par un expert de la N.A.S.A., cet accident ne serait pas dû à l'hydrogène mais à la nature extrêmement inflammable de la peinture de son enveloppe.

Quelques caractéristiques de l'hydrogène peuvent susciter l'inquiétude. En effet si sa température d'inflammation est dix fois inférieure à celle des hydrocarbures, sa température d'auto-inflammation est plus élevée. Sa vitesse de combustion est grande ce qui confère au mélange air-hydrogène une aptitude élevée à transiter de la déflagration à la détonation.

Le risque « hydrogène » peut être apprécié soit au niveau du cœur des piles à combustible soit à celui de la production sur l'installation et des installations de stockage.

##### a – Les risques liés au cœur des piles

Normalement dans une pile à combustible l'hydrogène et l'air n'entrent jamais en contact direct.

Cependant dans le cadre d'une analyse de risque d'un système, l'éventualité d'une rupture de l'étanchéité entre les compartiments, par dégradation de la membrane pour une pile de type P.E.M. ou fuite de l'électrolyte, doit être prise en considération. Un tel événement peut en effet conduire à la constitution d'un mélange explosif au sein d'une cellule voire, par propagation, dans l'ensemble du cœur de la pile.

Il faut donc qu'une étude spécifique de sécurité basée sur une analyse des risques et une quantification des conséquences soient réalisées sur chaque installation.

Il faut toutefois considérer que les quantités d'hydrogène contenues dans le cœur de pile sont limitées et constituent un potentiel de danger relativement faible, surtout comparé à un stockage d'hydrogène classique.

#### b – Les risques liés à la production

L'analyse des risques de chaque installation doit mettre en évidence d'une part les risques liés au combustible employé (gaz naturel, méthanol...) et ceux propres au procédé utilisé (craquage du méthanol, vaporéformage du gaz naturel...).

#### c - Les risques liés au stockage

Dans les cas de stockage sous forme liquide ou pressurisée, les risques sont aujourd'hui bien connus et maîtrisables par la mise en œuvre de dispositifs de sécurité adéquats.

La situation des automobiles à pile à combustible ou à moteur à hydrogène liquide a déjà fait l'objet d'études de sécurité.

Tout d'abord les quantités en jeu sont là relativement faibles : quelques centaines de litres seulement.

De manière similaire aux travaux ayant précédé la mise sur la marché des véhicules fonctionnant au G.P.L., ceux faisant intervenir l'hydrogène dans leur fonctionnement feront évidemment l'objet d'une procédure d'homologation avant toute fabrication industrielle.

Des essais ont été effectués sur des prototypes développés lors de différents projets.

Ainsi B.M.W. a pratiqué sur ses véhicules à moteur à combustion interne à hydrogène une série d'essais de collisions conformes aux spécifications américaines (chocs frontaux et au niveau de l'alimentation du réservoir à hydrogène...). Les résultats ont été entièrement positifs.

Le C.E.A. a soumis le réservoir d'hydrogène comprimé à 700 bars qu'il a réalisé à des tirs d'armes automatiques sans provoquer d'explosion.

Concernant les autres formes de stockage, (hydrures, adsorption sur des surfaces poreuses...) le retour d'expérience est moindre compte tenu de leur caractère encore très largement expérimental. Néanmoins la firme automobile japonaise Mazda a fait rouler pendant deux ans un prototype équipé d'un stockage sous forme d'hydrures sans problèmes particuliers.

Enfin la question de la sécurité des infrastructures de remplissage se posera naturellement en cas de développement de la filière. Elle nécessitera des études de sécurité et également la formation des futurs utilisateurs, c'est-à-dire à terme, le grand public.

Il faut noter que tous ces domaines sont activement étudiés notamment par l'I.N.E.R.I.S. qui travaille sur l'hydrogène depuis des années.

Ces travaux permettront de faire évoluer la réglementation de l'hydrogène.

### E – La réglementation de l'hydrogène

#### a – Les textes applicables

Les textes distinguent les applications stationnaires, mobiles et portables.

- Les applications stationnaires

Il existe au niveau européen des directives, transposées en droit français, qui s'appliquent à l'hydrogène et concernant : la protection des travailleurs, notamment pour l'exposition au risque d'atmosphère explosive, la protection des équipements et la protection de l'environnement et de la population.

S'agissant de cette dernière catégorie, s'appliquent plus précisément les textes suivants :

- la directive n°96/82/CE du 9 décembre 1996, dite « Seveso II », sur la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses transposée en droit français par le Titre 1er du Livre V du Code de l'environnement,

- la directive 2000/33/CE du 25 avril 2000 sur la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses transposée en droit français par un arrêté du 8 octobre 1999.

Au niveau français s'appliquent également :

- l'arrêté du 12 février 1998 relatif au stockage ou à l'emploi d'hydrogène (rubrique 1416 de la nomenclature des Installations classées pour la protection de l'environnement),

- l'arrêté du 24 août 1998 relatif aux installations de remplissage ou de distribution de gaz inflammables liquéfiés (rubrique 1414 de la nomenclature des Installations classées pour la protection de l'environnement).

#### - Les applications mobiles

Actuellement s'applique la directive 70/156/CE du 6 février 1970 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relative à la réception des véhicules à moteur et de leurs remorques modifiée par la directive 98/14/CE du 6 février 1998.

Il existe actuellement un projet européen dit « European integrated hydrogen project » (E.I.H.P.) à l'échéance de 2004 dont le but est de proposer une réglementation européenne pour les véhicules à hydrogène et l'infrastructure de distribution en remplacement des législations nationales.

#### - Les applications portables

Sont applicables dans ce domaine :

- la directive européenne 2001/2/CE relative aux appareils à pression transportables,
- la directive européenne 91/157/CE relative aux piles et accumulateurs contenant certaines matières dangereuses.

#### b – La réglementation française

La réglementation française de l'hydrogène se présente, en résumé, de la façon suivante :

##### – Transport de l'hydrogène

Il est autorisé de transporter l'hydrogène soit comprimé en suivant la réglementation des appareils à pression, soit liquéfié pourvu qu'un matériel adéquat soit utilisé.

##### – Problème des véhicules fonctionnant à l'hydrogène

Il n'y a pas à l'heure actuelle de réglementation de la circulation de véhicules fonctionnant à l'hydrogène.

D'après le ministère des transports, les prototypes fonctionnant à l'aide de ce carburant circulent sur les routes françaises sous couvert de l'immatriculation temporaire habituelle (W).

– Réglementation du stockage de l'hydrogène

• fabrication de l'hydrogène :

- quantité d'hydrogène liquide présente dans l'installation supérieure à 50 tonnes : nécessité d'une autorisation préfectorale et instauration de servitudes d'utilité publique autour de cette installation

- quantité d'hydrogène liquide présente dans l'installation inférieure à 50 tonnes : nécessité d'une autorisation préfectorale

• stockage ou emploi de l'hydrogène, quelque soit sa phase :

- pour une quantité supérieure ou égale à 100 kg mais inférieure à 1 000 kg : régime de la déclaration préalable

- pour une quantité supérieure ou égale à 1000 kg mais inférieure à 50 000 kg : régime de l'autorisation préfectorale

- pour une quantité supérieure ou égale à 50 000 kg : régime de l'autorisation préfectorale assortie de l'instauration de servitudes d'utilité publique autour de l'installation.

La réglementation française paraît plus rigoureuse que celle d'autres pays et notamment européens. Une harmonisation européenne est, de façon bienvenue, en cours. Nous souhaiterions que notre pays y prenne une part importante et dynamique.

L'étude de l'Office que nous préconisons devrait activement se pencher sur cette question.

Le danger d'une réglementation trop rigoureuse est qu'elle dissuade les recherches et les expérimentations sur ce vecteur d'énergie pendant que d'autres, nos concurrents de demain, semblent d'ores et déjà bénéficier d'une certaine avance en la matière.

C'est un fait que c'est un gaz qui a mauvaise réputation. Il ne paraîtrait pas raisonnable de nier que celui-ci présente des risques, mais il conviendrait certainement de garder cependant une certaine mesure en la matière.

En effet il nous semble qu'on peut faire le parallèle avec des produits tels que les carburants destinés à l'automobile. Ceux-ci présentent de façon indéniable beaucoup de risques mais des réglementations adéquates en ont permis une utilisation sûre, ce qui n'exclue pas, malheureusement, la survenance de quelques accidents.

Il est certainement possible qu'il en soit de même avec l'hydrogène.

Nous en sommes en tous cas convaincus.



## **Conclusion**

Au terme de cette étude, nous sommes convaincus que les travaux de recherche doivent se poursuivre et s'amplifier, tant cette technologie nous semble prometteuse. Sans évoquer, comme nous l'avons fait en introduction l'épuisement inéluctable des combustibles fossiles, il nous paraît certain que la qualité de l'environnement de plus en plus ressentie par nos contemporains, singulièrement dans les centres urbains, donne à cette technologie, malgré ses difficultés, un certain avenir.

Cette pression sur la qualité de l'air peut parfois être considérée par les industriels comme très excessive. Il nous semble avec réalisme qu'elle ne se relâchera pas et même que les phénomènes climatiques exceptionnels seront considérés par nos concitoyens comme des conséquences de l'évolution de la température liée à l'effet de serre.

Il nous paraît donc nécessaire d'accepter cette donnée et d'essayer de précéder le mouvement inéluctable plutôt que d'être contraints de nous adapter avec retard quand les produits des concurrents américains et japonais seront devenus des standards obligatoires.

La grande différence avec l'histoire antérieure de cette technologie qui a connu des échecs et conduit à des renoncements, c'est que cette fois, une puissante industrie, l'industrie automobile, la soutient, tout en considérant qu'elle ne sera opérationnelle qu'à terme en passant par plusieurs périodes intermédiaires.

Nous estimons que même si les engouements actuels fléchissent quelque peu dans l'avenir, notamment compte tenu des difficultés techniques rencontrées, l'intérêt ne retombera pas.

Les deux types de piles à combustible les plus assurés de se développer semblent à l'heure actuelle être les P.E.M. et les S.O.F.C.. Les piles alcalines resteront quant à elles employées dans le domaine restreint des véhicules spatiaux et des sous-marins.

Les P.E.M. bénéficieront de leurs qualités intrinsèques et surtout de leur fonctionnement à basse température. Leur adoption par l'industrie automobile serait dans ce sens un gage certain de succès.

Les S.O.F.C. sont excellentes dans le domaine des grandes puissances surtout couplées à une cogénération. Mais on peut estimer qu'elles auront sans doute quelques difficultés à s'imposer dans le domaine de la génération stationnaire compte tenu de l'existence de grands réseaux de distribution d'électricité. Cela sera encore plus vrai en France du fait de la compétitivité de notre électricité nucléaire qui nous assure à la fois indépendance nationale et protection de l'environnement, mais aussi de notre réseau électrique de distribution sur tout le territoire habité.

Le mouvement actuel de déréglementation du marché de l'énergie et l'ouverture à la concurrence du marché de l'énergie pourra favoriser ce type de pile mais son coût de revient constituera un obstacle très important.

Les piles de type S.O.F.C. seront peut être même pour la génération stationnaire concurrencées par les P.E.M. jusqu'à des puissances de l'ordre de 250 kilowatts.

Les micro piles, quant à elles, s'imposeront très rapidement sur le marché de l'alimentation des appareils électroniques portables mais elles nécessitent certainement quelques années, de l'ordre de 5 à 10 ans, de progrès et de mise au point.

Notre conviction est que ce type de générateur d'électricité n'est pas encore techniquement au point.

Certes le principe de base est bien connu mais les piles restent, quel que soit leur type, encore en très grande partie des quasi appareils de laboratoire. En effet elles restent très fortement tributaires de l'entretien et de la surveillance de spécialistes.

Beaucoup de problèmes techniques très importants restent à résoudre aussi bien au niveau du cœur de pile que des auxiliaires. De plus le problème du carburant n'a pas encore trouvé de solution évidente, notamment pour les piles embarquées qui posent de ce point de vue des problèmes considérables.

Il faudra en effet choisir entre installer un reformeur qui n'est pas une option technique simple et l'alimentation directe de la pile en hydrogène. Cette dernière solution oblige à stocker ce gaz, ce qui pose encore un certain nombre de difficultés.

On ne peut donc, compte tenu de ces difficultés, envisager à l'heure actuelle la commercialisation en grandes séries d'une pile embarquée malgré les annonces faites ici ou là. Par contre le stationnaire posera moins de problème. Mais là on se heurtera au coût des énergies concurrentes, du gaz notamment.

Le prix de revient actuel des piles à combustible est un autre handicap fondamental, sauf pour les micro piles. La diminution de coût de revient pourrait provenir d'une industrialisation en grande série mais l'essentiel semble à attendre de la réalisation de sauts technologiques.

Compte tenu de l'ensemble de ces difficultés on peut estimer que seules quelques niches pourront être progressivement occupées par ces piles qui pourront s'y avérer plus performantes que les sources classiques d'énergie. Ce sera d'ailleurs peut être le moyen de créer un marché à ces générateurs.

En tout état de cause les sources classiques d'énergie ont encore de beaux jours devant elles. C'est sans aucun doute le cas du moteur à combustion interne qui ne cesse de s'améliorer et qui garde encore de belles marges de progression et d'améliorations. Il ne cédera du terrain que progressivement et à long terme.

La pile à combustible est au confluent de plusieurs domaines : la physique, la chimie, l'électricité, la mécanique et l'ingénierie.

Nous avons retiré de notre enquête que l'effort de la majorité des chercheurs se concentrent essentiellement sur le cœur de pile, délaissant quelque peu les auxiliaires ainsi que les problèmes posés par le ou les carburant(s).

Or nous avons vu que ces auxiliaires sont très importants dans la mesure où ils représentent 30% de la valeur de l'ensemble du système générateur à pile à combustible. De ce point de vue, ce peut être un domaine à investir par la recherche de notre pays compte tenu de sa tradition de construction mécanique et électrique et de l'existence de grands compétences en ingénierie.

Nous avons noté que globalement la France avait pris du retard dans ce domaine.

Notre pays ne donne pas l'impression d'avoir une stratégie affirmée. Aussi la première tâche fondamentale nous semble être de recenser de façon systématique nos compétences.

Nous ne sommes pas dépourvus de tous moyens comme nous l'avons constaté dans l'action entreprise par le C.E.A. à la fois dans les micro piles et l'hydrogène et par la firme Air Liquide. On regrettera cependant la timidité de certaines autres entreprises.

La constitution du Réseau « pile à combustible » dont il faudrait néanmoins modifier le système d'attribution des aides, peut constituer la base d'un développement appréciable. Mais il sera impératif que se dégagent un ou deux chefs de file qui pourraient exercer une vigoureuse action de coordination et de rationalisation.

Et il nous semble que l'élaboration d'une stratégie pour notre pays ne pourra se faire qu'au sein d'un dessein européen tant les compétences sont dispersées.

L'Europe, dans son ensemble, ne se trouve pas à la pointe du développement de cette technologie.

Il est nécessaire qu'elle fasse plus sous peine de ne peser d'aucun poids quand cette technologie sera commercialisée et que de nouveaux standards, par exemple, en matière automobile seront élaborés.

Mais, là aussi, avant de déterminer une action il conviendra d'avoir une vision des forces disponibles et des compétences.

On ne pourra certainement pas investir dans tous les domaines concernés par cette technologie, notamment compte tenu de l'avance, indéniable, prise en Amérique du Nord et au Japon. Il sera certainement nécessaire de déterminer les créneaux où un grand besoin de recherche existe, membranes, catalyseurs, reformeur, notamment, afin d'acquérir une compétence qui permettrait d'aborder de futures négociations internationales en position assez forte.

Un autre domaine qui pourrait être fort judicieux d'investir, d'ores et déjà, est l'ensemble des recherches sur la production, la purification, le stockage voire la distribution de l'hydrogène.

En effet, apparemment, personne n'a encore obtenu notamment en matière de stockage embarqué des résultats décisifs. Les moyens de stockage fiables, performants et peu coûteux sont certainement la clé de la maîtrise complète de la filière hydrogène. Il y a là un secteur décisif de recherches pour la France et l'Europe.

Enfin il ne faudra pas négliger dans ce domaine la recherche en matière de sécurité car au delà de la sécurité obtenue par une réglementation, il faudra tenir compte de la sécurité « ressentie » de la part du public C'est ce qui permettra de progresser dans les utilisations de ce gaz et qui ouvrira les portes du futur.

## **RECOMMANDATIONS**

Au moment où une nouvelle filière technologique de production d'énergie semble émerger, il semble indispensable que notre pays et l'Europe développent une action soutenue dans le domaine des piles à combustible. Celui-ci nous paraît à bien des égards devoir être stratégique, notamment pour l'avenir des transports à moyen terme, et connaître une forte demande pour les sources portables. Nous ferons donc un certain nombre de recommandations qui prépareront les décisions qui devront être prises dans ce secteur.

Nous ferons aussi, en attendant un éventuel rapport de l'Office, des recommandations concernant l'hydrogène.

## **I – La pile à combustible**

Il nous apparaît nécessaire d'essayer de combler de toute urgence le retard pris par nos équipes scientifiques et nos industriels sur les Etats-Unis, le Canada et le Japon. Il convient donc que soient prises dans le délai le plus court possible les décisions qui permettront à notre pays d'occuper une place significative dans ce domaine d'avenir.

Mais, auparavant, il convient de fonder nos décisions et nos choix sur une connaissance précise et exhaustive des compétences à la fois en France et en Europe, ce qui nous semble manquer de façon fondamentale à l'heure actuelle, travail qu'il n'était pas possible d'effectuer dans le cadre de ce rapport.

Les recommandations sont regroupées dans trois chapitres principaux :

- La détermination de la politique nationale
- Les aides nationales
- La politique communautaire

### **A - La détermination de la politique nationale**

#### **1 – Création d'un service spécialisé « pile à combustible » au sein de la direction du gaz, de l'électricité et du charbon (D.I.G.E.C.) du ministère chargé de l'industrie.**

Ce service sera responsable de la réalisation de l'enquête nationale « pile à combustible ». Il sera chargé de coordonner les actions à mener compte tenu des résultats de cette enquête. Sa tâche sera de mettre en évidence un ou deux interlocuteurs bien identifiés pour la mise en place des programmes à venir.

#### **2 – Réalisation d'une enquête nationale portant sur l'ensemble des compétences existant en France en matière de pile à combustible.**

Cette enquête devrait être réalisée sous la maîtrise d'œuvre du ministère chargé de l'industrie. Elle recenserait toutes les compétences industrielles existantes en France en matière de pile à combustible. Il s'agirait des compétences en matière de cœur de pile, d'auxiliaires et d'ingénierie.

Le ministère chargé de la recherche recenserait de son côté toutes les activités lancées dans ces questions par l'ensemble des organismes de recherche.

Le ministère chargé de l'éducation nationale ferait quant à lui le point sur les enseignements et la recherche concernant ce domaine dans les établissements d'enseignement supérieur.

Toutes les informations recueillies feraient l'objet d'une publication et si possible d'une synthèse approfondie.

### **3 – Organisation d'un congrès national sur les piles à combustible**

Ce congrès permettrait de tirer les conclusions de l'enquête nationale « pile à combustible » et de déterminer les axes prioritaires d'une politique nationale en la matière. Il permettrait également une rencontre de tous les acteurs de ce domaine, la relative méconnaissance des travaux faits par autrui étant l'un des enseignements que nous avons pu tirer de nos contacts.

**4 – Lancement d'un programme mobilisateur « pile à combustible » centré sur le C.E.A. et Air Liquide avec pour vocation de regrouper l'ensemble des acteurs de ce secteur, ces deux entités ayant à la fois une connaissance solide des problèmes et la capacité de fédérateurs.**

## **B – Les aides nationales**

**5 – Toutes les aides publiques devront avoir un caractère de subventions.**

En attendant les résultats des enquêtes nationales « pile à combustible » et « hydrogène », les aides publiques existant à l'heure actuelle devront être, pour celles qui ne le sont pas, transformées en subventions.

Ce caractère s'impose compte tenu du fait que les recherches seront longues et les résultats encore très éloignées de la commercialisation.

**6 – Ces subventions devraient être distribuées par le Réseau « pile à combustible ». Une enveloppe globale serait mise pour ce faire à la disposition du bureau du Réseau, à coup sûr le plus adapté pour apprécier l'opportunité de mettre les moyens sur tel ou tel secteur, tel objectif ou tel autre dans le cadre des orientations nationales déterminées par les pouvoirs publics avec l'aide d'un comité d'experts.**

Il semble plus adéquat que les subventions soient distribuées sous la responsabilité directe du bureau du Réseau en fonction des projets présentés. Cette situation éviterait aux auteurs des projets labellisés de devoir solliciter un financement auprès de diverses autorités comme c'est le cas actuellement. Cela permettrait sans aucun doute d'engager les projets d'envergure beaucoup plus rapidement.

Il est nécessaire de simplifier la décision financière pour plus d'efficacité.

**7 – Les subventions devraient être accordées de façon prioritaire aux petites entreprises innovantes.**

Compte tenu de la multiplicité des tâches, celles-ci semblent tout à fait prioritaires pour l'attribution des fonds publics dans la mesure où elles ne semblent pas pouvoir trouver d'aide auprès des grands groupes.

## **C – L'action communautaire**

**8 – Le gouvernement devrait proposer à tous nos partenaires de réaliser les mêmes enquêtes que celles préconisées au niveau national.**

Il serait ainsi possible d'obtenir un état précis des compétences européennes, des forces et des faiblesses à la fois dans le domaine de la pile à combustible et de l'hydrogène. L'action

européenne pourrait de cette façon être réorientée vers les secteurs à développer en priorité compte tenu des activités menées en Amérique du Nord et au Japon.

**9 - Regroupement de toutes les actions menées au niveau européen dans un seul programme « hydrogène ».**

La même nécessité amène à recommander le regroupement de toutes les actions en faveur de l'hydrogène dans un seul programme.

**10 – Les programmes européens devront être coordonnés avec les différents programmes nationaux de recherche sur ces thèmes.**

Cette coordination est recommandée compte tenu de la difficulté actuelle de faire se correspondre les programmes européens et nationaux.

**11 – Renforcement de l'intérêt communautaire pour tous les programmes agréés de recherche fondamentale et appliquée et pour les projets de développement proposés par les groupements d'entreprises européennes.**

## **II – L'hydrogène**

Il nous semble que globalement il convient de commencer d'étudier à quelles conditions il pourra être fait appel dans l'avenir à l'hydrogène comme carburant de substitution aux énergies fossiles. Les recommandations visent à obtenir une meilleure connaissance des possibilités d'emploi de ce gaz.

**12 – L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques devrait être saisi d'une étude sur les perspectives d'utilisation de l'hydrogène.**

**13 - Réalisation d'une enquête nationale portant sur l'ensemble des compétences existant en France en matière d'hydrogène.**

Il s'agirait de faire le même type d'enquête que celle concernant la pile à combustible

**14 – Organisation d'un congrès national sur l'hydrogène**

Ce colloque permettrait de tirer les conclusions de l'enquête nationale « hydrogène » et de déterminer les grands axes d'une politique nationale en la matière.

## EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques s'est successivement réuni les mardi 22 mai et mercredi 20 juin 2001 pour examiner le rapport de MM. Robert Galley et Claude Gatignol.

### **- Réunion du mardi 22 mai 2001**

Après que **M. Claude Gatignol** eut présenté les grandes lignes de son rapport, plusieurs membres de l'Office sont intervenus.

**M. Jean-Yves Le Déaut, député**, a posé des questions sur le problème du coût de revient de cette technologie et sur les aides financières qui lui sont apportées.

**M. Serge Poignant, député**, a demandé quelle était l'action du C.N.R.S dans ce domaine et s'est interrogé sur les possibilités d'utiliser le méthanol au delà de la production d'hydrogène.

**M. Gérard Miquel, sénateur**, a estimé que la part des énergies renouvelables n'était pas modeste dans le bilan énergétique global.

**M. Claude Birraux, député**, a posé une question sur l'utilisation du bois au regard de l'effet de serre.

En réponse **M. Claude Gatignol** a observé qu'il n'y avait pas, à l'heure actuelle, de chef de file dans ce domaine en France mais que des possibilités existaient de la part de Technicatome et de TopCo. Il a également estimé qu'il n'était pas toujours possible d'utiliser le bois, que les systèmes énergétiques étaient complexes et que c'est surtout une certaine complémentarité qui s semble se dégager.

A l'issue de ce débat, il a été décidé de continuer l'examen de ce rapport lors d'une prochaine séance.



### **- Réunion du mercredi 20 juin 2001**

Après que **MM. Robert Galley et Claude Gatignol, députés**, eurent présenté les recommandations de leur rapport, plusieurs membres de l'Office sont intervenus.

**M. Henri Revol, sénateur**, a d'abord demandé qui serait le maître d'ouvrage de l'enquête et du congrès national préconisé et qui pilotait actuellement le Réseau « pile à combustible ».

**M. Claude Birraux, député**, s'est interrogé sur la pertinence d'une enquête et a estimé qu'une sous-direction du ministère chargé de l'industrie devrait être chargée de cette affaire. Il a souhaité que soit fait un appel à concours en direction des P.M.E. Il a enfin observé qu'au niveau européen, la structure d'Eurêka convenait parfaitement pour stimuler l'action européenne dans ce domaine.

**M. Pierre Laffitte, sénateur**, a estimé qu'il s'agissait là d'un sujet fondamental et que le ministère de l'industrie pourrait utilement intervenir dans ce domaine. Il a ensuite plaidé pour que soit institué un fonds d'investissement par les grandes entreprises pour aider au financement des entreprises innovantes. Il a également suggéré que soit créée une entité regroupant tous les partenaires de ce domaine.

Dans leurs réponses les rapporteurs ont apporté les précisions suivantes :

- le maître d'ouvrage de l'enquête et du congrès doit être le ministère de l'industrie,
- il y a la nécessité de disposer en France d'un chef d'orchestre pour les projets concernant cette technologie, ce qui n'est pas encore le cas, à la différence des Etats-Unis, du Canada et du Japon par exemple,
- l'entreprise canadienne Ballard détient 350 brevets concernant cette technique et il est donc vain de vouloir tout réinventer,
- un créneau pourrait néanmoins être trouvé sur le reformeur,
- l'enquête préconisée répond aux souhaits de toutes les personnalités entendues,
- le Réseau est perçu comme trop lourd,
- la création d'une sous-direction spécialisée au ministère de l'industrie chargée de cette technologie est une bonne suggestion.

L'Office a ensuite adopté ce rapport et en a autorisé la publication.

**PERSONNALITES AUDITIONNEES**

## **FRANCE**

M. Patrick Achard, conseiller scientifique au Centre d'énergétique de l'Ecole des mines (Sophia Antipolis)

M. Thierry Alleau, conseiller scientifique à la Direction des techniques avancées du Commissariat à l'énergie atomique, président de l'Association française de l'hydrogène

M. Robert Ballay, directeur de recherche à Electricité de France, président du Comité d'orientation du Réseau « pile à combustible »

M. Bertrand Barré, directeur de la recherche et du développement de la COGEMA

M. Michel Bayle, directeur de la recherche à Gaz de France

M. Joseph Beretta, responsable du groupe « électromécanique, électrochimie, électronique et systèmes du groupe PSA

M. Pierre Beuzit, directeur de la recherche de Renault, vice-président du Réseau « pile à combustible »

M. Didier Bloch, chef du laboratoire d'études du stockage électrochimique de l'énergie du Commissariat à l'énergie atomique

M. Jean-Claude Boncorps, directeur de Dalkia

M. Jean Bulabois, président de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, chargé de mission au Centre national de recherche technologique de Belfort (pile à combustible)

M. Georges Carola, directeur du Commissariat à l'énergie atomique/Grenoble

M. Jean-Edmond Chaix, membre de la direction technique de Technicatome

M. Thierry Chambolle, directeur délégué de Suez Lyonnaise des eaux

M. Nasri Chami, directeur « Energie » du Centre de recherches pour l'environnement, l'énergie et le déchet du groupe Vivendi

M. François de Charentenay, directeur de la recherche du groupe PSA

M. Gérard Chaumain, directeur-adjoint du département « Développement industriel et technologique de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

M. Serge Chavanne, directeur de SORAPEC

Mme Samira Chelhaoui, ingénieur d'affaires à la direction des « risques accidentels » de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques

M. Bernard Davat, directeur de l'Ecole nationale supérieure d'électricité et de mécanique (Institut national polytechnique de Lorraine), chargé de mission au Centre national de recherche technologique de Belfort (pile à combustible)

M. Christian Desmoulins, directeur des technologies avancées du Commissariat à l'énergie atomique/Grenoble

M. Guy Ducroux, chargé de mission à la direction du développement industriel de Technicatome

M. Jean-François Fauvarque, directeur du laboratoire d'électricité du Conservatoire national des arts et métiers

M. Alain Feugier, directeur « Environnement » de l'Institut français du pétrole

M. Robert de Franclieu, directeur commercial de Photowatt international S.A.

M. Charles Fribourg, directeur technique adjoint de Technicatome

M. Michel Franz, chef du pôle « Equipements industriels pour l'énergie et l'environnement » au ministère de l'économie, des finances et de l'industrie

M. Philippe Garderet, directeur de la stratégie et de l'évaluation du Commissariat à l'énergie atomique

M. Didier Gaston, directeur adjoint à la direction des « risques accidentels » de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques

Mme Anne de Guibert, directrice de la recherche de SAFT

M. Pascal Hénault, directeur de la recherche et de l'innovation automobile du groupe PSA

M. Frédéric Hug, directeur « Recherche-développement et marketing stratégique » d'Elyo

M. François Jacques, directeur du département « Energie, transport, environnement, et ressources naturelles » du ministère de la recherche et de la technologie

M. Michel Junker, ingénieur à l'Association lorraine pour la promotion de l'hydrogène (A.L.P.H.E.A.)

M. Claude Lamy, professeur d'université, responsable de l'unité d'électro-catalyse du Centre national de la recherche scientifique

M. François Laurent, chargé de mission au département « Energie, transport, environnement, et ressources naturelles » du ministère de la recherche et de la technologie

M. Jean-Pierre Lisse, chef du groupe « électrochimie » du groupe PSA

M. Robert Malher, président de Alstom transmission et distribution

M. Alain Mathiot, directeur adjoint auprès du directeur des technologies avancées du Commissariat à l'énergie atomique/Grenoble, chargé du pôle « Matériaux, rayonnements ionisants, robotique »

M. Rudolf Metkemeijer, responsable scientifique du Centre d'énergétique de l'Ecole des mines (Sophia Antipolis)

M. Michel Mouliney, directeur des technologies avancées d'Air Liquide

M. Bernard Nicolas, président de SORAPEC

Mme Annick Percheron-Guégan, directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique, directrice du laboratoire chimie métallurgique des terres rares

M. Robert Peugeot, directeur de la qualité et de l'innovation du groupe PSA

M. Emmanuel Poirier d'Angé d'Orsay, directeur du développement « produit » de Valeo

M. Jacques Rilling, directeur de la recherche et du développement du Centre scientifique et technique du bâtiment

M. Robert Saglio, directeur du développement industriel de Technicatome

M. Patrick Sanglan, chef du service « Innovation – développement » à la Direction des techniques avancées d'Air Liquide

M. Jean Therme, directeur chargé du pôle « Electronique » à la direction des technologies avancées du Commissariat à l'énergie atomique/Grenoble

M. Claude Turbet, directeur d'objectif (utilisation) à la direction de la recherche de Gaz de France

M. Roland Vidil, responsable du secteur « pile à combustible » à la Direction des technologies avancées du Commissariat à l'énergie atomique

M. Marc Weckstein, chargé du développement de la consultance et des études transversales socioéconomiques du Centre scientifique et technique du bâtiment

## **ETATS-UNIS**

M. Paul von Allmen, responsable scientifique du laboratoire de recherche en physique de Motorola

M. Alain Attia, vice-président de H Power, chargé de la recherche et du développement

M. Hamed Benouar, directeur exécutif du Center for commercialization of ITS technologies (Université de Californie)

M. François Castaing, consultant

M. Dave Cole, directeur de l'Office for the study of automotive transportation de l'Université du Michigan

M. Bernard F. Coll, responsable scientifique de la division « matériaux plats » de Motorola

M. Robert N. Culver, chef de la stratégie politique et des affaires commerciales de Ford

M. Kenneth L. Davis, vice-président de Motorola, directeur du centre de recherche de l'état solide

M. Robert K. Dixon, responsable du bureau des technologies du Département de l'énergie

M. Gregory A. Dolan, directeur exécutif adjoint du U.S. Fuel Cell Council

M. Harvey Drucker, directeur de laboratoire associé « Energie, environnement, science et technologie » à Argonne national laboratory

M. René DuBois, directeur de la commercialisation de H Power

M. Rabbi Farraj, coordonnateur du projet « carburants alternatifs » de la Chicago transit Authority

M. James Fischer, ingénieur à la California environmental protection agency

M. Ronald J. Fiskum, chef de programme « pile à combustible » du Département de l'énergie

M. Sigmund Gronich, responsable du programme « hydrogène » du Département de l'énergie

M. Jerry Hallmark, responsable du laboratoire des technologies énergétiques de Motorola

M. Masahiro Hisatomi, responsable du département d'évaluation des véhicules de Nissan technical center North America, Inc.

M. Allan R. Hoffman, directeur des programmes d'études du Département de l'énergie

M. James E. Jaskie, responsable scientifique du laboratoire des technologies avancées de Motorola

M. Arthur Kaufman, responsable de la technologie de H Power

M. William P. Kelly, directeur des affaires politiques et internationales de Ford

M. Ramesh Koripella, ingénieur principal au laboratoire des technologies céramiques de Motorola

M. Michael Krumpelt, chef de la division « pile à combustible » de Argonne national laboratory

M. Romesh Kumar, chef de groupe « applications transport » du programme « électrochimie » de Argonne national laboratory

M. David Lewis, directeur de la division « technologie chimique » de Argonne national laboratory

M. Per A. Lorentzen, vice-président exécutif de ZeTek Power Corporation

M. Richard Lucki, directeur de PSA Amérique du Nord

M. Marvin Maslow, président de Manhattan scientifics, Inc.

M. Mark S. Mehall, ingénieur en chef du programme « pile à combustible » de Think (Ford)

M. James F. Miller, chef de département « sciences de base et électrochimie » de Argonne national laboratory

Mme JoAnn Milliken, chef de programme « technologie des transports » du Département de l'énergie

M. Robert M. Moore, directeur du projet « véhicule à pile à combustible » de l'Institut d'étude des transports de l'Université de Californie (Davis)

M. Darryl Noreen, directeur technique de ZeTek Power Corporation

M. William C. Platt, directeur général de la Chicago transit Authority

M. Charlie T. Pride, chef du département de la stratégie internationale et commerciale de Ford

M. Robert Rose, directeur exécutif du U.S. Fuel Cell Council et de Fuel Cell 2000

M. Ron I. Smith, chef du département technique « pile à combustible et stockage du combustible » de Ford

M. Daniel Sperling, directeur de l'Institut d'étude des transports de l'Université de Californie (Davis)

#### **CANADA**

M. Kevin G. Casey, responsable du développement stratégique de Stuart Energy system Inc.

M. Christopher H. Cheh, ingénieur principal de recherche d'Ontario Power Generation

M. Denis Connor, président de Questair

M. Chris Curtis, directeur exécutif du Conseil national de recherches

Mme Jane Dalziel, responsable du service commercial de Hydrogenics corporation

M. Enrico DiNinio, représentant du ministère de l'environnement (gouvernement provincial de l'Ontario)

M. Stephen Forgacs, chargé des relations avec les investisseurs de Ballard

M. François Girard, agent de recherche adjoint au Conseil national de recherches Canada

M. Wayne Hartford, président de Energy Ventures Inc.

M. S. Hugh Hawthorne, chef du département « procédés technologiques d' Ontario Power Generation

M. Alexander K. Stuart, président de Stuart Energy system Inc.

M. Andrew T.B. Stuart, président du Conseil de direction de Stuart Energy system Inc.

M. Ron Venter, directeur du Centre d'études de l'hydrogène et de l'électrochimie de l'Université de Toronto et de l'association canadienne de l'hydrogène

M. Jonathan Wilkinson, vice-président de Questair, chargé des systèmes à gaz

M. Terrance Wong, agent de recherche adjoint au Conseil national de recherches Canada

## **REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE**

M. Raphael Edinger, économiste chez DaimlerChrysler

M. Torsten Fleischer, physicien au Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (T.A.B.)

M. Jürgen Garcke, directeur du Centre de recherche sur l'énergie solaire et de l'hydrogène (Z.S.W.) d'Ulm

M. Joachim Grosse, responsable des projets « pile à combustible » de Siemens

M. Albert Hammerschmidt, directeur « piles à combustible pour sous-marins » de Siemens

M. Klaus Hassmann, directeur des projets « pile à combustible » de Siemens

M. Rudolf Henne, directeur du département « énergie – électrochimie » du Institut für technische Thermodynamik de l'Université de Stuttgart

M. Hans-Michael Huber, chef du projet « pile à combustible » de DaimlerChrysler

M. Christoph Huss, ingénieur au bureau « environnement » de B.M.W.

M. Ludwig Jorissen, chef de la division « électrochimie » du Centre de recherche sur l'énergie solaire et de l'hydrogène (Z.S.W.) d'Ulm

M. Dieter Menzen, chargé de la recherche sur les nouvelles technologies au ministère de l'économie et de la technologie

M. Hans Muller-Steinhagen, directeur du Institut für technische Thermodynamik de l'Université de Stuttgart

Mme Ragna Nordheimer, ingénieure chez B.M.W.

Mme Dagmar Oertel, chimiste au Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (T.A.B.)

M. Herbert Paschen, directeur du Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (T.A.B.)

M. Martin Pokojski, responsable de la centrale pilote de Berlin-Treptow

M. Walter Rau, chef du projet « bus à pile à combustible » de DaimlerChrysler

M. Helmut Tribusch, responsable du Hahn-Meitner Institut et du Institut für physikalische und theoretische Chemie (Max-Planck Institut)

## **JAPON**

M. Yukiya Amano, directeur général adjoint du bureau des affaires scientifiques du Ministère des affaires étrangères

M. Masashi Arita, directeur général du laboratoire de propulsion de Nissan

M. Robert Capitini, directeur de COGEMA-Japon

M. Michio Hori, directeur du département de recherche sur les piles à combustible de Toshiba

M. Nobuo Ishizuka, secrétaire général de Japan atomic industrial forum, Inc.

M. Takashi Ishizuka, directeur du département « Techniques avancées » de Nissan

M. Haruno Itoh, vice-président exécutif de Tokyo Gas Co. LTD

M. Kiyoshi Kashiwaba, directeur du département « Conversion et stockage de l'énergie de New energy and industrial technology development organization

M. Naoshi Kato, vice-président et directeur général « pile à combustible » de Toshiba

M. Hirobumi Kawano, directeur général de l'Agence des ressources naturelles et de l'énergie

M. Philippe Klein, Vice-président de Nissan Motor Co. LTD

M. Yoji Mikami, directeur des affaires publiques de Toyota

M. Nobuyuki Mori, directeur général du Centre de recherche sur les systèmes industriels de Toshiba

M. Toshio Nakayama, directeur général adjoint de New energy and industrial technology development organization

M. Hisao Nishikawa, ingénieur à la division « piles à combustible » de Toshiba

M. Jun-Ishi Nishizawa, président de Japan atomic industrial forum, Inc.

M. Ikuo Okada, directeur de Osaka Gas Co. LTD.

M. Tohru Shiba, directeur du département de la technologie de Osaka Gas Co. LTD.

M. Hirofumi Shibano, directeur exécutif de Osaka Gas Co. LTD

M. Tohmei Takekawa, directeur des affaires internationales de New energy and industrial technology development organization

M. Masaki Watabe, directeur-adjoint de Osaka Gas Co. LTD

M. Shin-Ichi Yano, directeur du département « Hydrogène, alcool et énergie de la biomasse » de New energy and industrial technology development organization

3216. - Rapport de MM. Le Déaut et Gatignol, députés, sur les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible (OPECST)