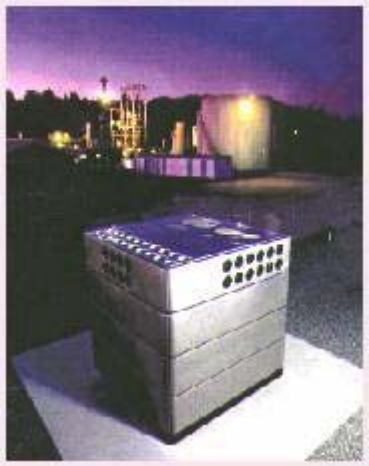
Projet de Production de Chaleur GM3EI

Etude d'une comparative d'une cogénération à base de pile à combustible

Etude réalisée par :

Martz Christophe
Stefani Cyril
Vilquin Jérôme



G.HERMAL *Pile a combustible Microgen, puissance moyenne*

SOMMAIRE

I)Introduction : généralités, petit historique 2

II)Les piles à combustibles 3

2.1)Principe de fonctionnement. 3

2.2)Réactions électro-chimiques aux électrodes. Puissance délivrée. 4

2.3) Les piles hautes et basses températures et le cœur de pile 6

2.4)Avantages des PAC et difficultés technologiques 9

III)Etude technico-économique spécifique au sujet

3.1) Etat du marché des piles à combustible 11

3.1.1) Les PAFC (Pile a combustible phosphoriques acides) 11

3.1.2)Domaine terrestre, applications fixes 12

3.1.3)Autres applications en développement 12

3.2) Etude de l'installation existante

3.2.1) Calculs de thermique 13

3.2.2) Coûts de l'installation électrique 13

3.4) Etude d'une nouvelle installation à base de PAC

3.4.1)Pile à combustible en générateur électrique exclusif 15

3.4.2)Pile à combustible fonctionnant en cogénération 15

3.5) Etude des différents rejets polluants 17

IV)Conclusion : une technologie prometteuse mais des défis a relever 20

I)Introduction

Généralités sur les Piles à Combustible (PAC)

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie *interne d'un combustible* en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique est ensuite converti en électricité engendrant des pertes mécaniques et thermiques non négligeable). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous produits très peu polluants. Ce qui fait des PAC en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications.

Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxyde de carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air). Suivant la puissance nécessaire, elle est composée d'un plus ou moins grand nombre d'assemblage de cellules élémentaires, qui comportent une chambre cathodique (alimentée en comburant) et une chambre anodique (alimentée en combustible), séparées par deux électrodes (qui canalisent les électrons), et un électrolyte intermédiaire, solide ou liquide suivant le type de pile.

On peut voir dans la figure ci dessous l'image d'une petite pile à combustible, avec quelques cellules en série, les tuyaux d'alimentation et d'évacuation des fluides (combustible, comburant et liquide de refroidissement), ainsi que le système d'assemblage (plaques et tirants).

Figure 1.1 : Vue d'une pile à combustible expérimentale de 5KW (1998)

Une pile à combustible se différencie des autres piles (ou batteries) électrochimiques par le fait que les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence. Dans une pile classique, les matériaux constituant les électrodes sont consommables. Avec le temps, en fonction de l'usage, ils se dégradent (oxydation de l'anode et réduction de la cathode) pour finalement rendre le processus inactif : la pile est usée.

Dans une pile à combustible, la structure (électrodes, électrolyte et sites réactifs) ne réagit pas, et reste invariante dans le temps, sous certaines précautions de maintenance.

Historique

C'est vers 1840 que William GROVE décrit la première pile à combustible. Décrit comme une électrolyse inverse de l'eau, elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Cependant les considérations énergétiques (monopole du pétrole et tout puissance du charbon) et le coût d'un tel dispositif n'ont pas permis son développement industriel pendant un plus d'un siècle

Après 1945, 3 groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprirent les études sur les principaux types de générateurs, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Wittney. Les premières applications " commerciales " des piles à combustible furent les programmes spatiaux du début des années 60, GEMINI, APPOLLO, Spacelab. pour lesquels furent développées des piles à membranes MEP (menbrane proton exhange)

Depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grosses entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics, dans le cadre de programmes nationaux ou multi-nationaux de diversification énergétique ou de protection de l'environnement.
Mais c'est surtout dans la 2ieme moitié des années 1990, prenant conscience des ravages des énergies fossile sur l'environnement que les pays industrialisés ont débloqué des millions pour cette technologie vraiment très prometteuse.

II)Recherches technologiques sur les PAC

2.1)Principe de fonctionnement

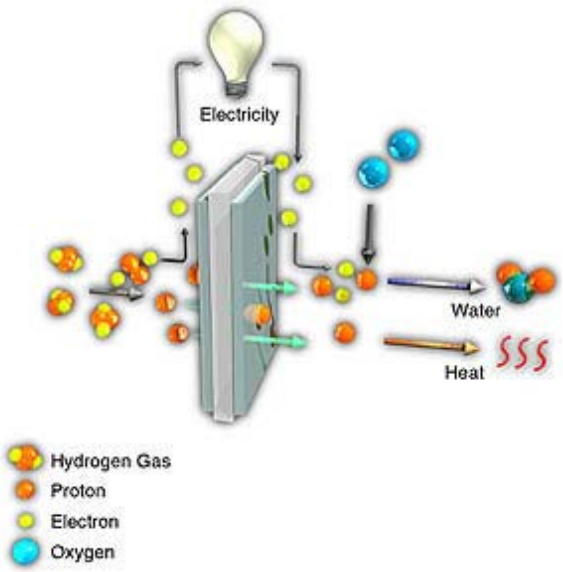


fig 2.1)Cellule élémentaire d'une PAC MEP

Une pile a combustible sépare les électrons des atomes d'hydrogène qui se recombinent avec l'oxygène de l'air pour former de l 'eau pure, qui est le seul produit (avec la chaleur) de cette réaction dans le cas d'utilisation d'hydrogène pur.
L'utilisation de l'hydrogène pur pose encore quelques problèmes (technique mais aussi psychologique), de nombreuses piles sont donc alimentées par des combustibles fossiles (gaz ou liquide) dont on extrait l'hydrogène dans un reformeur.

La réaction d'une cellule élémentaire (ou cœur de pile) est exactement l'inverse de la réaction d'électrolyse de l'eau. Les composants de base du cœur sont : les plaques bipolaires, les électrodes et l'électrolyte

Il existe plusieurs type de piles, suivant leur électrolyte et électrode et elles sont classées en 2 catégories.

Les piles basses T° :
- Les piles à membranes échangeurs de protons (PEMFC)
- Les piles alcalines (AFC)
- Les piles à acide phosphorique (PAFC)
- Les piles à méthanol direct (DMFC)

Les piles hautes T° :
- Les piles à carbonate fondu (MCFC)
- Les piles à oxydes solides (SOFC)

Toutes présentent des conditions de fonctionnement spécifiques que nous reverrons par la suite.

2.2)Réactions électro-chimiques aux électrodes

Réactions d'oxydo-réduction

Les différents types de piles, quelques soient leur réactifs, électrodes ou électrolytes conduisent toutes à la réaction globale d'oxydo-réduction suivante :

$$\mathbf{2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O}$$

Les exceptions viennent des piles à très haute température à oxyde solide ou l'on peut remplacer éventuellement l'hydrogène par du monoxyde de carbone pour produire du CO2. Dans ce cas, la pile a combustible perdrait sa valeur 100% écologique.

Chaque cœur de pile comprend donc 2 électrodes, poreuses et chargées d'un catalyseur :

- L'anode est alimentée en combustible (hydrogène)
  Réaction d'oxydation de l'hydrogène : $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4\,e^-$
- La cathode est alimentée en comburant (oxygène)
  Réaction de réduction de l'oxygène : $O_2 + 4H^+ + 4\,e^- \rightarrow 2H_2O$

Evidement leur somme donne la réaction globale de pile donnée ci-dessus.

L'électrolyte permet aux ions de migrer d'une électrode a l'autre afin de se recombiner avec les électrons perdus une fois qu'ils ont fourni le flux électrique.

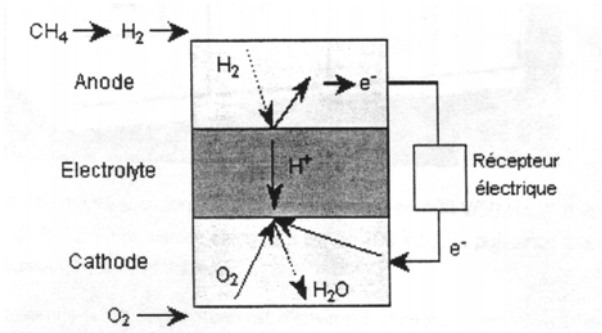


fig 2.2 : Flux des produits/reactif dans le cœur (pile avec reformeur)

Energies mises en jeu

Dans le cas de la pile hydrogène/oxygène, la réaction chimique globale se présente sous la forme suivante :

$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_20_{liq}$ avec ΔG = -237kJ / mole H_2

Lors de cette réaction globale, la variation d'entropie est négative. L'enthalpie absorbée par le produit doit être retranchée à l'enthalpie globale de la réaction (ΔH <0), pour abaisser son entropie. Ainsi, l'énergie récupérable du système correspond à l'énergie libre de Gibbs exprimée par la relation :

$$\Delta G = H - T.\ \Delta S$$

avec ΔG négatif, ce qui signifie par convention que la réaction est spontanée, et ΔH négatif, ce qui signifie par convention que cellule dégage de la chaleur.

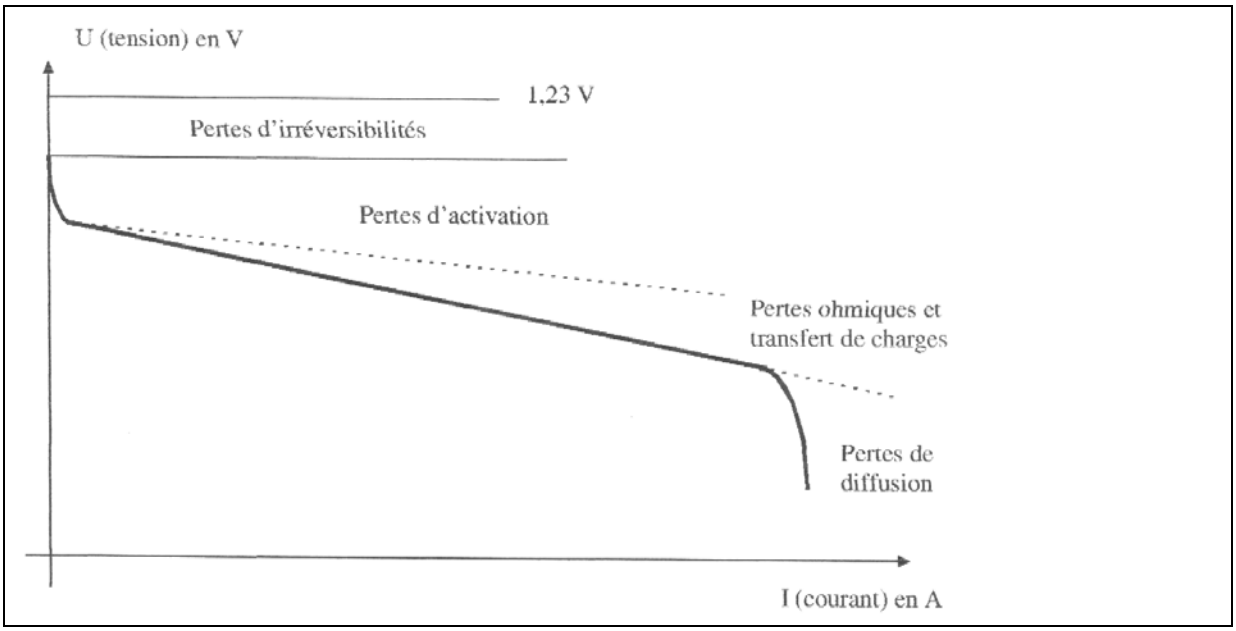
Sous 1 atmosphère de gaz et à une température de 25 °C :
$\Delta G0$ = -237 kJ/mole d'H2 consommée ;
$\Delta H0$ = -285 kJ/mole ;
$\Delta S0$= -0.164 kJ/mole/K

A partir de la relation : $\Delta G + nFEeq = 0$, avec $\Delta G < 0$ ou n est le nombre d'électrons échangés et F la constante de FARADAY (charge électrique), on déduit le potentiel thermodynamique de la pile dans ces mêmes conditions par :

$$E_{eq} = \Delta G/nF = 1.23V$$

Chaque cœur de pile peut donc fournir une tension théorique de 1.23 V, il faut donc monter, exactement comme pour les piles classiques, plusieurs cœur en série pour obtenir une puissance utilisable. Ces différents éléments en série sont appelés étages sont ou stacks.

En fait, cette valeur est théorique, et n'est valable qu'à courant nul. Tout débit d'électrons entraîne d'un certain nombre d'irréversibilités, qui dépendent, entre autres, de l'intensité du courant fourni. On caractérise souvent les piles par une courbe tension-courant.



En réalité à charge nulle on obtient une tension de 0.9 a 1.1 V à cause des perte d'irréversibilité. Les résistance ionique et électronique sont les cause des perte linéaires. Pour les plus fortes intensités, c'est la cinétique de diffusion des gaz a travers les électrodes qui font rapidement chuter la tension, d'autant plus que l'oxygène de réaction n'est pas pur. La tension d'utilisation nominale est d'environ 0.7 V / stack.

Les densités de courant obtenue varient en fonctions du type de pile, de sa T° et de la stoechiométrie des réactifs. Suivant les caractéristiques de pile on obtient une densité de 0,1 a 2 A/cm2 (plus petites piles).

La puissance délivrée par une pile dépend donc de 2 facteurs : le nombre de stacks et la dimension de ses surfaces d'échange.

On a, par exemple, besoin de 12V pour une puissance de 1KW, on dimensionne la pile de la manière suivante :

- 17 étages à 0.7 V
- 83 A soir pour une densité de 0,2 A/cm2 une surface de 420 cm2 soit 20x20 cm2
- 1 étage a une épaisseur d'environ 2 cm actuellement : on obtient un volume total de 680 cm3.

On peut alors calculer le rapport puissance/volume : environ *1.5 MW/M^3*

A titre de comparaison une chaudière au fioul de 40 KW de dimension 1.5x0.5x1 a un rapport de *53 KW/M^3* .

Néanmoins ces calculs, approximatifs, ne prennent en compte que le volume du cœur. Des organes de régulation, d'approvisionnement en carburant et comburant, d'évacuation des produits (utiles ou non) et de sécurité sont évidemment nécessaires autour du cœur.
Un module de 200 kW de ONSI occupe un volume de 5,4 m de long sur 3 m de large et 3 m de haut, et pèse environ 18 tonnes. C'est énorme mais c'est une technologie encore expérimentale, souvenons-nous, de la taille des premiers moteurs diesel par rapport a leur puissance.

Le rapport puissance/poids est aussi largement à l'avantage des piles à combustibles surtout pour les chaudières de petite et moyenne puissance. (environ 1000 W/kg contre 100 à 300 W/Kg pour les meilleures chaudières)

2.3) Les piles Hautes et Basse température et le cœur de pile

Elles sont généralement classées selon la nature de l'éléctrolyte qui donne la température de fonctionnement nominale. On distingue alors les alcaline AFC (Alkaline Fuel Cell) des piles à électrolyte acide qui sont divisées en 2 sous-groupes :

- les piles à haute température (> 500 °C), avec pour électrolyte du carbonate fondu (**MCFC** pour Molten Carbonate Fuel Cell) ou des oxydes solides (**SOFC** pour Solid Oxyde Fuel Cell) ;
- les piles à basse température (<200 °C), avec pour électrolyte des membranes polymères (**PEMFC** pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ou de l'acide phosphorique (**PAFC** pour Phosphoric Acid Fuel Cell).

Les piles basses températures

Elles fonctionnent sur le même principe général mais elles tendent tous à utiliser un reformeur qui transforme le gaz naturel en hydrogène pour différentes raisons :

- réseau de gaz naturel très bien développé
- stockage et distribution de l'hydrogène posent encore des problèmes
- à priori négatif des utilisateurs face au stockage d'hydrogène (aspect psychologique)
- Autres moyens de production de l'hydrogène coûteux , 4frs/kg par reformage à comparer à :
    - 5 à 7 frs/kg par purification des produit pétrolier (huiles..)
    - 25 frs/kg (! !) par électrolyse mais pouvant être largement réduit en utilisant les énergies renouvelables lors des heures de faible demande (hydro-électricité essentiellement, dont le potentiel énergétique quasiemment constant)

Note : Un craquage thermique de l'ammoniac (à environ 600 °C) suffit alors à produire de l'hydrogène, qu'il faudra ensuite purifier pour envoi dans les piles acides. Il semblerait que cela soit un des système les moins coûteux mais qu'en est-il du coût de production de l'ammoniac (coût économique et environnemental)

Connaissant le PCI de l'hydrogène : 190 000 KJ/KG on peut le comparer au coût énergétique du fuel et de l'électricité.

Coût d'un kWh électrique, thermique et d'hydrogène:

Electrique	Fuel	Hydrogène
Environ 0.3 frs + abonnement	0.2 à 0.3 frs suivant le cours du brut	0.47 frs par électrolyse 0.09 frs par reformage

Remarque : Ces coûts ne seront significatifs que lorsque cette énergie comprise dans la matière sera transformée en énergie utilisable.

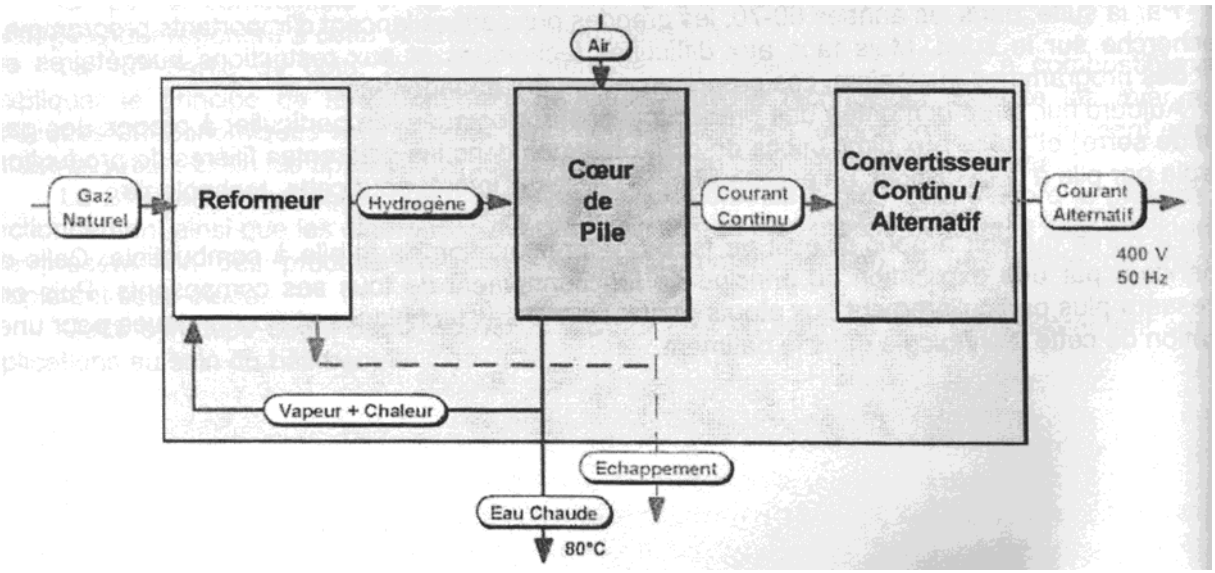


Fig 2.3 Schéma de principe d'une pile basse température a reformeur .

Les piles hautes températures

MCFC : Il n'y a pas de reformeur. Le combustible se transforme en hydrogène dans le cœur. Une température assez élevée 650°C maintient l'électrolyte (mélange de carbonate de potassium et de lithium) reste fondu. Il se dégage de la vapeur d'eau et du CO2 et la réaction exothermique a l'avantage de maintenir en température la pile qui ne nécessite donc que un chauffage d'amorce. Ce n'est donc pas une pile 100% écologique mais permet l'utilisation directe de CH4.

SOFC : L'électrolyte est constituée d'oxyde solides (Zirconium) elle fonctionne à environ 1000°C. Ici aussi le gaz naturel se transforme en H2 au cœur de la pile.

Synthèse des différentes piles

Famille	Température	Electrolyte	Combustible	Puissance	Marché
Alcaline (AFC)	60 à 90 °C	KOH (35 à 50 %)	Hydrogène (oxydant sans CO_2)	1,5 à 15 kW	Transports, espace
À électrolyte polymère (PEMFC)	50 à 80 °C	Membrane polymère échangeuse d'ions	Hydrogène, gaz naturel, méthanol, essence	100 W à 250 kW	Transports, centrales électriques, unités portables, propulsion de sous-marins, espace
À acide phosphorique (PAFC)	160 à 220 °C	Acide phosphorique concentré liquide	Hydrogène, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, distillat léger	50 à 250 kW	Transports, co-génération, centrales électriques
À carbonates fondus (MCFC)	620 à 660 °C	Sels de Li_2CO_3 et Na_2CO_3	Hydrogène, gaz naturel, gaz dérivé du charbon, gazole, kérosène, propane, méthanol	250 kW à 2 MW	Centrales électriques
À oxydes solides (SOFC)	800 à 1000 °C	Oxyde de zirconium stabilisé avec dioxyde d'yttrium	Hydrogène, gaz naturel, gaz dérivé du charbon, gazole, kérosène	1 à 100 kW	Centrales électriques

Source H Power

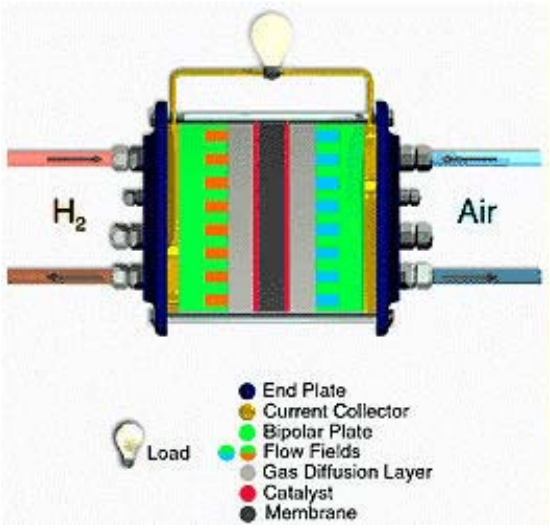
La puissance nécessaire, le carburant disponible et l'encombrement détermineront donc directement le type de pile employé.

En annexe : une présentation technique plus détaillée des différents type de piles

Le cœur de pile

C'est la partie sensible de la pile, sa principale difficulté du cœur consiste à mettre en contact en un même point 3 éléments distinct qui sont, de plus, dans trois état différents : l'hydrogène (gazeux), l'électrolyte (liquide ou solide) et les électrodes (solide)

Le cœur d'une PEM (la plus développéé actuellement) est composé de 3 parties :



- ***Les plaques bipolaires*** : elle doivent conduire les élections, évacuer la chaleur et les produits et diffuser l'hydrogène. Elle sont souvent utilisé sur leur 2 faces, d'où le nom bipolaire. Elles étaient en graphite usiné au début, mais le prix et la fragilité d'une telle solution poussent les constructeurs à les remplacer par des metaux. De 3000 frs pour une plaque de 20cmx20cm sur 3mm d'épaisseur il y a 10ans, l'objectif actuel est de 10 frs.

Fig 2.4 Assemblage d'un cœur de pile. En vert les plaques bipolaires

- **Les électrodes** : elle abritent les ½ réactions d'oxydo-réduction qui sont lentes même à la température de fonctionnement (70°C). Un catalyseur est donc nécessaire : on utilise le Platine mais il est encore (et sera toujours sans doute) très cher. Des recherches sont donc en cours pour trouver un catalyseur permettant de remplacer le platine qui de plus est déterrioré par la présence de CO2 et de CO (de l'air). Néanmoins leurs prix chutent rapidement comment le montre le graphique suivant.

fig 2.5 : Réduction des coûts des électrodes

- **L'électrolyte** : il a pour but de bien conduire les ions de la réaction et de stopper les électrons, sa nature est différente pour chaque type de pile. Dans un PEM, c'est une membrane en polymère perfluoré. Dans une SOFC un solide a base de Zicrone dopé à l'Yttrium.

2.4) Les avantages des PAC et leurs difficultés technologiques

a) *Voyons les différents avantages (ils sont nombreux) dont dispose une PAC par rapport a une installation plus classique :*

- Perte de fonctionnement réduite : le rendement de la réaction chimique d'une PAC est plus élevé que n'importe quel autre transformation mécanique d'énergie. On peut atteindre un rendement global (électrique + thermique) de 80%, certains estiment qu'on arrivera à terme à 90%.

Note : le rendement est calculé sur le PCI Hydrogène ou gaz fournit, les PAC a reformeur ont un rendement moins élevé.

	η Therm. (%)	**η Elect. (%)**	**η Global (%)**
Cogénération par moteur ou turbine	50	30	80
PAC	35-40	40-45	75-90
Centrale thermique (gaz, pétrole, charbon)	-	35	35

De plus le rendement des PAC de dépend pas :
-de la taille de la PAC (1 cellule de 100 W a quasiment le même rendement électrique qu'un système complet de pile de 1 MW) ;

-de la puissance fournie (rendement à peu près constant pour une charge entre 50 et 100 % de la puissance nominale) ; d'où une plage d'utilisation importante.

- Compacte et modulaire trés facillement

- Pas de pièces mobiles : maintenance et bruit réduits (c'est le transformateur électrique DC→ AC et les ventilateurs qui font le plus de bruit !).
  60dBA a 10 m sans protection sonore.

- Absence totale d'émission polluantes dans le cas d'utilisation de l'hydrogène pur. Dans le cas du reformage : Pour 200 KW : 6mg/m^3 de CO2, et 2mg/m^3 de Nox et les rejets de S02 sont négligeables.

En annexe un tableau récapitulatif des avantages/inconvénient des différents combustible.

Remarque : On peut néanmoins se poser la question de la consomation du comburant. En effet l'oxygène est associé aux ions d'hydrogène pour donner de l'eau. Une PAC pompe donc l'oxygène de l'air pour le transformer en eau. Existe-t-il, dans la nature, le phénomène inverse (c'est a dire une électrolyse naturelle) ? Sinon cela risque de poser des problèmes de teneur en oxygène.

b)Les difficultées des PAC

- Les coûts d'une PAC sont encore trop élevés : une installation PAC coûte environ 3 x plus chère qu'une installation classique.

	Capacité	Coûts d'installation (frs/KW)	Coûts de maintenance par kWh produit en centimes
PAC	3kW à 3MW	8000 à 25000	4 à 8
Photovoltaïque	1 à 100 kW	8000 à 48000	-
Turbine a gaz	1 à 30MW	5200 à 7200	3 à 7
Centrale thermique	400 MW	3000 à 3200	1,5 à 3
Centrale nucléaire	800 MW à 1.6 GW	?	191 Milliards pour 1995 (18 centrales EDF) soit 10,6 Milliard par centrale!

- Durée de vie : on atteint dans les pile haute T° (électrolyte solide moins corrosif et plus stable) des durée de 40000 à 50000 h. Néanmoins 100 000 h seront attendues pour les applications fixes contrairement aux destiné, par exemple, pour l'automobile ou 10 000 h *suffiront.*

- Nous avons vu que le cœur de pile a un rapport Puissance/Volume spectaculaire (1.4 MW/m^3).Les PAC utilisé en cogénération actuellement ont un rapport global d'à peine 15 kW/ m^3
  Il faudra donc réduire l'encombrement des organes auxiliaires.

III)Etude technico-économique spécifique au sujet

3.1)Le marché des PAC

Les trois types de piles à combustible les plus avancés technologiquement sont les AFK, PAFC et les PEMFC. Les autres ne sont pas encore assez développée mais les recherches sont importantes dans ces domaines. Ce sont les PAFC qui sont les plus adaptées et développé pour des système fixes de cogénération, nous ne verrons donc ici que ces type de pile. Une étude détaillé des autres type de piles est situé en Annexe.

3.1.1)Les PAFC

Au niveau commercial, ce sont les PAFC qui en sont au stade le plus avancé, avec plusieurs dizaines de MW installés mi 1998. La grande majorité du parc est constituée de systèmes statiques de cogénération, reliés à des réseaux électriques.
Ce sont surtout des opérations de démonstration, qui permettent aux opérateurs énergétiques de se familiariser avec ce nouveau générateur d'électricité et de chaleur.
Les principaux fabricants de ce type d'installations sont International Fuel Cell (Etats Unis d'Amérique) et Fuji Electric Corporation (Japon)..IFC, pour International Fuel Cell est une filiale de United Technologic Corporation (qui possède le fabricant de moteurs d'avions Pratt and Wittney, les ascenseurs OTIS, les hélicoptères Sylkorsky...), qui a créé en 1990 une joint venture avecToshiba (Japon), avec une participation mineure de Ansaldo (Italie). ONSI est la filiale d'IFC chargée de la commercialisation des PAFC. Leur produit phare, le PC25, est un système complet de cogénération basé sur des PAFC de 200 kW. C'est le seul à pouvoir être considéré, mi 1998, comme un produit " commercial ". Il est alimenté, pour la

plupart des systèmes, par du gaz naturel, et possède donc un étage de réformage (pour injecter dans la pile de l'hydrogène
majoritaire). La pile fonctionne aux alentours de 175 °C, et il est possible de récupérer de la chaleur utile à 80 °C, ou dans certaines versions, à divers niveaux de température (50 % à 120 °C et 50 % à 50 °C, par exemple).
Depuis le début des années 1990, plus de 180 installations de ce type ont été installées, une vingtaine en Europe, (une pile fabriquée par ONSI et sponsorisée EDF et GDF est déjà installée à Chelles en région parisienne à titre démonstratif), au Japon et aux Etats Unis, dont 120 sont encore en fonctionnement.

La PC25, déclinée dans plusieurs versions, totalise plus de 2 millions d'heures de fonctionnement. Le retour d'expérience acquis par l'ensemble de la communauté des utilisateurs permet de donner les statistiques suivantes *(Source par IFC) :*

- l'installation la plus ancienne totalise déjà 40 000 heures de fonctionnement (près de 5 ans) ;
- la plus longue période sans arrêt enregistrée est de 9500 heures (plus d'un an) ;
- la disponibilité moyenne des installations est de 95 % ;
- 31 installations ont eu des périodes de production ininterrompues de plus de 6 mois ;
- le rendement moyen électrique constaté est d'environ 40 %,

Les coûts actuels des installations sont très variables d'un projet à l'autre, mais onpeut considérer que la PC25 peut s'acquérir, au rythme actuel de la petite série, pour environ 2 MF, avec sans doute une bonne marge de réduction en cas de plus grande série. Par contre, il ne faut pas négliger les coûts annexes (génie civil,raccordements aux réseaux ...).

Les PAFC sont donc déjà des produits commerciaux, et si leur usage principal semble bien être la cogénération dans des installations classiques, d'autres applications, dans les transports " publics " sont aussi envisagées.

3.1.2)Domaine terrestre, applications fixes

C'est la cogénération qui semble actuellement la piste immédiate la plus prometteuse pour l'utilisation des piles à combustibles.
L'expérience acquise au cours de ces dernières années sur diverses installations de cogénération utilisant des piles à combustible PAFC a prouvé qu'elles étaient tout à fait techniquement capables de fournir à la demande électricité et chaleur. Même les coûts actuels de mise à disposition, pour de très petites séries, ne sont pas rédhibitoires.

L'installation classique utilise des piles de 200 kW électriques par système unitaire, le gaz naturel étant préalablement réformé pour obtenir un mélange riche en hydrogène. Elle génèrent de l'ordre de 200 kW thermiques, à un niveau compris entre 80 à 120 °C.

Elles sont toutes reliées à un réseau de gaz naturel, et la plupart au réseau électrique, bien que la pile soit en principe autonome : il est tout à fait possible de la faire produire en îlotage, ou sur un réseau local isolé.

Un certain nombre d'études économiques ont été réalisées sur le sujet. Pour la plupart confidentielles, elles ont prouvé que, en fonction des tarifs d'achat et de vente des différents " fluides " : gaz et électricité, certaines stratégies de gestion étaient plus ou moins intéressantes.
Enfin, il est très possible de concevoir que les piles à combustibles, avec leurs excellents rendements de conversion énergie chimique - énergie électrique, soient le coeur de centrales de production électriques de proximité, dans des zones urbaines pour lesquelles des réglementations très strictes en matière de pollution et de génération de bruit seraient adoptées.

3.1.3)Autres applications en développement

La plupart des autres idées d'application des piles à combustible sont plutôt tournées vers la micro production d'électricité : une " ampoule " d'hydrogène sous pression, une cellule, et on peut alimenter une balise ARGOS, un téléphone ou un PC portable... Le système peut alors concurrencer les batteries électrochimiques classiques, avec certainement une autonomie beaucoup plus importante. Bien sur les coûts de revient sont encore trop élevés mais ils chutent rapidement.

L'industrie des transports est aussi très intéressée par l'utilisation des PAC :

- émissions réduites (ou nulles) par rapport aux véhicule thermiques et
- plus grande autonomie par rapport aux batteries classique.

3.2)Etude de l'installation existante

D'après les besoins en puissance énoncé, nous évaluons le coût énergétique puis financier de l'installation existante.

3.2.1)Calculs de thermique

Nombre d'heures de fonctionnement par semaine
- Du lundi au vendredi (semaine de travail)

Lundi : 24-7=17 h
Mardi, Mercredi, Jeudi : 3*24=72 h
Vendredi : 21 h
Total : 17+72+21=110 h
- Samedi et dimanche

Total : 24*7-110=58 h

Coûts de l'installation thermique :

Connaissant les puissances moyennes pour tous les mois et pendant la semaine de travail et le week-end, on peut calculer l'énergie consommée pendant l'année complète. Les rendements de la conduite et de la chaudière permettent de calculer l'énergie que doit apporter le fioul. Ceci va nous être utile pour obtenir le volume (en litre) de fioul consommé pendant une année par l'intermédiaire du PCI_{fioul}. On peut ainsi calculer le coût des consommation de fioul pour une année, en prenant comme base 2,08 F/L HT.

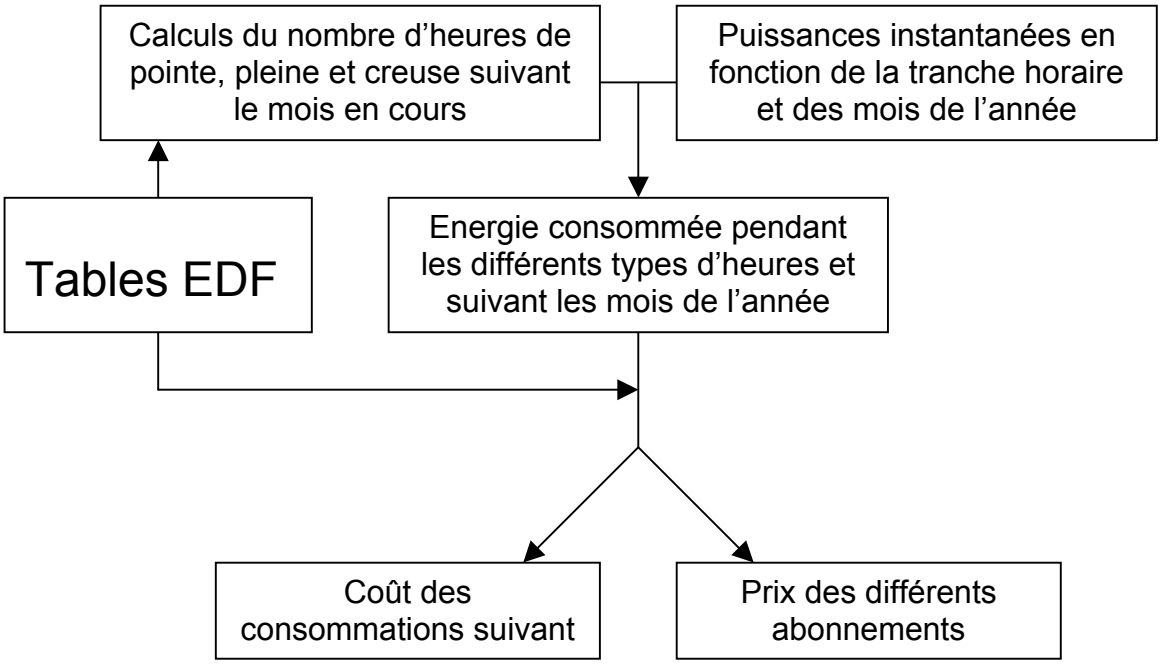
On a calculé environ 4177,9 kF dépensés par an.

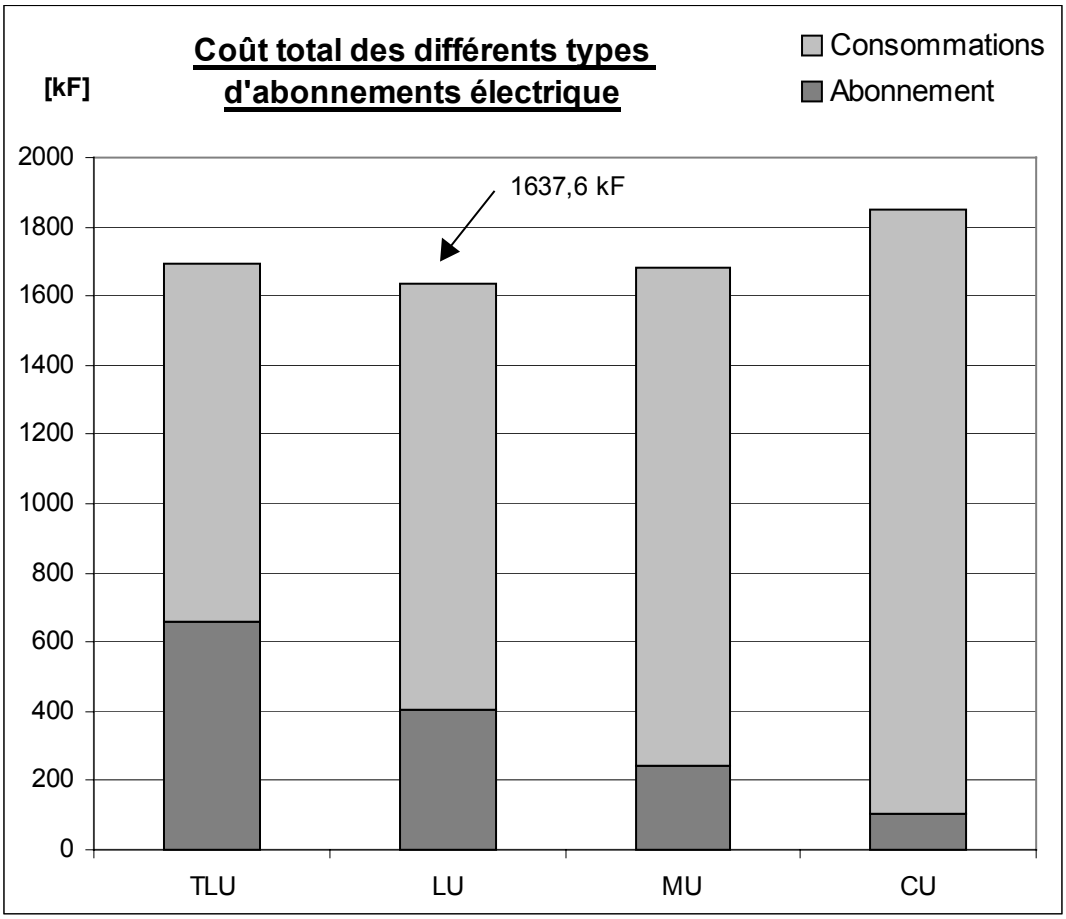
Calculs des plages horaires electrique
La tarification EDF est basée sur une séparation en plages horaires de la semaine. Ces plages, dépendantes de la saison (été ou hiver), sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

		h de Pte	h P	h C
Décembre à Février	Lu	4	11	4
	Ma/Me/Je	12	36	24
	Ve	4	11	4
	Sa	4	13	12
	Di	0	1	28
Mars à Novembre	Lu	0	15	4
	Ma/Me/Je	0	48	24
	Ve	0	15	4
	Sa	0	17	12
	Di	0	1	28

3.2.2)Coûts de l'installation électrique

On choisi un abonnement de type vert sans EJP car on ne connaît pas les jours de haute facturation.Le choix d'un abonnement passe aussi par la détermination de la taille de l'installation électrique. Pour ce faire, on a utilisé les valeurs maximales des puissance moyenne données dans le tableau.
On en déduit l'utilisation d'un tarif vert de type A5 car l'installation a une puissance de moins de 10000 kW. Le tableau précédent est utilisé pour calculé les puissances consommées pendant l'année et pendant les cinq plages horaires. La puissance d'heure de pointe est égale à la puissance d'heure pleine pour les mois de décembre, janvier et février car elle est comprise dans la même plage horaire. Elle est nulle pour novembre et mars (saison hiver) ainsi que pour tous les mois de la saison été. Connaissant le prix du kWh pour chaque plage horaire, on calcule le coût en électricité annuel pour les 4 types d'abonnement (TLU, LU, MU, CU). La puissance réduite et du coût de l'abonnement suivant les 4 abonnements est déterminée aussi en utilisant les tables EDF.
Connaissant les coûts des consommations et de l'abonnement pour les quatre configurations différentes, nous pouvons choisir la plus avantageuse de ces configurations.
Nous utiliserons un abonnement Longue Utilisation pour un coût annuel de 1637,6 kF.





3.4) Etude d'une nouvelle installation à base de PAC

3.4.1)Utilisation d'une PAC en générateur électrique exclusif.

On se propose d'utiliser une pile à combustible pour fournir exclusivement l'énergie électrique de l'usine. Afin de bénéficier du maximum de rendement électrique, nous allons utiliser la chaleur dégagée par la pile pour produire du courant.

Les piles basses température présentent l'inconvénient de ne pas dégager assez de chaleur pour que la vapeur ou l'eau produite soit exploitable dans une turbine. Cette eau comprise entre 80 et 150° peut être exploitable thermiquement mais pas détendue dans une turbine. Les piles haute température peuvent être couplées a une turbine à vapeur via un échangeur pour augmenter leur rendement électrique.

Le type de pile le mieux adapté est une pile haute température de type MCFC (à carbonates fondus).

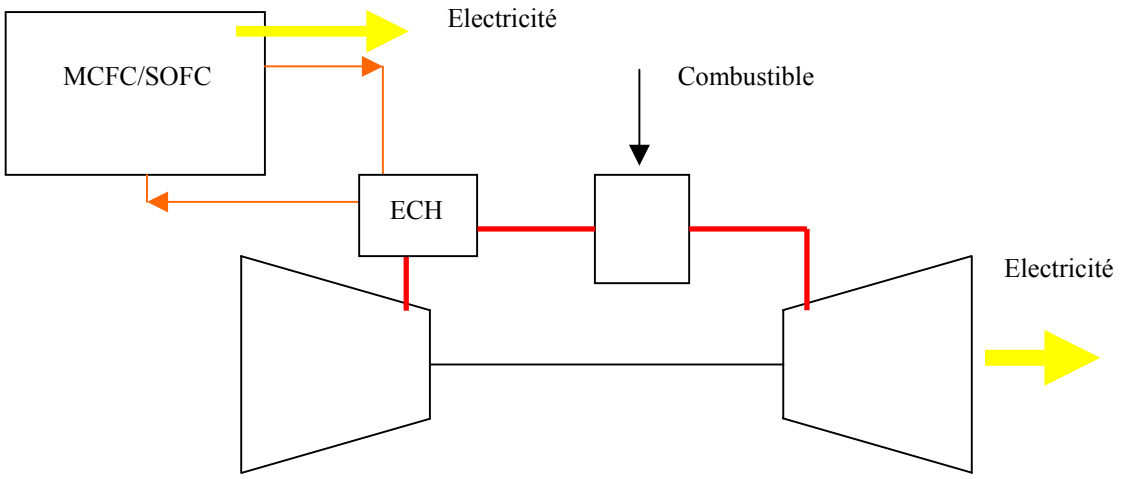


Fig3.1 : Pile haute température en couplage avec un turbo-alternateur.

En considérant la puissance électrique maximale donnée dans le tableau et en appliquant une majoration de 10% (sécurité) et le rendement électrique correspondant à ce type de pile (70%), on obtient une puissance de pile d'environ 1700 kW. En se basant sur un coût d'installation de 5000 F/kW, nous avons estimé que la pile aurait un prix d'environ 8650 kF.
En reprenant la même méthode de calcul que pour le fioul, nous avons calculé le coût annuel de consommation de gaz : environ 1438,3 kF, soit environ 200 kF de moins que pour l'électricité.
Nous devons aussi ajouter le coût de consommation de fioul qui est le même qu'avec la configuration actuelle.

3.4.2)Pile à combustible fonctionnant en cogénération

Cette fois-ci nous allons utiliser une pile à combustible pour produire la totalité de la puissance électrique et une partie de la puissance thermique. Les piles basse température sont particulièrement bien adaptée à cet usage car elles produisent de la vapeur d'eau entre 150 et 220°C.

Nous avons choisi une pile de type PAFC (à acide phosphorique) car :

- elles sont bien développées.
- toutes les piles présentent un coût d'installation et de maintenance à peu près similaire, autant donc profiter des avancées du marché.
- Il existe des modèles fonctionnant en continue depuis longtemps.
- Les installations de cogénération sur le marché sont a base de PAFC (ONSI).
- La température d'utilisation (150 à 200°C) permet l'utilisation directe de la chaleur des produits de réaction.

Le rendement électrique d'une telle pile est de 40%, ce qui permet de dimensionner la pile. Notre pile aurait une puissance de 3000 kW et coûterait environ 15125 kF. Le coût annuel de gaz avoisinerait les 2517 kF.

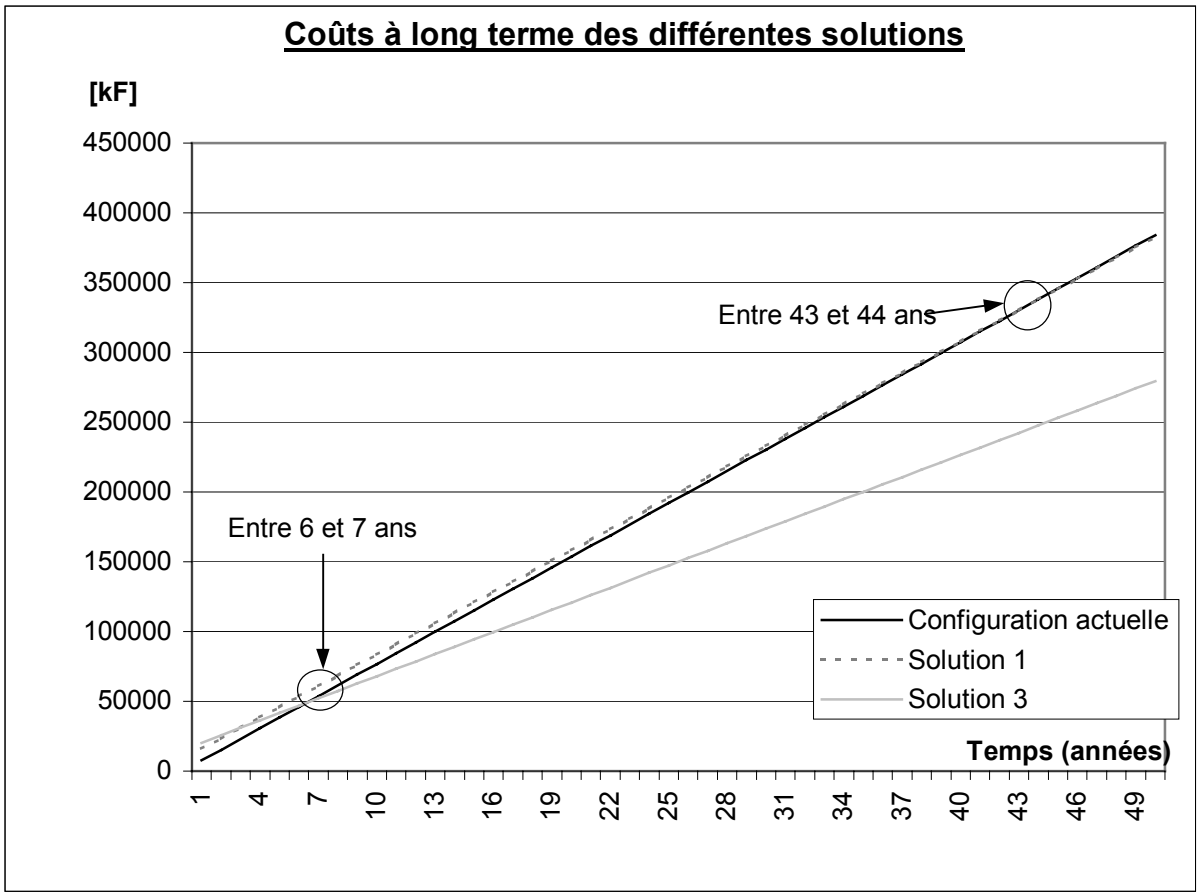
La vapeur d'eau à la sortie de la pile est prise à 170°C, pour avoir une pression de 9 bars et alimenter directement le réseau de distribution de l'usine. Le rendement thermique de la pile est aussi de 40%. Avec la puissance mise en place, la pile permet de fournir près du tiers des besoins en thermique de l'usine. Nous avons choisi de conserver la chaudière actuelle pour produire le reste des besoins. Le coût annuel de la consommation de fioul s'élève alors à environ 2769,1 kF.

Résultats et amortissement

Le tableau ci-après rappelle les coûts de consommation annuels des différentes installations :

	Electricité	Fioul	Gaz	Total
Installation actuelle	1637,6 kF	4177,9 kF	-	5815,5 kF
Pile HT pour électricite	-	4177,9 kF	1438,3 kF	5616,2 kF
Pile BT pour électricité et vapeur	-	2769,1 kF	2517,0 kF	5286,1 kF

La solution 2 apparaît ici comme la plus avantageuse mais nous devons prendre en compte le coût de mise en place des piles pour estimer le temps au bout duquel l'installation serait amortie. Les courbes suivantes représentent les dépenses à effectuer par ans pour les trois configurations.



L'installation de la pile basse température serait amortie au bout de 7 ans alors qu'il faudrait 44 ans pour la pile haute température. Cette dernière solution ne sera donc pas retenue au profit d'une production simultanée d'électricité et de vapeur.

3.5) Etude des différents rejets polluants

- Solution actuelle :

Les divers rejets sont le CO2 le CO le SO2 les Nox et les poussières.

Le calcul des différentes quantités s'effectue avec la consommation de fioul à l'année et en posant l'hypothèse d'un excès d'air de 25%. On en déduit les tonnes des divers polluants rejetées par an.

- Cogénération n°1 :

La chaudière fonctionne comme dans le cas initial donc produits autant de polluants, et la pile à combustible ne produit que du CO2 et des NOX en proportion très faible par rapport à une chaudière puisque par rapport aux normes elle produit 17 fois moins de CO2 et 75 fois moins de NOX c'est à dire :

CO2 : 6mg / Nm^3 de fumé
NOX : 2 mg / Nm^3 de fumé

- Cogénération n°2 :

La chaudière ne produit plus que 2/3 de sa production initiale, et la pile à combustible produit le 1/3 restant avec la quantité précédente :

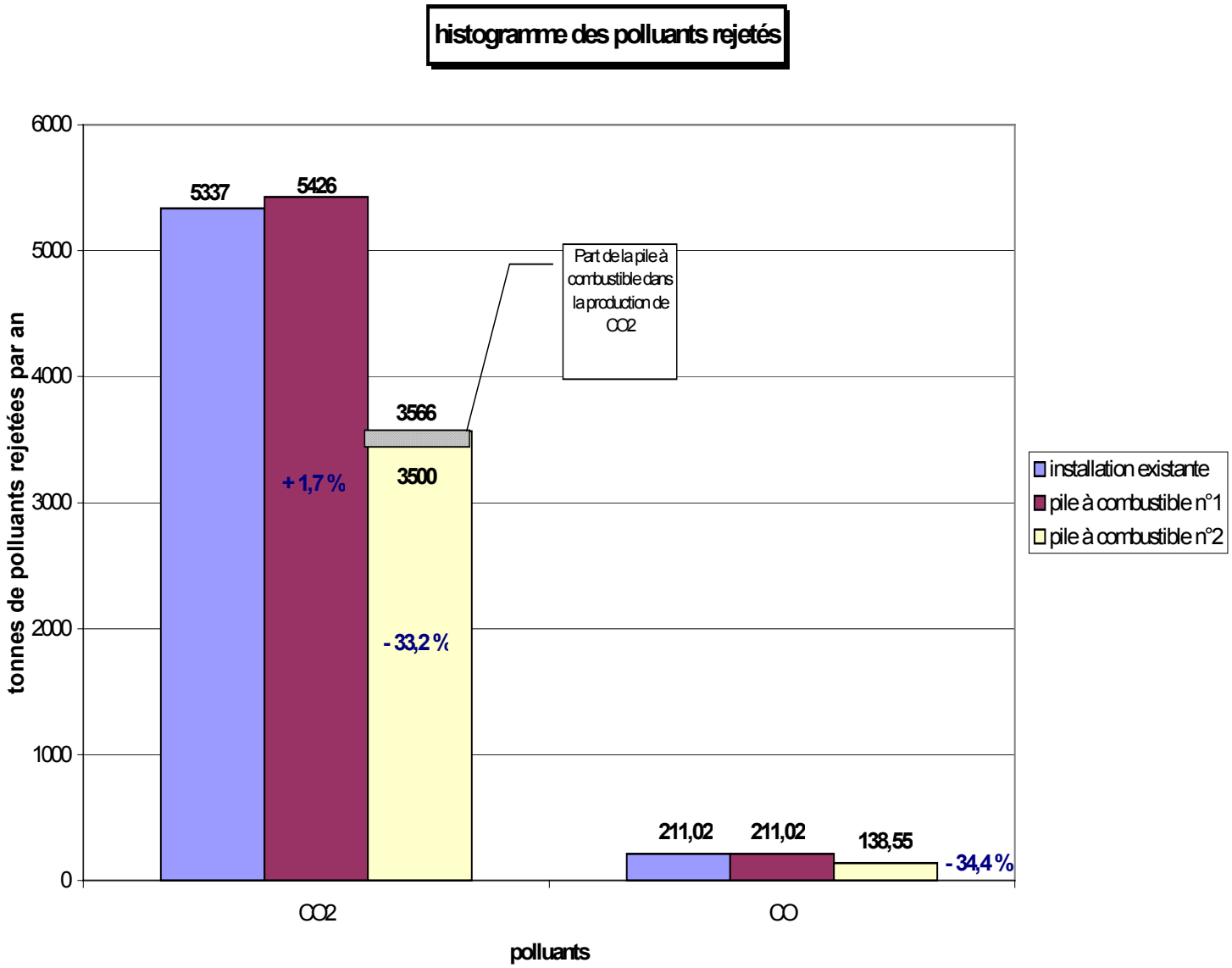
CO2 : 6mg / Nm^3 de fumé
NOX : 2 mg / Nm^3 de fumé

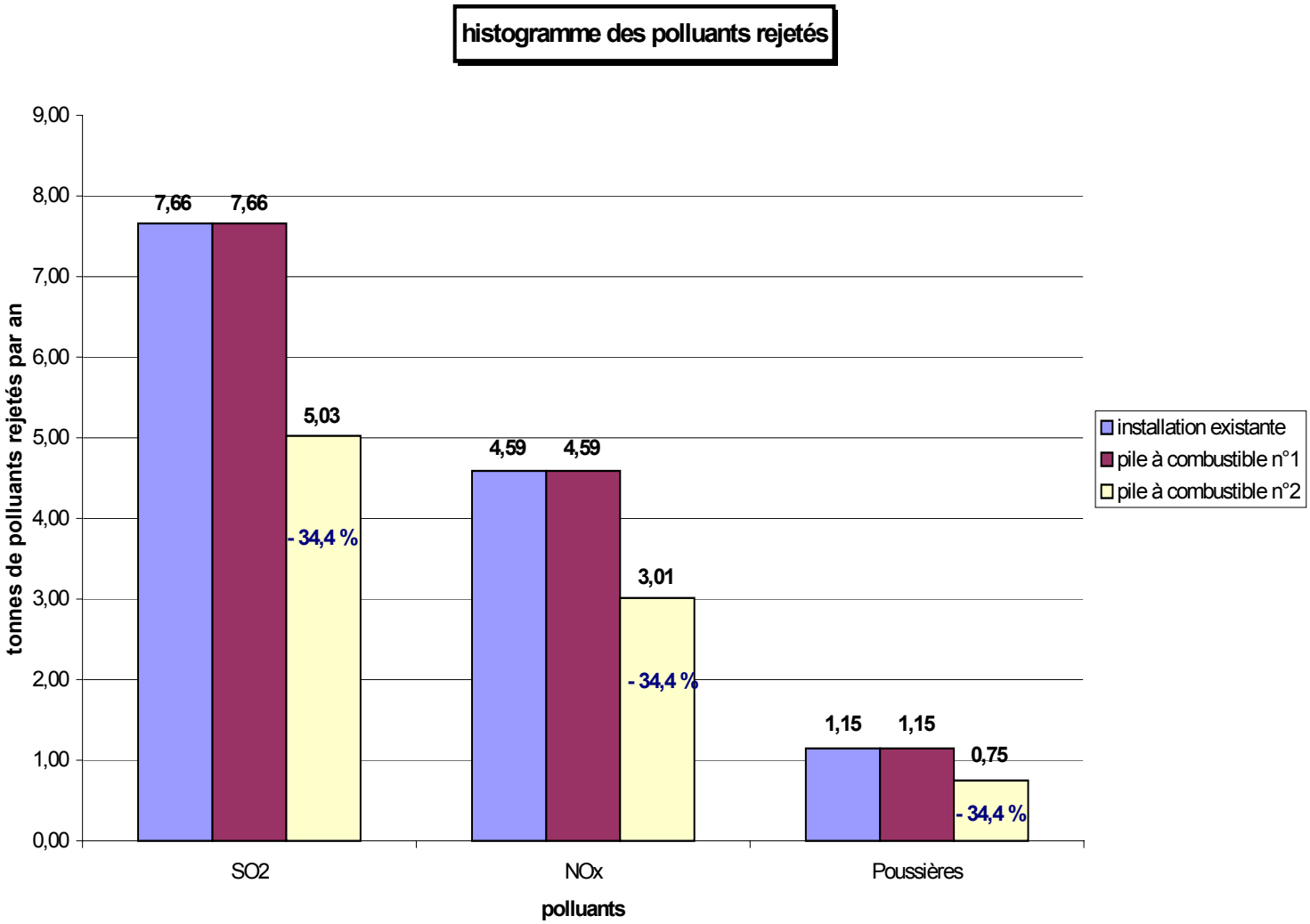
On en déduits donc les graphiques suivants avec la constatation que la participation de la pile à combustible en ce qui concerne les polluants est vraiment minime par rapport à la chaudière.

Remarques :

Il faut également rajouter que les polluants provenant de la pile à combustible sont dus au fait que l'on utilise du gaz naturel qui nécessite un reformage pour obtenir de l'hydrogène.

On remarque donc que dans le cas de l'utilisation d'hydrogène pur la pile à combustible est une énergie totalement verte sans prendre en considération le recyclage de celle-ci à la fin de sa vie. Mais il faudra compter sur des nouvelles techniques de production de l'hydrogène.




histogramme des polluants rejetés
tonnes de polluants rejetés par an
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
7,66
7,66
5,03
- 34,4 %
4,59
4,59
3,01
- 34,4 %
1,15
1,15
0,75
- 34,4 %
SO2
NOx
Poussières
polluants
installation existante
pile à combustible n°1
pile à combustible n°2

Conclusion

Les piles à combustible, et plus généralement, l'utilisation de l'hydrogène, sont un moyen intéressant de valoriser l'énergie chimique contenue dans divers combustibles, avec de très bon rendements, sous la forme " noble " d'énergie électrique. C'est a dire sans transformation mécanique.

Les réactions électrochimiques en jeu ne produisent pas d'émissions polluantes, et elles n'émettent ni bruit ni odeur.

Enfin, si les piles à combustible devenaient un jour un produit de série pour les constructeurs automobiles (avec des puissances embarquées de quelques dizaines de kW, à des prix compatibles avec ce marché : PAC à 20 000frs pour 50KW soit 40 frr/kW), la mise à disposition des particuliers de générateurs individuels (quelques kW) pourrait concurrencer grandement EDF qui prend d'ores et déjà les dispositions nécessaires afin de garantir son inaccessible monopole.

Quoiqu'il en soit, c'est a terme d'utilisation de l'hydrogène pur qu'il faudra utiliser lorsque les ressources en énergies fossiles seront épuisées. Pour cela il va valoir trouver un moyen de production économique et en masse de l'hydrogène….la Water Fuel Cell de S. Meyer semble représenter la meilleure solution…mais les enjeux économiques sont tels qu'il faut traiter ce sujet avec de grandes précautions.

ANNEXES

Les piles à combustibles

LES TYPE DE PILES

Les piles alcalines **(AFC)**

Bien que parmi les plus anciennement développées, et utilisées dans les programmes spatiaux de la NASA, les piles alcalines (ou AFC pour Alkaline Fuel Cell) ont été mises à l'écart depuis quelques années. Elles travaillent à " basse température ", aux environs de 60 à 80 °C, à pression atmosphérique, mais peuvent supporter jusqu'à 230 °C à plus forte pression. Elles nécessitent la présence de catalyseurs " nobles " à la cathode, mais peuvent s'en passer à l'anode (où le nickel est suffisant).
Elles utilisent de la potasse sous forme aqueuse (KOH) comme électrolyte.
Elles doivent être alimentées en gaz réactifs ne contenant ni CO (qui empoisonne les catalyseurs à base de platine), ni CO_2, pour éviter tout problème de consommation de l'électrolyte par précipitation de carbonates.
En fait, elles n'ont pas pu bénéficier pleinement des développements récents, qui furent principalement financés en vue d'opérations de transport, ce qui n'est pas favorable, a priori, aux systèmes contenant un électrolyte liquide.
Cependant, leur coût et leur poids plus faibles que les solutions acides laissent présager de bonnes potentialités pour les applications statiques. Des programmes spécifiques sont actuellement à l'étude au Canada et en Grande Bretagne.
Des piles unitaires de 50 kW ont déjà été assemblées, et une installation de 500 kW est en projet.

Les piles à carbonates fondus (**MCFC**)

Ces piles ont pour électrolyte des carbonates de lithium et de potassium fondus. Fonctionnant à haute température, (entre 600 et 700 °C sous 1 à 6 atmosphères), elles ont l'avantage d'avoir des rendements théoriques élevés, et de pouvoir transformer directement un composé hydrogéné (réformage interne) tel qu'un hydrocarbure. Elles sont insensibles aux polluants, et peuvent même consommer du CO comme carburant.
De plus, elles peuvent facilement travailler sans catalyseur noble, et utilisent pour cette fonction des composés à base de nickel.
Elles permettent de récupérer de la chaleur à un haut niveau de température, pour des applications " industrielles ".
Leurs principaux inconvénients sont aussi liés à ce niveau de température, (technologie délicate, tenue et coût des matériaux, montée en température longue et assurée par des moyens auxiliaires...).
L'installation pilote la plus importante est une centrale de cogénération de 2 MW à Santa Clara, en Californie.

Les piles à oxydes solides (**SOFC**)

Ceux sont celles qui travaillent à la plus haute température (de 850 à 1000 °C). Cette température est nécessaire pour permettre à l'électrolyte composé d'oxydes de zirconium ZrO_2 et d'ytterbium Y_2O_3 de posséder une conductivité protonique suffisante. Les recherches actuelles tentent de baisser cette température de

fonctionnement en dopant l'électrolyte d'autres composés.
Les catalyseurs utilisés sont à base de nickel et d'oxydes, et l'ensemble est insensible aux polluants. Les combustibles admis sont très variés, et le réformage interne est possible.
C'est sur ces piles que sont menés, depuis quelques années, les plus gros efforts de recherche, car on peut envisager des densités de puissance élevées et des rendements proche de 60 % en génération d'électricité. De plus, la chaleur utile peut être récupérée à un niveau de température suffisant pour envisager des utilisations industrielles intéressantes. Les prototypes les plus puissants sont actuellement de 25 kW, mais des projets à 2 MW sont à l'étude.

Les piles à acide phosphorique (**PAFC**)

Avec un électrolyte sous forme gélifiée, elles fonctionnent à une température " utile " d'environ 180 à 210 °C, pour des pressions allant jusqu'à 6 atmosphères.
A ces niveaux de température, il y a nécessité d'utiliser des catalyseurs nobles (du platine, 0,8 gramme par kW de puissance électrique nominale).
La PAFC est peu sensible au CO, on peut en admettre jusqu'à 1% en volume. Le combustible le plus souvent utilisé est un mélange riche en hydrogène, issu du réformage du gaz naturel, au moyen de techniques conventionnelles.
C'est, de loin, la pile la plus utilisée pour des applications commerciales, et près de 200 installations de ce type (d'environ 200 kW) sont en fonctionnement dans diverses parties du monde (USA, Japon et Europe).
On précisera plus loin certaines de leurs principales qualités, dans le cadre du chapitre sur les applications.

Les piles à membranes échangeuses de protons (**PEMFC**)

Ce sont des piles à électrolyte polymère solide, parfois appelées SPFC (Solid Polymer Fuel Cell), fonctionnant dès la température ambiante, mais dans des conditions optimales autour de 80 °C, pour des pressions de 1 à 4 atmosphères.
Elles nécessitent des catalyseurs précieux, mais les progrès récents en limitent les besoins à environ 0,25 gramme par kW. Elles craignent la présence de CO, qui doit être limitée à quelques ppm.
De nombreux prototypes pour le domaine des transports ont été développés, et on commence à proposer des installation de cogénération basé sur des PEMFC, jusqu'à 250 kW.
Leurs avantages sont des temps de démarrage quasiment instantanés avec, à température ambiante, près des deux tiers de la puissance nominale en quelques secondes, ce qui les rend compatibles avec les besoins des véhicules de transports.
De plus, elles mettent en oeuvre des technologies moins délicates, et assez faciles à développer, avec les moyens actuels, dans le cadre de séries industrielles. Par contre, la teneur en eau des membranes des PEMFC doit être contrôlée soigneusement : celles ci doivent être maintenues humides pour favoriser le transports des ions, nécessitant un système spécifique d'humidification.
Le combustible le plus souvent employé est l'hydrogène, sous une forme très pure, nécessitant un réformage externe très poussé des carburants classiques (gaz naturel, méthanol...).

Les piles à méthanol direct (**DMFC**)

De récents travaux de recherche ont été entrepris pour adapter les PEM au méthanol (sans réformage). Si de telles piles s'avéraient techniquement réalisables, elles pourraient, du moins pour les applications embarquées, être très rapidement économiquement viables, tout en résolvant le problème du stockage d'hydrogène, ou du réformeur embarqué. Pour ces raisons, certains y voient l'avenir pour la traction automobile, mais, pour l'instant, les densités de courant obtenues restent faibles.
On peut, en guise de conclusion de ce rapide tour d'horizon, citer un troisième type de piles acides à basse température, les piles à méthanol à combustion directe (DMFC pour Direct Methanol...) qui permettent de se passer de réformeur externe, avec un électrolyte constitué d'acide sulfurique, et évitent tout stockage d'hydrogène. Elles seront certainement supplantées par les PEM à Méthanol, le jour où celles ci s'avéreront fiables.

LE MARCHE

Les PEMFC

Les premières piles sorties des laboratoires utilisant le concept de membrane échangeuse de protons étaient dédiées au domaine spatial. En effet, leur basse température de fonctionnement exigeait, pour obtenir des densités de puissance importantes, de grandes quantités de métaux " nobles ", platine par exemple.

Cependant, si jamais l'industrie automobile, pour des raisons liées, par exemple, à la protection de l'environnement, devenait un marché majeur pour les piles de type PEM, les coûts du générateur moyen d'environ 50 kW (70 CV) ne pourraient pas, dans les conditions actuelles, dépasser les 20 kF, soit 400 F par kW, c'est à dire 10 fois moins que les objectifs annoncés à l'horizon 2000 pour une installation basée sur une PAFC. L'apparente simplicité de l'assemblage membranes électrodes dans les piles ne peut pourtant cacher les problèmes technologiques qui restent à résoudre.
D'autant plus que de nouvelles potentialités, avec utilisation directe de méthanol, pourraient émerger rapidement.

Ces perspectives prometteuses ont attiré l'ensemble des grands groupes mondiaux constructeurs de véhicules particuliers, et l'offre actuelle de PEMFC est en continuelle augmentation : de nombreux laboratoires de recherche proposent des solutions innovantes, que des groupes industriels reprennent à leur compte.
Voici une liste des principales entreprises impliquées dans leur développement.
Ballard Power Systems (de Vancouver au Canada) semble l'industriel ayant l'offre la plus riche. Il est surtout connu pour les applications " transport " de ses piles (en association étroite avec Daimler Benz), notamment les projets NECAR et de nombreux prototypes de bus.
Associé depuis peu à GEC ALSTHOM, il développe aussi des produits spécifiques aux applications statiques (dont une installation intégrée de cogénération par pile de 250 kW, avec réformage de gaz naturel).
Avec les progrès récents, ses piles ont atteint des caractéristiques de poids et compacité (1 kg/kW et 1 dm^3/kW) compatibles avec les contraintes de l'industrie automobile, et permettent donc de concevoir des systèmes de cogénération de

toutes tailles, pour des besoins domestiques aussi bien qu'industriels.
Daimler Benz (de Stuttgart en RFA) est aussi, depuis longtemps, actif dans le domaine des PEMFC et de leurs applications, en association avec Ballard depuis 1993. Il développe surtout les réformeurs de méthanol, en vue de les installer dans les véhicules automobiles (projet réalisé avec NECAR3).
De son coté, **Siemens** travaille depuis près de 20 ans sur les PEMFC, à partir de brevets de General Electric, et livre, entre autres, des systèmes de propulsion pour des sous marins de la Marine Allemande, basés sur des stacks d'environ 50 kW. Un effort de recherche spécifique est mené pour réduire les coûts de production en vue de répondre au probable accroissement du marché.
Un autre constructeur européen est présent sur le marché des PEMFC : **De Nora**, de Milan ; c'est un des leaders mondiaux dans le domaine des électrolyseurs à membranes, et il développe, depuis 1991, des piles PEM tant pour les applications embarquées que pour les applications statiques.
Son unité de base de cogénération est de 50 kW, avec réformage de gaz naturel. Elle devrait être commercialisée dans l'année 1998, avec des prix de base, pour un système complet, d'environ 10000 F par kW, avec un bon espoir de diviser ces coûts par 3 dans la prochaine décennie.
Enfin, il faut citer 3 constructeurs américains, très actifs dans le domaine des PEMFC :

- **IFC** (déjà cité pour les PAFC), qui est le partenaire privilégié de Ford dans le développement des PEM et des réformeurs de méthanol ;
- **H Power** (du New Jersey), qui produit déjà en série des " micropiles " de 50 à 300 W, alimentées en air non pressurisé ; sa gamme s'enrichit de PEM jusqu'à 50 kW, alimenté par de l'hydrogène issu de réformage de carburant pour moteurs diesels ;
- **Energy Partners** (de Floride), qui produit des stacks de 19 kW.

En conclusion, les PEMFC semblent être, à court et moyen termes, les systèmes les plus prometteurs, car ils sont à la fois compatibles avec les besoins de la traction automobiles et de la cogénération stationnaire. La plupart des constructeurs automobiles financent, avec des aides institutionnelles, de gros efforts de recherche et développement, avec l'ambition affichée de sortir des véhicules en série dès 2010. Si tel est le cas, les systèmes de cogénération correspondants seront très vraisemblablement compétitifs, techniquement et économiquement, tant pour les applications domestiques qu'industrielles.
Les autres types de piles
Les quatre autres types de piles à combustible sont, apparemment, moins immédiatement valorisables, soit par leur caractéristiques propres, soit par les progrès techniques encore nécessaires avant leur mise sur le marché.

Les **piles à méthanol direct (DMFC)**, qui affichent depuis quelques années des progrès sensibles quant à leurs performances, sont cependant encore loin de celles obtenues par les PEMFC, pour des coûts en métaux nobles encore trop importants. Cependant, elles seraient une excellente solution pour des piles portables, car, à basse température, elles pourraient fonctionner avec des carburants de la famille des hydrocarbures. Les principaux acteurs dans ce domaine sont le Jet Propulsion Laboratory (Californie), et Siemens. Elles sont à base de NAFION, mais se heurtent à un certain nombre de problèmes, rapidement listés ci dessous.

- La formation de sous produits d'oxydation, tels que le CO en forte concentration,

nécessite l'utilisation de grandes quantités de plomb comme catalyseur pour son oxydation en CO_2.

- D'autre part, la diffusion du méthanol à travers la membrane diminue le rendement faradique.
- Enfin, il ne faut pas négliger les problèmes liés à la séparation du CO_2 formé et du méthanol résiduel en sortie de pile.

Les **piles alcalines (AFC)**, bien que déjà disponibles et largement utilisées dans les programmes spatiaux ou militaires, sont, à l'heure actuelle, limitées par les problèmes de carbonatation de l'électrolyte. Les tailles envisageables sont, elles aussi, limitées, et un seul fabricant, ZEVCO (Royaume Uni), qui a repris les activités d'ELENCO (Belgique), en propose sur le marché. Par contre, certains grands groupes (Westhinghouse, en liaison avec une entreprise canadienne, ASTRIS) continuent de développer des solutions innovantes pour permettre à ces piles de mieux faire valoir leurs avantages (basse température, poids et coût intéressants...).

Les **piles à carbonates fondus** sont souvent considérées comme les remplaçantes, à moyen terme, des PAFC, en ce qui concerne les applications statiques. En effet, fonctionnant à plus haute température, elles présentent un meilleur rendement de génération électrique, et des coûts d'investissement qui devraient diminuer (pas de métaux nobles). De plus, elles sont capables de " brûler " d'autres combustibles que l'hydrogène, notamment des produits obtenus par gazéification du charbon, ainsi que le gaz de synthèse (CO/H_2), issu du réformage brut de tous les combustibles carbonés. Une dizaine de groupes industriels s'intéressent aux MCFC, répartis également entre USA, Japon et Europe. On retrouve des entreprises actives sur d'autres types de piles (IFC, Ansaldo), de très gros industriels (Deutsche Aerospace, Hitachi, Mitssubishi) ou des laboratoires spécifiques (M-C Power Corporation, Energy Research Corporation aux Etats Unis, Brandstofel Nederland, Hisikawajima-Harima
au Japon). 2 opérations de démonstration sont en cours de montage en Californie, au travers de groupements de producteurs d'électricité, pour tester des unités de 250 kW (à San Diego) et 2 MW (à Santa Clara).

Enfin, les piles le plus d'espoirs à moyen et long terme, pour les applications statiques, semblent être les **piles à oxydes solides**. Etant les piles les plus chaudes, ce sont donc celles qui ont les meilleures potentialités en rendement électrique, densité de puissance et coût unitaire, tout en acceptant théoriquement la plus grande diversité de combustibles. De très nombreux programmes de recherche et développement sont en cours. Ils tentent de doper l'électrolyte par adjonction d'oxydes de terres rares, pour lui permettre d'accroître sa conductivité protonique à plus bas niveau de température. On y retrouve des industriels déjà impliqués dans le développement d'autres types de piles, souvent en association avec des laboratoires universitaires, et des équipes de recherche de producteurs d'énergie. Par exemple, la DER d'EDF est dans un consortium regroupant, entre autres, Siemens et GEC Alsthom pour développer une pile de 50 kW, avec l'aide de la Communauté Européenne.

Ce rapide tour d'horizon de l'offre dans le domaine des piles à combustible peut être résumé par :

- une offre commerciale de plus en plus performante et diversifiée permet

l'installation de plusieurs MW par an ;

- de grands groupes industriels, de divers secteurs de l'économie, s'intéressent au sujet, et investissent d'importantes sommes en recherche et développement ;
- il existe des solutions pour tous types d'applications ;
- les programmes militaires et spatiaux, et leurs puissances financières, sont aussi impliqués dans le processus.