

LA PILE PAFC *(Phosphoric Acid Fuel Cell)*

Sommaire

1. Un peu d'histoire
2. Caractéristiques générales
3. Le principe de fonctionnement et les composants
4. Performances et caractéristiques
5. Exemples de réalisations
6. Acteurs industriels
7. Aspects économiques

1. Un peu d'histoire

Le premier électrolyte utilisé dans une pile à combustible, par son inventeur William Grove en 1842, fut l'acide sulfurique. Ce n'est qu'en 1961 que G.V. Elmore et H.A. Tanner mirent en évidence l'intérêt de l'acide phosphorique (à concentration de 35%) en le mélangeant à de la poudre de silice : l'acide ne subissait plus de réduction électrochimique et la pile pouvait fonctionner à l'air. A partir de cette date, l'intérêt des militaires¹ permit une accélération de son développement et la première pile vit le jour en 1965 (figure 1).

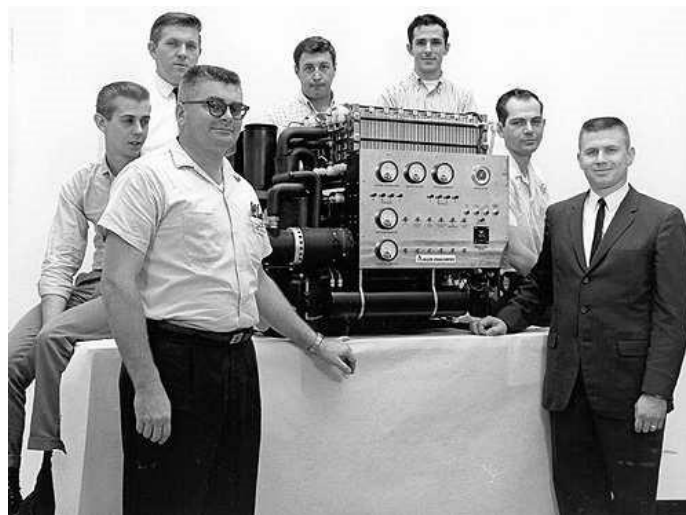


Figure 1 - La pile PAFC Allis-Chalmers de 5 kW, 1965
(Document du Smithsonian Institute, USA)

¹ Cette pile pouvait être couplée à un reformeur utilisant des combustibles disponibles pour les militaires.

2. Caractéristiques générales

Aujourd'hui, la pile à combustible à acide phosphorique possède –dans la famille des piles à combustible- une technologie très mature, grâce essentiellement aux japonais et à la société américaine *UTC Power*, dès 1978, et qui a disparu en 2013. Cette dernière avait réalisé une centrale de 1 MWe et avait vendu plus de 300 piles PureCell™ (anciennement PC25™) de 200 et 400 kWe dans 19 pays (anciennement sous sa marque *ONSI Corp*²) depuis 1992. Certaines piles avaient dépassé 40 000h de fonctionnement.

Malgré quelques tentatives d'application de la technologie PAFC dans le portable (Sanyo, 250W sous 24V) et le transport public (Fuji Electric), ce sont les applications stationnaires en cogénération de 50 à 5 000 kWe qui regroupent aujourd'hui les développements.

3. Le principe de fonctionnement et les composants

Il s'agit (voir figure 2) d'une oxydoréduction électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon la réaction chimique globale universellement connue :

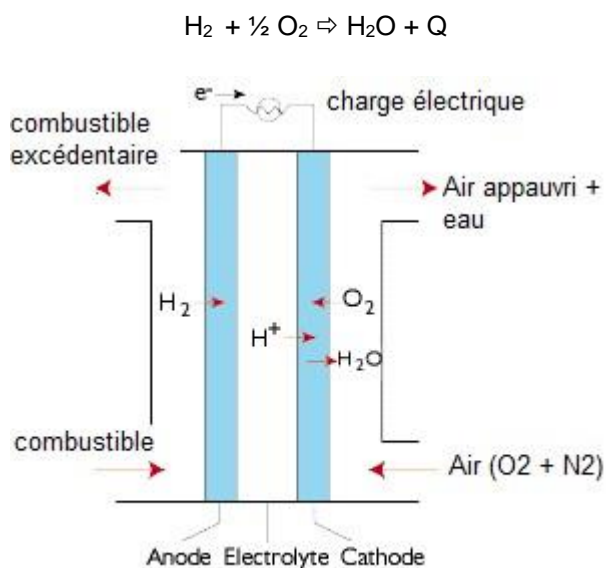
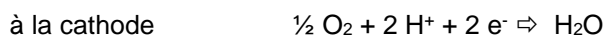


Figure 2 – Schéma de principe d'une pile PAFC

Les électrodes

La réaction électrochimique s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte liquide (acide phosphorique), conducteur des protons H^+ . Les électrodes sont généralement en graphite.

Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :



Les plaques d'interconnexion

Les plaques d'interconnexion –montage bipolaire- sont en carbone poreux équipées de canaux pour l'alimentation en gaz des électrodes.

Le catalyseur

Les catalyseurs anodique et cathodique sont du platine.

² Le japonais *Toshiba* s'était associé, en 1992, à *UTC Fuel Cells* pour former la société *ONSI Corp*.

L'électrolyte

L'acide phosphorique est contenu dans une matrice poreuse de carbure de silicium et de Téflon. La température de fonctionnement : au moins 190°C pour éviter la dissolution de l'eau dans l'électrolyte acide et au plus 210°C, température de début de décomposition de l'électrolyte.

Evacuation de l'eau : l'eau formée par la réaction est évacuée à la cathode sous forme de vapeur grâce à un débit d'air sur-stœchiométrique.

Evacuation de la chaleur : la chaleur est évacuée par une circulation de fluide caloporteur (air ou eau) dans les plaques bipolaires.

4. Performances et caractéristiques

L'allure de la caractéristique courant-tension est la même que celle de la pile PEMFC (voir fiche 5.2.1). Le point de fonctionnement généralement choisi se situe autour de 0,17 W/cm². Le rendement énergétique s'exprime³ par la relation :

$$\eta = 1 - T\Delta S/\Delta H$$

avec : ΔH , la chaleur de réaction à pression constante et $T\Delta S$ la chaleur isotherme réversible échangée avec le milieu extérieur.

Ce rendement s'exprime de façon plus simple, en tout point défini par la tension V , par la relation : $\eta = V/V_0$ ou $V/1,23$ (pour le couple H₂/O₂)

Dans la pratique, le point de fonctionnement choisi se situe dans une zone de rendement électrique compris entre 36 et 42% (HHV), proche de l'optimum de puissance spécifique. La puissance spécifique est privilégiée vis à vis du rendement du fait du coût des composants.

A titre d'exemple, le Tableau 1 donne les principales caractéristiques du modèle PureCell™ de 400 kW que *UTC Power* commercialisait.

5. Exemples de réalisations

Il n'est évidemment pas question de détailler toutes les installations réalisées. Ces piles, en particulier celles installées par *UTC Power*, puis *ClearEdge Power*, sont toujours en place, fonctionnant en cogénération électricité-chaleur avec un rendement global de l'ordre de 90% (cf. Fig. 3).

ClearEdge, ayant cédé ses avoirs au coréen *Doosan* en juillet 2014 après avoir été déclaré en faillite, il est difficile de connaître aujourd'hui l'état et le devenir de plusieurs centaines de systèmes.

A noter que l'une d'elles avait été installée en France en 2000, par EDF et Gaz de France, pour alimenter en électricité et chauffage un groupe d'habitations, à Chelles (Seine et Marne), à titre expérimental. Son fonctionnement avait été très satisfaisant (disponibilité de l'ordre de 80%) jusqu'à la fin du projet en fin 2003. Seul un coût encore excessif (760 000 euros pour 200 kW en 2000) n'avait pas permis à EDF de renouveler une telle expérience.

³ *Les piles à combustible* : C. Lamy et J.M. Léger, Journal de Physique IV, Colloque C1, supplément au Journal de Physique III, Volume 4, janvier 1994.



Figure 3 – PureCell™ modèle 400

Power	
Electric power	400 kW/400 to 471 kVA
Voltage/frequency	480VAC/60 Hz/3 phase
Efficiency	
Electrical (LHV)	>40% initial >38% 10-year average
Overall (LHV)	90% with full heat recovery
Fuel	
Supply	Natural Gas
Consumption (HHV)	3.79 MMBtu/hr initial 3.99 MMBtu/hr average
Inlet Pressure	10 to 14 in. water
Heat Recovery	
Low grade up to (140°F supply)§	1.017 MMBtu/hr initial 1.043 MMBtu/hr average
High grade up to (250°F supply)§	0.717 MMBtu/hr initial 0.833 MMBtu/hr average

Tableau 1 – Principales caractéristiques de la pile PureCell™ modèle 400

6. Acteurs industriels

Ils ne sont plus, en principe, que deux industriels sur ce marché, après la disparition de *Hydrogen Corp*⁴ en 2008 et le changement de stratégie de *Mitsubishi Electric Corp.* (abandon de la PAFC au profit de la SOFC) au début 2000:

- *Fuji Electric*⁵ qui a débuté les développements de la filière PAFC en 1973. Depuis 2010, son produit commercial est une unité de 100 kWe baptisée **FP-100i** (Figure 4) dont les

⁴ *Hydrogen Corp* commercialisait une unité de 400 kW et collaborait avec le coréen Samsung qui, lui aussi, a abandonné ses travaux sur la filière PAFC

⁵ <http://www.fujielectric.com/>

caractéristiques sont données dans le Tableau 2, extrait de la présentation *Fuji* à l'IPHE de mars 2011.

En 2012, *Fuji Electric* annonçait avoir atteint une durée de fonctionnement de 130 000 h et avoir vendu 30 systèmes, dont un à Daimler, installé mi-2012.

En décembre 2017, *Fuji Electric* annonçait 85 installations à pile à combustible PAFC dans le monde, dont 67 au Japon et 8 en Allemagne.



Figure 4 - Le système FP 100i de Fuji Electric

- **Doosan Fuel Cell America, Inc.** filiale de Doosan Corp⁶, compagnie sud-coréenne. Elle a livré six installations (sur la technologie PureCell Model 400) en Corée, au KOSEP (Korean South East Power Co. Ltd) en mai 2015, ce qui portait, à cette date, à 35 le nombre d'unités installées à Séoul (et dans ses environs) et aux USA. En août 2018, Doosan a annoncé la réalisation d'une centrale de 50 MWe, baptisée *Daesan Green Energy Fuel Cell Power Plant* (figure 4), dont la construction doit être achevée en 2020. Elle sera alimentée en hydrogène sous-produit à proximité dans un complexe pétrochimique.



Figure 4 – la *Green Energy Fuel Cell Power Plant* de Doosan (50 MWe)

⁶ <http://www.doosanfuelcell.com/en/>

7. Aspects économiques

La pile *UTC Power* de 400 kWe installée en mai 2011 à New York avait coûté 3 millions de dollars (mise en place incluse), soit 7 500 \$/kWe installé. Des éléments d'analyse de coût sont donnés dans la référence (2) de la bibliographie, directement accessible sur le site Web associé.

A titre d'exemple, EDF et Gaz de France avaient donné un prix d'achat de la pile de Chelles de 3 800 Euros/kWe, en 1988.

En 2013, le prix de vente affiché par *Fuji Electric*⁷ pour son système de 100 kWe était de 65 M¥ (environ 480 000 €), hors installation.

Type	Natural gas-fed	Digester gas-fed	Pure-hydrogen gas-fed
Rated output power	AC 105kW		
Output voltage/ frequency	210V or 220V / 50Hz or 60Hz		
Electrical efficiency	42% [LHV]	40% [LHV]	48% [LHV]
Total efficiency	91% [LHV] ,123kW [When 60 deg C water is used] If 90 deg C water is used, then 50kW	90% [LHV] ,130kW [When 60 deg C water is used] If 90 deg C water is used, then 50kW	99% [LHV] ,113kW [When 60 deg C water is used] If 90deg C water is used, then 68kW
Exhaust gas	NOx : less than 5ppm [O ₂ 0%] SOx,dust : less than the detection limit		NOx, SOx, dust : none
Consumption of fuel	22m ³ /h (Normal)	44m ³ /h (Normal)	74m ³ /h (Normal)
Operating system	Fully automated / grid-connected		
Volume W x L x H	2.2m (W) x 5.6m (L) x 3.4m (H)		
Weight	15 tons	16 tons	14 tons
1 th IPHE Workshop - Stationary Fuel Cells		Copyright© Fuji Electric Systems Co.,Ltd. All right reserved	

Tableau 2 – Caractéristiques du système Fuji FP-100i

⁷ <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2013>