

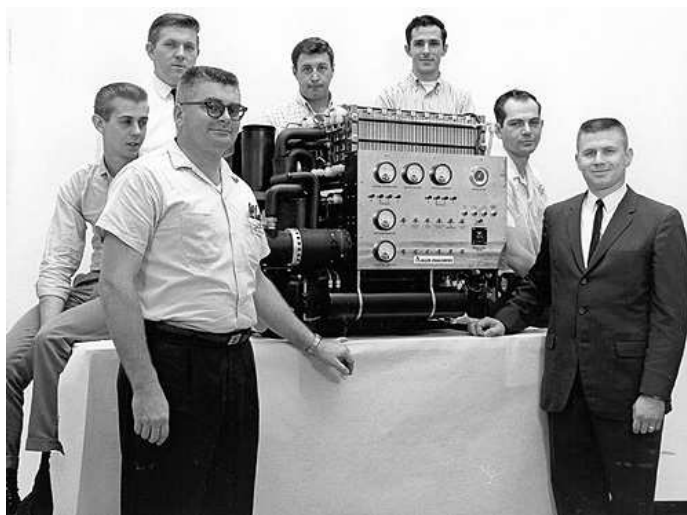
## **LA PILE PAFC** *(Acid Phosphoric Fuel Cell)*

### **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
8. Bibliographie

### **1. Un peu d'histoire**

Le premier électrolyte utilisé pour 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 militaires<sup>1</sup> 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)

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

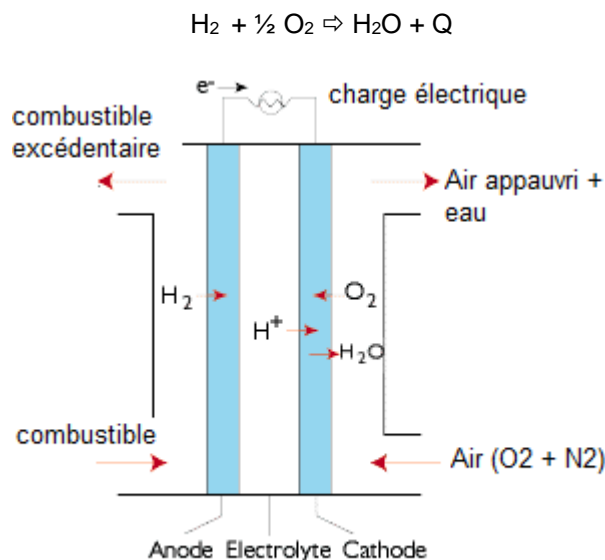
## 2. Caractéristiques générales

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<sup>2</sup>*) depuis 1992. Certaines piles avaient dépassé 40 000h.

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 :

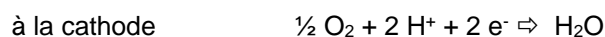


**Figure 2 – Schéma de principe d'une pile PAFC**

### 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.

<sup>2</sup> 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/cm<sup>2</sup>.

Le rendement énergétique s'exprime<sup>3</sup> par la relation :

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

avec :  $\Delta H$ , 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 :

$$\eta = V/V_0 \text{ ou } V/1,23 \text{ (pour le couple H}_2\text{/O}_2\text{)}$$

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 kWe 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. Elle avait été arrêtée au début 2005.

---

<sup>3</sup> *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**  
(by courtesy of UTC Power)

|                                  |                                                  |
|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Power</b>                     |                                                  |
| Electric power                   | 400 kW/400 to 471 kVA                            |
| Voltage/frequency                | 480VAC/60 Hz/3 phase                             |
| <b>Efficiency</b>                |                                                  |
| Electrical (LHV)                 | >40% initial<br>>38% 10-year average             |
| Overall (LHV)                    | 90% with full heat recovery                      |
| <b>Fuel</b>                      |                                                  |
| Supply                           | Natural Gas                                      |
| Consumption (HHV)                | 3.79 MMBtu/hr initial<br>3.99 MMBtu/hr average   |
| Inlet Pressure                   | 10 to 14 in. water                               |
| <b>Heat Recovery</b>             |                                                  |
| Low grade up to (140°F supply)§  | 1.017 MMBtu/hr initial<br>1.043 MMBtu/hr average |
| High grade up to (250°F supply)§ | 0.717 MMBtu/hr initial<br>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*<sup>4</sup> en 2008 et le changement de stratégie de *Mitsubishi Electric Corp.* (abandon de la PAFC au profit de la SOFC) au début 2000: **Doosan**, qui a racheté les avoirs de ClearEdge, et **Fuji Electric**.

<sup>4</sup> *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

- **Doosan Heavy Industries & Constructions**<sup>5</sup>. On pouvait penser que cette compagnie allait poursuivre la commercialisation de la pile PureCell™ de 400 kWe, mais quand on regarde son site Web .... la seule publicité de pile à combustible qui apparaît est une pile de type MCFC!
- **Fuji Electric Systems Co., Ltd**<sup>6</sup> a débuté les développements de la filière PAFC en 1973 et a mené 90 expérimentations à partir de 1990. Depuis 1998, 28 unités d'une centaine de kW ont été installées. Depuis 2010, son produit commercial est une unité de 100 kWe baptisée **FP-100i** (cf. Fig. 4) dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 2, extrait de la présentation *Fuji* à l'IPHE<sup>7</sup> de mars 2011.  
En 2012, *Fuji Electric* annonçait avoir atteint une durée de fonctionnement de 130 000h et avoir vendu 30 systèmes, dont un vendu à Daimler, installé mi-2012.  
Mi-2003, *Fuel Cell Today* annonçait 48 installations dont 41 au Japon et 5 en Allemagne.

## 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*<sup>8</sup> pour son système de 100 kWe était de 65 M¥ (environ 480 000 €), hors installation.



Figure 4 - Le système FP 100i

<sup>5</sup> <http://www.doosan.com/en/business/business.do?bizCode=8039&bizSubCode=8041>

<sup>6</sup> <http://www.fujielectric.com/>

<sup>7</sup> [http://www.iphe.net/events/workshops/workshop\\_2011-03.html](http://www.iphe.net/events/workshops/workshop_2011-03.html)

<sup>8</sup> <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2013>

| Type                         | Natural gas-fed                                                                            | Digester gas-fed                                                                           | Pure-hydrogen gas-fed                                                                     |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rated output power           | AC 105kW                                                                                   |                                                                                            |                                                                                           |
| Output voltage/<br>frequency | 210V or 220V / 50Hz or 60Hz                                                                |                                                                                            |                                                                                           |
| Electrical efficiency        | 42% [LHV]                                                                                  | 40% [LHV]                                                                                  | <b>48% [LHV]</b>                                                                          |
| Total efficiency             | 91% [LHV] , 123kW<br>[When 60 deg C water is used]<br>If 90 deg C water is used, then 50kW | 90% [LHV] , 130kW<br>[When 60 deg C water is used]<br>If 90 deg C water is used, then 50kW | 99% [LHV] , 113kW<br>[When 60 deg C water is used]<br>If 90deg C water is used, then 68kW |
| Exhaust gas                  | NOx : less than 5ppm [O <sub>2</sub> 0%]<br>SOx,dust : less than the detection limit       |                                                                                            | NOx, SOx, dust<br>: none                                                                  |
| Consumption of fuel          | 22m <sup>3</sup> /h (Normal)                                                               | 44m <sup>3</sup> /h (Normal)                                                               | 74m <sup>3</sup> /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<sup>th</sup> IPHE Workshop - Stationary Fuel Cells Copyright© Fuji Electric Systems Co.,Ltd. All right reserved

Tableau 2 – Caractéristiques du système Fuji FP-100i

## 8. Bibliographie

- Phosphoric Acid Fuel Cell Portal Page:

[http://www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/phosphoric\\_acid\\_fuel\\_cells\\_pafc/4,1,1,2507.html](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/phosphoric_acid_fuel_cells_pafc/4,1,1,2507.html)