
LA PILE AFC (Alkaline Fuel Cell)

Sommaire

- 1- Généralités
- 2- Le principe de fonctionnement et les composants
- 3- Les performances
- 4- Principales objections faites à ce type de pile
- 5- Exemples de réalisations
- 6- Acteurs industriels
- 7- Conclusions

1. Généralités

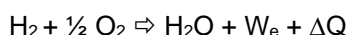
C'est le type de pile dont le développement est le plus ancien : la pile de F.T. Bacon en 1932 était alcaline. Puis la NASA l'avait sélectionnée au début des années soixante pour ses futurs vols habités *Apollo* et *Navette spatiale* pour deux raisons : d'une part parce qu'il n'existait pas encore de membrane protonique (mise au point plus tard par *DuPont de Nemours*) pour une pile acide de type PEM qu'elle avait initialement retenue pour les premiers vols habités (*Gemini*) et d'autre part parce qu'elle utilisait une partie de la technologie qui avait déjà été développée en milieu alcalin dans l'industrie chlore-soude.

La pile AFC se caractérise essentiellement par :

- son électrolyte liquide alcalin et sa température de fonctionnement dans une gamme large (25 à 260°C),
- des performances élevées du fait de la vitesse des réactions chimiques mises en jeu,
- un fonctionnement possible avec des catalyseurs non précieux,
- un empoisonnement rapide de l'électrolyte par le CO₂ si on utilise l'air ambiant à la cathode dans les applications terrestres. De ce fait, ce type de pile n'a d'intérêt que si l'on dispose d'hydrogène et d'oxygène purs.

2. Le principe de fonctionnement et les composants

Il est extrêmement simple : il met en jeu des réactions électrochimiques contrôlées d'oxydoréduction impliquant l'hydrogène et l'oxygène, avec production simultanée d'électricité W_e , d'eau et de chaleur ΔQ , selon la réaction chimique globale :



Une cellule élémentaire est représentée sur la figure 1.

Les électrodes

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte liquide, conducteur des anions OH⁻. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :

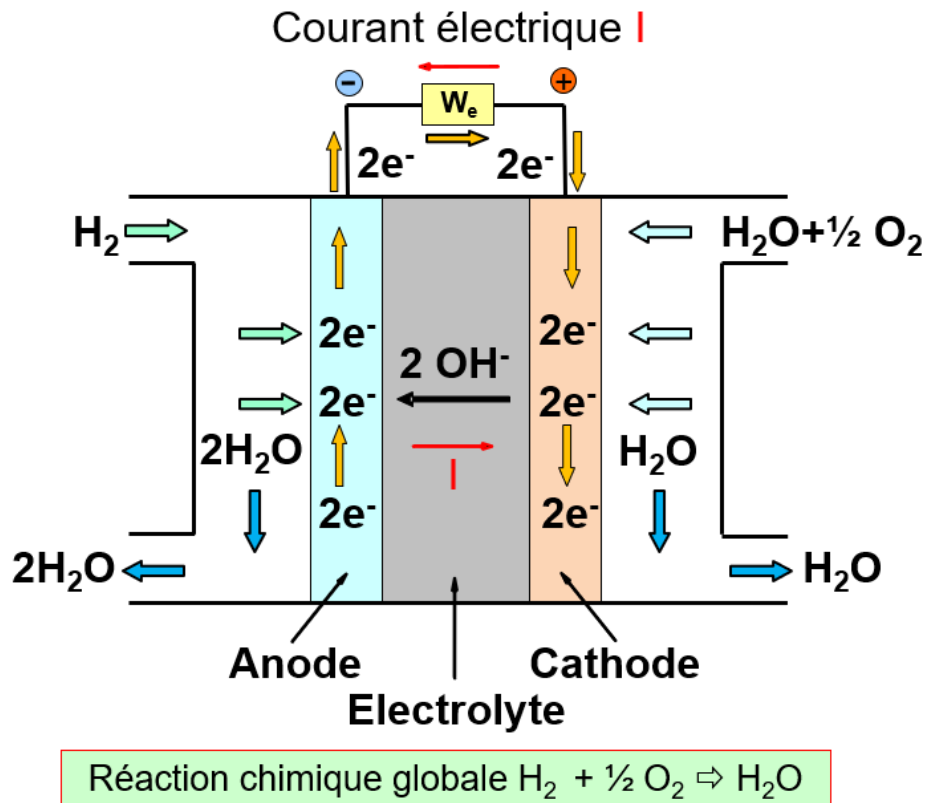
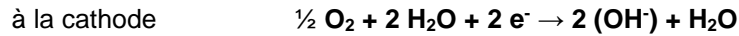
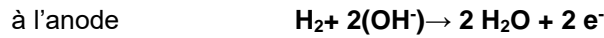


Figure 1 - Schéma de principe d'une pile à combustible AFC

Les plaques d'interconnexion entre cellules élémentaires

Elles sont généralement en nickel ou acier inoxydable, ou même en plastique moulé ; en effet la connexion électrique des électrodes (cellules mises en série électrique), s'effectue à l'extérieur des électrodes, les plaques d'interconnexion n'étant pas bipolaires.

Les catalyseurs d'électrodes

De nombreux métaux précieux ou non peuvent être utilisés comme catalyseurs :

- anode : Pt ou Ni de Raney ou borure de nickel,
- cathode : alliage Pt-Au ou Ag

L'électrolyte

Il peut être mis en œuvre sous deux formes, soit sous forme liquide, soit sous forme solide.

Forme liquide

C'est une solution aqueuse d'hydroxyde de métal alcalin. Cela peut être de la soude NaOH ou de la potasse KOH ; la seconde est préférée par les opérateurs de ce type de pile et sa concentration est de 30 à 45% (8 à 12 moles par litre). Cet électrolyte est soit statique (pile UTC – ex-IFC de la navette spatiale), soit mis en circulation. Dans ce dernier cas, la circulation permet d'utiliser l'électrolyte comme fluide de refroidissement ; mais cette solution a pour inconvénient de multiplier les risques de fuites.

Forme solide

C'est alors une membrane mince dite « anionique », comme celle qu'a développé AFC Energy. Elle est intitulée AEM (Anion Exchange Membrane). Elle est, dans le cas actuel, constituée d'un sandwich de deux polymères disponibles commercialement et bon marché : le PPO (poly 2,6-diméthyl-1,4-phenylene oxide) et le SEBS (polystyrène-b-éthylène-co-butylène-b-styrène). Cet ensemble fait alors une dizaine de microns d'épaisseur. La pile l'utilisant a été baptisée *HydroX-Cell(S)* en novembre 2019.

La température de fonctionnement : pour un électrolyte liquide, à concentration de potasse moyenne (30 – 45%) et à pression proche de l'ambiante, la température de fonctionnement atteint 80 – 90°C ; on peut faire fonctionner la pile à température plus élevée à condition d'augmenter la concentration en potasse et/ou de la faire fonctionner à pression plus élevée : c'était le cas des piles spatiales qui fonctionnaient vers 260°C et sous 3-4 bars.

Avec un électrolyte solide la température de fonctionnement peut s'abaisser jusqu'à 60°C.

3. Les performances

Les performances classiques¹ se situent autour du point de fonctionnement suivant, à pression ambiante et vers 70°C (figure 2):

$$E_N = 0,78 \text{ Volt et } j_N = 100 \text{ mA/cm}^2$$

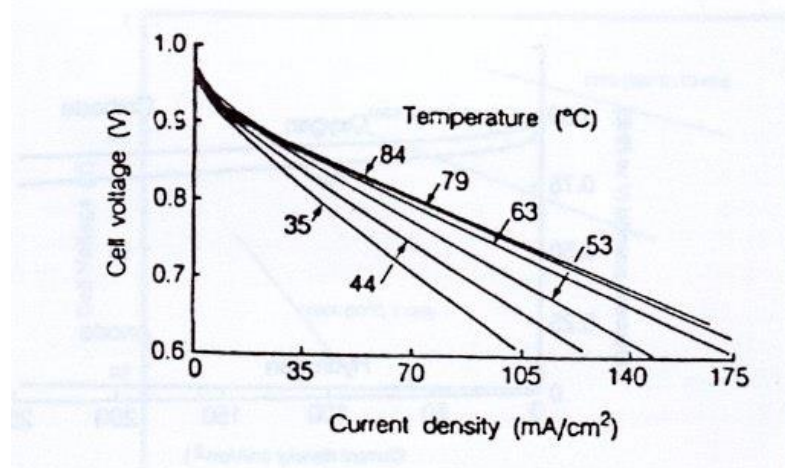


Figure 2 - Caractéristique V(I) d'une pile AFC et influence de la température
(Source : *Proceedings of the 15th IECEC, Volume 2, p. 889, J. McBreen et al.*)

Toutefois, la pile alcaline peut fonctionner à température et pression plus élevées : par exemple, la pile de Bacon dans les années 30 (puissance de 5 kW), fonctionnait à 200°C sous 40-50 bars.

¹ Nombreuses références de A. J. Appleby : *Energy*, 11, 95, 1986 ; *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1989.

Les durées de vie peuvent être élevées : des démonstrations jusqu'à 15 000 h de fonctionnement ont été faites aux USA.

La valeur du rendement énergétique est de même nature pour tous les types de pile à combustible et est détaillée dans la fiche sur les piles à combustible (cf. Fiche 5.2.1).

4. Principales objections faites à ce type de pile

Avec un électrolyte liquide, elles se résument aux points suivants :

- La corrosion des électrodes et autres pièces métalliques provoquée par l'électrolyte liquide qui conduit à des choix de matériaux au coût élevé, et limite la durée de vie à des valeurs (de l'ordre de 15 000 h) inacceptables pour les applications stationnaires mais tolérables pour des applications mobiles et aérospatiales.
- La difficulté à minimiser le volume d'une telle pile,
- La difficulté d'utiliser directement de l'air comme comburant du fait de l'intolérance de l'électrolyte liquide au CO₂.
- La nécessité de traiter l'électrolyte à l'extérieur de la pile pour le purger de l'eau issue de la réaction électrochimique (en effet, une partie de l'eau formée se retrouve dans l'électrolyte), ce qui conduit à la mise en place d'un sous-système supplémentaire qui grève le coût, la masse et le volume.

Avec un électrolyte solide, ces objections disparaissent ce qui montre les potentialités de la pile alcaline utilisant une telle membrane. Néanmoins, la fiabilité de cet électrolyte n'a pas encore été démontrée sur des durées de fonctionnement longues.

5. Exemples de réalisations

Programme spatial US Apollo

La pile développée par *Pratt and Whitney* pour les missions habitées Apollo est représentée sur la figure 3. Ses caractéristiques principales étaient les suivantes :

- diamètre 57 cm, longueur 112 cm, poids 110 kg,
- caractéristique électrique de cellule : 0,85V – 150 mA/cm²,
- puissance unitaire nominale de 1,42 kW sous 27-31 V,
- alimentation en hydrogène et oxygène purs,
- électrolyte potasse (KOH) à 85%,
- pression de fonctionnement : 60 apsi (4,1 bars abs.),
- température de fonctionnement : 260°C

Programme spatial US du Space Shuttle Orbiter

La pile AFC qui avait été développée pour la navette spatiale US par le même constructeur que précédemment avait les caractéristiques suivantes (figure 4):

- 35 cm de hauteur pour 38 cm de largeur et 101 cm de longueur, poids 91 kg,
- caractéristique électrique de cellule : 0,86V – 470 mA/cm²,
- puissance unitaire nominale de 12 kW sous 27,5 V,
- alimentation en hydrogène et oxygène purs,
- pression de fonctionnement : 60 apsi (4,1 bars abs.),
- température de fonctionnement : 80-90°C
- électrolyte : solution de KOH
- anode : catalyseur 10 mg/cm² d'un mélange de 80% Pt/20% Pd + PTFE déposé sur un écran en Ni argenté,
- cathode : 20 mg/cm² d'un mélange de 90% Au/10%Pt sur le même substrat.

Fiche 5.2.3

Révision de : août 2021

Source : France Hydrogène – T. Alleau



Figure 3 - La pile *Pratt and Whitney* du programme Apollo (1967 ...)



Figure 4 - Un des trois modules de la *Space Shuttle* (1981 – 2011)

6. Acteurs industriels

L'industrialisation de ce type de pile pourrait conduire à un coût plus faible que celui de sa concurrente de type PEM. L'abaissement de ce coût, qui pourrait atteindre 50%, s'expliquerait essentiellement par l'utilisation possible de catalyseurs non précieux (au détriment des performances), comparée aux besoins de platine pour la PEM.

Malgré cet avantage, les inconvénients soulignés au paragraphe 4 ont considérablement limité le développement de cette technologie au profit de la filière PEM, si bien que la quasi-totalité des acteurs, présents sur le marché à partir des années 80 ont, soit disparu, soit abandonné ce secteur :

Fiche 5.2.3

Révision de : août 2021

Source : France Hydrogène – T. Alleau

- **UTC Fuel Cells**, devenu *UTC Power* en 2001, puis *Clear Edge* en 2003, qui a fait ensuite faillite et a enfin été racheté par le coréen *Doosan* en 2014, a fourni les piles spatiales utilisées par la NASA, d'abord pour les vols Apollo puis pour les navettes spatiales. Au total, les piles alcalines spatiales de UTC, alimentées en hydrogène et oxygène stockés sous forme cryogénique, ont cumulé plus de 80 000 heures de fonctionnement au cours d'une centaine de missions. On peut noter que le prototype de navette spatiale russe *Bourane*, abandonnée en 1990, était aussi équipé d'une pile alcaline. Il n'y a plus d'activité aux USA sur la pile AFC depuis l'arrêt du programme des navettes spatiales en 2011.
- **ASTRIS ENERGI** était une société canadienne. Elle avait été créée en 1983 et avait une filiale en République Tchèque, à Benesov (*Astris s.r.o.*), qui était chargée de la R&D et de la fabrication des piles. En août 2007, elle a vendu ses actifs à *MKU Canada Inc.* qui appartient au groupe indien *Acme Tele Power Ltd.* Elle s'était spécialisée dans les unités de la gamme 15-250 We pour des équipements de laboratoire et pour des bancs de tests destinés à la formation, et dans les logiciels adaptés à ces applications. Elle a aujourd'hui abandonné l'activité AFC.
- **Cenergie** qui était une jeune société basée aux USA (Atlanta, Georgie) et dirigée par Nicholas Abson, ancien CEO de *ZeTek* (une des sociétés pionnières dans l'AFC et qui a disparu). Cette société a disparu à son tour.
- **Space Shuttle Orbiter** en Floride (Pompano Beach, USA) qui avait racheté l'usine que *ZeTek* avait construite à Cologne, en Allemagne. Elle travaillait en relation étroite avec l'Université de Graz (Autriche - K. Kordesch). Elle a disparu.
- La société anglaise **Fuel Cell Control Ltd** qui avait repris les actifs de la société *Zevco/ZeTek*, laquelle avait disparu en 2001. Elle a également disparu.
- La start-up israélienne **CellEra** qui avait été créée en 2007 autour d'un nouveau concept de membrane solide et qui a été rachetée par **Elbit Systems** en mars 2015. Cette dernière ne s'est pas manifestée depuis cette date.

A partir de 2011, avec l'apparition des membranes solides anioniques en particulier, plusieurs sociétés sont apparues sur ce créneau :

- La société britannique **AFC Energy PLC**².
- La société israélienne **GEN CELL**
- La société belge **Alkaline Fuel Cell Power Corp.**

AFC Energy PLC

- Fin 2011, cette société développe un modèle commercial d'une puissance de 50 kWe (Système BETA). Il a fonctionné, depuis janvier 2012, dans l'usine d'électrolyse chlore-soude d'*AkzoNobel* en Allemagne, pour valoriser l'hydrogène produit.
- En février 2012, AFC a été retenu comme coordinateur dans le cadre du programme LASER-CELL du FCH-JU européen. Ce projet avait pour objet de développer des technologies de fabrication de composants en grande série.
- En juin 2012, AFC annonce un accord avec la société **ICL** (Industrial Chemicals Ltd) pour construire, dans l'usine d'électrolyse chlore-soude d'ICL à Essex, la plus grande unité de cette technologie, d'une puissance voisine de 1 MW. Cette installation utilisera la technologie BETA Plus d'AFC et sera alimentée avec l'hydrogène sous-produit par l'électrolyseur.
- En septembre 2012, AFC annonce l'inauguration de sa ligne de production dans le Surrey, capable de fabriquer 20 000 électrodes par an.
- En mars 2013, AFC fournit son premier système à l'Université de Lancaster.
- En avril 2014, AFC a reçu une commande de *PHE* (PowerHouse Energy Group)

² <http://www.afcenergy.com/>

- En juillet 2014, AFC a signé un accord préliminaire (MOU) avec la société sud-coréenne *Chang Shin Chemical Co., Ltd*
- En septembre 2014, AFC fait partie d'un projet européen du FCH-JU (POWER-UP) qui a pour objet l'implantation d'un module à pile alcaline (KORE) de 240 kWe, qui sera installé dans une usine chimique de Air Products (Stade, en Allemagne) qui sous-produit de l'hydrogène. La mise en place est annoncée pour fin 2015. Un essai d'un module de 25 cellules est réussi en décembre 2014.
- En mars 2015, AFC réussit, en usine, le test d'un module de 101 cellules (taille définitive), et les composants destinés au module KORE sont réalisés en juin 2015.
- En avril 2015, AFC signe un accord avec **Bangkok Industrial Gas** pour le développement, en Thaïlande, d'une capacité de 10 MW, avec une première tranche de 2 MWe pour fin 2016, qui utiliserait des surplus de production d'hydrogène de la société **BIG** dans la province de Rayong.
- En avril 2015, AFC signe un accord (MoU), avec la société **Dubai Carbon**, pour un projet de déploiement de 300 MW à Dubai d'ici la fin 2020.
- En octobre 2015, le module KORE (Fig. 5) fournit ses premiers kilowatts. Une puissance de 200 kW est atteinte en janvier 2016.
- En février 2016, AFC annonce avoir signé un accord de partenariat avec l'allemand **planting GmbH**
- En mars 2016, AFC signe un accord de collaboration, avec les sud-coréens **Samyoung Corp.** et **Changshin Chemical Co.**, pour le déploiement futur d'un ensemble de 50 MW à Daesan, avec une première phase de 5 MW et une seconde de 45 MW pour la fin 2019.
- En juillet 2016, AFC annonce la mise au point d'un système d'une puissance de 10 kWe programmé dans son plan stratégique interne.



Figure 5 - Le module AFC/KORE de 240 kW en 2015

- En août 2016, AFC annonce un accord de collaboration technologique (Joint Development Agreement - JDA) avec l'italien **De Nora S.p.A.**
- En novembre 2016, AFC a annoncé qu'il a achevé la mise au point de la génération 2 « Gen2 » de sa pile.
- En mars 2017, AFC annonce qu'il a reçu confirmation d'une commande de **PowerHouse Energy plc** ("PowerHouse") d'une petite pile.
- En avril 2017, AFC annonce une extension de l'accord avec *De Nora* aux électrodes et au stack
- En juin 2017, AFC annonce qu'il est sur la voie de réussir la première démonstration commerciale d'ici la fin 2017 (Fig. 6).

Fiche 5.2.3

Révision de : août 2021

Source : France Hydrogène – T. Alleau



Figure 6 - Le module AFC/Kore en 2017

- En juillet 2017, AFC annonce qu'il a signé un accord avec **Dunsfold Park Ltd.** ("Dunsfold Park") pour démarrer le projet FEED d'étude d'un générateur dans la gamme 1 - 1.5 MW pour l'alimentation d'un micro-réseau. AFC estime pouvoir fournir une première installation au 4^{ème} trimestre 2018.
- En octobre 2017, AFC annonce qu'il est sur la bonne voie pour une commercialisation.
- En juillet 2018, AFC annonce qu'il a reçu une commande de *Southern Oil*, en Australie, d'un générateur d'une puissance comprise entre 200 et 400 kW à délivrer au premier semestre 2019 et qui doit utiliser un surplus d'hydrogène dans la raffinerie de Gladstone.
- En janvier 2019, AFC annonce le succès d'une démonstration d'un chargeur pour véhicule électrique, baptisé CH2ARGETM, équipé d'une pile à combustible alcaline.
- En avril 2019, AFC confirme les performances de sa technologie ... équipée d'une membrane solide.
- En juin 2019, AFC annonce le succès d'un test, sur 18 mois, d'un prototype *Ammonia to Power* (A2P) dans le cadre du projet FCH-JU baptisé ALKAMMONIA.
- En octobre 2019, AFC annonce que la technologie de ses électrodes a été testée avec succès sur 10 000 heures.
- En juillet 2020, AFC annonce avoir réussi une levée de fonds de 31,6 M€ pour poursuivre le développement de la compagnie.
- En septembre 2020, AFC annonce la vente d'un système alcalin de 100 kW à un laboratoire allemand de Jülich.

GENCELL Energy³

- En juin 2018, cette société israélienne, a présenté un générateur à pile alcaline, baptisé **A5**. L'hydrogène est fourni par un système de craquage de l'ammoniac qui fonctionne à 700°C et qui a été développé dans le cadre d'un projet FCH-JU, dénommé **Alkammonia** et qui s'est achevé en 2018. Sa puissance est de 4 kW et il est destiné à l'alimentation d'un réseau de télécommunications.
- En octobre 2020, GenCell annonce qu'elle a livré un générateur **type G5** (back-up de 5 kW pendant 5 heures) à un client européen.

Alkaline Fuel Cell Power Corp.

Cette société belge⁴ (AFCP) est apparue en 2021. Elle s'appuie sur des connaissances issues de l'ESA (European Space Agency) et est cotée en bourse (symbole PWWR). Elle vise des systèmes de petite puissance (micro-CHP) pour les applications résidentielles en Europe.

³ <https://www.gencellenergy.com/contact/>

7. Conclusions

Après avoir fait les beaux jours de la NASA au milieu des années 60, la technologie alcaline a progressivement sombré essentiellement du fait des inconvénients associés à l'utilisation d'un électrolyte liquide.

A partir de 2010, le développement d'une membrane électrolyte solide anionique a relancé cette filière qui présente de nombreux avantages ... sous réserve de la démonstration de la fiabilité de ce type de matériau.

⁴ <https://www.fuelcellpower.com/>