



## LES PORTABLES À PILE À COMBUSTIBLE

### Sommaire

1. **Les origines**
2. **Caractéristiques et performances**
3. **Architecture de la micro-pile**
4. **Le stockage de combustible**
5. **Les principaux développements**

### 1. Les origines

C'est vers la fin des années 90 qu'a germé, un peu partout et du fait des progrès technologiques, l'idée d'implanter des mini-piles à combustible dans les appareils portables, du fait du plafonnement des performances des meilleures batteries (au lithium, de l'ordre de 150 Wh/kg) et d'un besoin croissant en autonomie.

L'un des tout premiers à se faire connaître sur ce créneau fut la société *Manhattan Scientifics* : dès octobre 1999, Robert Hockaday annonçait avoir réussi un test de fonctionnement d'un téléphone mobile alimenté par une pile à combustible. Moins de quatre ans plus tard, le Président américain Bush faisait une démonstration publique d'un mobile alimenté par une micro-pile à combustible de chez MTI ! Il faut dire qu'avec un chiffre d'affaires de plus de 5 milliards d'euros, le marché des batteries de portables pouvait se permettre une spectaculaire R&D.

### 2. Caractéristiques et performances

On classe habituellement dans la catégorie des portables, les générateurs à pile à combustible dans la gamme 100 mW à 1kW ; leur fonction est essentiellement d'équiper les systèmes suivants : PDA (Personal Digital Assistant), smartphones, tablettes tactiles, ordinateurs portables, caméscopes, outils et générateurs électrogènes portables pour utilisations diverses.

Du fait des environnements classiques dans lesquels ils sont utilisés, ces générateurs fonctionnent à une température voisine de l'ambiante. Deux technologies de pile sont alors théoriquement utilisables : la technologie alcaline et la technologie acide. De fait, seule la technologie acide, dans ses deux variantes PEMFC (alimentée en hydrogène) et DMFC (alimentée en méthanol) (voir fiche 5.2.2), a fait l'objet de développements dans ce domaine d'applications. Côté cathode (ou oxygène), la solution généralement retenue est la respiration naturelle, dite « air-breathing ».

Les puissances fournies sont les suivantes :

- i. téléphonie cellulaire : elle consomme une puissance très variable qui est, au maximum, de l'ordre du watt. La solution la plus généralement développée est un montage hybride composé d'une petite batterie Li-ion qui satisfait la fonction « puissance », et d'une micro-pile à combustible d'une centaine de mW qui recharge cette batterie et satisfait donc la fonction « énergie stockée », le tout piloté par un microcircuit de contrôle-commande. Compte tenu de la taille de ce générateur hybride, les premiers développements ont conduit à un chargeur indépendant du téléphone et relié par fil via la prise USB. A la fin 2007, les progrès dans la miniaturisation ont permis de l'intégrer au cellulaire, comme on peut le voir sur le prototype (fig. 1) présenté par Motorola qui intègre une technologie de pile développée par le canadien *Angstrom Power Inc.* On voit sur la face arrière la grille de protection du système de respiration de la cathode.



Fig. 1 – Prototype de téléphone cellulaire *Motorola* à micro-pile à combustible (*Angstrom*) intégrée et alimentée en hydrogène (2007)

- ordinateurs portables : ils consomment une puissance de l'ordre de 30 We.

Pour les deux applications ci-dessus, les performances actuelles des meilleures batteries (Li-ion) sont insuffisantes et la demande est forte pour une solution répondant mieux aux besoins des utilisateurs (autonomie, panne au moment critique, durée de chargement...). Le marché concerné est d'une nature particulière dans la mesure où la pile à combustible n'a pas de concurrent dès lors qu'elle peut potentiellement multiplier par un facteur 3 à 5 les performances actuelles avec batteries, avec, de plus, un temps de recharge limité à quelques secondes, le temps de remplacer une capsule de combustible. Ce saut dans les performances signifie que ce marché pouvait s'ouvrir même si le coût était sensiblement supérieur à celui de la solution à batterie ; la contrainte majeure n'est donc pas de nature économique mais technique, en particulier au niveau de la compacité et de la légèreté. Pour une dizaine de wattheures embarqués et pour devenir concurrentielle par rapport aux solutions actuelles, la pile à combustible doit réussir à peser moins de 50 g dans un volume inférieur à 25 cm<sup>3</sup> et être équipée d'un stockage sûr et aisé à recharger<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> La question parfois évoquée des rejets d'eau vaut à peine d'être mentionnée tant ils sont infimes, représentant une très faible masse qui, de plus est rejetée, sur plusieurs jours, sous forme de vapeur.

- autres applications : les caméras numériques (elles consomment une puissance de quelques dizaines de watts), des outils comme les perceuses électriques (quelques centaines de watt) et les générateurs portables pour utilisations diverses appelés aussi groupes électrogènes, aujourd'hui essentiellement à moteur thermique à essence (puissance de l'ordre du kWe).

### **3. Architecture de la micro-pile**

Son principe repose sur l'utilisation d'une technologie traditionnelle en microélectronique, que l'on baptise « *fuel-cell-on-a-chip* »: elle consiste à déposer sur un substrat, successivement et par très fines couches (quelques microns), une anode, un électrolyte et une cathode. L'ensemble est schématisé sur la figure 2. Un exemple de réalisation est montré sur la figure 3.

Les entreprises et les centres de recherche internationaux (dont le CEA pour la France) qui ont développé cette technologie privilégient une approche en substrat de silicium mince.

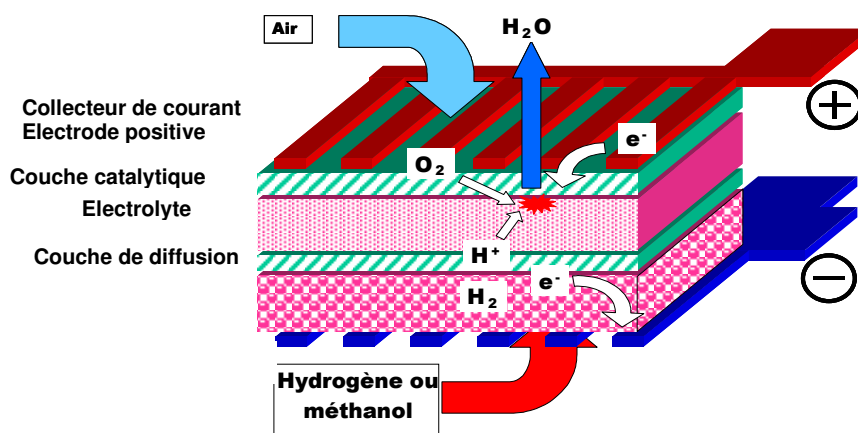


Fig. 2 - Architecture du cœur de la pile (Source: CEA)



Fig. 3 - Ensemble de micro-piles à combustible (Source CEA)

Sur la figure 3 ci-dessus, chaque disque sombre est une cellule unitaire de pile à combustible. Ces cellules sont ensuite découpées puis électriquement associées en série afin de correspondre aux caractéristiques de tension réclamées par l'application.

#### 4. Le stockage du combustible

La température de fonctionnement d'une pile de type PEMFC peut atteindre 75°C mais dans le cas de petits appareils (téléphone, PDA, en particulier) elle doit impérativement rester proche de la température ambiante si on le porte sur soi. Dans ces conditions, le rendement de conversion d'énergie chimique en énergie électrique est relativement faible : il sera de l'ordre de 30% (alors qu'il est de 50% dans les applications plus classiques de ce type de pile à combustible). Cela signifie que pour produire 10 Wh d'énergie électrique dans ces types de portables de petite puissance, la quantité totale d'énergie embarquée devra être de l'ordre de 30 Wh. Ces 30 Wh correspondent à environ 0,9 gramme d'hydrogène.

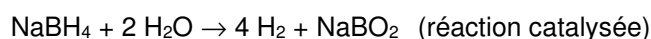
Selon l'hypothèse prise plus haut relative au dimensionnement global du dispositif, les 0,9 gramme d'hydrogène requis doivent être stockés de façon à ne pas dépasser 25 g et 12,5 cm<sup>3</sup>.

Plusieurs modes de stockage sont envisageables :

**Hydrogène sous pression** : techniquement possible mais les investissements en composants et en infrastructure sont prohibitifs. De plus, la sécurité des utilisateurs est difficilement garantie.

**Hydrogène sous forme d'hydrures métalliques** : procédé basé sur la désorption d'hydrogène gazeux sous des conditions proches des conditions de température et de pression normales. Les hydrures métalliques généralement utilisés ne sont pas dangereux pour l'environnement. Par contre, cette solution ne se révèle pas compatible avec le cahier des charges : il faudrait en effet 60g de matériau pour obtenir les 0,9 g d'hydrogène auxquels il convient d'ajouter le container métallique.

**Hydrogène stocké dans une solution de NaBH<sub>4</sub>** : l'hydrogène est libéré par la réaction suivante, à partir de borohydrure de sodium :



NaBO<sub>2</sub> est soluble dans l'eau, n'est pas toxique pour l'environnement et peut être recyclé, en usine, en NaBH<sub>4</sub>. La quantité d'hydrogène produite dépend de la concentration en NaBH<sub>4</sub> dans la solution aqueuse. Cette voie a fait l'objet de nombreux développements dans le passé mais ne semble plus, aujourd'hui, intéresser les industriels. Cette technologie avait été développée par la société américaine *Millenium Cell* qui a disparu en 2008.

**Méthanol** : du méthanol peut être apporté directement à l'anode d'une pile PEMFC où il se transforme en hydrogène par le biais d'une réaction catalysée par du ruthénium ; cette pile est alors dénommée DMFC (Direct Methanol Fuel Cell).

- à l'anode:  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$
- à la cathode :  $6\text{H}^+ + 6\text{e}^- + 1,5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{H}_2\text{O}$
- réaction globale :  $\text{CH}_3\text{OH} + 1,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Le méthanol est un liquide à la température ambiante, facile à transporter et à distribuer sous forme de cartouches comme celles des stylos, mais sa toxicité pourrait devenir un handicap sérieux. De plus, le passage du méthanol au travers de la membrane, difficile à éviter du fait de la miscibilité du méthanol dans l'eau (réaction dite de « cross-over »), conduit à faire réagir chimiquement ce méthanol du côté de la cathode, ce qui diminue l'efficacité de la réaction. Enfin, des sous-produits de réaction empoisonnent les catalyseurs et diminuent la durée de vie des électrodes. Les recherches sur les membranes perméables à l'eau mais imperméables au méthanol font l'objet de travaux de R&D dans le monde. Malgré ce handicap la société allemande *SFC Energy* l'utilise et la développe avec un certain succès depuis sa création en 2000.

A noter que certains laboratoires ont tenté de développer une technologie similaire en utilisant de l'éthanol, moins toxique que le méthanol, mais dont les performances sont moindres.

**Conclusion** : de fait, aucune des technologies décrites ci-dessus ne fournit actuellement de résultat qui satisfasse le cahier des charges des petits appareils (cellulaires, ordinateur portable, ...), en termes d'encombrement et d'énergie stockée, ce qui a conduit les industriels à abandonner –du moins

provisoirement- l'idée d'intégrer la source d'énergie à l'appareil portable en se limitant à développer un système indépendant, aisément connectable, comme le propose la société suédoise myFC.

## **5. Les principaux développements**

### **1. Téléphonie mobile, PDA (source d'énergie dans la gamme 100 – 1000 mWe)**

Plusieurs laboratoires publics et de nombreuses sociétés avaient lancé des travaux dans ce domaine dès le début des années 2000 et de nombreux prototypes avaient été présentés.

Les acteurs les plus dynamiques sur ce créneau étaient les suivants :

- Les japonais Toshiba, KDDI, Hitachi, Seiko Instruments, NTT DoCoMo, Casio, Cosel et Sony.
- Les américains Motorola, Millenium Cell et MTI MicroFuel Cells, Inc.,
- Le canadien Angstrom,
- L'alliance américano-israélienne Medis Technologies Ltd.
- Le coréen *Samsung*,
- Le taïwanais *ANTIG Tech*.
- Une alliance européenne *CEA – STMicro – Nokia* à laquelle s'est ajouté, par la suite, le français BIC.
- La japonais *Bio Coke Lab* .
- L'anglais *Intelligent Energy* avec son chargeur Upp.
- Le français *Paxitech* avec sa pile PACRETE.
- La société *Horizon Fuel Cell Technologies*, basée à Singapour, avec son chargeur Minipak

Ils se partageaient entre les technologies « hydrogène » et « méthanol », intégrées ou non à l'appareil. La plupart annonçaient une commercialisation autour de 2005 – 2007 (cf. Fig. 4 et 5)



Fig. 4 – Cellulaire *Samsung* avec son chargeur (DMFC) indépendant (2007)



Fig. 5 – Baladeur *Toshiba* à pile intégrée (DMFC) (2007)

Mais compte tenu des nombreuses difficultés rencontrées (performances, coût, encombrement ...), ils ont quasiment tous progressivement abandonné ce type de développement.

En 2020, il ne reste plus qu'un seul développeur, dans cette gamme de puissance :

- **Le suédois *myFC*<sup>2</sup>** qui avait présenté, en juin 2013, le chargeur **myFC PowerTrek** qui contient sa réserve d'hydrogène, une pile à combustible et une batterie Li-ion (3 800 mAh) (cf Fig. 6); ses caractéristiques électriques étaient: 5V - 6,5 W. La cartouche contient les sels suivants: siliciure de sodium, borohydrure de sodium et 12 g d'aluminium; l'hydrogène est produit par réaction chimique avec de l'eau contenue dans un réservoir. Son prix, début 2014, était de 229 US\$ TTC. Une nouvelle version baptisée **PowerTrek 2.0** a été présentée en octobre 2014.



Figure 6 - le chargeur **PowerTrek 2.0** de *myFC* (Suède) avec ses cartouches de sel (2014).

En mars 2015, une version plus compacte et moins puissante, de type monocharge, a été présentée: le **JAQ** (cf. Fig. 7). Il est basé sur le même principe que le PowerTrek. Il a été distribué en quelques exemplaires pour tests en juin 2016.

En mars 2017, *myFC* présente, à Barcelone, une nouvelle version, plus fine, baptisée **LAMINA™** (Fig. 8), toujours basée sur le même principe. Ses performances ont été améliorées : puissance max. 10,5 W, capacité de 4 000 mAh, poids de 200 g.

En avril 2018, JAQ fournit 500 exemplaires au chinois *Huangdou e-commerce*.

<sup>2</sup> <http://www.myfcpower.com/>





Figure 7 - le chargeur **JAQ** de myFC (2016)



Figure 8 – Le chargeur **JAQ LAMINA™** (2017)

Autres applications:

- En janvier 2019, la société américaine WIDEX a présenté au CES 2019 **une prothèse auditive** alimentée par une mini pile à combustible baptisée WIDEX EVOKE ENERGY CELL™ qui se recharge en 20 secondes (à partir d'une cartouche de méthanol) pour 24h d'autonomie.

2. Ordinateurs portables, caméras numériques (piles dans la gamme 10 – 50 W)

Ce domaine d'applications a subi presque le même sort que celui de la téléphonie mobile décrit dans le paragraphe précédent. Au début des années 2000 de nombreux industriels<sup>3</sup> ont pensé avoir trouvé là un créneau intéressant (en particulier avec des piles de type DFMC, cf. Fig. 9) mais ne sont finalement pas parvenus à s'imposer. En 2015, tous ont abandonné ce secteur.

---

<sup>3</sup> MTI MicroFuel Cell (USA), LG Chemical (Corée du Sud), Sanyo Electric (Japon), Samsung (Corée du Sud), NEC Corp. (Japon), Casio Computer (Japon), Canon (Japon), Matsushita/Panasonic (Japon), Antig Tech. (Taiwan), Tekion Inc. (Canada), Jadoo Power Systems (USA)



Figure 9 –Ordinateur AVC équipé du bloc d'alimentation *Antig Tech*.  
(sur la gauche (DMFC) (2006))

### 3. Générateurs transportables (piles dans la gamme 40 W – 35 kW)

Les technologies retenues sont soit les PEMFC, soit les DMFC. Ces générateurs fournissent de l'énergie électrique sous des caractéristiques standard: courants continus (12 à 48 V et prise USB) ou alternatifs (110 & 230 V). Les principaux acteurs en 2020 sont :

- *SFC Smart Fuel Cell AG*<sup>4</sup> (Allemagne). Leurs générateurs sont commercialisés sous la marque EFOY (*Energy For You*). Ils sont équipés de piles de type DMFC (méthanol). SFC avait vendu plus de 33 000 générateurs à pile à combustible début 2015. Leurs produits couvrent la gamme de 25 (mod. 600) à 90 W (mod. 2200) pour batteries 12V (Fig. 10). Ils sont très utilisés dans le domaine du camping car et de la navigation de plaisance : lors de la **mini transat** 2017, plus de la moitié des concurrents en étaient équipés. Par ailleurs l'Armée allemande s'est équipée, en 2018, de 2 200 exemplaires du générateur EMILY 2200.



Figure 10 – La gamme EFOY (2019)

- *Horizon Fuel Cell Technology*<sup>5</sup> (Singapour) a développé le générateur ECOBOX MR (gamme 100 – 150 – 200) capable d'une puissance de 100 – 150 - 200 W sous 12V et conçu autour d'une pile de type DMFC (cf. Fig. 11)

<sup>4</sup> <http://www.sfc.com/en>

<sup>5</sup> <https://www.horizonfuelcell.com/>





Figure 11 - Le générateur ECOBOX MR-150

- *Ballard*, via sa filiale *Protonex*, a présenté, en 2015, son générateur **Squad Power Manager** (SPM-622) (cf. Fig. 12) destiné à des opérations militaires de l'US Army. Début 2018, 5 000 unités étaient en service dans l'armée. Il peut fournir jusqu'à 300 W sous 28V.



Figure 12 – Le générateur **Squad Power Manager** Protonex (2015)

- Le CEA/LITEN et Safran ont présenté, en janvier 2017, les résultats d'un développement de générateur hybride (Batterie/Pile à combustible), baptisé SESAME 2, destiné au fantassin. Il délivre une puissance de 15 à 30W. Le poids porté, pour une énergie équivalente, est deux fois moindre qu'avec une seule batterie. L'hydrogène est produit par réaction chimique d'un solide avec de l'eau. Aucune information n'a été diffusée sur la suite qui aurait été donnée.

- En mars 2017, l'*Office of Naval Research* (USA) a présenté au *Naval Surface Warfare Center Carderock* un générateur à pile à combustible de type SOFC alimenté en combustible de type JP-8, carburant militaire ; il est développé dans le cadre du *ONR Future Naval Capability* (FNC). L'objectif de cette démonstration est de tester une solution plus efficace et plus propre que les générateurs diesel actuels, dans la gamme 3 – 100 kW.
- En mars 2017, *PowerCell Sweden AB* a présenté un générateur à pile à combustible, baptisé *PowerCell S2*, d'une puissance de 35 kW. Il peut être alimenté soit en hydrogène stocké soit en hydrogène fourni par un reformeur.



Figure 13 – Le générateur PowerCell S2 (2017)

- Nota: Jusque vers 2017, Air Liquide – via sa filiale Axane - proposait son générateur portable *Mobixane 500* équipé d'une pile PEMFC alimentée en hydrogène à partir de bouteilles sous pression. Ce générateur avait été utilisé par l'explorateur Jean Louis Etienne, lors des expéditions « Banquise » (*Polar Observer* en 2002) et « Clipperton » (déc. 2004 – avril 2005) (voir figure 14). Depuis cette date, Air Liquide n'affiche plus "commerciallement" cette activité même si elle en poursuit certains développements au sein de *la World Business Unit Air Liquide advanced Business & Technologies* (aB&T).



Figure 14 – L'explorateur Jean-Louis Etienne au cours de l'expédition Clipperton avec sa *Mobixane* (2004 – 2005)