

LES PILES A COMBUSTIBLE (PAC)

Sommaire

1. Un peu d'histoire
2. Principe de fonctionnement
3. Les différents types de piles à combustible
4. L'état de développement des divers types de piles
5. Le combustible
6. Les grands domaines d'application de la pile à combustible
7. Evolution des ventes
8. Conclusions
9. Bibliographie

1. Un peu d'histoire

En 1800, moins de deux décennies après qu' Antoine Lavoisier eut mis en évidence la composition chimique de l'eau en hydrogène et oxygène, les britanniques William Nicholson et Anthony Carlisle confirment cette réalité. Ils effectuent, par application d'un courant électrique, la décomposition de cette eau en ses deux éléments, ce fut la première électrolyse.

La découverte de l'effet "pile à combustible" est généralement attribuée au chimiste suisse-allemand **Christian Friedrich Schönbein**, en 1839. Mais la première pile fabriquée en laboratoire, la même année, est le fait de **William Robert Grove**, avocat britannique, aussi chimiste amateur et vice-président de la *London Royal Institution*. Cet effet "pile à combustible" est l'inverse de l'électrolyse. Le schéma de cette première pile est reproduit sur la figure ci-dessous.

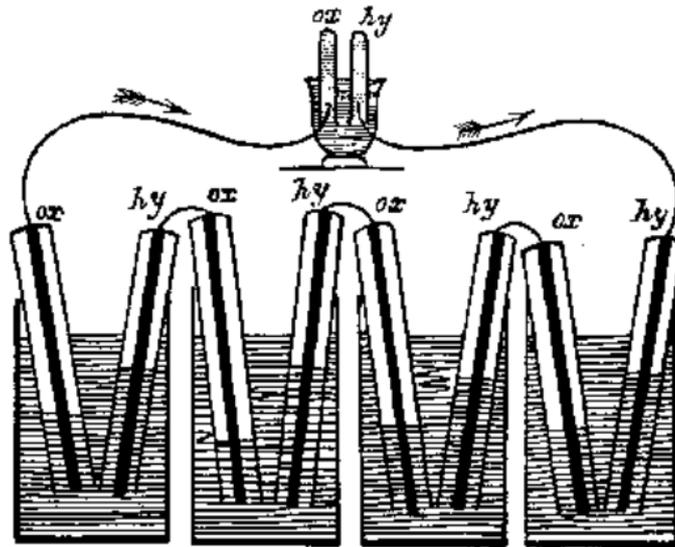


Figure 1 - Schéma de la première pile à combustible de William Grove (1839)

Mais cette innovation tombe dans l'oubli pendant plus d'un siècle. Ce n'est qu'au début des années 1960 que la firme américaine *General Electric*, à la recherche d'un générateur plus performant que les batteries traditionnelles, l'a reprise pour la développer et en installer deux modules de 1 kWe dans les premières capsules spatiales *Gemini* : ce fut le véritable point de départ de l'aventure industrielle de cette technologie.

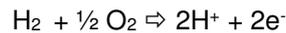
2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible hydrogène/oxygène (ou hydrogène/air) est extrêmement simple : il s'agit de l'oxydation de l'hydrogène et de la réduction de l'oxygène au sein d'un élément de pile conduisant à la réaction chimique globale :

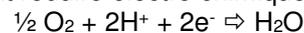


avec production simultanée d'eau, d'énergie électrique W_e et de chaleur ΔQ .

Cette réaction s'opère au sein d'une pile essentiellement composée de deux électrodes -l'anode et la cathode- séparées par un électrolyte, une réaction qui est l'opposée de celle de l'électrolyse de l'eau. A l'anode l'oxydation électrochimique de l'hydrogène



produit 2 protons H^+ qui traversent l'électrolyte et 2 électrons qui passent dans le circuit extérieur en produisant le courant électrique et vont réduire électrochimiquement l'oxygène en produisant de l'eau



Ces réactions peuvent se produire à la température ambiante grâce à un catalyseur, le platine, qui favorise la rupture des liaisons chimiques dans les molécules d'hydrogène et d'oxygène. Cet effet électro catalytique du platine au niveau des électrodes de la pile à combustible a été découvert par Christian Schönbein la même année (1839) que W. Grove a construit son premier prototype de pile.

Ce processus électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de la température ambiante jusqu'à 1 000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, ainsi que les réactions électrochimiques intermédiaires mises en jeu varient (l'ion de l'électrolyte -anion ou cation- échangé entre les deux électrodes est précisé dans le Tableau I), mais le principe général est inchangé.

La figure 2 illustre le principe de fonctionnement de la pile la plus courante (de type PEM¹) qui fonctionne dans la gamme 25-90°C.

Remarque 1 : la réaction chimique globale ($\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$) est indépendante de la nature de l'électrolyte et la nature catalytique de l'électrode n'intervient pas dans les réactions électrochimiques intermédiaires, mais seulement en augmentant leurs vitesses de réactions, donc l'intensité du courant électrique.

Remarque 2 : les réactions électrochimiques intervenant au sein de la PAC² H_2/O_2 et de l'électrolyse de l'eau sont opposées l'une de l'autre (au sens mathématique) et les grandeurs thermodynamiques associées (enthalpie ΔH , enthalpie libre ΔG , etc.) changent de signe.

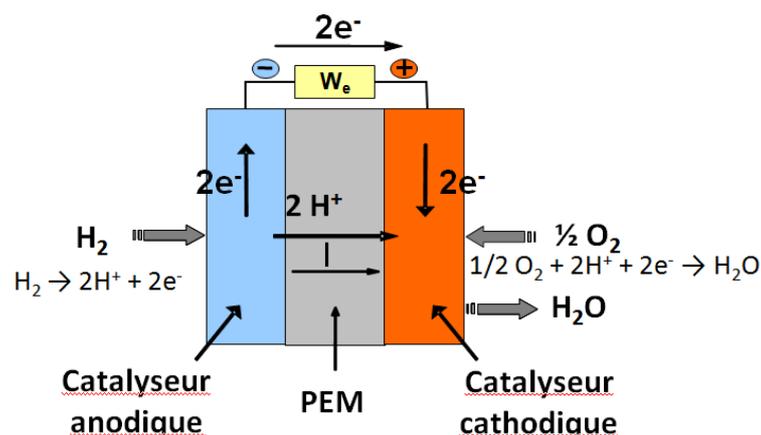


Fig. 2 - Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEM

¹ PEM: Proton Exchange Membrane, ou membrane à échange de protons.

² PAC: abréviation pour Pile à Combustible (Fuel Cell en anglais)

3. Les différents types de piles à combustible

Le tableau I ci-après résume les divers types de piles couramment développées. Les types de catalyseurs indiqués ne sont pas les seuls possibles mais les plus couramment mis en œuvre.

Type ³	Electrolyte	Espèce ionique	Catalyseur anode	Catalyseur cathode	T (°C)	Domaine d'utilisation
AFC	potasse (liquide)	OH ⁻	Pt	Pt-Ag	80	Espace, transports, stationnaire Gamme : 1 - 100 kW
PEMFC et DMFC	polymère (solide)	H ⁺	Pt (DMFC:Pt/Ru)	Pt	25 - 90	Portable, transports, stationnaire Gamme : 10 mW – 1 MW
PAFC	acide phosphorique (liquide)	H ⁺	Pt	Pt	180-200	Stationnaire, transports Gamme : 100 kW - 10 MW
MCFC	sels fondus (liquide)	CO ₃ ²⁻	Ni	Ni - LiO	650	Stationnaire Gamme : 100 kW - 10 MW
PCFC	céramique (solide)	H ⁺	Perovskite	Pr ₂ NiO ₄ ⁺	400 à 600	Stationnaire, transports Gamme : 100 W - 10 kW
SOFC	céramique (solide)	O ²⁻	Ni-YSZ	La _x Sr _{1-x} MnO ₃	600 à 1000	Stationnaire, transports Gamme : 100 W - 10 MW

Tableau I – Les différents types de piles à combustible

Remarque : on doit noter que d'autres types de piles font l'objet de recherches mais étant au stade des études de base en laboratoire, elles ne sont pas évoquées dans cette fiche. Par exemple, les MFC (Microbial Fuel Cell) qui produisent de l'électricité par digestion de microbes dans le cadre de traitement des eaux usées.

Performances

Toutes les piles décrites dans le tableau I ont des caractéristiques de fonctionnement similaires. Une représentation en est donnée sur la figure 3 dans le cas de la pile de type PEM. Elle fonctionne généralement autour d'un point choisi par l'utilisateur (par exemple V_N , I_N , P_N , η_N).

³ AFC : Alkaline Fuel Cell, PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell, DMFC: Direct Methanol Fuel Cell, PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell, MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell, PCFC: Protonic Ceramic Fuel Cell, SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

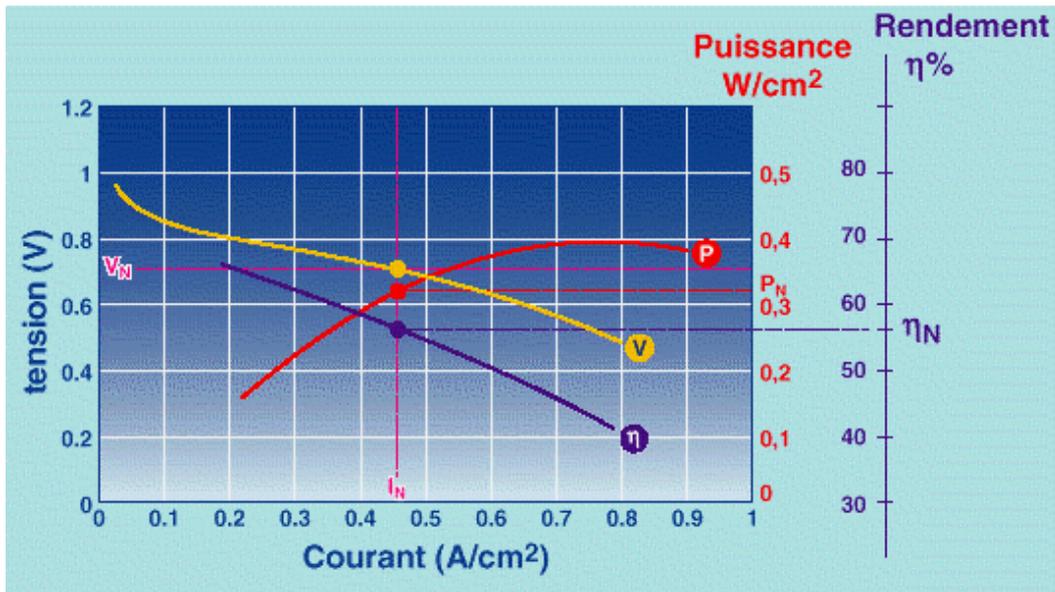


Fig. 3 – Caractéristiques électriques de la pile PEM

Le rendement énergétique théorique, c'est-à-dire à courant nul, (représenté sur l'échelle de droite de la Figure 3), est défini comme le rapport de l'énergie électrique potentielle (W_e) à l'énergie de réaction à pression constante ou enthalpie ($-\Delta H$). Il peut s'exprimer⁴ par la relation :

$$\eta_0 = W_e / (-\Delta H) = nFV_0 / (-\Delta H) = (-\Delta G / -\Delta H) = 1 - T\Delta S / \Delta H$$

$$V_0 = -\Delta G / nF = 1,23 \text{ Volt}$$

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

avec:

- n le nombre d'électrons,
- F la constante de Faraday, qui représente la charge globale d'une mole de charges élémentaires e soit le produit eN_A , N_A étant le nombre d'Avogadro. F a pour valeur 96 485 A.s ou Coulomb, unité de quantité d'électricité,
- V_0 la différence de potentiel à courant nul,
- ΔG l'enthalpie libre de réaction,
- $T\Delta S$ la quantité de chaleur isotherme réversible échangée avec le milieu extérieur,
- ΔS , l'entropie échangée.

Le rendement global η , compte tenu des tensions réelles, c'est-à-dire des écarts par rapport à la tension à courant nul V_0 , s'exprime en tout point défini par la tension de cellule V , par la relation :

$$\eta = \eta_0 (V/V_0) \text{ avec } V_0 = 1,23 \text{ V (pour le couple H}_2/\text{O}_2).$$

Sa variation avec le courant est représentée par la courbe bleue, repérée η sur la Figure 3.

Sa valeur est voisine de 55% au point nominal choisi qui ne correspond pas au point de puissance maximum (comme sur un moteur thermique), car le rendement est alors trop faible, de l'ordre de 40%. Cette caractéristique permet donc à la pile, en cas de besoin, de fournir environ 25% de puissance supplémentaire, ce qui est intéressant, en particulier pour les applications automobiles, raison pour laquelle cette valeur voisine de 55% de rendement nominal est généralement choisie par les constructeurs.

La puissance P s'exprime par le produit $V \times I$: sa variation est représentée par la courbe rouge, repérée P , sur la Figure 3. Sa valeur est voisine de 0,32 W/cm² au point nominal choisi.

Parmi les divers types de piles à combustible, un utilisateur potentiel fera un choix selon les paramètres qui lui sont imposés par son cahier des charges, comme :

⁴ *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.

- la température de fonctionnement : ce choix dépend du temps de démarrage souhaité, du souhait ou non de valoriser la chaleur produite et des contraintes d'environnement. C'est ainsi que la PEMFC est choisie pour les véhicules routiers car la basse température à laquelle elle fonctionne évite un chauffage préalable, permettant ainsi un démarrage rapide. Un avantage également pour des applications portables. Par ailleurs on pourra choisir la MCFC, PCFC ou SOFC si on veut profiter au mieux de l'énergie résiduelle contenue dans leurs rejets thermiques à haute température pour alimenter un cycle thermodynamique aval et ainsi augmenter le rendement global du système ou si l'on souhaite s'affranchir d'un catalyseur précieux, comme le platine.
- la durée de vie : les piles « tout solide » (PEMFC/DMFC et PCFC/SOFC) peuvent prétendre à des durées de vie sensiblement supérieures à celles qui exigent la manipulation et le transfert d'un électrolyte liquide, lequel est de surcroît à l'origine de phénomènes de corrosion pas toujours faciles à contrôler. La PEMFC a, par exemple, déjà fait la preuve d'un bon fonctionnement au delà des 100 000 heures.
- les contraintes de volume et masse : selon que l'application est mobile (portable, transports) ou fixe (générateurs stationnaires), on peut être amené à faire des choix différents. Par exemple, la PEMFC se présente actuellement comme la plus compacte (en volume plus de 3 kW/litre et en masse 3,1 kW/kg pour la pile seule et 1 kW/litre et par kilo environ pour le système générateur électrique complet) et a été ainsi sélectionnée pour la quasi totalité des projets de générateurs pour l'électronique portable et les véhicules électriques.
- l'échéance : les divers types de piles ne sont pas aujourd'hui au même stade de développement : les plus développées, et commercialisées depuis plusieurs années, sont les piles PEMFC (applications portables, mobiles et petit stationnaire), suivies par les piles stationnaires MCFC de *FCE* (l'américain *FuelCell Energy* et sa filiale coréenne *POSCO* qui ont vendu plusieurs centaines de MWe) et par les piles SOFC de *Bloom Energy* qui a vendu sensiblement la même quantité de MWe.
- le coût : du fait de son marché potentiel pour les générateurs portables, le petit stationnaire et le transport automobile, la pile PEMFC sera très vraisemblablement celle qui atteindra les prix les plus bas. On estime généralement que le prix de la pile seule pourrait atteindre, d'ici 2020, 30 €/kWe pour les applications automobiles à durée de vie limitée à 5 000 heures et 500-1000 €/kWe pour les applications stationnaires à durée de vie supérieure à 50 000 heures. Mais d'autres considérations, comme le coût du système complet, la disponibilité de tel ou tel matériau (la platine en particulier), son intégration dans un process complexe, la nécessité de valoriser les rejets thermiques, la nature du combustible, l'acceptabilité sociale peuvent conduire à un autre choix de pile à combustible.

Remarque : les piles PAFC ont été les premières à être commercialisées par les américains UTC Power, puis par ONSI, filiale de ITC Corp. sous le nom de PC25. C'était en 1992. Aujourd'hui cette technologie a été reprise et commercialisée par la société coréenne *Doosan Corp.*

4. L'état de développement des diverses filières de piles à combustible⁵

■ la pile AFC

La pile alcaline est la plus ancienne. Elle a été essentiellement développée pour l'espace après que les premières piles de type acide à électrolyte solide, testées en laboratoire pour les vols spatiaux Gemini, n'aient pas donné toute satisfaction du fait de l'absence, au début des années soixante, de membrane électrolyte protonique performante. Ce type de pile (en 2 modules de 5 kWe), a accompagné tous les vols habités de la NASA et a donné entière satisfaction. Il alimentait aussi la navette spatiale soviétique *Bourane* dont le seul vol orbital fut réalisé en 1988 et dont le programme fut abandonné en 1993.

En Europe, à l'occasion du projet spatial européen Hermès lancé en 1985, une technologie de même type avait été retenue et développée par la firme allemande Siemens et la société belge Elenco. Ce projet de navette ayant été abandonné, une société anglaise, Zevco, a en 1994, repris les acquis d'Elenco pour tenter de les valoriser dans le domaine du transport routier. C'est ainsi qu'un prototype de taxi londonien a été équipé, en juillet 1998, d'une pile AFC de 5 kWe pour recharger les batteries d'un système de propulsion hybride alimenté en hydrogène stocké à bord. Depuis, cette société a

⁵ <http://fuelcelltoday.com/analysis/industry-review/2013/the-industry-review-2013>

déposé son bilan et il ne reste plus, à notre connaissance, qu'une seule société dans le monde développant ce type de pile : *AFC Energy plc.* (www.afcenergy.com/)

Après l'arrêt du programme des navettes US en 2011, il n'y a plus, à l'heure actuelle, d'utilisation spatiale de la pile AFC.

Cette technologie simple pourrait permettre d'atteindre des coûts assez bas mais, de par son principe, elle est handicapée par la nécessité de devoir traiter l'air - la source de comburant oxygène- pour éliminer le CO₂, polluant majeur de son électrolyte (solution de potasse). Toutefois, des recherches se poursuivent pour contourner cette difficulté en tentant de développer une membrane électrolyte solide conductrice pour les ions OH⁻.

(Pour plus de détails, voir la fiche 5.2.3)

■ la pile PEMFC

Ce type de pile est celui sur lequel sont actuellement concentrés les plus gros efforts de développement grâce essentiellement à la disponibilité d'une membrane électrolyte performante, à conduction protonique qui, en fait, avait été conçue pour l'électrolyse chlore-soude. Cette membrane perfluorée - Nafion™- du chimiste Du Pont de Nemours est maintenant commercialisée par d'autres sociétés. Ce type de pile a été retenu, par tous les grands constructeurs automobiles, comme source électrique des véhicules légers, des bus et des chariots élévateurs. Il est aussi celui des grandes sociétés de matériel électronique (en concurrence avec sa cousine DMFC) pour l'alimentation de leurs produits portables (téléphones cellulaires, micro-ordinateurs, caméscopes, groupes électrogènes...) et stationnaires. Ces efforts de recherche pour augmenter les performances et diminuer le coût, aussi bien de la pile elle-même que de ses périphériques, sont à la hauteur de l'enjeu, c'est à dire considérables.

Dès 1996, plusieurs constructeurs automobiles ont réalisé des prototypes de véhicules à pile à combustible puis, à partir de l'année 2000, construisirent en petites séries de quelques dizaines d'exemplaires de ces véhicules qu'ils ont mis sur le marché de la location à partir de 2003 à titre expérimental. Actuellement, trois constructeurs ont lancé leur commercialisation : Hyundai avec l'*ix35* en 2015 puis Toyota en 2016 avec la *Mirai* et enfin Honda fin 2016 avec la *Clarity*.

Les avantages attribués à cette famille sont les suivants :

- fonctionnement à basse température, donc démarrage rapide,
- électrolyte solide,
- excellente fiabilité démontrée jusqu'à 100 000 h sans dégradation notable,
- autonomie comparable à celle des véhicules thermiques équivalents
- recharge en hydrogène très rapide (de l'ordre de 3 à 5 minutes)
- bon comportement aux basses températures (jusqu'à -30°C)

Ces avantages sont altérés par quelques défauts :

- le besoin d'utiliser des métaux précieux très coûteux comme catalyseurs des réactions électrochimiques aux électrodes (platine pour les piles PEMFC et ruthénium pour les piles DMFC).
- la membrane électrolyte conductrice protonique reste chère et limitée en température d'utilisation (85°C actuellement avec la famille des Nafion),
- la sensibilité au CO (moins de 10 ppm requis aux électrodes),
- pour les applications automobiles, le rejet thermique à une température plus basse (voisine de 70°C) que celle des rejets d'un moteur thermique classique (autour de 95°C), d'où la nécessité de mettre en place une chaîne d'évacuation de la chaleur résiduelle plus encombrante et plus onéreuse (l'écart de température entre le rejet thermique et la température ambiante dimensionne directement la surface d'échange).

(Pour plus de détails, voir la fiche 5.2.2)

■ la pile PAFC

Après les premiers développements industriels de la société américaine ONSI dès 1991, qui a installé près de 200 exemplaires de la pile PC25 (200 kWe) dans le monde (dont un exemplaire à Chelles en France en 1998), la partie la plus visible de l'activité PAFC s'est résumée à celle de la société américaine *ClearEdge Power* (ex *UTC Power*) qui commercialisait la pile *PureCell™* de 200 kWe depuis l'année 2000 avec un certain succès (une centaine d'installations fin 2013 et plus de 100 000h cumulées sur une seule installation). Leur coût était voisin de 3000-4000 US\$/kWe. La société a fait faillite en avril

Fiche 5.2.1

Révision : février 2018

Source : AFHYPAC – Th.Alleau - C. Lamy - P. Malbrunot

2014 et son activité "pile à combustible" a été rachetée par la compagnie coréenne *Doosan Corp.* qui poursuit la commercialisation de la PureCell.

Les avantages attribués à cette famille :

- une bonne fiabilité,
- des rejets thermiques à une température élevée (vers 200°C), donc faciles à évacuer et éventuellement valorisables (chauffage et eau chaude sanitaire, par exemple).

Avec pour défauts:

- un électrolyte corrosif (acide phosphorique stabilisé dans une matrice de carbure de silicium poreux),
- une technologie onéreuse.

En dehors de *Doosan*, seule la société japonaise *Fuji Electric* (via sa filiale *Fuji Electric Europe* implantée en Allemagne) commercialise une unité de 100 kWe.

(Pour plus de détails, voir la fiche 5.2.4)

■ la pile MCFC

Plus de 110 installations (septembre 2014) de piles de 300 kWe (DFC300) à 2,4 MWe (DFC3000) ont été vendues depuis 1970 par *FuelCell Energy* (USA) en collaboration commerciale étroite avec la société coréenne *POSCO Energy*. Cette filière partage, avec la PEMFC, les records de vente dans le monde.

Les avantages attribués à cette filière sont :

- bonne fiabilité,
- rejets thermiques à une température élevée (vers 600°C), donc faciles à évacuer et même valorisables en énergie électrique via une chaîne thermodynamique en aval (avec une turbine à gaz).

Et ses défauts:

- électrolyte liquide et corrosif (carbonates fondus),
- technologie onéreuse.

(Pour plus de détails, voir la fiche 5.2.5)

■ La pile PCFC

Cette pile est la dernière née dans la famille des piles à combustible. Elle cumule des avantages des piles PEMFC et SOFC tout en supprimant quelques inconvénients. Elle s'appuie sur la recherche de céramiques conductrices protoniques dans la gamme 400-600°C. Les travaux de recherche ont démarré au début des années 2000 mais ce type de pile, très séduisante, n'en est encore qu'au stade du laboratoire.

Elle bénéficierait :

- d'une fiabilité comparable à celle de la pile SOFC,
- d'un électrolyte solide
- d'une température des rejets thermiques élevée, et donc faciles à valoriser et/ou à évacuer.
- de l'absence de platine aux électrodes.

Les défauts éventuels, à ce jour, ne sont pas identifiés, cette filière étant encore au stade du laboratoire.

■ la pile SOFC

Ce type de pile suscite actuellement un très grand intérêt compte tenu de ses performances présentes et potentielles ainsi que de son insensibilité au monoxyde de carbone (qui devient un réactif) contenu dans l'hydrogène lorsque celui-ci est issu du reformage d'hydrocarbures. Le haut niveau de température des rejets thermiques (de l'ordre de 600 à 800°C) permet, là encore, une valorisation intéressante au travers de cycles combinés (une turbine en sortie de pile, suivie d'une valorisation thermique des rejets à 300-400 °C). Ainsi le rendement global (électrique + thermique) se trouve supérieur à 80%. Une raison pour laquelle cette pile SOFC est l'objet d'efforts importants aussi bien aux USA sous l'impulsion du DOE, qu'au Japon dans le cadre du programme NEDO, et qu'en Europe avec l'aide des programmes européens PCRD et FCH-JU réussis.

Deux grandes familles technologiques de piles à oxyde solide sont développées :

Fiche 5.2.1

Révision : février 2018

Source : AFHYPAC – Th.Alleau - C. Lamy - P. Malbrunot

- ⇒ la technologie cylindrique, dont *Siemens (ex Siemens-Westinghouse)* a été le leader ; elle avait déjà cumulé plus de 70 000 heures de fonctionnement sur des prototypes de 100 et 200 kWe. Mais en 2008 Siemens fait savoir qu'elle souhaite se séparer de cette activité et la moitié de l'équipe est licenciée en mars 2009. Depuis cette date, aucun résultat n'a été publié.
- ⇒ la technologie plane, plus complexe mais potentiellement plus compacte et peut-être plus économique, développée au Japon, en Australie et en Europe, et dont les prototypes en test sont au niveau de quelques kWe. Les acteurs européens sont : *Hexis* (Galileo 1000N de 1 kWe), les laboratoires allemands de Jülich (qui ont repris la technologie initialement développée par Siemens) et de Stuttgart, ainsi que Siemens et les laboratoires néerlandais de ECN. En France, depuis quelques années, une entente CNRS-CEA a permis d'entreprendre des développements technologiques sur le sujet. Les japonais sont aussi très actifs en la matière, en particulier *Kyocera Corp* qui développe une version IT-SOFC⁶ (fonctionnement à partir de 550°C au lieu de 800°C).
A noter que cette technologie a débouché deux types de commercialisations :
 - des piles de 0,8 kWe pour des applications stationnaires résidentielles (programme *Ene.Farm* type S japonais et *Ene.Field* en Allemagne avec le concours du FCH-JU),
 - des piles de 100 kWe pour des applications stationnaires par l'américain *Bloom Energy*.

Les avantages attribués à cette famille de piles SOFC :

- une bonne fiabilité,
- des rejets thermiques à une température élevée (vers 600 - 700°C), donc faciles à évacuer et éventuellement valorisables en aval en énergie électrique via une chaîne thermodynamique (turbine à gaz) et à la suite, d'une valorisation thermique (chauffage).
- pas de catalyseurs en métal précieux,
- un reformage aisé d'éventuels combustibles carbonés directement à l'anode.

Les défauts:

- une température de fonctionnement élevée, donc un temps de démarrage relativement long : c'est donc une technologie réservée à des applications de longue durée,
- la fragilité de la céramique qui supporte mal les différentiels de température.

Si un état de développement technologique proche de la maturité existe au Japon il est encore insuffisant pour une évaluation du coût-plancher. Aux dires des industriels japonais il devrait devenir rapidement inférieur à celui de la technologie PEMFC.

(Pour plus de détails, voir la fiche 5.2.6)

Remarque :

Pour être complet il faut évoquer un nouveau type de pile en développement et sur lequel des espoirs raisonnables sont fondés, la *Microbial Fuel Cell*. Elle exploite le métabolisme de certaines bactéries pour produire de l'électricité.

Deux résultats ont été récemment publiés en 2017 :

- Des travaux de l'Université de Bayreuth, publiés dans la revue *Macromolecular Bioscience*, mettant en œuvre un bio film artificiel (hydrogel, réseau de petites fibres d'un polymère contenant un seul type de bactérie, la *Shewanella oneidensis*) permettant un flux d'électrons.
- Des travaux équivalents d'une équipe bavaroise⁷ (BayBiotech), illustrés dans la figure 4.

⁶ IT-SOFC : Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell

⁷ Patrick Kaiser, Steffen Reich, Daniel Leykam, Monika Willert-Porada, Seema Agarwal, Andreas Greiner, Ruth Freitag,
Electrogenic single-species biocomposites as anodes for microbial fuel cells, *Macromolecular Bioscience* (2017),
doi: 10.1002/mabi.201600442.

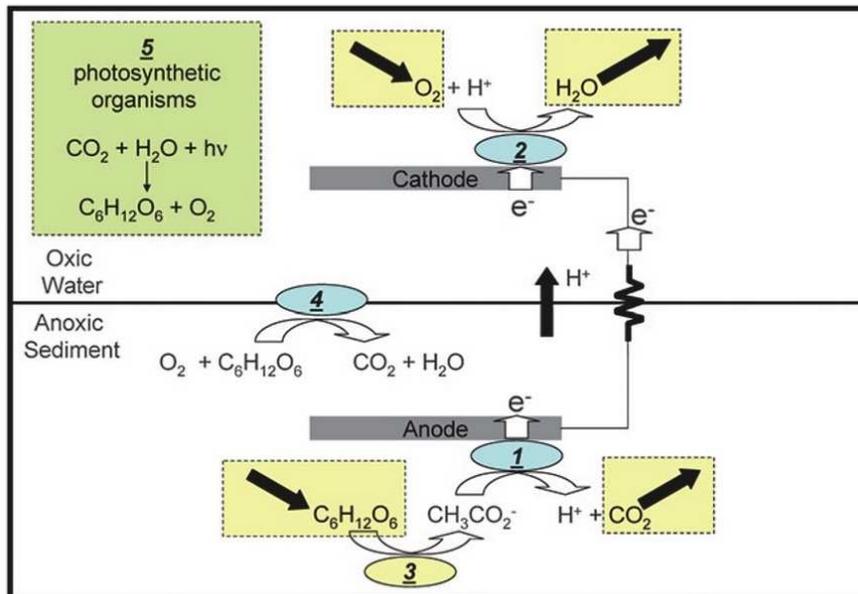


Figure 4 – Solar Microbial Fuel Cell - 2017

5. Le combustible

Si l'hydrogène est le principal combustible d'une pile à combustible, le méthanol, l'éthanol, le gaz naturel, etc., peuvent également être utilisés. Ce peut être dans une pile à oxydation directe -notamment la DMFC qui a la structure d'une PEMFC mais dans laquelle le méthanol est oxydé directement à une anode de platine - ruthénium. Ce peut être encore dans une pile haute température (MCFC, SOFC) où le combustible (gaz naturel, hydrocarbures) est transformé en hydrogène par reformage « interne » par une anode catalytique.

6. Les grands domaines d'applications de la pile à combustible

Il y a aujourd'hui trois grands domaines dans lesquels un brillant avenir économique est promis à la pile à combustible : le portable, le transport et le stationnaire.

- *Le portable*⁸

Dans cette famille on inclut essentiellement le téléphone mobile (qui demande une puissance de l'ordre de 100 mW à quelques W), l'ordinateur portable (qui demande une puissance de l'ordre de 20 W), les jouets éducatifs et les applications militaires. Ces secteurs connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapés par l'autonomie de leurs batteries, typiquement la batterie lithium-ion. Cette dernière atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 130 à 150 Wh/kg, soit quelques dizaines d'heures d'autonomie à un téléphone actif de haut de gamme (type smartphone) et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or leurs utilisateurs demandent 5 à 10 fois plus.

La solution actuelle est une micro-pile à combustible de type PEMFC ou DMFC, généralement couplée à une batterie Li-ion : la pile fournissant l'énergie en rechargeant la batterie qui assure les demandes de puissance. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir de combustible (hydrogène gazeux, générateur d'hydrogène ou méthanol) : on rechargera son portable comme on recharge un stylo à encre, avec une cartouche, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 2 à 3 fois plus d'autonomie qu'une batterie ... pour le même encombrement ! Une solution transitoire est retenue : utiliser un chargeur à pile à combustible que l'on connecte par l'intermédiaire d'une prise USB. Ainsi, trois sociétés : *Aquafairy* (Japon), *Horizon Fuel Cells* (Singapour) et *myFC* (Suède) couvrent le marché

⁸ Voir la fiche 9.4.1

de ce type de chargeur. En 2011, *myFC* a mis sur le marché le chargeur **PowerTrek**⁹ (voir figure 5) au prix de 66€ en France¹⁰. En France¹¹, la PME *Paxitech*¹², développe une technologie comparable.

Pour donner une idée de la croissance de ce secteur d'application de la pile à combustible, il faut citer le rapport 2013 de *FuelCellToday*¹³, qui montrait une forte augmentation des ventes avec 18 900 unités en 2012.

Pour 96% des ventes de portables à pile à combustible la technologie mise en œuvre est la technologie PEMFC, le reste étant équipé en piles DMFC.



Fig. 5 - Le chargeur *PowerTrek* connecté à un I-phone (2016)

- *Le transport*

C'est le domaine d'application qui est à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90.

Avec les premiers essais de bus à pile PEMFC par le canadien Ballard des centaines de prototypes de véhicules électriques à pile à combustible (VL et bus) ont vu le jour depuis 1993, également tous équipés de piles PEMFC. Ils sont fabriqués par de grands constructeurs automobiles comme: *Daimler, Volkswagen, General Motors, Ford, Toyota, Nissan, Honda, Hyundai* et le chinois *SAIC*.

(Voir les fiches 9.1 à 9.1.11, ainsi que les fiches 9.2 à 9.2.2 et la fiche 9.4.4.)

L'état de l'art actuel est, pour chaque constructeur (seul ou associé à d'autres¹⁴), la validation de sa technologie. Néanmoins, les premières commercialisations annoncées sont, pour certains, comme il a été dit plus haut, devenues effectives: fin 2014 pour Hyundai (ix35), fin 2015 pour Toyota (Mirai), fin 2016 pour Honda (Clarity) et devraient l'être ultérieurement pour la plupart des autres constructeurs. Il convient aussi de noter une application en forte croissance (plus de 12 000), en particulier aux USA, de générateurs à pile à combustible pour l'alimentation de chariots élévateurs électriques.

Par ailleurs, il faut aussi noter un intérêt croissant de constructeurs navals (civils et militaires) pour la pile PEMFC, pour les bateaux de petite et moyenne taille et pour des engins sous-marins (chantier allemand *DWV* et espagnol *Navantia*), et la pile MCFC pour les navires côtiers (voir fiche 9.4.2).

Enfin, de nombreux projets d'aéronefs sont en cours de développement, équipés de piles à combustible pour la propulsion à hélices ou comme secours d'alimentation électrique à bord: voir la fiche 9.4.3.

- *Le stationnaire*¹⁵

⁹ <http://powertrek.com/>

¹⁰ prix chez Amazon.com en juin 2016.

¹¹ En 2011, BIC s'était lancé sur cette filière mais l'a ensuite abandonnée

¹² <http://www.paxitech.com/>

¹³ <http://fuelcelltoday.com/analysis/industry-review/2013/the-industry-review-2013>

¹⁴ Daimler associé à Ford et Nissan, BMW à Toyota, Volkswagen à Suzuki, GM à Honda ...

¹⁵ Voir fiches 9.3.1 et 9.3.2

Compte tenu des nouvelles lois sur la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier au Japon et aux USA et récemment en Europe.

Dans ce domaine, l'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications :

- le générateur stationnaire pour la production dédiée à des collectivités et la production industrielle. Les puissances unitaires mises en jeu sont dans la gamme 200 kW_e - 3 MW_e.
- le générateur stationnaire domestique (cogénération électricité-chaleur). Les puissances mises en jeu sont dans la gamme 0,5 - 5 kW_e.

Dans le premier domaine, on trouve essentiellement l'activité de *FuelCell Energy* (USA) avec son allié, le coréen *POSCO Energy*, avec ses piles MCFC dans la gamme 300 – 3000 kW_e, dont plus de 100 exemplaires ont déjà été vendus. A noter que le second animateur de ce secteur, *ClearEdge* (ex UTC) déclaré en faillite début 2014 (technologie PAFC), a été repris par le coréen Doosan.

L'évolution de ce marché est représentée sur la figure 7 extraite du *rapport FuelCell Today* de 2013.

Dans le deuxième domaine de la production domestique, plusieurs actions sont en cours :

- La plus importante est un programme qui a démarré en 2005 au Japon avec plusieurs industriels : fin 2016, 190 000 systèmes de cogénération avaient été installés et fonctionnent en site réel dans le cadre du programme **Ene.farm**. L'Europe a démarré un programme équivalent avec **Ene.field** en 2012. Ces systèmes sont tous alimentés en combustible fossile (généralement le gaz naturel ou kérosène), transformé en hydrogène via un reformeur installé en amont de la pile.
- Une autre se développe avec des petites PAC stationnaires qui équipent des unités d'alimentation électrique autonomes (à bas d'EnR) en sites isolés, comme des refuges de montagne, ce que proposent en France, les sociétés ATAWAY et POWIDIAN.

7. Evolution des ventes

L'évolution des ventes des divers types de piles selon leur nature, leur puissance et leur type d'applications est représentée dans les figures 6 à 11.

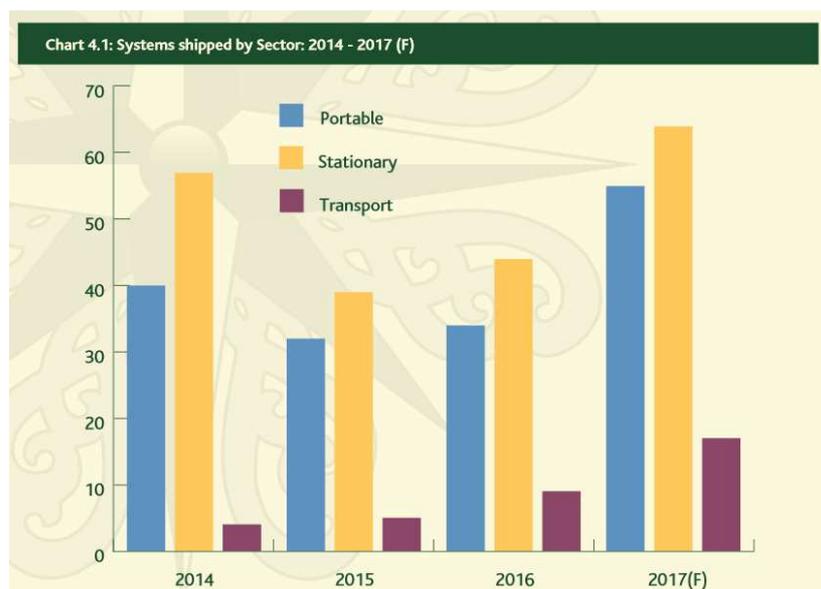


Figure 6 - Evolution des ventes de piles à combustible, en nombre par milliers, par type d'application (Source: Fuel Cell and Hydrogen Annual Review, 2017¹⁶)

¹⁶ http://media.wix.com/ugd/a61c06_b3ddee7704954e9abfe2b9d5ce326036.pdf

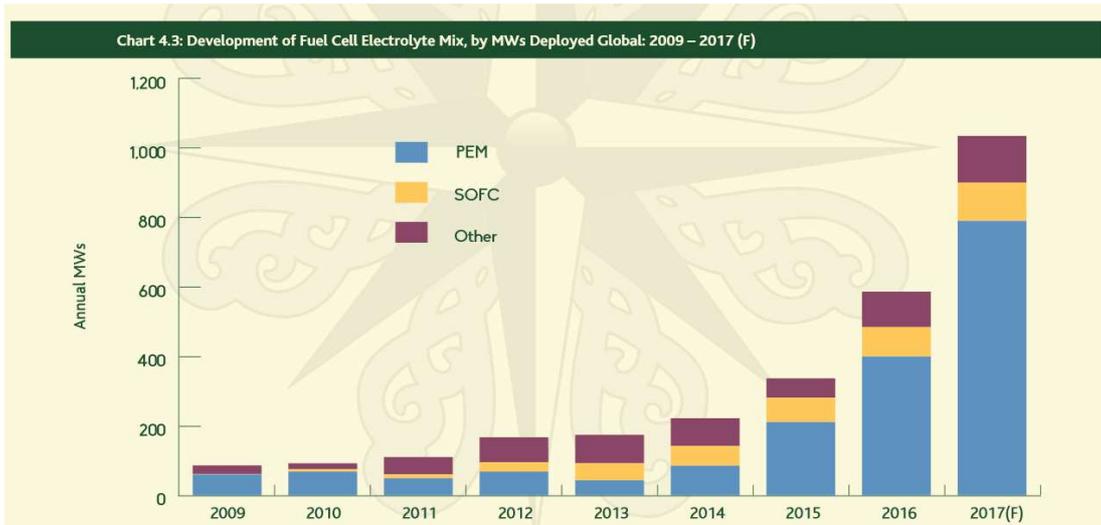


Figure 7 - Evolution des ventes en terme de puissance par type de pile
(Source idem Fig. 6)

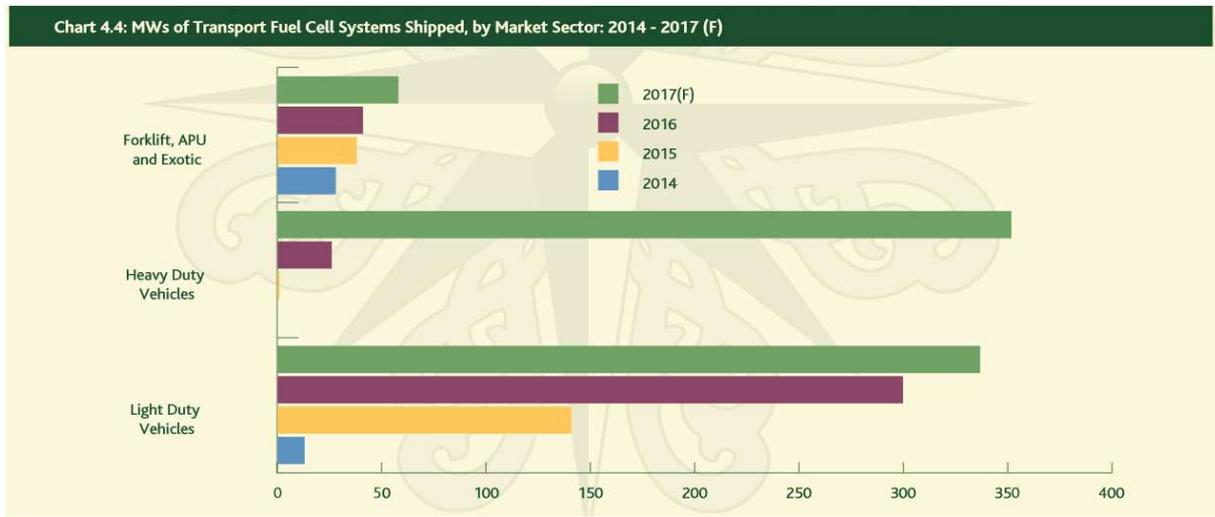


Figure 8 - Evolution des ventes dans le domaine de la mobilité en terme de puissance
(Source idem Fig. 6)

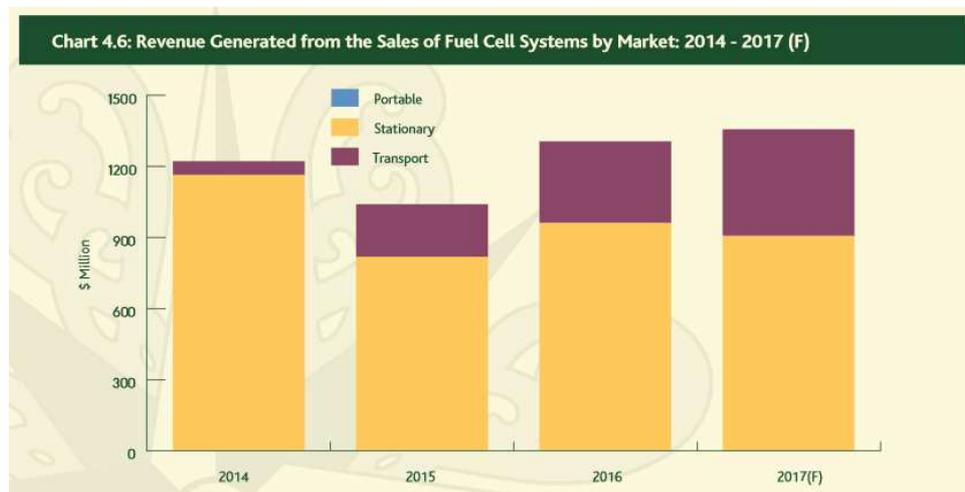


Figure 9 - Evolution du chiffre d'affaires en terme de domaine d'application

(Source idem Fig. 6)

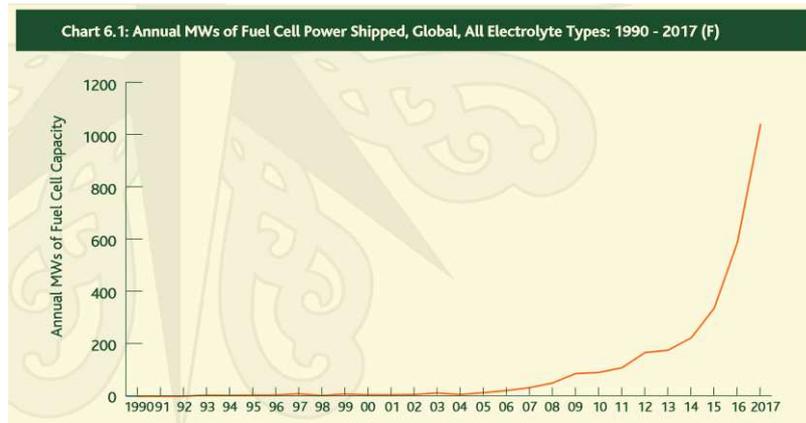


Figure 10 - Evolution de la puissance totale cumulée, générée par les piles (Source idem Fig. 6)

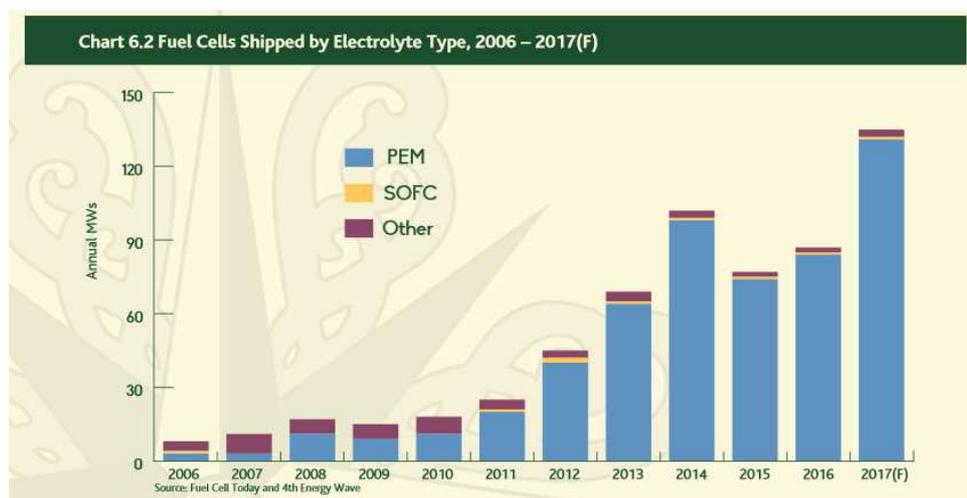


Figure 11 - Evolution de la puissance générée annuellement, par type de pile (Source idem Fig. 6)

8. Conclusions

Depuis un quart de siècle, et du fait de leurs performances énergétiques et environnementales, les piles à combustible connaissent un développement spectaculaire. La plus grande partie correspond au domaine de la mobilité avec une remarquable croissance mais également aux deux secteurs que sont le portable et le petit stationnaire.

Les caractéristiques techniques des piles obtenues aujourd'hui sont très proches de celles attendues des points de vue :

- des performances massique et volumique de l'ordre de 3 kWe/litre et par kilo,
- de la fiabilité ; les technologies PEMFC, MCFC et SOFC ont été validées sur plusieurs dizaines de milliers d'heures. C'est encore essentiellement le coût qui reste un obstacle majeur à une plus large diffusion, en particulier dans le domaine de la mobilité et, dans une moindre mesure, dans celui du portable et du stationnaire.

9. Bibliographie

De très nombreux ouvrages ont été publiés ces dernières années sur la pile à combustible, que ce soit en langue française ou en langue anglaise. Une liste assez complète est accessible via le site AFHYPAC (www.afhypac.org), rubrique "Documentation".

Fiche 5.2.1

Révision : février 2018

Source : AFHYPAC – Th.Alleau - C. Lamy - P. Malbrunot

- The Fuel Cell and Hydrogen Annual Review 2016:
https://docs.wixstatic.com/ugd/a61c06_bf44fd893cbc4a189b7da180253cd7bc.pdf
<https://www.4thenergywave.com/fuelcellannualreview>
- US DOE - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
Fuel Cell Technologies
Market Report - October 2017
https://energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f37/fcto_2016_market_report.pdf
- Fuel Cell and Hydrogen Annual Review, 2017
http://media.wix.com/ugd/a61c06_b3ddee7704954e9abfe2b9d5ce326036.pdf