

La pile à combustible

Projet de Physique P6

STPI/P6/2013 – 25

Étudiants :

Salma BENSOUDA

Dounia ZRYOUIL

Ghita FARZOUZ

Sophia ZERHBOUB

Caroline CHAZAL

Euridice PELAGATTI

Enseignant responsable du projet :

Jamil Abdulaziz

Date de remise du rapport : 17/06/2013

Référence du projet : STPI/P6/2013 – 25

Intitulé du projet : **La pile à combustible**

Type de projet : **expérimental.**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- **Étude du fonctionnement de la pile à combustible.**
- **Multiplés découvertes théoriques de la pile à combustible.**
- **Mise en place d'un protocole expérimentale.**
- **Mise en pratique en faisant fonctionner un moteur à l'aide d'une PAC**
- **Mise en évidence des difficultés pour faire tourner les hélices.**

Mots-clefs du projet: **pile, énergie, hydrogène, réactions chimiques**

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	p.4
2. La pile à combustible	p.5
2.1. Historique	p.5
2.2. Principe de fonctionnement	p.6
2.3. Les différents types de piles à combustibles et leur fonctionnement	p.9
2.3.1. Les PAC à basses températures	p.11
2.3.2. Les PAC à haute température	p.14
2.4. Applications des PAC	p.18
2.4.1. Les avantages	p.18
2.4.2. 3 grandes familles de PAC pour 3 applications	p.18
2.5. Quel avenir pour la pile à combustible ?.....	p.20
3. Expérimentation.....	p.23
3.1. Description de la manipulation	p.23
3.2. Analyse et interprétation	p.23
4. Bilan du projet	p.25
4.1. Journal de bord	p.25
4.2. Organisation du groupe	p.28
4.3. Le ressenti personnel	p.28
5. Conclusion	p.31
Annexes.....	p.33

1. INTRODUCTION

Actuellement, le pétrole est plus que jamais critiqué en tant qu'énergie. En effet, le prix de l'essence ne cesse d'augmenter et la pollution que génère « l'or noir » est toujours aussi importante. Les gouvernements et les entreprises étudient de nombreuses possibilités pour régler ce problème de pollution et surtout pour à terme remplacer le pétrole qui, on le sait, va disparaître dans les prochaines décennies. Par conséquent, étudier la pile à combustible pour notre projet de P6 nous a paru une excellente idée. En effet, la pile à combustible ou « PAC » comme on l'appelle déjà, pourrait être une des solutions majeures pour remplacer le pétrole qui fait fonctionner les avions, les voitures, ou encore pour produire de l'électricité à moindre coût et surtout pour polluer moins. C'est même l'un des moyens de production d'énergie qui se développe le plus actuellement. Et si pour la plupart nous ne savions pas grand-chose de la pile à combustible, comprendre comment elle fonctionne et pourquoi elle est considérée comme un candidat sérieux à la succession du pétrole nous a tout de suite plu, d'où notre choix de prendre ce sujet. Après quelques recherches sur le sujet, nous avons rapidement réalisé que la pile à combustible est effectivement en plein essor, à en voir le nombre d'articles qui y sont consacrés.

Pour notre dossier, nous avons choisi de présenter notre rapport en 3 parties. Nous avons planifié de faire toute la partie théorique en premier, puis de nous consacrer à une partie pratique pour mieux comprendre le fonctionnement d'une pile à combustible et enfin de livrer nos impressions personnelles sur ce projet. Par conséquent, le plan de notre dossier sera le suivant : en premier lieu nous étudierons le fonctionnement théorique d'une pile à combustible, en nous penchant notamment sur les réactions qui ont lieu à l'intérieur de cette dernière, sur les matériaux qui la composent, mais également sur ses avantages, ses inconvénients, ses applications et ses limites, et enfin sur les recherches actuelles. Dans une seconde partie, nous ferons un compte rendu des expériences menées pour reconstituer une pile à combustible. Enfin, dans une troisième et dernière partie, nous rendrons compte de nos impressions personnelles sur ce projet et de ce qu'il nous a apporté.

2. LA PILE A COMBUSTIBLE

2.1. Historique

Considérée comme une solution idéale pour satisfaire les besoins en énergie électrique tout en limitant la pollution, la pile à combustible est en effet un bon convertisseur d'énergie. C'est ainsi que depuis le XIX^{ème} siècle, l'homme a cherché à développer ce type de pile. Mais les études n'ont réellement été approfondies qu'au XX^{ème} siècle puisque la pile à combustible semble respecter le concept du développement durable, un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins.

L'histoire du développement de la pile à combustible couvre plus de 170 ans.



1839 : Le chimiste allemand Christian Schönbein découvre l'effet pile à combustible.



1842 : Le chimiste amateur anglais William R. Grove réalise le premier modèle de laboratoire de pile à combustible (utilisation de l'électrolyse inverse de l'eau pour produire du courant à partir d'O₂ et de H₂ et réalisation de la réaction avec triple contact entre électrolyte, réactifs et catalyseurs).



1932 : L'anglais Francis Thomas Bacon reprend les études au sujet de la pile à combustible.
1953 : Francis T. Bacon réalise un premier prototype de 1kW, puis 5 kW.
1959 : Francis T. Bacon réalise un deuxième prototype de 5 kW, ce prototype servira de modèle pour les futures piles à combustible utilisées lors des missions spatiales Apollo.

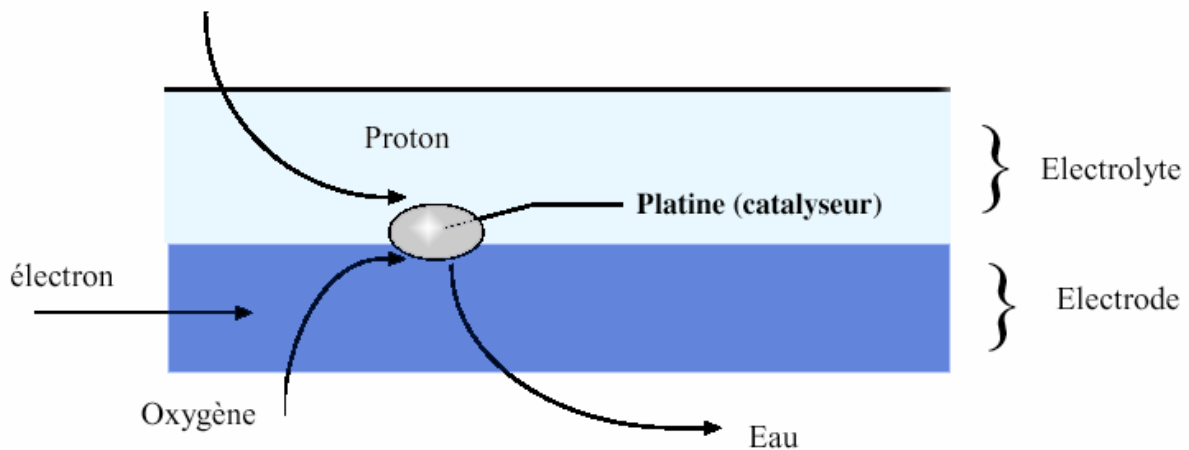
Années 90 : Début du développement de la pile à combustible dans le domaine du transport.

2.2. Principe de fonctionnement

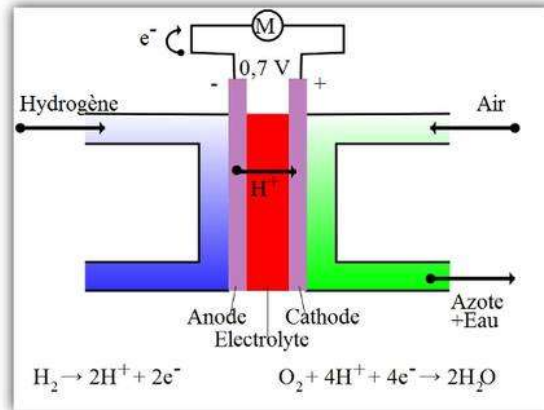
Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est chimique : l'électricité est produite grâce à une réaction d'oxydo-réduction. Ici, l'énergie chimique d'un combustible (en général de l'hydrogène) est directement transformée en énergie électrique, sans passer par l'énergie thermique. Ce qui constitue le gros avantage de la pile à combustible par rapport à d'autres modes de production d'électricité.

Le principe est le suivant : la pile est constituée de 2 électrodes, l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte, un matériau qui ne laisse pas passer les électrons, juste les ions. On alimente tout d'abord la pile en hydrogène (le combustible) et en oxygène. L'anode est chargée en hydrogène provenant d'un réservoir et la cathode est chargée en oxygène provenant de l'air. Dans l'anode, suite à la réaction d'oxydation, la molécule H_2 de dihydrogène est dissociée en ions H^+ et en électrons. Ces derniers sont captés par l'anode et, ne pouvant traverser l'électrolyte, sont contraints de circuler dans un circuit externe, ce qui crée un courant électrique continu. En parallèle, les ions H^+ traversent l'électrolyte et arrivent sur la cathode, où a lieu la réaction de réduction de l'oxygène : les ions H^+ se combinent à la molécule O_2 et aux électrons pour former de l'eau, qui est évacuée sous forme de vapeur. La réaction produit également de la chaleur.

Pour que la réaction ait lieu, on utilise un catalyseur, le plus souvent de platine. Ce dernier a pour rôle d'augmenter la vitesse de réaction sans pour autant être consommé lui-même. Le catalyseur est disposé sur l'anode et sur la cathode, au niveau d'un point de contact entre l'électrolyte et l'électrode, de manière à ce que tous les « acteurs » de la réaction d'oxydation ou de réduction soient présents, comme indiqué sur le schéma suivant :



Au final, le fonctionnement d'une pile à combustible peut être représenté de la manière suivante :

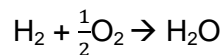


<http://www.futura-sciences.com>

Par ailleurs, la tension produite par le courant électrique créé n'est que de 0.7 V maximum par cellule, il faut donc brancher plusieurs cellules en série pour obtenir une tension importante. Enfin, le courant électrique créé par la pile est continu. Par conséquent, pour certaines applications (courant domestique par exemple), il devra être transformé en courant alternatif au moyen d'un alternateur.

Etude chimique:

Une PAC est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique et thermique. La réaction mise en œuvre est une réaction électrochimique entre l'hydrogène H₂ (carburant) et l'oxygène O₂ (comburant) avec production simultanée d'eau, d'électricité et de chaleur selon la réaction globale de synthèse de l'eau :



Contrairement aux piles traditionnelles ou aux batteries, l'énergie n'est donc pas stockée dans le volume fini de la pile lui-même, mais dans des réservoirs de gaz qui peuvent alimenter la PAC de manière continue. Le flux d'énergie délivré par la PAC découle de la circulation du gaz combustible (H₂) et du gaz oxydant (O₂). La mise en œuvre de cette réaction s'effectue au travers de deux demi-réactions l'une à l'anode correspondant à l'oxydation de l'hydrogène et l'autre à la cathode avec la réduction de l'oxygène produisant de l'eau.

Il ne faut pas oublier que la production d'énergie électrique s'accompagne de pertes thermiques qu'il convient d'évacuer par l'intermédiaire d'un circuit de refroidissement.

Le combustible utilisé: l'hydrogène

L'élément hydrogène est extrêmement abondant sur Terre ; dans l'eau des lacs, des rivières et des océans, ainsi que dans les combustibles fossiles: c'est le constituant essentiel de notre Univers. Mais un problème se pose quant à son utilisation. En effet, il n'existe pas à l'état libre.

Le dihydrogène est, dans les conditions usuelles, un gaz incolore et inodore. Le paramètre essentiel pour l'étude de ses propriétés physiques est la très faible masse de la molécule H₂, la plus petite connue. Il en résulte une faible densité pour H₂ (solide, liquide ou gaz) et une

très grande vitesse de translation des molécules à l'état gazeux. Le dihydrogène possède une bonne conductibilité calorifique, une grande facilité de diffusion et d'effusion (l'effusion concerne le passage à travers un petit trou percé d'une paroi mince). L'état de gaz presque parfait de $H_2(g)$ est en relation avec ses températures de fusion et de liquéfaction basses. Il est utilisé et transporté depuis longtemps.

Son utilisation est intéressante car c'est un combustible à pouvoir énergétique élevé, non polluant, non toxique et sa combustion ne produit que de l'eau (éventuellement un peu d'oxydes d'azote si la combustion a lieu avec de l'air à haute température). Son énergie massique, délivrée lors de sa combustion avec le dioxygène, est élevée (120 MJ.kg⁻¹), comparée à celle de l'essence (45 MJ.kg⁻¹) ou du méthane (50 MJ.kg⁻¹).

C'est pour cela que les chercheurs et les acteurs du développement durable se penchent actuellement sur les propriétés intéressantes de ce gaz, afin de faire marcher des véhicules par exemple, sans pour autant polluer l'atmosphère.

Comme précisé plus haut, la PAC est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique et ne stocke pas d'énergie.

L'énergie chimique est contenue dans l'hydrogène entrant dans la PAC. Mais l'hydrogène n'étant pas directement disponible dans la nature, il peut être produit à partir de trois énergies primaires : les énergies fossiles, nucléaires et renouvelables (figure 7).

Pour être économiquement et écologiquement viable, la production d'hydrogène doit répondre à trois critères:

- La compétitivité économique, avec un coût de production pas trop élevé
- Le rendement énergétique (la production d'hydrogène ne consommant pas trop d'énergie)
- La propreté (en utilisant un processus de fabrication non polluant).

Plusieurs méthodes sont aujourd'hui opérationnelles mais aucune ne répond pour l'instant parfaitement à ces trois critères.

Si l'utilisation de l'hydrogène reste encore faible dans le domaine de l'énergie, il est une des matières de base de l'industrie chimique et pétrochimique et est utilisé dans les secteurs de la métallurgie, de l'électronique, de la pharmacologie ainsi que dans le traitement de produits alimentaires. Ceci représente environ 50 millions de tonnes d'hydrogène produites par an.

Voici ci-dessous un schéma récapitulatif de la filière de production du dihydrogène et sa conversion dans une pile à combustible.

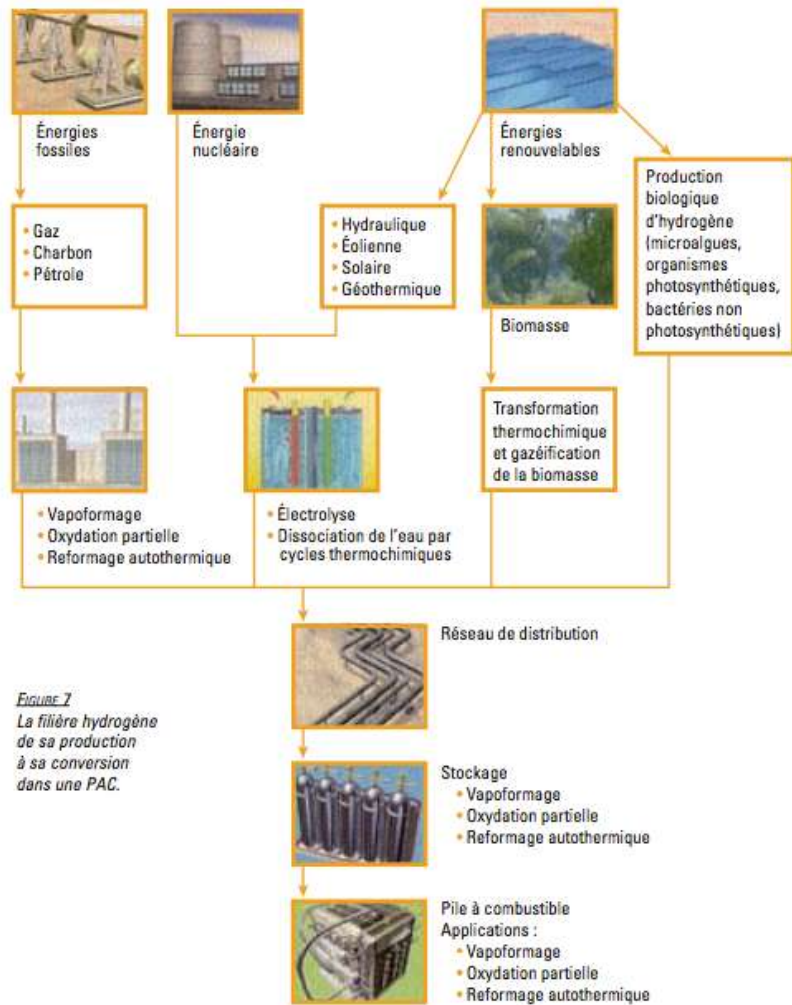


Figure 7
La filière hydrogène de sa production à sa conversion dans une PAC.

Les deux difficultés qui limitent l'utilisation du dihydrogène sont liées à son coût de fabrication à partir de l'eau (électrolyse, photolyse, ...) et à son stockage (sa légèreté implique une densité énergétique volumique peu favorable au stockage sous forme gazeux).

Comme toutes les machines transformant une forme d'énergie en une autre, les générateurs chimiques-électriques obéissent eux aussi aux lois fondamentales de la physique, en particulier à celles de la thermodynamique. Cependant, dans ce dernier domaine, il n'est possible d'écrire les réactions d'égalité que si l'on étudie les transformations réversibles.

On calcule facilement la puissance électrique et l'énergie obtenue à l'aide des équations :

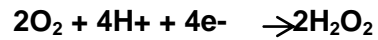
$$P=V.I$$

$$E=V.I.t$$

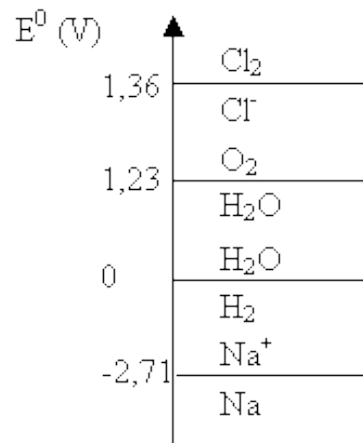
Remarque : pour toute cette partie, les calculs ne représentent que ceux d'UNE cellule de pile à combustible.

Si on reprend les 2 demi-équations d'oxydo-réduction, on a :





Or on sait que, de par le transfert d'électrons, toute réaction d'oxydo-réduction crée une différence de potentiel et donc une tension. Si on se réfère au graphique ci-dessous, qui représente le potentiel standard pour chaque couple oxydant/réducteur, on voit que celui du couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ est de **1.23V** et que celui du couple H^+/H_2 est de **0V**, donc quand on obtient une différence de potentiel pour cette réaction de 1.23 V. Ceci explique d'où viennent les « environ **0.7V** » produits par la réaction d'une pile à combustible.



Dans les cellules à combustible, un des termes les plus importants est l'énergie de Gibbs. On l'indique habituellement par G.

Par la suite, on cherche à déterminer l'énergie libre générée lors de la réaction d'une pile à combustible.

On sait que :

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot \Delta E$$

- ΔG la variation d'énergie de Gibbs ou énergie libre au cours de la réaction.
- n le nombre d'électrons échangés au cours de la réaction (ici, n=2).
- ΔE la différence de potentiel.
- F la constante de Faraday, qui correspond à la charge électrique contenue dans une mole d'électrons.

$$\text{On a } F = e \times N_A = 1,602 \cdot 10^{-19} \times 6,022 \cdot 10^{23} = 96485 \text{ C/mol.}$$

On calculera les valeurs d'un point de vue théorique, on prendra $\Delta E = 1.23\text{V}$

$$\text{D'où } \Delta G = -2 \cdot 1.23 \cdot 96485 = -237 \text{ kJ}$$

On tracera aussi la courbe tension en fonction de l'intensité et puissance en fonction de l'intensité de la pile à combustible selon des valeurs théoriques. Pour le tableau et les courbes voir annexe 1.

2.3. Les différents types de piles à combustibles et leur fonctionnement

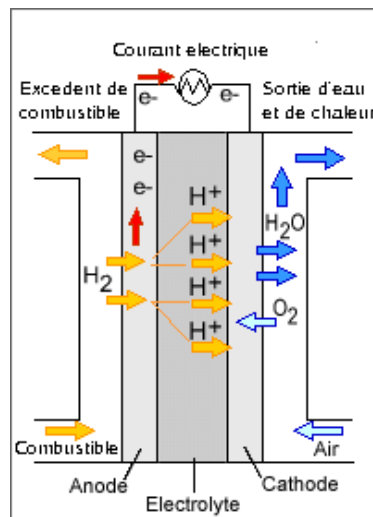
On classe habituellement les piles à combustibles selon leur électrolyte et leur température de fonctionnement. Ainsi on distingue au total 6 types différents de piles à combustible divisés en deux catégories : les PAC à basses températures et les PAC à hautes températures.

Il faut savoir qu'actuellement il y a deux types de pile intensivement étudiés afin de les développer et les améliorer : les piles de types PEMFC et SOFC.

2.3.1. Les PAC à basses températures

2.3.1.1. PEMFC

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (Polymer Exchange Membran Fuel Cell) font l'objet de recherches intensives depuis les années 90 afin de réduire leur coût. En effet, leur potentiel n'est pas négligeable car elles sont polyvalentes ! On peut aussi bien les utiliser pour les transports, que pour le stationnaire et même pour les technologies portables.



<http://fr.wikipedia.org>

Dans ce type de piles l'électrolyte est une membrane polymère conductrice de protons. On remarque également la présence de plaques de diffusions, aussi appelées backing, et de plaques bipolaires.

L'électrolyte a pour rôle de conduire les protons H^+ pour assurer le passage des charges électriques dans la pile. La membrane est étanche au dihydrogène et au dioxygène et

empêche le passage des électrons à l'intérieur de la pile. Son épaisseur peut être de l'ordre de la dizaine de microns ce qui favorise le passage des protons. Ces protons ont besoin d'eau pour circuler. Ainsi la membrane doit être précisément humidifiée pour ne pas altérer le fonctionnement de la pile. En effet, une membrane sèche ne sera pas un bon conducteur et s'usera, à l'inverse une membrane trop humide risque de noyer les électrodes. Actuellement, les piles de type PEMFC ont une membrane en Nafion produit par DuPont de Nemours. Les électrolytes des PEMFC fonctionnent pour des températures comprises entre 60 et 90°C, à des pressions comprises entre 1 et 5 bars.

Les électrodes ont une géométrie complexe. En effet, elles doivent mettre en contact les réactifs, l'électrolyte et un conducteur électronique. Elles sont toutes les deux recouvertes de Platine. Ce catalyseur a pour but de favoriser la réaction d'oxydation du H₂ pur ou reformé, qui est le combustible de la pile, et de réduction de l'oxygène contenu dans l'air. L'air est, dans ce cas, l'oxydant. Les réactions aux électrodes sont donc :

- Anode : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$
- Cathode : $\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$

Les électrodes que l'on trouve aujourd'hui sont composées de particules de Carbone ayant un diamètre compris entre 20 et 50 nm. On vient ensuite déposer sur celles-ci des particules de Platine dont le diamètre varie entre 2 et 4 nm. La teneur en Platine est en général de l'ordre de 0.2 mg/cm². Le fonctionnement des PEMFC peut être altéré à cause du catalyseur. En effet, celui-ci absorbe le monoxyde de carbone qui n'a pas été éliminé pendant le procédé de purification.

Comme dit au début de cette partie, les PEMFC sont également composées de plaques de diffusion. Elles entourent les électrodes et servent à :

- Permettre la diffusion des gaz jusqu'aux électrodes
- Permettre le transfert des électrons
- Assurer la gestion de l'eau en l'évacuant ou en humidifiant la membrane.

Ces plaques sont constituées d'un substrat de fibre de carbone que l'on recouvre de graphite et d'un polymère hydrophobe : le PTFE. Ainsi, les plaques de diffusion sont poreuses et conductrices.

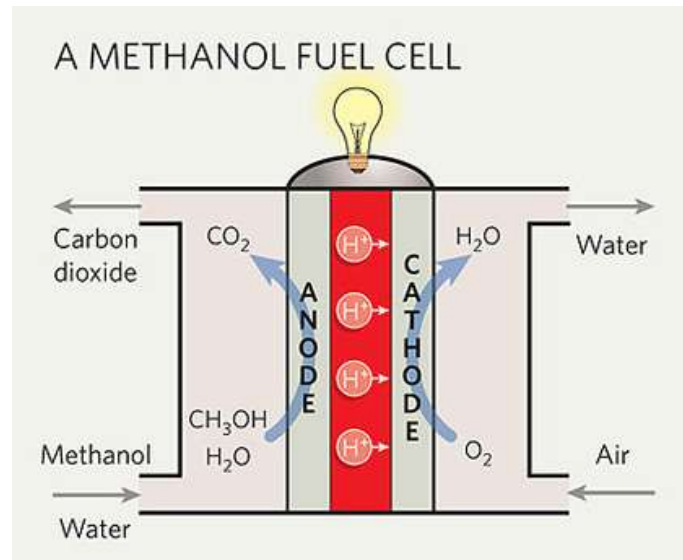
Enfin, les plaques bipolaires servent à :

- Collecter le courant
- Séparer les gaz à l'anode et à la cathode.

Elles sont généralement composées de feuilles de graphite, de composite ou de métaux à base de carbone. En effet, cela permet aux plaques bipolaires d'être de bons conducteurs électriques et d'être imperméables aux gaz.

2.3.1.2. DMFC

Les piles DMFC pour Direct Methanol Fuel Cell, sont en fait des piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC), seulement le combustible n'est plus le dihydrogène mais du méthanol.



Machine-history.com

Comme pour les PEMFC, les DMFC ont comme électrolyte une membrane polymère conductrice de protons et ce sont toujours les ions H⁺ qui se déplacent à l'intérieur. Le problème de l'humidification de la membrane se pose également ici. Contrairement au PEMFC, les DMFC ont souvent une membrane plus épaisse afin d'être le plus imperméable possible au méthanol qui altère le rendement de la pile. La température de fonctionnement est comprise entre 60 et 90°C.

Cependant l'efficacité reste faible. L'avantage de ces piles est qu'elles peuvent stocker de l'énergie dans un faible volume. Elles ont par contre une puissance limitée. Elles produisent une faible quantité d'énergie sur une longue période.

Les réactions aux électrodes sont les suivantes :

- Anode : $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6 \text{H}^+ + 6 \text{e}^-$
- Cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

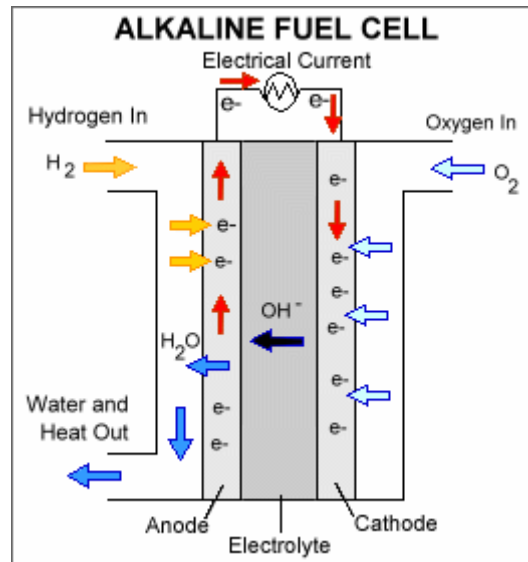
Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de Ruthénium et de Platine afin d'empêcher l'altération de la pile avec le monoxyde de carbone.

Les DMFC sont également composées de plaques de diffusion et de plaques bipolaires.

On trouve aujourd'hui des piles dont le méthanol est remplacé par de l'éthanol : les DEFC. En effet, l'éthanol est quand même moins toxique et a une meilleure densité énergétique : 8.0 kWh/kg contre 6.1 kWh/kg pour le méthanol.

2.3.1.3. AFC

Les piles AFC pour Alkaline Fuel Cell, sont l'un des plus anciens dispositifs de piles à combustible.



www.adrien-girard.fr

Elles sont constituées d'un électrolyte liquide qui est généralement une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) avec une concentration variant de 30 à 40 %. Cet électrolyte assure la conduction des ions OH⁻. Les ions hydroxydes de l'électrolyte peuvent réagir avec le dioxyde de carbone de l'air par exemple selon la réaction suivante :



Cette réaction va engendrer une réduction de la conductivité de l'électrolyte. C'est pourquoi il est nécessaire de travailler avec des gaz purs et non avec de l'air ou des gaz reformés. Ces gaz purs constituent les oxydants.

Les catalyseurs pour la réaction d'oxydation de l'hydrogène sont généralement composés de Nickel et d'un métal inactif comme l'aluminium, cela permet de réduire les coûts. On trouve également des catalyseurs en Platine-Palladium. Le combustible de cette pile est donc le dihydrogène. Les catalyseurs pour la réduction de l'oxygène sont soit en Argent soit en Platine-Or.

Les réactions aux électrodes sont donc :

- Anode : $\text{H}_2 + 2 \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$
- Cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{OH}^-$

Les plaques qui servent à l'interconnexion sont en Nickel ou en acier inoxydable.

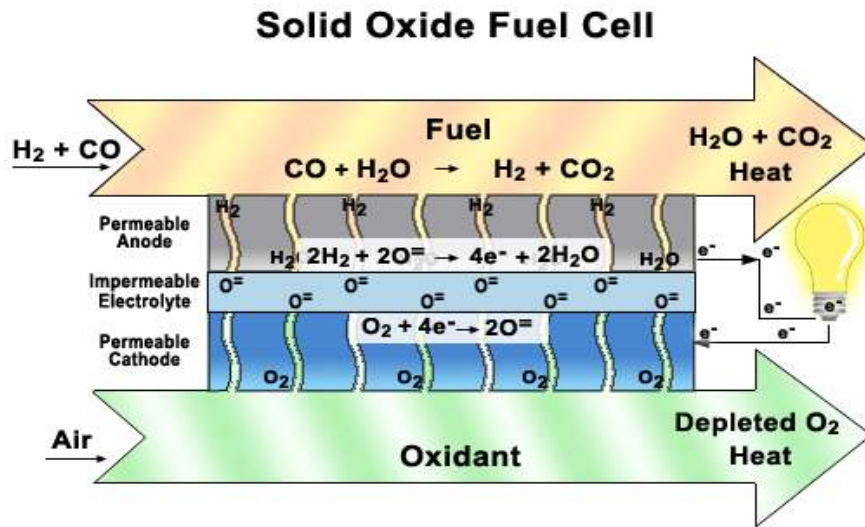
Sa température de fonctionnement de l'électrolyte est comprise entre 60 et 90°C. Mais si l'on augmente la pression, la température de fonctionnement augmente également. Ce qui permet de travailler à des températures plus importantes.

2.3.2. Les PAC à haute température

2.3.2.1. La pile à oxyde solide : SOFC

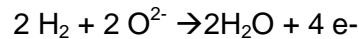
Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme suivant: l'oxygène est dissocié à la cathode en O₂, puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique

à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

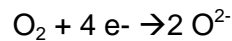


On remarque alors que les réactions mises en jeu sont les suivantes:

- À l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:



- à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction:



La caractéristique principale des SOFCs réside donc dans leur haute température de fonctionnement (600 à 1 000 °C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique.

Cette température présente un double avantage :

- Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, qui pourront être facilement reformés en se passant de catalyseur à base de métaux nobles.
- Elle produit d'autre part une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération, le rendement pouvant atteindre ainsi 80%.

Mais elle présente également un inconvénient, la mise en température est longue et complique toute utilisation à cycles courts et répétitifs.

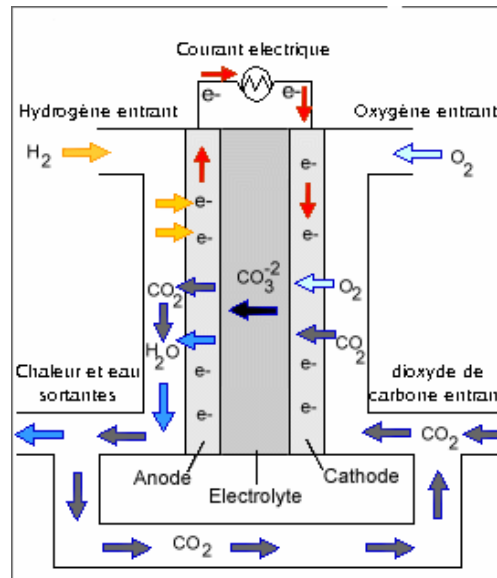
Pour ces raisons, la technologie SOFC se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW).

La mise au point de ce type de pile implique, de par cette haute température de fonctionnement, la résolution de problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux assez complexes, ainsi que d'assemblage et d'étanchéité.

2.3.2.2. La pile à carbonates fondus : MCFC

Le développement des piles à combustible à carbonates fondus a débuté dans le milieu du vingtième siècle.

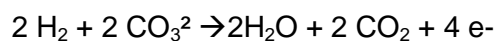
Les avantages et les inconvénients de ce type de pile sont sensiblement les mêmes que dans le cas des SOFCs. La température élevée améliore énormément la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend ainsi inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs.



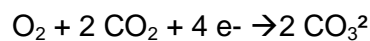
Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voire supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus, les MCFCs peuvent utiliser une large gamme de carburants, et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas pour les piles à basses températures.

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes:

- À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction:



- à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a:

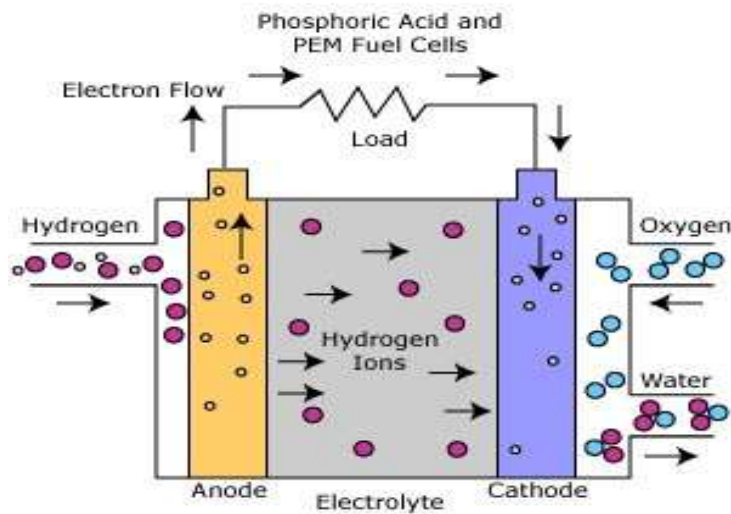


L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel du côté de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée.

2.3.2.3. La pile à acide phosphorique : PAFC

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans différents

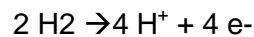
endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.



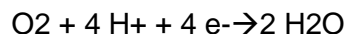
Les avantages des PAFCs sont leur facilité de fabrication, leur stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans le cas de la PEMFC, avec des températures de fonctionnement variant de 150 à 220°C, on a donc :

- A l'anode :



- A la cathode :



Les composants des deux piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique (aussi un électrolyte conducteur de protons), un liquide, alors qu'il s'agit d'un polymère solide dans le cas de la PEMFC.

Au début du développement des PAFCs, on a utilisé l'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile. Mais avec les progrès faits dans les matériaux utilisés pour la construction des piles, la concentration en acide est maintenant de 100%.

La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone.

Comme dans le cas des PEMFCs, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat

côté dans lequel l'électrolyte peut être stocké. On procède actuellement à l'essai d'autres catalyseurs pour ce type de piles à combustible: fer-cobalt, titane, chrome, zirconium.

2.4. Applications des PAC

2.4.1. Les avantages

L'utilisation de la pile à combustible présente de multiples avantages. En effet, en plus d'être caractérisée par une bonne autonomie pouvant atteindre plusieurs dizaines d'heures, son fonctionnement est efficace par toutes températures et nécessite une maintenance réduite. De plus, le mécanisme de cette pile permet l'absence de bruit ou encore de vibrations.

Par ailleurs, un moteur électrique alimenté par une pile à combustible dispose d'un rendement bien plus important que celui d'un moteur thermique. Ainsi, avec 1 kWh d'électricité on obtiendra 0,5 à 0,6 kWh d'énergie mécanique à la sortie du moteur. Alors qu'avec 1 kWh de carburant on finira par avoir 0,2 à 0,4 kWh d'énergie mécanique à la sortie du moteur, le reste étant de la chaleur perdue.

Plus important encore, les piles communément utilisées fonctionnent toutes grâce à l'hydrogène qui est un composé qui n'existe pas à l'état libre. C'est à dire que l'hydrogène ne peut être exploité directement dans la nature. Pour pouvoir utiliser ce gaz noble, il faut soit l'extraire d'hydrocarbures, soit le produire par électrolyse ou thermolyse de l'eau. Il faut donc dépenser énormément d'énergie, peu importe la méthode utilisée.

Enfin, une réaction de combustion est souvent synonyme d'émission de substances polluantes à cause d'une combustion imparfaite ou encore à cause de la présence d'azote. La pile à combustible est donc avant tout un moyen de produire de l'énergie, sous forme d'électricité, en émettant très peu de polluants locaux et donc sans porter atteinte à notre environnement.

2.4.2. 3 grandes familles de PAC pour 3 applications

Dans ses débuts, la pile à combustible a été utilisée massivement dans les programmes spatiaux et par les armées.

De nos jours, les utilisations potentielles des piles à combustible sont très nombreuses et variées.

Selon leur utilisation, les piles sont différentes, entre autres par leur taille. On distingue principalement deux types de pile. Certaines, moins grandes et moins puissantes fonctionnent à basse température. D'autres, grandes et très puissantes, sont utilisées à température moyenne ou élevée. C'est le type d'électrolyte utilisé qui détermine la température de fonctionnement de la pile.

2.4.2.1. Les piles à combustibles embarquées

Il est à noter que malgré le fait que la technologie des moteurs thermiques soit relativement mature et performante, elle reste très polluante. Cette dernière concurrence quand même le secteur de la pile à combustible dont le coût représente une contrainte non négligeable. On distingue donc deux sous-familles assez différentes dans leurs cahiers des charges, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé

au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'heures d'années de durée de vie, alors qu'un véhicule lourd qui vise le transport de passagers ou de marchandises exige une durée de fonctionnement environ 100 fois plus longue.

- Les véhicules légers: de nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993.

Le constructeur allemand Daimler-Chrysler alias Mercedes a montré 4 prototypes Necar, dont le plus récent (Necar 4 alimenté en hydrogène liquide), présenté en 1999, est construit sur la base de la voiture de série Class A. La Necar 5, modèle de présérie équipé d'un reformeur alimenté en méthanol, a vu le jour en novembre 2000.

Les Américains et les Japonais: General Motors (sur la base d'une Opel Zafira), Ford (avec plusieurs prototypes Think FC5), Toyota (deux prototypes), Nissan (avec son R'nessa), Mitsubishi, Honda, Mazda etc...

Les français : Renault a présenté un prototype en 98 (type Laguna).

- Les véhicules lourds: plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993.

Le canadien Ballard, a fait office de pionnier avec six bus (pile de 200kw), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service à Vancouver (USA) et Chicago (USA).

L'allemand Daimler-Chrysler, sur la même technologie que Ballard, a montré en 1997 un prototype de bus (le Nebus), et avait annoncé le lancement d'une présérie de 30 bus (Citaro) pour 2003 (pour une mise en service dans plusieurs villes d'Europe).

2.4.2.2. Les piles à combustible stationnaires

Le secteur des piles à combustibles constitue une excellente source d'énergie délocalisée. Si l'on prend en considération les lois sur la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreuses industries, en particulier aux Etats-Unis. Les deux principaux domaines d'application sont la production collective dont la puissance varie de 200kW à quelques MW, et la production individuelle dont la puissance varie de 2 à 7kW.

La taille de l'installation constitue un facteur important en ce qui concerne le rendement électrique. Cette caractéristique rend possible la construction de petites unités, très proches des utilisateurs. Celles-ci ont l'avantage de pouvoir fournir en plus de l'énergie électrique, de l'eau chaude, pouvant être utilisée par exemple pour le chauffage domestique. Le rendement total de la pile utilisée à des fins de cogénération (principe de production simultanée de deux énergies différentes dans le même processus) peut atteindre les 80%.

Dans la production d'électricité collective, de nombreux projets et démonstrations existent. Un premier modèle de pile à combustible stationnaire a été démarré en France début 2000 par EDF pour alimenter un groupe HLM à Chelles, en Seine-et-Marne. La pile fournit électricité et chaleur par cogénération à l'équivalent de 200 foyers.

2.4.2.3. Les piles à combustibles miniaturisées

Les piles à combustibles miniaturisées sont essentiellement représentées par les téléphones et les ordinateurs portables. Une croissance continue est à noter dans ces deux applications. Mais cette croissance est freinée par l'autonomie de leur batterie. Même la plus performante laisse classiquement quelques jours d'autonomie à un téléphone et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois

mieux alors que la batterie électrochimique a quasiment atteint ses limites. La pile à combustible peut être une bonne alternative aux batteries au lithium par exemple.

La pile à combustible qui fait l'objet de recherches importantes dans ce domaine, va charger une petite batterie qui assurera mieux le fonctionnement de l'appareil. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme il recharge un briquet ou un stylo à encre. Ce qui permettra un gain de temps relativement important.

2.5. Quel avenir pour la pile à combustible ?

Aujourd'hui, les voies de recherche portent sur :

- Utilisation **d'alliages de platine** (Ru, Mo, ou Sn à l'anode, métaux de transition en général à la cathode). Ce qui permettrait:
 - ⇒ **L'augmentation de la tolérance au CO** ainsi que sur l'injection d'additifs oxydants dans les gaz anodiques.
 - ⇒ **L'augmentation de la température** de fonctionnement.
- Nouvelles résines pour la fabrication de **plaques bipolaires composites**.
- Nouveaux catalyseurs sans platine.
- Nouveaux supports de diffusion de gaz pour les piles à combustible.

AUJOURD'HUI	SOLUTIONS PROPOSEES
<p>Porosité + surface spécifique du contact trop faibles (distribution des gaz non homogène; 20-30% du platines utilisé pendant le fonctionnement de la pile).</p>	<p>➔ Il faut rajouter une protection limitée vis-à-vis des électrodes et de la membrane notamment en ce qui concerne la tenue mécanique.</p> <p>UMR-CNRS 6226 Sciences chimiques de Rennes Matériau poreux sous forme de feutre métallique utilisable comme plaques de diffusion</p> <ul style="list-style-type: none"> - Haut degré de porosité + surface spécifique $1-50\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ + excellente conductivité électrique (intensité et tension améliorées : puissance améliorée) <p>Propriétés physiques : Légèreté + solidité + malléabilité Corrosion + contact avec les structures : Un film organique d'épaisseur pouvant varier de 0,1 à 1µm</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Evacuation de l'eau empêchant ainsi une accumulation dans les pores, donc puissance de la pile améliorée ⇒ Réduction de la conductivité ionique de la membrane + perte d'étanchéité + obstruction des canaux
<p>➔ Plaques bipolaires ont pour fonction la collecte du courant, la distribution et la</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nouveaux concepts de plaques bipolaires <ul style="list-style-type: none"> - Composites organiques + tôles

<p>séparation des gaz à l'anode et à la cathode.</p> <p>Normalement, elles doivent posséder un niveau de conductivité électrique suffisant + bonne imperméabilité aux gaz + bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de la pile (eau, acide, oxygène, ...)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Plaques classiques = graphite ➔ Canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. <p>Prix élevés !!! (usinage)</p>	<p>métalliques</p> <p>-</p> <p>De nouvelles résines pour la fabrication de plaques bipolaires composites</p> <ul style="list-style-type: none"> - Huntsman Advanced Materials + GraftTech International Holdings Inc + Département américain de l'énergie <p>Secteur automobile: résine benzoxazine adaptée aux piles travaillant à haute température</p> <p>+ une haute température de transition vitreuse + excellentes propriétés mécaniques + module très élevé + faible aptitude à l'absorption d'eau + retrait proche de 0 + excellentes propriétés électriques</p>
---	---

Pour conclure :

- Métaux et alliages et plus particulièrement les aciers inoxydables sont légers et bon-marchés
- Energie stationnaire et énergie de secours = la résine ignifuge présente un très faible contenu ionique et donc une excellente conductivité thermique et électrique (déjà commercialisé en 2010-2011)

Il reste encore des verrous à lever pour obtenir une technologie mûre et utilisable à grande échelle.

Les objectifs à atteindre sont de plusieurs ordres :

1) Financier (coût des systèmes PAC)

2) Politique (environnement, énergie, acceptation de l'hydrogène comme vecteur énergétique)

3) Scientifique et technologique

* AXANE (acteur des PAC) filiale d'Air liquide

* Développement des piles PEMFC limité car :

> Insuffisance de leur durée de vie

> Insuffisance de leur fiabilité

> Problème au niveau du « cœur de la pile »

- Vieillesse prématurée des AME (assemblage membrane électrodes) (problème concernant le domaine de la science des matériaux = dégradation chimique / physique de l'électrolyte + de l'électrochimie = vieillissement de l'électrode)

- L'endommagement est difficilement repérable (membranes, interfaces entre l'électrolyte et les couches actives, ou dans les électrodes)

* Peu de résultats sont publiés quant à la caractérisation des propriétés des constituants de l'AME après différents temps de vieillissement dans un même système

L'Université de Savoie travaille à une meilleure compréhension des modes de défaillance des AME en s'appuyant sur une démarche matériaux, permettant de comprendre les modifications structurales à différentes échelles.

Le programme ANR-PANH « Balises » : mise au point d'une PAC qui a fonctionné 10000 heures sans interruption ni maintenance sur le terrain (alimentation d'un relai GSM)

MIT : Massachussets Institut of Technology

Pile au méthanol : Le MIT a développé une nouvelle membrane polymère sous forme d'un film mince de 5 micros = forte conductivité ionique.

La membrane est construite couche par couche avec deux polymères différents qui apportent de bonnes propriétés mécaniques.

- Coût moins important
- Faible perméabilité au méthanol
- Augmentation de la puissance délivrée de 50%

IF : Institut Fraunhofer des techniques de surface et bioprocédés (IGB)

-Création d'une membrane composite presque imperméable à l'éthanol à la présence de nano particules inorganiques de silice. (diminution de la perte d'éthanol due à la perméabilité de la membrane d'un facteur 100)

- 2 composants inorganiques

-Avantage : présence d'un autre composant inorganique + l'interconnexion transversale des nano particules de silice + la réduction des gonflements de la membrane. (=stabilité mécanique de la membrane + moins sensible aux températures élevées)

-PAC à l'hydrogène sans platine :

Le constructeur automobile DAIHATSU a développé une PAC fonctionnant à l'hydrogène (N₂H₄) :

- > Ne nécessite pas de métaux nobles (=platine) pour la catalyse des réactions aux électrodes
- > Pas de CO₂ (réaction à l'anode = azote + eau)
- > Puissance équivalente à celle des PEM classiques

Le constructeur envisage d'utiliser ce modèle de PAC dans ses futurs petits véhicules low-cost.

3. EXPERIMENTATION

3.1. Description de la manipulation

Avant de commencer la manipulation, quelques précautions sont à prendre. Il est nécessaire de produire une bonne circulation et un bon renouvellement d'air dans la pièce, d'éloigner l'électrolyseur de toute source chaude, et de prendre les mesures de sécurité de base du laboratoire.

Mode d'emploi de la pile à combustible :

- On remplit le réservoir à eau avec de l'eau distillée. Pendant ce temps, la pince supérieure de l'électrolyseur doit être fermée, et la pince inférieure doit être ouverte.
- Ensuite, on ferme la pince supérieure. On enlève le réservoir de compensation, on remplit le réservoir à gaz avec de l'eau distillée jusqu'à la marque A, puis on remet le réservoir de compensation.
- On branche l'électrolyseur à un générateur de tension que l'on règle à 1.9 V (tension max d'alimentation), tout en s'assurant que la polarisation est correcte.
- On laisse le courant passer afin d'approvisionner le système en hydrogène. Lorsque l'on obtient une quantité suffisante dans le réservoir, on débranche le générateur et on relie la pile au ventilateur afin de lire la valeur de la tension que l'on atteint petit à petit.

A faire: bien humidifier la membrane de la pile, et ouvrir de temps en temps la pince inférieure afin de laisser échapper tout gaz autre que l'hydrogène (bulles d'air par exemple) de la pile à combustible (afin que les résultats ne soient pas faussés).

3.2. Analyse et interprétation

Pour confirmer la partie théorique, nous avons mené l'expérience de la pile à combustible deux fois.

Lors de la première expérience (menée le 9 avril 2013), nous avons été encadrées par le professeur M. Abdulaziz qui est venu en début d'heure vérifier le montage et voir si les consignes de sécurité étaient respectées. L'expérience avait duré plus de 3 heures. Le but était d'utiliser nos connaissances théoriques afin d'expliquer l'expérience.

Une fois l'électrolyseur branché au générateur, le niveau d'eau baisse dans le réservoir à gaz et monte dans le réservoir de compensation : l'hydrogène est produit par électrolyse et occupe un certain volume (que l'on a mesuré) dans le réservoir à gaz. Pendant l'expérience, nous avons prélevé toutes les 5 minutes, le volume occupé par l'hydrogène dans le réservoir à gaz, la tension aux bornes de la pile, l'intensité du courant dans le circuit et la tension délivrée par le générateur. La tension délivrée par le générateur ne devait à aucun moment être nulle, d'où l'importance de surveiller sa valeur pendant l'expérience.

Pour les résultats voir annexe 1.

Au bout de 35 minutes, l'hydrogène occupait 35 cm^3 du réservoir à gaz. A ce moment-là, nous avons éteint le générateur et branché la pile à combustible au moteur. L'hydrogène contenu dans le réservoir à gaz était consommé au niveau de la membrane.

Le gaz était ainsi transformé en énergie électrique alimentant le moteur. Au bout de 195 minutes, le moteur se mit à marcher (les hélices tournaient).

Afin de mener à bien l'expérience, nous avons ouvert la pince inférieure à maintes reprises afin d'évacuer l'air susceptible d'être coincé au niveau de la membrane et ralentissant l'expérience. Nous avons également tourné tout le système au début de l'expérience afin de bien mouiller la membrane. Nous avons également fait tourner les hélices pensant qu'une force mécanique était nécessaire pour accélérer le processus.

Nous avons répété l'expérience une deuxième fois (jeudi 11 avril 2013), Voir annexe 2 pour les résultats.

Au bout de 85 minutes, la tension a atteint son maximum: 448 mV.

Petites astuces nécessaires pour le bon déroulement de l'expérience :

- On fait évacuer de l'hydrogène en ouvrant la valve inférieure, cela nous permet d'évacuer le résidu d'air qui se trouve dans la membrane et qui ralentit l'expérience,
- On rebranche le générateur assez souvent, quand on voit qu'il n'y a plus assez d'hydrogène dans le réservoir,
- On branche le moteur régulièrement pour voir combien de temps peut tenir l'hélice en tournant.

C'est donc en respectant ces petites astuces que la tension aux bornes de la pile augmentait plus rapidement que les premières fois où nous avons essayé.

4. BILAN DU PROJET

4.1. Journal de bord

Séance 1: (4 février 2013)

- Recherche d'informations sur la pile à combustible chacune de son côté.
- Recherche des sources à utiliser.
- Création du groupe sur Facebook pour faciliter l'échange d'informations.

Pour la séance 2: (11 février 2013)

- mise en commun des informations trouvées.
- Attribution des tâches.
- Etablissement d'un plan.

Séance n°02 le 11/02/2013

-> Nous avons décidé d'un plan qui nous a convenu à nous toutes.
Nous nous sommes réparties les tâches pendant cette séance.

L'attribution des tâches s'est faite à l'issue d'un tirage au sort. Nous avons également fixé un délai que nous devons impérativement respecter pour assurer le bon déroulement du projet. Nous avons prévu d'achever la partie théorique à la rentrée de Mars, à savoir le 04/03/2013.

Les parties seront publiées sur le groupe facebook afin que nous puissions les lire en intégralité et préparer les différentes questions sur les parties des autres que l'on traitera pendant la réunion du 04/03/2013.

Cela nous permettra de mieux cerner le sujet et d'envisager également des questions que le jury est susceptible de nous poser. De plus, la réunion qui aura lieu à la rentrée nous permettra non seulement de mettre en commun notre savoir mais aussi d'aborder (en partie, la partie expérimentale).

Pour la séance n°03:

- Réunion pour traiter différentes questions sur les parties
- Abord de la partie expérimentale

Séance n°3: le 04/03/2013

-> Nous avons réuni nos parties. Le plan sur lequel nous nous sommes mises d'accord la veille des vacances est le suivant:

Sommaire

Introduction (Caroline Chazal)

I- Pile à combustible

- 1) Historique (Salma Bensouda Korachi)
- 2) Principe et principaux constituants (Caroline Chazal et Dounia Zryouil)
- 3) Différents types et caractéristiques (Euridice Pelagatti et Ghita Farzouz)
- 4) Applications et limites (Sophia Zerhboub)
- 5) Quel avenir pour la pile à combustible ? (Salma Bensouda Korachi et Euridice Pelagatti)

II- Expérimentation

- 1) description de la manipulation
- 2) Analyse et interprétation
- 3) Conclusion

III- Bilan du projet

- 1) Journal de bord (Salma Bensouda Korachi)
- 2) Répartition du travail (tous les membres du groupe)
- 3) Le ressenti personnel (tous les membres du groupe)

Conclusion (tous les membres du groupe)

L'objectif de cette réunion était de mettre en commun les informations et vérifier qu'il n'y a pas de répétition dans les parties.

Étant donné que le matériel n'est pas disponible, nous n'avons pas pu aborder la partie expérimentale.

Pour la séance n°04:

Pour la séance prochaine, nous allons discuter du sujet avec vous. Nous répondrons également à vos questions. La semaine prochaine, notre partie théorique sera finalisée.

Séance n°04: (le 11/03/2013)

Nous avons pris connaissance de la partie expérimentale (brochure distribuée par le professeur expliquant les différentes étapes de la manipulation).

Nous nous sommes également toutes intéressées à la cinquième sous-partie de la partie théorique, à savoir "Quel avenir pour la pile à combustible?" que nous avons décidé de traiter ensemble.

Pour la séance n°05: (le 18/03/2013)

Nous allons attaquer la partie expérimentale, nous demanderons des clarifications sur cette partie.

Séance n°05 (le 18/03/2013)

Nous avons envoyé un mail à monsieur Ludovic Henriet pour lui demander s'il pouvait nous prêter un moteur qui fonctionne à 200 mV étant donné que notre encadrant a jugé que le temps nécessaire au démarrage de l'expérience était relativement long.

Nous avons également rediscuté de la partie expérimentale pour mieux nous l'approprier.

Pour la séance n°06 (le 25/03/2013)

(tout dépendra de la réponse de M. Ludovic Henriet: si le moteur est disponible, nous attaquerons directement la partie expérimentale, sinon nous verrons avec notre encadrant)

Séance n°06 (le 25/03/2013)

Nous nous sommes familiarisées avec le matériel. Nous avons fait l'expérience mais malheureusement, faute de temps, nous n'avons pas pu atteindre notre objectif (la tension aux bornes de la pile devait atteindre 350mV mais elle n'a atteint aujourd'hui que 164 mV). Nous avons donc prévu de consacrer tout un après midi le mardi 09 avril 2013 pour faire l'expérience.

Pour la séance n°07 (le 08/04/2013)

Nous allons discuter de la partie théorique avec notre encadrant. Nous referons la manipulation le lendemain.

Séance n°07 (le lundi 08/04/2013)

Nous avons discuté de notre projet avec notre encadrant. Nous nous sommes rendues compte que nous ne maîtrisons pas la partie théorique à 100%.

Pour cela, nous avons consacré cette séance pour l'approfondir.

le mardi 09/04/2013 – 1^{ère} expérience

Nous avons consacré toute une après-midi pour faire un essai. Je me suis présentée au laboratoire à 14h. L'encadrant m'a guidée pour monter le dispositif et pour le brancher. La membrane était déjà mouillée mais je l'ai mouillée une deuxième fois pour m'assurer qu'elle a été totalement

humidifiée. Des mesures de tension et de volume de gaz étaient prises toutes les 5 minutes (en moyenne). A 15h00, Ghita Farzouz m'a rejoint et nous avons poursuivi l'expérience. A 16h30, Dounia Zryouil a terminé l'expérience avec moi. La manipulation a duré plus de 4 heures. La tension aux bornes de la pile atteinte vers 18h 15 était de 389 mV. Le moteur a fonctionné pendant plus de 15 minutes.

Nous comptons refaire cette même expérience le jeudi 11 avril avec les autres membres du groupe. (Salma Bensouda Korachi)

le jeudi 11/04/2013 – 2^{ème} expérience

Salma BENSOUA KORACHI : 14h-14h45

Ghita Farzuoz : 14h30-15h10

Dounia Zryouil: 15h05-16h

Euridice PELAGATTI: 15h30-16h45

Sophia ZERHBOUB : 16h30 - 17h45

Séance n°08 (le lundi 29/04/2013)

Nous avons expliqué l'expérience et approfondi la partie théorique.

Pour la séance n°09 (le 06/04/2013)

Nous allons terminer la partie sur l'avenir de la pile à combustible.

Séance n°09 (le lundi 06/05/2013)

Nous nous sommes réunies à la bibliothèque pour collecter des informations sur l'avenir de la PAC. Vous trouverez ci-joint le travail fait.

Pour la séance n°10 (le 13/05/2013)

Nous avons lu le rapport avec notre encadrant pour apporter les modifications nécessaires. Il nous reste à ce jour quelques points à revoir, des parties à détailler et d'autres à synthétiser.

Séance n°10 (le lundi 27/05/2013)

Nous avons terminé de rédiger le rapport (avec toutes les modifications apportées). Il nous reste à faire la mise en page.

Pour la séance n°11 (le 03/05/2013)

Chacune rédigera une conclusion générale du projet, son ressenti personnel pour compléter le III- Bilan du projet.

Séance n°11 (lundi 03/06/2013)

La conclusion générale et les ressentis personnels ont été rédigés. La rédaction du rapport touche à sa fin. Il ne nous reste plus qu'à rassembler toutes les parties et faire la mise en page.

Pour la séance n°12 (le 10/06/2013)

Faire la mise en page (Sophia Zerhboub s'en chargera). Normalement le rapport sera prêt pour de bon le jeudi 06/06/2013.

Chaque membre du groupe devra préparer des diapositives pour dimanche 09/06/2013 afin de les montrer à notre encadrant la semaine prochaine.

4.2. Organisation du groupe

La réalisation d'un projet requiert beaucoup d'investissement de la part de chacun des membres du groupe. C'est pour cela que nous avons organisé plusieurs réunions depuis le début du semestre afin de mener à bien l'avancement du projet et de se partager équitablement le travail à fournir.

Nous nous sommes en effet partagés les tâches de manière à donner à chacun la partie où il donnera le meilleur de lui-même afin de rédiger ce rapport.

Chaque binôme a travaillé soit sur des recherches historiques concernant la pile à combustible, des recherches sur le mode de fonctionnement de **celle-ci** ou encore sur son utilisation aujourd'hui et sur l'avenir de celle-ci.

Afin de bien organiser toutes ces réunions, nous avons eu recours au mail INSA mais surtout au réseau social Facebook (nous avons créé un groupe Facebook pour le projet P6).

Cela va sans dire, une bonne organisation était primordiale afin de mener à bien ce projet. Quelques difficultés ont notamment été rencontrées au moment des révisions pour les examens, mais nous avons pu finalement rentrer dans les délais.

4.3. Le ressenti personnel

Salma : Le travail en groupe a toujours été à mes yeux, le meilleur moyen de travailler. Il permet en effet un échange d'idées et de connaissances dans le but d'atteindre un objectif bien précis.

Il permet en effet de partager divers points de vue, considérer la situation sous différents angles, apporter sa contribution à la résolution de problèmes. Mais aussi, il nous permet de prendre plaisir à partager des idées, des responsabilités, à être complices pour coproduire. Etant supposées devenir ingénieurs dans quelques années, nous serons quotidiennement confrontées au travail en groupe. La vision que j'ai pu avoir du travail en groupe grâce à ce projet permet de me conforter dans mon choix de futur métier. En effet, dans ce projet chacune a apporté beaucoup et nous avons donc pu avancer rapidement. Le fait, également, qu'il y est eu une bonne ambiance tout au long de ces dix semaines à contribuer à la satisfaction d'avoir accompli ce projet toutes ensemble.

En ce qui me concerne, ce projet m'a permis de révéler certaines de mes capacités sur le plan théorique comme sur le plan expérimental mais surtout de prendre conscience de mes limites. D'autre part, il m'a mené à mieux comprendre certaines notions en physique et en chimie, à combler certaines de mes lacunes, grâce à la patience et à l'aide de notre encadrant. Le choix de ce sujet m'a permis d'approfondir mes connaissances sur le fonctionnement de la pile à combustible et de me familiariser avec les différents constituants de la pile à combustible notamment grâce à l'expérience que l'on a menée à maintes reprises.

Euridice Pelagatti :

Pour commencer, ce projet m'a beaucoup appris sur le travail en groupe. En effet, il a fallu d'abord s'adapter aux différentes façons de travailler des autres membres du groupe. Il était important de respecter le planning car le moindre retard pouvait empêcher un autre membre d'avancer. Nos travaux étaient dépendant les uns des autres. Je tiens à dire que notre équipe s'entendait bien, nous échangeons facilement.

Pour ce qui est de la pile à combustible elle-même, ce projet m'a beaucoup apporté ! Je dois avouer que je ne connaissais très peu de choses à son sujet. Tout ce que je savais c'était qu'elle était sûrement une solution pour l'avenir car non polluante. Grâce à ce projet j'ai compris son fonctionnement et son importance !

Caroline Chazal :

Pour ma part ce projet a été une nouvelle opportunité (après ceux du premier semestre) de travailler en groupe. La différence était que cette fois nous étions encore plus nombreuses au sein du groupe, il a donc fallu encore plus s'adapter au rythme et à la façon de travailler de chacune. L'avantage est que nous nous sommes bien entendues tout au long du projet, ce qui a permis d'avancer rapidement et de manière efficace. Faire le point régulièrement nous a permis de voir où en était chaque membre du groupe et se mettre au même niveau quand certaines avaient un problème de timing ou un souci quelconque.

En ce qui concerne le sujet du projet lui-même, ça m'a également beaucoup apporté : en effet, je ne connaissais absolument pas la pile à combustible, j'avais choisi ce sujet parce que je savais qu'il était du domaine de l'énergie, univers qui m'intéresse énormément, mais je ne savais rien à propos de la pile à combustible elle-même. Ce projet m'a donc beaucoup intéressée, j'ai découvert une nouvelle manière de produire de l'énergie, et qui selon moi est promise à un bel avenir.

Dounia :

Avant de commencer ce projet, je n'avais pas idée de comment fonctionnait une pile à combustible, dans quels domaines celle-ci peut être utilisée et pourquoi, malgré les nombreux avantages qu'elle présente, elle ne l'est toujours pas sur le marché. Ce projet m'a donc tout d'abord énormément appris sur le plan de mes connaissances scientifiques, mais également sur le plan communicatif et sur le sens du travail en groupe qui jusque-là ne m'était pas beaucoup familier.

Ainsi, mon ressenti personnel à la fin de cette expérience est positif à 100% !

Sophia :

La notion de pile à combustible était totalement abstraite à mes yeux avant que je m'investisse dans ce projet. J'ai donc pu compléter mes connaissances en ce qui concerne son fonctionnement technique, sa commercialisation et ces diverses applications. Au-delà, des découvertes physique, chimique et scientifique que j'ai pu faire ce projet m'a avant tout permis d'aborder la notion de travail en groupe dont je n'avais pas particulièrement l'habitude. En effet, cette expérience m'a appris que même si l'on ne choisit pas toujours ces collègues de travail il faut faire preuve de diplomatie pour éviter les malentendus et désaccord .En bref, il faut continuellement garder à l'esprit qu'il y a un objectif à atteindre, soit aboutir à un projet relativement réussit et complet.

Ghita :

Lors du premier cours de P6, nous avons donc été informés que le sujet du projet serait l'étude des piles à combustibles, j'ai tout de suite ressenti une certaine appréhension quant à ce projet, car je ne possédais aucune connaissance en la matière. Mais cette appréhension s'est assez vite dissipée dès le début des cours et de nos recherches. Lors de la première réunion, nous nous sommes immédiatement mis d'accord sur la méthode de travail à suivre.

Et je pense que cela nous a servi pour avancer, pour mener notre projet à bout. En effet, cette absence de connaissance nous a forcée à travailler en groupe afin que, ensemble, nous découvrons et comprenions toutes ces méthodes et techniques. Mais mise à part l'envie de découvrir un peu plus tous ces aspects, c'est l'envie de travailler en groupe qui m'a motivé dans ce projet.

En effet travailler en groupe m'a permis de travailler plus régulièrement, d'avancer petit à petit. Un projet en groupe requiert des qualités qu'un ingénieur doit avoir: de la patience, du dynamisme et de la conciliation.

De la patience car on doit être capable de rester calme face à un problème pour pouvoir trouver sereinement une solution.

Du dynamisme car il faut que le groupe soit sans cesse motivé à avancer dans la construction du projet.

De la conciliation car il faut savoir faire des concessions en cas de désaccord et suivre l'avis de l'autre dans sa globalité plutôt que de suivre son opinion personnelle.

Je sors donc de ce projet satisfaite de notre travail, mais aussi satisfait de cette expérience.

5. CONCLUSION

Gérer l'avancée d'un projet, physique ou autre, requiert un sens de l'organisation accru. Le projet que nous devons effectuer tout au long de ce semestre a en effet demandé un effort au niveau de l'organisation de tout un chacun, mais également au niveau de la gestion du temps et du partage des tâches.

Ainsi nous nous retrouvons aujourd'hui avec un rendu qui nous est satisfaisant vu le respect des diverses recherches et fonctionnalités attendues.

Bien au-delà de notre apprentissage au niveau du partage, de la communication et du travail en groupe, nous avons appris de nouvelles choses sur la pile à combustible, son avenir et pourquoi celle-ci n'est toujours pas démocratisée sur le marché. Ce projet aura donc été une grande expérience puisqu'il fait partie des tous premiers projets que nous devons mener dans notre cursus d'élèves-ingénieurs, mais également parce qu'il nous a beaucoup apporté tant sur le plan scolaire que sur le plan communicatif.

Toutefois, nous aurions voulu pouvoir réaliser plus d'expériences, qui représentent une manière ludique d'apprendre. Enfin, il aurait été intéressant de rencontrer des personnes travaillant dans le développement ou la production de la pile à combustible, en visitant des sites industriels par exemple, cela aurait pu justement nous éclairer davantage sur notre sujet.

BIBLIOGRAPHIE

Encyclopédie :

- **WIKIPEDIA.** Pile à combustible
http://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible (valide à la date 10/04/2013)
- **WIKIPEDIA.** PEMFC
http://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible_%C3%A0_membrane_d%27%C3%A9change_de_protons

Sites Internet :

- <http://pileacombustible.free.fr/fonctionnement.htm> (valide à la date 10/04/2013)
- <http://www.ulb.ac.be/inforsciences/files/piles.pdf> (valide à la date 10/04/2013)
- www.adrien-girard.f (valide à la date 10/04/2013)
- www.machine-history.com (valide à la date 10/04/2013)
- <http://bazylak.mie.utoronto.ca> (valide à la date 10/04/2013)
- <http://pilecombustible.free.fr/dossier.php> (valide à la date 10/04/2013)
- http://www.alpha.com/upload/e8405_piles_combustible.pdf (valide à la date 10/04/2013)
- <http://pileacombustible.free.fr/> (valide à la date 10/04/2013)
- http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/developpement-durable-1/d/une-pile-microbienne-produit-du-courant-et-depollue-leau_35322/ (valide à la date 12/05/2013)

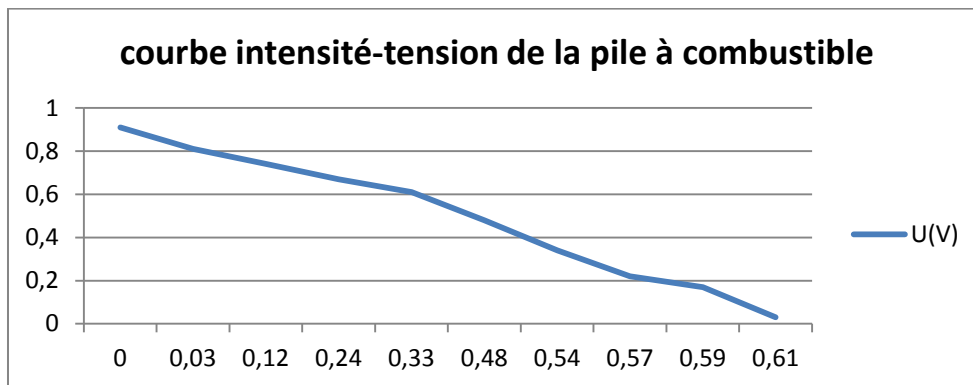
Livre :

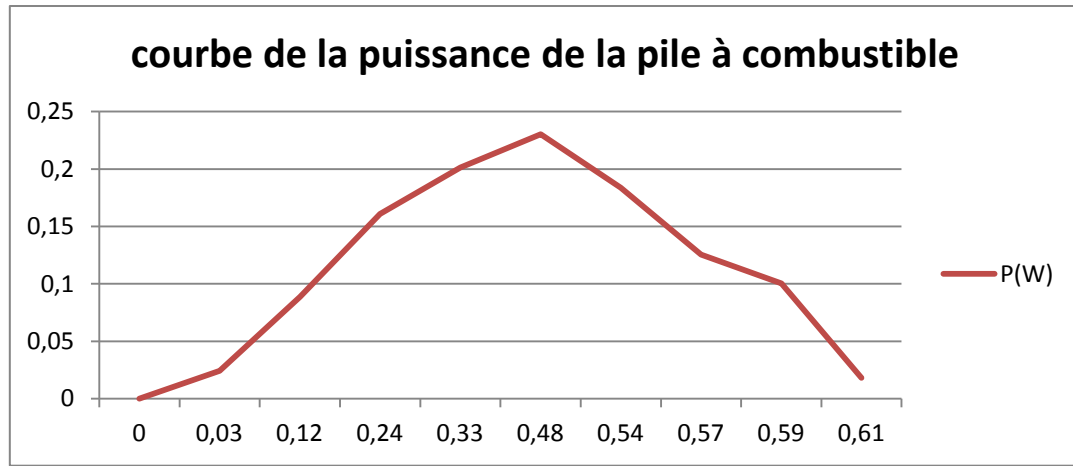
- Méziane BOUDELALL , « La pile à combustible - 2e éd. - L'hydrogène et ses applications », *Dunod*, 2012.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Résultats et courbes pour le calcul de la puissance et de l'énergie d'une cellule de PAC

U(V)	I(A)	P(W)
0,91	0	0
0,81	0,03	0,0243
0,74	0,12	0,0888
0,67	0,24	0,1608
0,61	0,33	0,2013
0,48	0,48	0,2304
0,34	0,54	0,1836
0,22	0,57	0,1254
0,17	0,59	0,1003
0,03	0,61	0,0183





ANNEXE 2 : Résultats première expérience

Temps (minutes)	Tension aux bornes de la pile à combustible (mV)	Volume occupé par l'hydrogène (cm ³)	Tension délivrée par le générateur (V)	Intensité du courant (A)
5	120.8	5	2.1	0.33
10	127.2	10	//	//
15	130.7	15	//	//
20	138.4	20	//	//
25	142.1	25	//	//
30	145.2	30	//	//
35	151.5	35	//	//
40	168.7	*	//	//
45	176.7	*	//	//
50	186.2	*	//	//
55	198.4	*	//	//
60	201	*	//	//
65	211	*	//	//
70	217	*	//	//
75	226.2	33	//	//

80	231.4	33	//	//
85	241.7	31	//	//
90	247.4	30	//	//
95	253	29	//	//
100	259.5	29	//	//
105	265	28	//	//
110	274.6	27	//	//
115	276.1	27	//	//
120	281.3	27	//	//
125	286.7	26	//	//
130	291.9	25	//	//
135	296	23	//	//
140	301	21	//	//
145	332.4	18	//	//
150	338.1	16	//	//
155	358.5	14	//	//
160	361.2	13	//	//
165	370.6	11	//	//
170	373.1	9	//	//
175	376.9	9	//	//
180	379.4	7	//	//
185	381	6	//	//
190	385.1	5	//	//
195	389	2	//	//

ANNEXE 3 : Résultats deuxième expérience

<i>Temps (mins)</i>	<i>Volume occupé par l'hydrogène (cm³)</i>	<i>Tension aux bornes de la pile (mV)</i>	<i>Intensité du courant (A)</i>	<i>Tension délivrée par le générateur (V)</i>
0	0	0.332	0.3	2.3
5	12	0.339		
10	20	0.344		
15	29	0.354		
20	40	0.367		
25	40	0.378		
30	40	0.388		
35	40	0.399		
40	40	0.405		
45	40	0.414		
50	38	0.420		
60	38	0.426		
65	36	0.431		
70	35	0.436		
75	35	0.440		
80	35	0.445		
85	34	0.448		
90	31	0.22		
95	31	0.23		
100	30	0.23		
105	29	0.24		
110	26	0.25		
115	25	0.26		

120	25	0.26		
125	23	0.27		
130	22	0.27		
135	20	0.28		
140	20	0.29		
145	19	0.29		
150	16	0.29		
155	15	0.30		
160	14	0.30		
165	13	0.30		