

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche
Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila
Institut des Sciences et de la Technologie



Spécialité : électromécanique

Thème de l'exposé :

Les piles à combustible

Réalisé par :

BOULATROUS Rayen

BENKHALEF Randa

ZELLAGUI Chaima

KHELOUF Abderaouf

BOUCHERMA Soufiane

Encadré par : Mm. S.bouchekouf

Année Universitaire: 2021/2022

SOMMAIRE

Généralité

- 1. Introduction**
- 2. Historique des piles à combustible**
- 3. Le combustible et son stockage**
- 4. Différents types des piles à combustible**
 - a. La pile Alcaline AFC**
 - b. La pile à combustible à méthanol direct (DMFC)**
 - c. La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)**
 - d. La pile à acide phosphorique (PAFC)**
 - e. La pile à carbonate fondu (MCFC)**
 - f. La pile à oxyde solide(SOFC)**
- 5. Principe de fonctionnement**
- 6. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible**
 - a. Les avantages**
 - b. Les inconvénients**

Conclusion

Généralité:

Le développement des nouvelles énergies est un défi majeur du 21^{ème} siècle pour, d'une part, faire face au réchauffement climatique et d'autre part, avoir des alternatives aux énergies fossiles.

La croissante consommation mondiale en énergie primaire ainsi que la raréfaction prévue à moyen terme des combustibles fossiles et leur impact non négligeable sur l'environnement, font de l'hydrogène l'un des vecteurs énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles. La production mondiale d'énergie repose aujourd'hui essentiellement sur les combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel. L'augmentation de la population mondiale ajoutée au développement économique laisse prévoir le doublement des besoins énergétiques au niveau mondial. Tant dit que les réserves s'épuisent, nous devons trouver une alternative aux combustibles fossiles, ce qui a poussé les scientifiques à chercher de nouvelles sources de production d'énergie électrique qu'on appelle aujourd'hui les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont de nos jours aux cœurs de l'actualité et considérées comme une solution pour favoriser l'indépendance énergétique et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Une nouvelle source possible et renouvelable qui apparaît comme une technologie prometteuse : est la pile à combustible. Elle est efficace en terme de rendement et elle produit de l'énergie sans rejet polluant ni nuisance sonore. La pile à combustible est un système électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction d'oxydoréduction en énergie électrique avec production simultanée d'eau et de chaleur, donc la pile à combustible est un convertisseur d'énergie performant en terme de rendement, qui transforme l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en énergie électrique d'une part et en chaleur d'autre part .

1. Introduction :

La pile à combustible est un générateur d'énergie permettant de transformer directement l'énergie d'un combustible (hydrogène, hydrocarbure) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique.

En effet l'énergie est produite grâce à une réaction électrochimique. Cependant la pile à combustible nécessite l'apport d'un combustible pour fonctionner, l'hydrogène. Elle réalise donc une oxydation entre son carburant l'hydrogène et son comburant l'oxygène. Ce système n'émet aucun gaz à effet de serre et produit de l'eau ainsi que de l'électricité.

Grâce à cet avantage environnemental, l'utilisation de ce système est envisagée pour diverses applications d'alimentation de véhicules électriques propres, ainsi que la cogénération de chaleur et d'électricité.

Ce chapitre introductif sur les piles à combustible poursuit plusieurs objectifs. On effectue tout d'abord un rappel chronologique de l'évolution des piles à combustible depuis leurs découvertes jusqu'à nos jours. On présente ensuite les différents types de pile à combustible puis on explique leur principe de fonctionnement. On présente enfin les avantages et les inconvénients des piles à combustibles.

2. Historique des piles à combustible :

L'effet physico-chimique à l'origine des piles à combustible a été découvert en 1838 par le professeur Christian Friedrich Schoenbein qui a observé un courant électrique dû à la combinaison d'hydrogène et d'oxygène. La première pile à combustible fut présentée par William GROVE en 1839 sous l'expérience suivante : une cellule hydrogène-oxygène (figure I-1) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte acide (acide sulfurique).

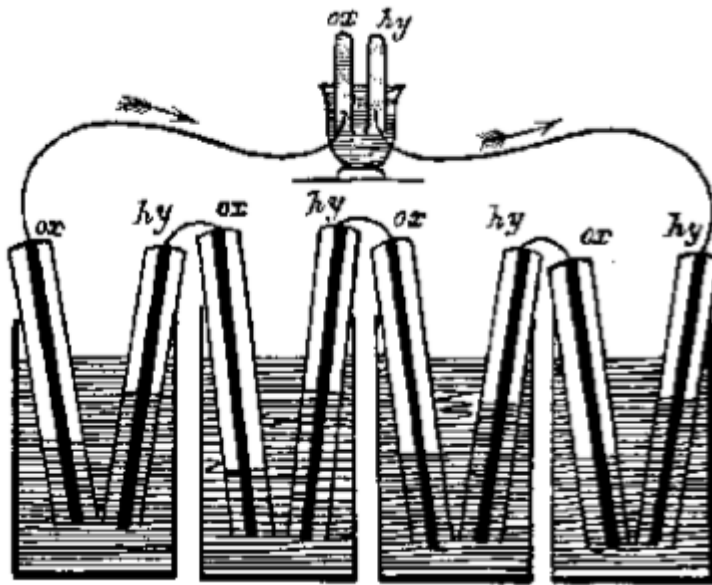


Figure 1 : Expérience de Sir W.Grove en 1839

Après quelques améliorations apportées à cette expérience, celle-ci tombe presque dans l'oubli au profit des machines thermiques, des accumulateurs et des piles électriques en vogue à cette période-là. Cinquante ans plus tard, en 1889, Ludwig Mond et Charles Langer apportent des perfectionnements notamment avec l'introduction de catalyseurs (platine) ou d'électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre et en amiante. Ils baptisent cette technologie pile à combustible.

Wilhelm Ostwald dit en 1884 « la pile à combustible est une invention plus importante pour l'humanité que la machine à vapeur et enverra bientôt le générateur Siemens dans les musées ». Malheureusement, à cause de la grande quantité de pétrole disponible et de l'invention du moteur à combustible, les piles à combustible

furent délaissées jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. Les piles à combustible réapparurent alors dans le programme spatial américain Apollo.

Les acteurs du domaine énergétique français ne restent pas à l'écart des travaux de l'époque mais pour des raisons de faisabilité technique ou pour des raisons stratégiques (choix d'autres filières de production d'électricité) les programmes sont progressivement arrêtés.

Ce n'est que dans les années 1990 que les recherches reprennent, notamment dans le domaine automobile. En 1999 les recherches vont être encouragées (et financées) grâce à la création d'un réseau national de recherche technologique « pile à combustible » elles sont poursuivies à l'heure actuelle par l'intermédiaire de projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ou d'autres organismes publics comme L'ADEM.

3. Le combustible et son stockage :

Le combustible le plus simple à utiliser est l'hydrogène. C'est également lui qui permet d'obtenir les densités de courant les plus élevées. Sa combustion ne produit que de l'eau (sous forme liquide ou de vapeur). C'est un carburant réactif et il est abondant. Cependant il est inflammable dans l'air ou en présence d'oxygène. De plus, incolore et inodore, C'est un gaz à manipuler avec précaution. Autre inconvénient, il occupe beaucoup de place, ce qui s'avère problématique dans le cas de piles équipant des véhicules. Les recherches sur la pile portent donc également sur les réservoirs de stockage d'hydrogène que l'on veut plus sûrs, plus légers et plus compacts.

4. Différents types des piles à combustible :

On compte actuellement six types de piles à combustible qui se différencient selon la nature de leur électrolyte et le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Les différents types de piles sont rappelés dans le tableau I-1.

Tableau I-1- : Différents types de la pile à combustible.

	Electrolyte	Température De fonctionnement	Domaine D'application
AFC Alkaline Fuel Cell Pile à combustible alcaline	Hydroxyde De potassium	60°C à 90°C	Transport
DMFC Direct méthanol Fuel Cell Pile à combustible au méthanol direct	Membrane polymère	60°C à 120°C	Portable
PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell Pile à combustible à membrane	Membrane polymère	60°C à 100° C	Portable Stationnaire Transport
PAFC Phosphoric Acide Fuel Cell Pile à combustible à acide phosphorique	Acide phosphorique	150°C à 220°C	Stationnaire
MCFC Molten Carbonate Fuel Cell Pile à combustible à carbonate fondu	Carbonate de Métaux alcalins	650°C	Stationnaire
SOFC Solid Oxide Fuel Cell Pile à combustible à oxyde solide	Céramique	600°C à 1000° C	Stationnaire Transport

a. La pile Alcaline AFC:

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se trouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 60° à 90°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction :



Et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde OH^- . Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques .

L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le CO_2 contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante :



Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le cout global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage en reliant plusieurs piles en série.

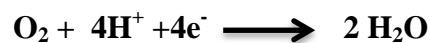
b. La pile à combustible à méthanol direct (DMFC):

La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C :

A l'anode:



Et à la cathode on a :



Dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels du à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile.

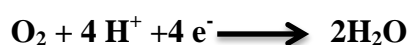
c. La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC):

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fut ensuite vite remplacé par des AFCs, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de type Nafion (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

A l'anode, on a :



Et à la cathode, on a :



L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins coûteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites de métaux à base de carbone.

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

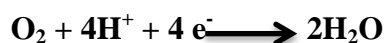
Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans températures variant de 150 à 220°C.

A l'anode:



Et à la cathode :



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 côtelé dans lequel l'électrolyte peut être stocké.

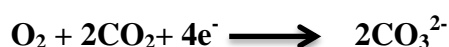
e. La pile à carbonate fondu (MCFC):

Le développement des piles à combustible à carbonate fondu a débuté dans le milieu du vingtième siècle. 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 MCFC peuvent utiliser une large gamme de carburant, et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas des piles à basses températures.

A l'anode, on a la réaction suivante :



Au niveau de la cathode :



L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel de la côte 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.

f. La pile à oxyde solide(SOFC):

Le principe de fonctionnement des SOFCS 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.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode:



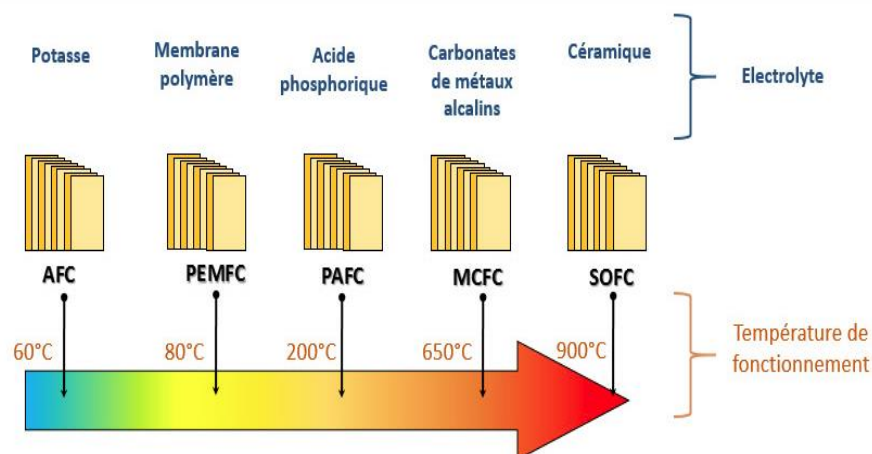
A la cathode:



La caractéristique principale des SOFCS réside donc dans leur 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 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 tout utilisation à cycles courts et répétitifs (comme dans le cas de transport).

Pour ces raisons, la technologie se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1KW à quelques dizaines de MW). Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale.

La mise au point de ce type de pile, de par sa haute température de fonctionnement et la résolution des problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux est assez complexe. Une des particularités de la SOFC et son électrolyte solide, habituellement du zirconium (Zr_2) dopé d'une mole de 8 à 10% d'ytterbium (Y^{3+}), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O^{2-}). Les SOFCS peuvent être de conceptions planes, monolithique et tubulaires, et utiliser de l'acier inoxydable, de l'acier austénitique, des matériaux céramiques selon les températures de fonctionnement et l'électrolyte désiré.



5. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :



Dans les piles dites « acide », l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction chimique.

Oxidation (anode):



Réduction (cathode) :

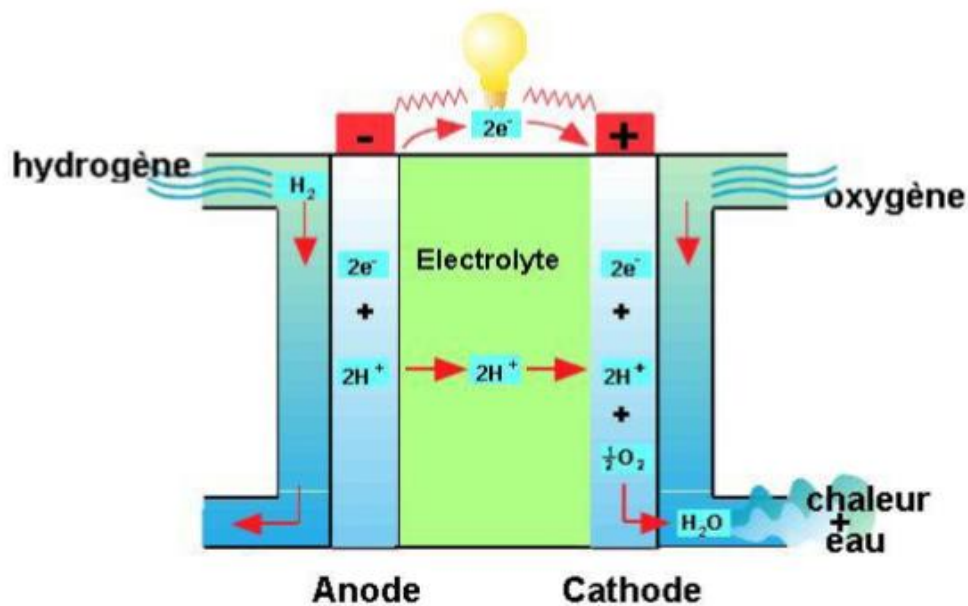


Figure 2 : Principe de fonctionnement

6. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible :

a. Les avantages:

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- ❖ De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- ❖ De faibles émissions sonores
- ❖ Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
- ❖ Elles sont de construction modulaire,
- ❖ Diverses températures de fonctionnement (PEMFC) Pas de parties rotatives.

b. Les inconvénients:

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ?

En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler :

- ❖ Le coût.
- ❖ Le poids et le volume.
- ❖ La durée de vie.
- ❖ La gestion thermique du module.
- ❖ Le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi.

Conclusion :

La pile à combustible offre à un faible coût de découverte d'un système énergétique qui entre le domaine des énergies renouvelables.

Les besoins de production d'énergie électrique sont de plus en plus nécessaires, C'est ainsi que durant ces dernière années, l'utilisation des énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien est en forte croissance.

Mais ces systèmes doivent être hybridés avec d'autre sources d'énergie comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et enfin réutilisé par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique verte. La production d'hydrogène par des moyens autonomes comme le couplage aux énergies renouvelables apporte des réponses propres, fiables et plus économique à cette nouvelle technologie.