

Piles à combustible et production d'H₂ à partir d'un panneau solaire.

**Etudiants :****Estelle DOUCHY****David LAMIDEL****Emmanuelle FERGON****Hubert OREFICE****Quentin FRANCOIS****Rémi MARGUERITE****Tina HAMDAM****Enseignant-responsable du projet :****Jami ABDUL AZIZ**

Date de remise du rapport : **15/06/2015**

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – 40**

Intitulé du projet : ***Piles à combustible et production d'H₂ à partir d'un panneau solaire.***

Type de projet : ***Bibliographique, expérimental***

Objectifs du projet :

Étude du fonctionnement de la pile à combustible et les différents types qui existent.

Multiples applications de la pile a combustible.

Etudes de la production et du stockage du dihydrogene par électrolyse.

Mise en place d'un protocole expérimentale.

Mise en pratique du couplage PAC - Electrolyseur - Panneaux solaires en faisant fonctionner un moteur.

Mise en évidence des difficultés pour faire tourner l'hélice.

Mots-clefs du projet ::

Pile à combustible (PAC)

Electrolyse

Hydrogène

Energie propre

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	1
Pile à combustible	2
1.1. Historique - Généralités.....	2
1.2. Description - Fonctionnement.....	3
1.2.1. Principe général	3
1.2.2. La cellule élémentaire	4
1.2.3. Module	5
1.2.4. Plaques bipolaires	5
1.3. Les différents types de PAC	6
1.3.1. PEMFC : Pile à combustible à membrane polymère.....	6
1.3.2. AFC : Pile à combustible alcaline.	7
1.3.3. Tableau de comparaison.....	9
1.4. Les applications de la PAC.....	9
2. Production et stockage d'hydrogène.....	13
2.1. Production d'H ₂ par électrolyse de l'eau.....	13
2.1.1. Sources actuelles de H ₂	13
2.1.2. Définition de l'électrolyse.....	13
2.2. Technologies d'électrolyses actuelles.....	13
2.2.1. L'électrolyse alcaline	14
2.2.2. L'électrolyse PEM.....	15
2.2.3. Thermodynamique de l'électrolyse:	16
2.2.4. Comparaison de l'électrolyse alcaline et PEM :	17
2.3. Stockage de l'hydrogène	18
2.3.1. Le stockage à haute pression sous forme gazeuse	18
2.3.2. Le stockage à très basse température sous forme liquide	19
2.3.3. Stockage à base d'hydrures sous forme solide	19
2.3.4. Tableau récapitulatif	20
2.3.5. Les réseaux de distribution	20
2.4. Principe de fonctionnement du panneau photovoltaïque	21

3.	Recherche et développement	22
3.1.	Comparaison de la PAC avec les principales sources d'énergies contemporaines.....	22
3.2.	Atouts/Inconvénients : quel intérêt d'une PAC ?.....	22
3.2.1.	Un enjeu énergétique	22
3.2.2.	Un enjeu environnemental	23
3.2.3.	Un enjeu économique	23
3.3.	Perspectives d'évolution.....	24
3.3.1.	Diminuer le coût des PAC	24
3.3.2.	La propulsion des véhicules	24
4.	Conclusions et perspectives.....	26
5.	Conclusions personnelles	27
6.	Bibliographie	31
7.	Annexes.....	32
7.1.	Compte rendu expérimental	32
7.1.1.	Protocole.....	32
7.1.2.	Electrolyseur : Production d'hydrogène:	32
7.1.3.	Pile à combustible: Consommation d'hydrogène:	34

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1:	Décomposition de l'hydrogène.....	3
Figure 2:	Réaction à la cathode.....	3
Figure 3:	Schéma du fonctionnement	4
Figure 4:	Module	5
Figure 5:	Fonctions schématisées d'une plaque bipolaire.....	5
Figure 6 :	Schéma du principe de fonctionnement de la PEMFC.....	6
Figure 7 :	Schéma du principe de fonctionnement de l'AFC.	7
Figure 8 :	Réaction d'électrolyse alcaline.....	14
Figure 9 :	Réaction d'électrolyse dans une cellule PEM	15
Figure 10 :	Représentation d'un stack.	16
Figure 11 :	Tableaux comparatifs des électrolyses alcaline et PEM.....	17
Figure 12 :	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	21



1. INTRODUCTION

Aujourd'hui nous entrons dans une période où les besoins en énergie se font de plus en plus ressentir. Cependant il semble qu'il n'existe toujours aucune technologie permettant de produire une énergie qui soit à la fois renouvelable et propre. Mais qu'en est-il de l'avenir ? Trouvera-t-on une méthode pour produire une énergie moins polluante sans dépendre du charbon, du pétrole ou du gaz naturel ?

L'une des solutions qui semble répondre à ces critères est la pile à combustible - que l'on nommera par l'abréviation PAC pour plus de praticité. La PAC est un générateur d'énergie, qui convertit l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en électricité de façon continue grâce à une série de réactions chimiques. Ce système, découvert plus de deux siècles auparavant, présente de nombreux avantages. En effet, cette source d'énergie offre un bon rendement énergétique, pouvant atteindre soixante pourcent. Ce rendement est meilleur comparés à ceux issus de la combustion des matières fossiles qui est généralement de quarante pourcent. De plus, cette source d'énergie permet d'éviter la combustion dans l'air à haute température, ainsi elle est qualifiée de propre.

Cependant, si les piles à combustible ne sont pas encore beaucoup développées, c'est notamment à cause des problèmes liés à son combustible. Tout d'abord, la PAC nécessite du dihydrogène pour fonctionner, cependant cet élément n'existe pas sous une forme directement exploitable dans la nature. De plus, les piles à combustible tirent encore leur hydrogène de combustibles fossiles. Ainsi, la production de dihydrogène exige de l'énergie, il peut donc sembler absurde de consommer de l'énergie afin d'en produire. Il semble ainsi clair d'étudier le rendement énergétique de ce système dans son ensemble afin de considérer sa rentabilité. De plus, le stockage de l'hydrogène dans le temps est également un obstacle au développement de cette source d'énergie. Nous étudierons les perspectives d'avenir quant à la production et le stockage de l'hydrogène, composant essentiel au fonctionnement de la pile à combustible.

Nous pouvons donc nous demander, en quoi, dans un contexte de transition énergétique, le couplage d'une réserve de dihydrogène, produit par panneaux solaires, et d'une pile à combustible est-il un enjeu pour une production durable d'électricité ?

Nous verrons, en premier lieu, la description du système dans son ensemble, à travers l'évolution de son fonctionnement depuis sa découverte jusqu'à aujourd'hui.

Ensuite, nous nous attarderons sur le couplage de la pile à combustible avec la production de dihydrogène. Dans cette partie nous verrons également les différentes manières de produire de l'hydrogène tel que les panneaux solaires et de le stocker.

Enfin, nous étudierons la recherche et le développement menés actuellement sur le système de la pile à combustible. Afin de mener notre étude à bien, nous avons fait une expérimentation afin d'étudier le fonctionnement concret d'une pile à combustible couplée avec un panneau solaire.

Ce projet aura donc pour but premier d'augmenter les connaissances en matière de pile à combustible des lecteurs; mais aussi de montrer que les piles à combustibles peuvent être une alternative efficace aux besoins énergétiques. Cependant de nombreux défis doivent être réglés avant que la pile à combustible ne soit vraiment efficace.



PILE A COMBUSTIBLE

1.1. Historique - Généralités

Bien que la découverte de la pile à combustible remonte à 1839, il a fallu attendre le XXème siècle pour voir son développement approfondi. En effet après 1839, il s'est suivi une longue période d'abandon reléguant la pile à combustible à une simple curiosité, son intérêt n'étant alors pas évident. C'est véritablement au XXème siècle que l'intérêt pour la pile à combustible se raviva ; notamment avec les concepts de développement durable qui ont émergé, concepts auxquelles semblait pouvoir répondre la pile à combustible.

Voyons les étapes de cette découverte.

- Les premiers pas vers la PAC.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1802 par Sir Humphry Davy. En effet, il est parvenu à décomposer de l'eau pure en hydrogène et en oxygène grâce à un courant électrique. Il réalise ainsi une des premières électrolyses de l'eau.

Plus tard, certains scientifiques vont donc essayer d'effectuer le processus inverse de l'électrolyse de l'eau, dans le but de générer un courant électrique à partir d'oxygène et d'hydrogène. C'est ainsi qu'en 1839, le britannique Sir William Grove, réalisa la première pile à combustible (appelée "la pile de Grove"). Elle était composée d'une anode de zinc dans de l'acide sulfurique dilué, et d'une cathode de platine dans de l'acide nitrique concentré. Les deux liquides étaient séparés par un pot en céramique poreuse. La pile Grove était alors la source d'énergie privilégiée des télégraphes américains au début de la période 1840-1860.

Ensuite la pile à combustible resta plus ou moins dans l'oubli pendant près de 20 ans.

- Le développement de la pile à combustible.

Il a fallu attendre 1960 pour que la pile à combustible reçoive tout l'intérêt qu'elle mérite. En effet, la NASA l'utilisa pour alimenter ses véhicules spatiaux lors des missions lunaires comme Apollo en 1963, ou Gemini. La pile à combustible trouvera ainsi sa première application concrète.

Dès lors, des dizaines de laboratoires et d'industriels se lancèrent dans la recherche pour développer la PAC dans le cadre de programmes nationaux ou multinationaux de diversification énergétique ou de protection de l'environnement. En effet, en 1973, suite au premier choc pétrolier, il apparaît indispensable de trouver une alternative énergétique au pétrole. Une prise de conscience quant à l'intérêt de la pile à combustible se met donc en place. Des centaines de projets et de prototypes voient ainsi le jour, partout dans le monde et les améliorations de la pile à combustible sont nombreuses.

Finalement, malgré des intérêts variés au fil du temps, la fin des années 90 marque un regain d'intérêts indéniables de la pile à combustible dont les recherches reprennent de plus belle.



1.2. Description - Fonctionnement

1.2.1. Principe général

La pile à combustible est un système qui permet de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique.

Il existe une grande variété de piles à combustible. Afin d'étudier son fonctionnement général, nous nous concentrerons sur la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Cette dernière produit de l'énergie électrique à partir d'une réaction d'oxydoréduction.

La cellule d'une pile à combustible est relativement simple, elle se compose de deux électrodes poreuses : l'anode (électrode négative) et la cathode (électrode positive), ces deux électrodes étant séparées par un électrolyte. C'est au niveau des électrodes que se produisent toutes les réactions chimiques.

L'anode est alimentée en dihydrogène, provenant d'un réservoir, tandis que le dioxygène est fourni à la cathode, celui-ci venant de l'air ambiant. A l'anode, le dihydrogène se décompose selon l'équation de réduction : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$, dont le potentiel d'électrode est : $E = E^\circ(H_2/H^+) + 0.03 \log([H^+]^2/P(H_2))$.

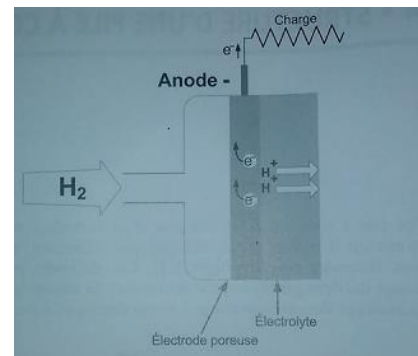
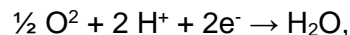


Figure 1: Décomposition de l'hydrogène.

Les électrons libérés vont être captés par l'anode. Comme ils ne peuvent pas passer par l'électrolyte, ils devront passer par le circuit extérieur et ainsi générer le courant électrique. Les ions H^+ vont également migrer vers la cathode à travers l'électrolyte. A la cathode, on assiste ainsi à la réduction de l'oxygène par la réaction :



dont le potentiel d'électrode est : $E = E^\circ(O_2/H_2O) + 0.03 \log([H^+]^2/P(O_2))$.

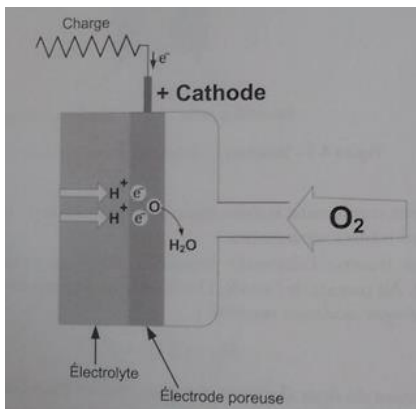
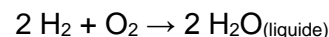


Figure 2: Réaction à la cathode.

A la cathode, l'électron rentre en contact avec la zone de triple contact. Cette zone est le point de rencontre entre le gaz (H_2 et O_2), l'ensemble électrode/catalyseur et l'électrolyte.

Cette dernière réaction produit de l'eau, évacuée sous forme de vapeur, car la réaction produit également de la chaleur.

Le bilan global de la réaction dans une pile à combustible est :



La différence de potentiel est donc :

$$E = E(\text{cathode}) - E(\text{anode}) = (E^\circ(O_2/H_2O) + 0.03 \log([H^+]^2/P(O_2))) - (E^\circ(H_2/H^+) + 0.03 \log([H^+]^2/P(H_2))) = 1.23V/ESH \text{ à } P = 1\text{Bar}$$



1.2.2. La cellule élémentaire

Dans cette sous partie, nous allons expliquer le rôle spécifiques de chaque couche.

Tout d'abord, le rôle de circuler que les ions (ici les le passage des électrons et est constitué d'une base de sulfoniques (SO_3^-). L'épaisseur comprise entre 50 et 250 μm . l'électrolyte est son taux conductivité de la membrane. augmente la résistance alors l'activité catalytique par humidifier la membrane, on excès à la cathode. Une autre température. La température 100°C pour une telle pile afin membrane.

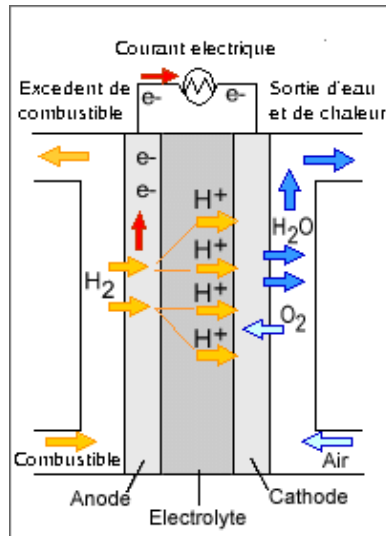


Figure 3: Schéma du fonctionnement

nous allons expliquer le rôle

l'électrolyte est de ne laisser protons H^+) tout en bloquant des gaz. Pour la PEMFC, il PTFE¹ avec des groupes de cette membrane est L'une des caractéristiques de d'humidité² car il influe sur la Un taux d'humidité trop faible qu'un taux trop élevé réduite blocage des pores. Pour récupère l'eau produite en propriété est la tenue en ne doit pas dépasser les de ne pas dégrader la

Ensuite, la couche suivante est le catalyseur dont le rôle est d'accélérer les réactions surtout aux basses températures de fonctionnement de la pile. Au niveau de la composition, c'est le platine qui est utilisé pour la cathode et un mélange platine/ruthénium pour l'anode. L'utilisation d'un mélange platine/ruthénium s'explique par l'empoisonnement chimique. Des molécules autres que l'oxygène (comme le monoxyde de carbone) viennent se fixer sur le catalyseur diminuant ainsi son activité. Cette sensibilité contraint à purifier les gaz entrants. Le catalyseur est déposé sous forme de très fines particules afin de diminuer sa quantité. En effet, son coût élevé impose une réduction de son utilisation. Les quantités déposées aujourd'hui sont de l'ordre de 1 mg. Le catalyseur est supporté soit par l'électrode, soit par l'électrolyte.

Pour finir, nous pouvons voir que c'est à la surface des électrodes que se produisent les réactions chimiques. C'est pourquoi, elles doivent avoir une bonne conductivité électrique (pour faire circuler les électrons vers le circuit externe), une importante surface de contact avec l'électrolyte (pour augmenter le nombre de réactions), une bonne diffusion des gaz et une stabilité chimique et mécanique. Les électrodes sont en général soit sous forme d'électrode séparée, soit intégrées à un support. L'électrode joue le rôle de couche de diffusion de gaz. Cette couche est à base de fibres de carbone (tissées ou non). En plus des fonctions de l'électrode, cette couche doit permettre d'évacuer la chaleur et l'eau formée à l'aide d'une certaine géométrie.

¹ Polytétrafluoroéthylène.

² S'exprime en nombre de moles d'eau par groupe sulfonique.



1.2.3. Module

Précédemment, dans l'étude du principe de fonctionnement de la pile à combustible, la tension théorique a été estimée de l'ordre du volt. Cette tension étant très faible, la formation d'un module semble intéressante pour augmenter la production d'électricité.

Dans la pratique, la pile est constituée d'un grand nombre de ces modules, qui sont raccordés électriquement en parallèle ou en série, sous forme d'un empilement appelé "stack". Chacune des cellules est alors séparée par une plaque bipolaire.



Figure 4: Module

1.2.4. Plaques bipolaires

La plaque bipolaire permet de relier les cellules électriques. Malgré leur fine épaisseur (de l'ordre du millimètre pour le graphite et de la dizaine de millimètre pour le métal), les plaques bipolaires remplissent différentes fonctions primordiales : électrique, mécanique, hydraulique et thermique.

Tout d'abord, la plaque bipolaire a un rôle électrique : elle permet donc de relier le pôle positif d'une cellule au pôle négatif d'une autre. Cette plaque doit pouvoir récolter le courant produit par les cellules et le faire passer vers les électrodes de sortie, c'est-à-dire vers le pôle négatif et le pôle positif de la pile. Ces plaques ont ainsi une conductivité électrique importante afin d'avoir une bonne performance.

Cette plaque possède aussi une propriété mécanique, en effet les réactifs sont transmis aux cellules : le dihydrogène circule d'un côté de la plaque et le dioxygène de l'autre, à travers des canaux de distribution.

Ces plaques font également circuler de l'eau et donc doivent être résistantes à la corrosion.

Une autre des fonctions de la plaque bipolaire est la fonction thermique. La cellule élémentaire dégage elle-même de la chaleur, l'empilement amplifie ce phénomène. Cette fonction est primordiale en ce qui concerne la durée de vie de la pile. Pour ce faire, des systèmes actifs (fluide en circulation) ou passifs (de type radiateur) sont mis en place. Les canaux de refroidissement se situent à l'intérieur et contiennent soit de l'air, soit un liquide. Les rainures servent également à la circulation des réactifs et des sous-produits des différentes réactions. En général, les canaux et les rainures sont de part et d'autre de la plaque.

Les matériaux utilisés pour fabriquer les plaques peuvent être des composites (graphite associé à un liant) ou des métaux (acier, aluminium, titane). Des revêtements peuvent être utilisés pour améliorer certaines propriétés évoquées ci-dessus.

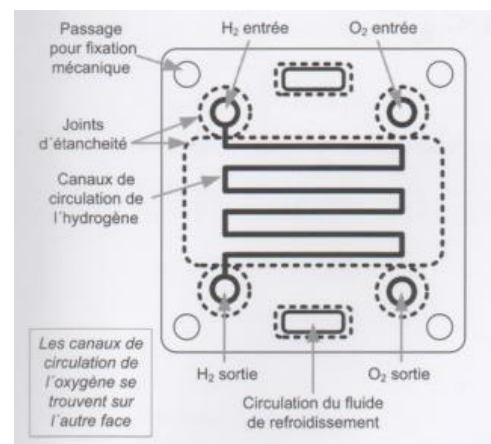


Figure 5: Fonctions schématisées d'une plaque bipolaire.



1.3. Les différents types de PAC

Couramment, on classifie les piles à combustible en fonction de leur type d'électrolyte:

Type	Électrolyte
PEMFC	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons
DMFC	Pile à combustible au méthanol direct
PAFC	Pile à combustible à acide phosphorique
AFC	Pile à combustible alcaline
MCFC	Pile à combustible à carbonate fondu
SOFC	Pile à combustible à oxyde solide

Par la suite, nous allons seulement détailler le fonctionnement des deux piles les plus développées et utilisées à l'heure actuelle : la PEMFC et l'AFC.

1.3.1. PEMFC : Pile à combustible à membrane polymère.

Ayant été pris comme modèle dans la description du principe de la pile à combustible, nous allons ici expliciter les caractéristiques de la PEMFC.

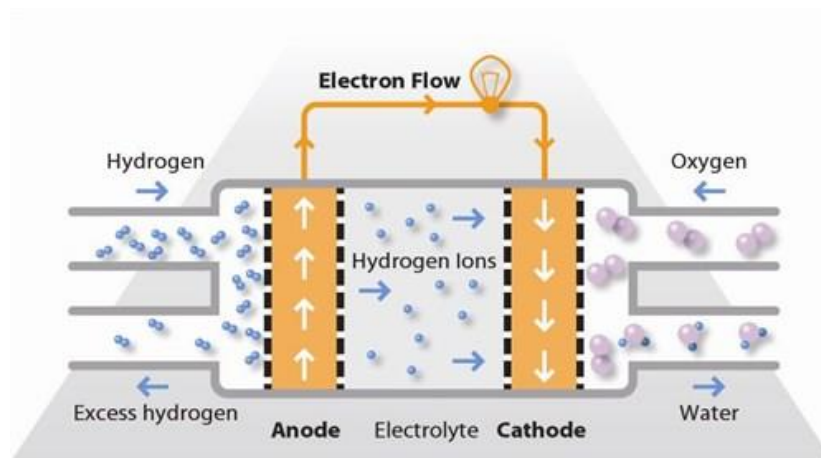


Figure 6 : Schéma du principe de fonctionnement de la PEMFC.

Les réactions chimiques qui se produisent dans la PEMFC sont les suivantes :

- A l'anode : $\text{H}_2 \xrightarrow{\text{-Pt/Ru}} 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- A la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \xrightarrow{\text{-Pt}} \text{H}_2\text{O}$
- Bilan : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} \text{ (liquide)} + \text{chaleur}$

Pour la pile à combustible à membrane polymère, les principaux paramètres de fonctionnement sont la température, la pression, le débit, la stoechiométrie et l'oxygène ou l'air. La variation de ces paramètres va influencer sur la courbe tension/densité de courant qui caractérise la pile à combustible.



Les caractéristiques de la pile sont les suivantes :

Températures de fonctionnement	60 à 80°C
Pression de fonctionnement	1 à 3 bar
Rendement électrique	40 à 50 %
Tension réelle	0,6 à 0,95 V
Densité de courant	Jusqu'à plusieurs A/cm ²
Temps de démarrage	Pratiquement instantané
Temps de réponse	Très rapide
Durée de vie	1 000 à 2 000 heures (en 2005)

Voici les avantages et inconvénients de la PEMFC.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Temps de démarrage très rapide. • Temps de réponse très rapide. • Compacité. • Fonctionnement à basse température. • Insensible au CO₂. • Structure tout solide. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de la membrane. • Nécessité de maintenir la membrane hydratée. • Coût du catalyseur (platine). • Sensibilité au CO à une concentration supérieure à 10-20 ppm et au soufre. • Durée de vie et fiabilité en utilisation réelle.

1.3.2. AFC : Pile à combustible alcaline.

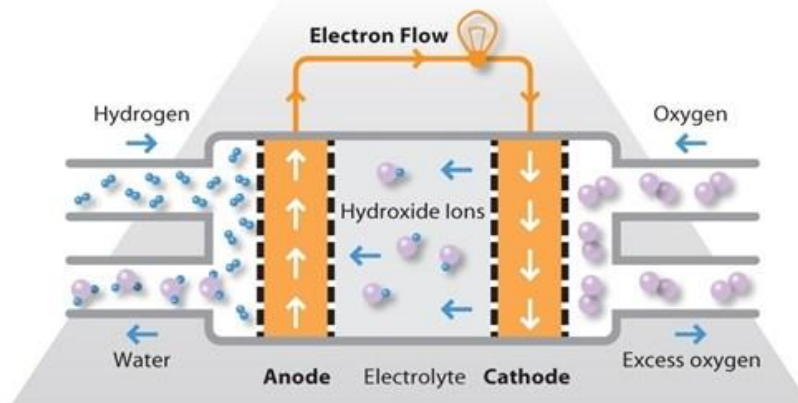


Figure 7 : Schéma du principe de fonctionnement de l'AFC.



Les réactions chimiques qui se produisent dans l'AFC sont les suivantes :

- A l'anode : $\text{H}_2 + 2 \text{OH}^-_{\text{-Ni}} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- A la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- + 2 \text{H}_2\text{O} - \text{Ag} \rightarrow 2 \text{OH}^-$
- Bilan : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{\text{(liquide)}} + \text{chaleur}$

Pour la pile à combustible alcaline, on retrouve un empilement de cellules élémentaires séparées par des plaques bipolaire, comme pour la PEMFC.

Tout d'abord, l'électrolyte est l'hydroxyde de potassium (KOH) concentré, stabilisé dans une matrice ou mis en circulation par l'intermédiaire d'une pompe. Ce sont les ions OH⁻ qui sont transportés de la cathode vers l'anode. Un problème de cette pile est que l'hydroxyde de potassium réagit avec le CO₂ produisant ainsi le carbonate K₂CO₃. Ce carbonate bloque les ports de l'électrolyte et réduit le rendement de la pile. L'élimination du CO₂ dans l'air envoyé à la cathode est donc nécessaire.

L'avantage de cette pile est qu'elle ne nécessite pas de métal précieux comme catalyseur. Le nickel à l'anode ou l'argent à la cathode suffisent à catalyser les réactions.

Et pour finir, en ce qui concerne les électrodes, elles sont en nickel ou graphite. La réaction au niveau de l'anode produit de l'eau qui est ensuite réutilisé pour la réaction à la cathode.

Pour l'AFC, on distingue deux types de fonctionnement : à électrolyte fixe ou en circulation. D'un côté, l'avantage de la circulation de l'électrolyte est que l'hydroxyde de potassium est en permanence régénéré. Cela facilite l'évacuation de l'eau et de la chaleur mais élimine aussi les impuretés et les carbonates. En revanche, le système de pompe est complexe à mettre en place et la corrosivité de l'hydroxyde de potassium détériore les matériaux du système. D'un autre côté pour l'électrolyte fixe, c'est tout le contraire. En effet, la structure est plus simple et plus stable mais l'évacuation de l'eau (dilution de l'électrolyte) et de la chaleur est difficile, la formation des carbonates réduit les performances.

Les caractéristiques de la pile sont les suivantes.

Températures de fonctionnement	60 à 90°C
Pression de fonctionnement	1 à 5 bars
Rendement électrique	> 60 % (avec de l'hydrogène pur)
Tension réelle	0,7 à 1,0 V
Densité de courant	100-200 mA/cm ²
Temps de démarrage	Quelques dizaines de minutes
Temps de réponse	Relativement rapide
Durée de vie	Environ 5 000 heures (en 2006)



Voici les avantages et les inconvénients qui se dégagent de l'AFC.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionne à basse température. • Fonctionne à pression atmosphérique. • Faible coût de l'électrolyte. • Faible coût des catalyseurs. • Temps de réponse. • Temps de démarrage. • Rendement électrique élevé. • Fonctionne à basse température (en dessous de 0°C). 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible au CO₂. • Electrolyte corrosif. • Nécessite des gaz purs.

1.3.3. Tableau de comparaison

Voici un tableau comparatif des différentes piles :

Type	Température (°C)	Combustibles		Ions	Électrolyte		Comburant
PEMFC	80	H ₂	A N O D E	H ⁺ →	Membrane polymère	C A T H O D E	O ₂ ou air
DMFC	110	CH ₃ OH		H ⁺ →	Membrane polymère		O ₂ ou air
PAFC	200	H ₂		H ⁺ →	Acide phosphorique H ₃ PO ₄		O ₂ ou air
AFC	80	H ₂		← OH ⁻	Hydroxyde de potassium KOH		O ₂ ou air
MCFC	650	H ₂		← (CO ₃) ²⁻	Mélange de carbonates		O ₂ ou air
SOFC	1 000	H ₂ , CO, CH ₄		← O ²⁻	Céramique solide		O ₂ ou air

1.4. Les applications de la PAC

A présent, il semble important de décrire les applications de la pile à combustible.

On retrouve d'une manière général trois grands domaines d'application : les applications embarqués (dans les transports), les applications portables et les applications stationnaires.

Décrivons plus en détail les applications dans ces trois domaines.



Les applications embarquées :

Le domaine des transports est un domaine où les contraintes de coûts sont particulièrement fortes. La concurrence y est très élevée et le moteur thermique est une technologie très mature et performante dont le seul inconvénient est la pollution qu'il engendre. La PAC dont le coût est non négligeable peine alors à le concurrencer.

Néanmoins, il faut savoir que la PAC a été testée, par des démonstrateurs ou des prototypes, sur une très large variété de modes de transport, comme les voitures, bus, bateaux, deux-roues, sous-marins, dirigeables, drones, navettes spatiales etc.. Cependant, ces prototypes sont très peu commercialisés à l'heure actuelle et restent au stade de la recherche afin d'améliorer leur rentabilité et donc leur compétitivité.

Au sein des applications embarquées, La technologie que l'on privilégiera majoritairement est celle des piles à basses températures (PEMFC) car la mise en fonctionnement est très rapide par rapport aux piles à hautes températures et elle offre une relativement bonne durée de vie.

Les besoins technologique en termes de transport seront tout de même différents selon que l'utilisation de la PAC se fasse pour un transport de type terrestre, maritime ou aérien.

- Pour le **transport terrestre**, la pile à combustible peut servir soit :

Pour la propulsion du véhicule en lui-même : en remplaçant donc le moteur thermique par un moteur électrique, alimenté par une PAC.

Plusieurs méthodes existent comme l'utilisation d'un groupe électrogène purement pile à combustible ou encore l'hybridation de la pile à combustible avec une source auxiliaire de puissance (SAP) ou enfin, l'utilisation de la pile pour charger des batteries.

Néanmoins dans un but de propulsion, à l'heure actuelle, la solution la plus efficace reste le recours à un moteur hybride. Mais il doit encore gagner en maturité et en rentabilité. En effet, l'hydrogène (combustible idéal de la PAC) est distribué uniquement par quelques stations-service dans le monde et l'énergie nécessaire pour son obtention reste encore importante.

Pour la production auxiliaire de puissance (APU) : la pile est alors utilisée à la place ou en complément d'une batterie dans le but d'alimenter les instruments de bord ou les auxiliaires du véhicule. Elle agirait donc en complément du moteur à combustion interne qui se chargerait encore de la propulsion du véhicule. Cette architecture se révèle intéressante surtout pour certains camions qui ont besoin de générer de l'électricité quand ils sont à l'arrêt. Par exemple : les camions frigorifiques. Dans ce cas très précis, la pile utilisée ne sera plus nécessairement une PEMFC mais pile à oxyde solide (SOFC) qui fonctionne à haute température mais présente un rendement élevé.

- Pour le **transport maritime**,

La pile à combustible est là encore utile pour la propulsion d'un navire ou d'un sous-marin. Sur le plan militaire, la réduction du bruit, des vibrations et de la signature thermique qu'engendre l'utilisation de la pile se révèle être un atout important. En ce sens de nombreux projets de recherche existent avec l'utilisation de piles de types PEMFC (pour la rapidité de mise en actions toujours) ou MCFC (à carbonate fondu) / SOFC, permettant d'utiliser des combustibles plus conventionnels. De plus, le rendement d'une PAC étant plus important, elle permet une autonomie des batteries plus élevée, ce qui permettrait à un sous-marin de rester plus longtemps dans les profondeurs.



- Pour le **transport aérien**,

Il est connu que les avions sont très polluants notamment lors de leurs décollages et atterrissages. Ainsi, le recours à une pile à combustible pour la propulsion serait très avantageux. Or, les recherches dans ce domaine sont rares et l'heure ou la PAC remplacera le traditionnel moteur à combustion semble très lointaine.

Les applications stationnaires :

Le domaine des applications stationnaires est certainement le domaine d'applications où les recherches sont les plus abouties et pour lequel l'intérêt des industriels est le plus important. Elle concerne les installations fixes qui peuvent aller de l'habitation individuelle (de quelques kilowatts), à l'habitation collective, à des installations industrielles, tertiaires ou militaires (de plusieurs centaines de kilowatts). On va donc distinguer deux types d'applications : les applications de petites puissances et les applications de grandes puissances.

- Les applications de **petites puissances** :

On parle de petites puissances lorsque celles-ci sont inférieures à 10kW. De telles installations sont dédiées soit à la cogénération, c'est-à-dire : la production combinée de chaleur et d'électricité ; soit à des systèmes d'alimentations sans coupure (dit UPS). On peut alors envisager plusieurs sortes d'application :

Les applications domestiques :

La pile permet de produire de l'électricité pour les différents locaux d'une habitation et peut aussi, en même temps, fournir de la chaleur pour chauffer l'eau des locaux (cogénération). Les piles utilisés à l'heure actuelle sont les piles à acide phosphorique (PAFC), ce sont celles qui fonctionnent le mieux. Mais on peut également utiliser les piles de types SOFC (haute température), et PEMFC (fonctionnant à basse températures et avec un temps de démarrage et de réponse très courts).

Les applications décentralisées :

Ce type d'application est très intéressant lorsque le coût d'installation d'une ligne électrique se révèle trop élevé (dans les endroits isolés ou à fortes contraintes notamment). Le recours à une PAC peut alors se révéler plus rentable.

Les applications pour des systèmes de secours :

En cas de coupure d'électricité, un système de PAC pouvant prendre le relais comme alimentation de secours peut être vital notamment dans les hôpitaux ou des sites sensibles.

- Les applications de **grandes puissances** :

On parle de grandes puissances lorsque celles-ci sont supérieures à 10kW.

Les piles à combustibles peuvent être utilisées pour produire de l'électricité à grande échelle dans des centrales électriques. On utilise alors des piles hautes températures SOFC ou MCFC avec reformage interne. En effet, les hautes températures permettent une meilleure rentabilité car la vapeur d'eau produite est mieux mise à contribution (via des échangeurs internes, turbine et cogénération).



Actuellement, du côté des centrales à fortes puissance, on peut citer l'entreprise Fuel Cell Energy aux Etats-Unis. Elle possède une centrale de type MCFC et produirait dans les 2MW d'électricité par exemple. Mais c'est loin d'être la seule et on peut observer que le nombre de centrale électrique à pile à combustible qui s'implantent dans le monde ne cesse de croître.

Les applications portables :

Cette famille d'application représente les piles à combustibles d'une puissance de quelques dizaines de watts jusqu'aux kilowatts. Elles sont capables d'équiper des appareils portatifs comme nos téléphones mobiles, GPS, baladeurs ou encore ordinateurs portables.

L'utilisation des piles à combustibles dans ce domaine pourrait permettre d'avoir des systèmes capable de remplacer nos batteries (d'autant plus que c'est une technologie qui arrive à maturité et qui semble difficile à améliorer encore). Et cela, avec un meilleur rendement, une meilleur autonomie (pas besoin de recharger de batterie, les PAC fonctionnent en continu, il suffit de la recharger en méthanol liquide comme on rechargerait un briquet), et avec une faible pollution.

Pour cela, on utilise des PAC de types PEMFC (au méthanol) et DMFC que l'on peut couplées avec une batterie Li-ion ainsi, avec un telle système on pourrait considérablement gagner en autonomie (la pile produit l'énergie qui recharge la batterie). L'engouement pour ce secteur est très important et les prototypes et projet de recherche sont très nombreux. Le but étant toujours d'obtenir des systèmes moins coûteux et donc plus compétitif.



2. PRODUCTION ET STOCKAGE D'HYDROGENE

Le H₂ est un des réactifs de la pile à combustible. Pour que la pile à combustible puisse s'imposer en tant que convertisseur d'énergie du futur, la mise en place d'une infrastructure d'hydrogène est indispensable.

Comment peut-on le produire proprement c'est à dire sans émission de gaz polluants?

2.1. Production d'H₂ par électrolyse de l'eau

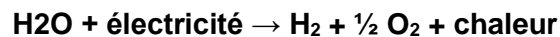
2.1.1. Sources actuelles de H₂

Aujourd'hui, 90 % du gaz hydrogène est produit de manière industrielle soit par vaporeformage de méthane (craquage du gaz naturel par la vapeur d'eau à haute température), soit par **oxydation partielle** (production de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures lourds et de dioxygène). Ces deux procédés émettent d'importantes quantités de CO₂ : 9 tonnes de CO₂ sont émis dans l'atmosphère pour la production d'une tonne d'hydrogène par vaporeformage contre 18 tonnes par oxydation partielle.

Un troisième procédé, **l'électrolyse de l'eau**, constitue la solution la plus propre de production d'hydrogène. En effet, c'est un moyen de production d'hydrogène propre qui ne génère ni gaz à effet de serre ni CO₂, de plus, il permet de stocker de l'électricité sous forme chimique.

2.1.2. Définition de l'électrolyse

L'électrolyse de l'eau produit du dihydrogène (H₂) et du dioxygène (O₂) à partir d'eau, grâce à un courant électrique. La réaction se produisant est :



La réaction correspond à la réaction inverse de celle se produisant dans une pile à combustible.

Elle nécessite un apport continu d'énergie électrique, dépendant essentiellement de l'entropie de réaction et de son enthalpie qui correspond à l'enthalpie de dissociation de l'eau : $\Delta H = 285 \text{ kJ/mole}$. Le potentiel théorique pour réaliser cette électrolyse est de 1,481V à 25°C. En pratique, il faut des potentiels de 1,7 à 2,1V, en raison des phénomènes électrochimiques mis en jeu au niveau des électrodes (apparition de surtension) et des pertes électriques (chute ohmique principalement). Avec de tels potentiels, le rendement global est de l'ordre de 70 à 85%.

Dans le cas où l'électricité est produite en utilisant des sources renouvelables comme l'énergie solaire convertie en électrique grâce aux panneaux photovoltaïques, on dit que l'hydrogène produit par électrolyse est de l'hydrogène "propre".

2.2. Technologies d'électrolyses actuelles

Classiquement, l'électrolyse se fait à basse température (inférieure à 100°C). Ce type d'électrolyse "alcaline" ou "PEM" pour *Proton Exchange Membrane* est un procédé plus écologique mais plus coûteux que les modes de production d'hydrogène à base de combustibles fossiles.

Plusieurs types d'électrolyseurs sont commercialisés aujourd'hui, dont la production varie entre 0,5 Nm³/h soit 40g d'H₂ par heure et plus de 750 Nm³/h soit 70 kg d'H₂ par heure. Cet électrolyte peut être :



- Une solution aqueuse acide ou basique.
- Une membrane polymère échangeuse de protons.
- Une membrane céramique conductrice d'ions O^{2-} .

Actuellement, 2 technologies d'électrolyses sont utilisées :

- **l'électrolyse alcaline** avec l'utilisation comme électrolyte, d'une solution alcaline conductrice d'ions pour la dissociation de l'eau,
- **l'électrolyse PEM** qui utilise un **électrolyte solide à membrane polymère échangeuse de protons** (*Proton Exchange Membrane*) à la place d'un électrolyte liquide (électrolyse alcaline).

2.2.1. L'électrolyse alcaline

Actuellement, l'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle.

Les électrolyseurs à technologie alcaline commercialement disponibles ont des températures de fonctionnement comprises entre 80 et 90 °C et leurs pressions de fonctionnement s'échelonne de 1 jusqu'à environ 30 bar (absolus). Ils présentent une gamme de puissance allant du kW au MW, les rendements énergétiques de tels électrolyseurs sont de l'ordre de 75 à 90 %, pour une durée de vie supérieure à 80 000 heures de fonctionnement, pouvant même aller jusqu'à 160000 heures (soit environ 18 ans).

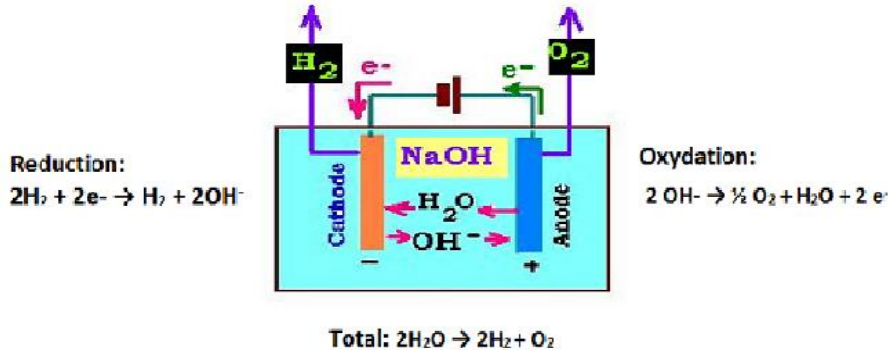
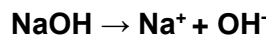
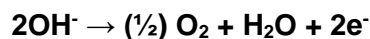


Figure 8 : Réaction d'électrolyse alcaline.

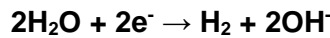
Pour la solution basique, on utilise la solution d'hydroxyde de sodium NaOH. Ainsi, les espèces chimiques présentes en solution sont l'eau H_2O et les ions Na^+ et OH^- provenant de la dissociation de NaOH :



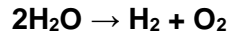
Sur l'anode, d'où partent des électrons, il se produit une oxydation: l'ion hydroxyde OH^- est oxydé en dioxygène en fournissant des électrons :



L'eau recueillie dans l'anode passe à la cathode où il est réduit en captant les électrons en provenance de la pile débitrice pour former des molécules de dihydrogène H₂ et des ions hydronium OH⁻. C'est la réaction de réduction :



Ainsi, on obtient l'équation bilan suivant :



Un électrolyseur alcalin permet une production d'hydrogène de 4 Nm³/h sous une pression de 10 bars avec une puissance électrique fournie de 20 kW et une consommation moyenne d'eau de 12 l/h.

2.2.2. L'électrolyse PEM

L'électrolyse PEM appelée aussi l'électrolyse acide se distingue de la précédente par un électrolyte solide à membrane polymère PEM (Proton Exchange Membrane) conductrice de protons.

L'électrolyse à membrane polymère est considérée par beaucoup comme une technologie d'avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les piles à combustibles de technologie PEM, et de la réduction des coûts associée. Cette technologie est directement issue des développements de la pile à combustible type fonctionnant vers 900 – 1000°C.

Elle se révèle intéressante si on l'alimente à la fois en électricité et en chaleur pour maintenir la température élevée souhaitée, le rendement peut alors être supérieur à 80%. Elle est essentiellement destinée à être couplée à un système solaire à concentration ou à un réacteur nucléaire à haute température. Elle est au stade de la recherche dans divers laboratoires.

2.2.2.1. Fonctionnement de l'électrolyse acide

La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des protons produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H₂ et O₂), selon les réactions ci-dessous :

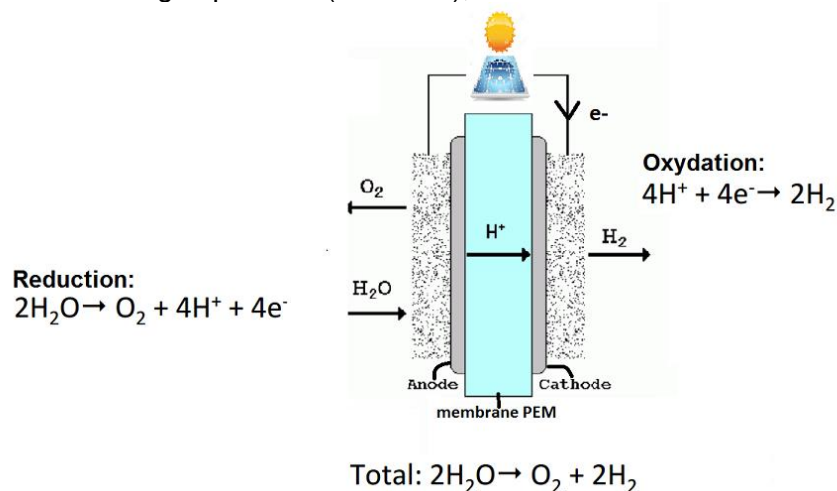


Figure 9 : Réaction d'électrolyse dans une cellule PEM



La membrane est recouverte des deux côtés d'une fine couche de matériau catalyseur. Ces deux couches forment l'électrode négative et positive de l'électrolyseur. L'électrolyse de l'eau permet de produire de l'hydrogène et de l'oxygène. Un électrolyseur PEM divise l'eau pure en hydrogène et en oxygène. En appliquant une tension continue (1,7V - 2,5V) des molécules d'eau sont oxydées sur l'anode en oxygène et en protons et des électrons sont libérés. Les protons (ions H⁺) se dirigent vers la cathode en passant par une membrane conductrice de protons et y forment du gaz hydrogène avec les électrons circulant le long du circuit conducteur extérieur. Du gaz oxygène s'accumule du côté de l'anode.

La production de quantités importantes d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse de l'eau nécessite l'association de plusieurs cellules individuelles PEM en empilement. L'empilement de ces cellules PEM est appelé stack. Entre chaque cellule se trouve une électrode de titane poreux permettant le passage des électrons d'une cellule à une autre. Le tout est baigné dans de l'eau afin que la réaction d'oxydoréduction puisse s'effectuer. La production d'hydrogène reste constante et continue 24h sur 24h.

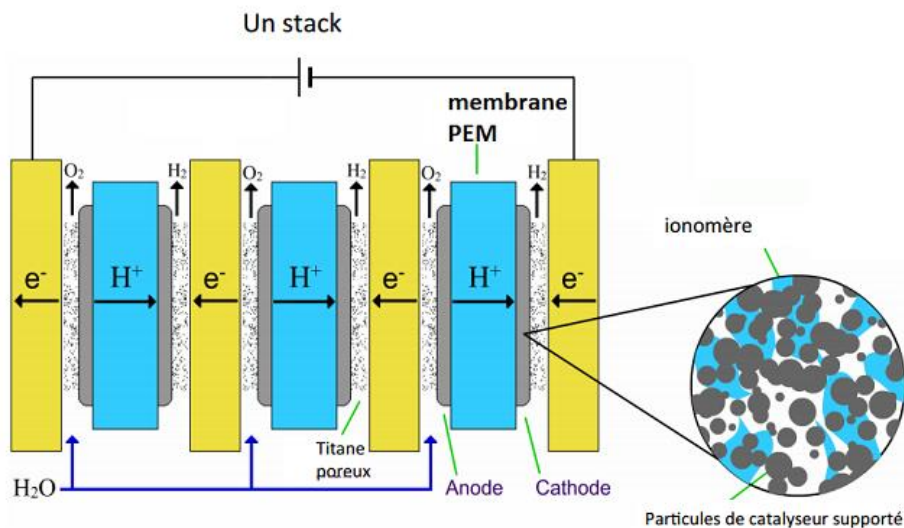


Figure 10 : Représentation d'un stack.

2.2.3. Thermodynamique de l'électrolyse:

La quantité minimum d'énergie électrique (nFE) à fournir à la cellule est égale à la variation d'enthalpie libre (DeltaG_d) associée à la réaction de dissociation de l'eau :

$$\Delta G_d - nFE = 0$$

Avec :

- DeltaG_d > 0 puisque la réaction n'est pas une réaction spontanée sachant qu'il faut appliquer une tension électrique continue aux bornes des électrodes.

Où :

- DeltaG_d s'exprime en J
- n = nombre de moles d'eau en mol
- F = constante de Faraday 96 485 C/mol
- E = tension thermodynamique d'électrolyse en V (= 1 J/C)

Donc, la tension thermodynamique d'électrolyse E s'écrit :



$$E(T, P) = (\Delta G_d(T, P)) / nF$$

De plus, la tension enthalpique V de décomposition est définie par :

$$V(T, P) = (\Delta H(T, P)) / nF$$

Ainsi, dans les conditions standards de température et de pression ($T = 25^\circ\text{C}$, $P = 1 \text{ bar}$), l'eau est liquide et le H_2 et le O_2 sont gazeux :

$$\Delta G_d^0(\text{H}_2\text{O}) = 237.22 \text{ kJ.mol}^{-1} \rightarrow E_0 = \Delta G_d^0(\text{H}_2\text{O}) / 2F = 1.2293 \text{ V}$$

$$\Delta H_d^0(\text{H}_2\text{O}) = 285.84 \text{ kJ.mol}^{-1} \rightarrow V_0 = \Delta H_d^0(\text{H}_2\text{O}) / 2F = 1.4813 \text{ V}$$

Une tension supplémentaire à la tension d'électrolyse est donc nécessaire pour fournir la chaleur requise par la dissociation. Elle est de $0,25\text{V}$.

En somme, la tension à fournir à la cellule pour effectuer l'électrolyse de l'eau est de, environ, $1,48\text{V}$.

2.2.4. Comparaison de l'électrolyse alcaline et PEM :

	Type d'électrolyse	
	Alcaline	PEM
Température de fonctionnement ($^\circ\text{C}$)	40 - 90	20 - 100
Pression de fonctionnement (bars)	3 - 30	1 - 400
Consommation électrique (kWh/Nm^3 de H_2)	4 - 5	6
Rendement énergétique (%)	70 - 90	80 - 90
Durée de vie (ans)	15 - 20	15 - 20
Etat de développement	Commercialisé	Développement

Caractéristiques	Type d'électrolyse	
	Alcaline	PEM
Electrolyte	Solution aqueuse (principalement KOH)	Membrane polymère solide (Nafion)
Densité de courant (A/cm^2)	$< 0.4 \text{ A/cm}^2$	2 A/cm^2
Fiabilité	Utilisation commerciale éprouvée.	Haute fiabilité dans le temps (utilisation spatiale, sous-marins)
Avantages	Actuellement le coût le plus bas avec de bons rendements	Électrolyte solide (pas de pièces mobiles, pas de liquide corrosif); fortes densités de courant ; conception compacte; grande production de gaz sous pression; peut fonctionner à haut ΔP
Inconvénients	Faible densité de courant; électrolyte liquide ; maintenance ; auxiliaires souvent nécessaires pour la compression du gaz.	Le coût élevé des membranes polymères et des catalyseurs en métal noble; processus de fabrication compliqués et coûteux

Figure 11 : Tableaux comparatifs des électrolyses alcaline et PEM.



2.3. Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est un très bon vecteur énergétique avec une densité énergétique de 33 kWh/kg. Il contient 3 fois plus d'énergie que le gazole et 2,5 fois plus d'énergie que le gaz naturel.

Cependant l'hydrogène est un gaz difficile à stocker du fait de sa très faible densité. À pression atmosphérique et à température ambiante, il faut 11 m³ pour stocker seulement 1 kg d'hydrogène. Or la production annuelle d'hydrogène dans les secteurs industriels est d'environ 45 millions de tonnes, cela pose un vrai problème aux industriels qui veulent utiliser efficacement l'hydrogène en tant que combustible.

Ainsi l'hydrogène ne peut jouer son rôle de vecteur énergétique que si l'on arrive à le stocker efficacement, avec un coût limité et dans des conditions de sécurité acceptables. Le risque de fuite de l'hydrogène doit être pris en considération, compte tenu du caractère inflammable et explosif de ce gaz. De plus, en raison de la petite taille de sa molécule, il est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux.

Cela a pour conséquence de les rendre cassants et donc beaucoup plus fragiles. Différents modes de stockage doivent être envisagés.

Le concept de stockage de l'hydrogène désigne toutes les formes de mise en réserve de l'hydrogène en vue de sa mise à disposition ultérieure comme produit chimique ou vecteur énergétique. Dans notre cas il s'agit de carburant pour notre pile à hydrogène.

Les technologies de stockage actuelles compriment à haute pression (700 bars et +) ou liquéfient l'hydrogène à -253 °C, procédé présentant des risques supplémentaires. De plus, ces procédés sont extrêmement coûteux en énergie.

Pour stocker le gaz et le transporter efficacement, il faut fortement réduire son volume. Plusieurs techniques existent pour cela :

- le stockage à haute pression sous forme gazeuse
- le stockage à très basse température sous forme liquide
- le stockage à base d'hydrures sous forme solide

2.3.1. Le stockage à haute pression sous forme gazeuse

L'hydrogène est un gaz très léger qui peut être fortement comprimé afin de réduire son volume massique. La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter la pression.

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m³ contre 0.090 kg/m³ à pression et température atmosphérique. Ainsi, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres. Aujourd'hui, l'hydrogène est déjà distribué dans des bouteilles en acier dans lesquelles il est stocké à 200 bars.

Pour améliorer encore la capacité de stockage, les industriels développent des bouteilles ou des réservoirs composites, matériaux bien plus légers que l'acier, qui permettent de stocker l'hydrogène jusqu'à une pression de 700 bar. Ainsi, la majeure partie des constructeurs automobiles a retenu la solution du stockage sous forme gazeuse à haute pression. Cette technologie permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire à une voiture alimentée par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein.

Aux avantages indéniables de cette méthode s'opposent un coût global élevé, un volume encore trop conséquent des réservoirs, une perte en énergie de l'ordre de 10%, ainsi que des questions de sécurité. Deux méthodes très différentes permettent de stocker l'hydrogène gazeux à haute pression, soit dans des microsphères en verre, soit dans des réservoirs composites.



2.3.2. *Le stockage à très basse température sous forme liquide*

Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à très basse température.

Le stockage à l'état liquide de l'hydrogène apporte plus de sécurité tout en gagnant en place par rapport à la technique par compression. Pour contenir l'hydrogène sous forme liquide, plusieurs méthodes existent :

- Liquéfier le gaz à basse température (en dessous de -250°C) et pression atmosphérique. Sa masse volumique augmente alors. En effet l'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de -250°C . Ainsi, à -252.8°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés.
- Héberger l'hydrogène au milieu de molécules de liquides organiques rechargeables tels le naphthalène ou le benzène. Il suffit de les hydrogéner à température élevée pour obtenir deux nouvelles molécules stables, le cyclohexane et la décaline, qui sont ensuite conditionnés à basse température pour être facilement transportés et utilisés.

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est pour l'instant réservé à certaines applications particulières de très hautes technologies comme la propulsion spatiale. Par exemple, les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide, contiennent les 28 tonnes d'hydrogène liquide qui vont alimenter son moteur central. Ces réservoirs sont une véritable prouesse technologique : ils ne pèsent que 5,5 tonnes à vide et leur paroi ne dépasse pas 1,3 mm d'épaisseur.

2.3.3. *Stockage à base d'hydrures sous forme solide*

Le stockage de l'hydrogène sous une forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est une piste de recherche prometteuse.

Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau. Les phénomènes d'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules se collent sur une surface solide.

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux.



2.3.4. **Tableau récapitulatif**

Stockage de l'hydrogène par:	État	Avantages	Inconvénients
Compression	Forme gazeuse	- La plus utilisée - Bien maîtrisée - La moins coûteuse à ce jour	- Pression pas assez importante pour stocker de grands volumes - Risque d'explosion si trop grande pression
Liquéfaction	Forme liquide	- Bien maîtrisée - Stock de plus grands volumes	- Contraintes mécaniques importantes car risques de fuite - Énergie dépensée importante
Adsorption	Forme solide	Plus sécurisant - Capacité de stockage modulable	- En cours de recherche - Complexe et cher

2.3.5. **Les réseaux de distribution**

Pour que le dihydrogène puisse réellement devenir le vecteur énergétique de demain, un vaste réseau de distribution devra se mettre en place (pipelines, réservoirs rechargeables...) afin de permettre toutes les utilisations. Il devra être disponible à tout moment, en tout point du territoire. Cela nécessiterait de mettre en place des infrastructures importantes en corrélation avec les stations pour véhicules électriques pour produire, stocker et transporter l'hydrogène sur des distances à l'échelle d'un pays.

Mettre au point ces modes de transport, de stockage et de distribution compatibles avec les faibles usages représente donc un enjeu crucial.

Dans les schémas actuels, la logique de distribution industrielle est en général la suivante : le dihydrogène est produit dans des unités centralisées, puis utilisé sur site ou transporté par pipelines. Ces réseaux permettent de connecter les principales sources de production aux principaux points d'utilisation (actuellement l'industrie chimique).

Des réseaux de distribution de dihydrogène par pipelines existent déjà dans différents pays pour approvisionner les industries chimiques et pétrochimiques (environ 1 500 km en Europe de l'ouest et 1 150 km aux États-Unis). La réalisation de ces infrastructures industrielles démontre que l'on dispose d'une bonne maîtrise de la génération et du transport de dihydrogène.

Un bémol cependant : le coût du transport est environ 50% plus cher que celui du gaz naturel, et à volume et pression égales, le dihydrogène transporte trois fois moins d'énergie que le gaz naturel. Ce frein économique implique que le passage à l'hydrogène ne peut résulter que d'un choix généralisé, et nécessite aussi l'aplanissement de toutes les difficultés existantes.

Pour distribuer le dihydrogène aux utilisateurs, des infrastructures de ravitaillement devront être développées. La mise au point de stations-service ne semble pas poser de problèmes techniques particuliers. Une quarantaine de stations pilotes existe d'ailleurs déjà dans le monde, en particulier aux États-Unis, au Japon, en Allemagne et en Islande.

Il faudra cependant du temps pour que ces stations-service maillent tout le territoire, ce qui freine aujourd'hui le développement du dihydrogène dans les transports.



2.4. Principe de fonctionnement du panneau photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques, ou photo électriques ont pour but de transformer l'énergie solaire en énergie électrique qui pourra être utilisée ensuite dans la production d'hydrogène dans notre cas. Le panneau photovoltaïque est un ensemble de cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs comme le silicium principalement, le sulfure de cadmium ou le tellure de cadmium, qui ont la particularité de pouvoir libérer des électrons lorsqu'ils sont frappés par un flux de photons. On appelle ce phénomène l'effet photoélectrique. Cette libération d'électrons crée alors une différence de potentiel dans la cellule qui entraîne la création d'un courant électrique continu que l'on peut ensuite récupérer dans les circuits et transférer vers les systèmes électriques à alimenter.

Une cellule photovoltaïque est constituée de deux plaques plus ou moins chargées en électrons, créant déjà une différence de potentiel afin de faciliter l'effet photoélectrique. La couche supérieure, en contact direct avec les rayons incidents du soleil est dite dopée N (pour négative). Cette couche N possède un surplus d'électrons grâce à l'ajout d'atomes de phosphore (qui possèdent 5 électrons périphériques). La couche inférieure, dite dopée P (pour positive), est moins chargée en électrons que la couche supérieure car elle possède des atomes de Bore à trois électrons de valence. Cette différence fait que, lorsque la cellule est soumise aux rayons solaires, les électrons de la couche N descendent vers la couche P ce qui entraîne la création du courant électrique continu.

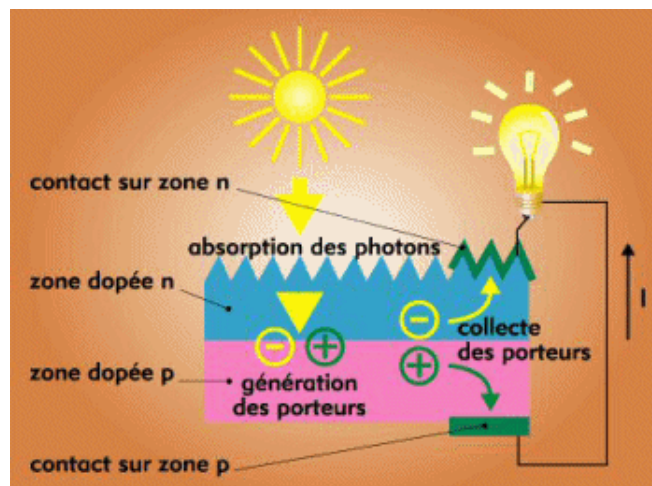


Figure 12 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Afin de mettre en application le couplage pile à combustible et électrolyseur, nous avons réalisé une expérience. (voir annexe)



3. RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

3.1. Comparaison de la PAC avec les principales sources d'énergies contemporaines.

Pour bien comprendre l'impact et l'avenir prometteur de la pile à combustibles, nous allons maintenant comparer la pile à combustible avec les autres sources principales connues:

- les énergies fossiles.
- l'énergie nucléaire.
- l'énergie éolienne.

Toutes ces énergies nous confèrent la grande majorité de l'énergie dans notre monde. En quoi est ce que la pile à combustible peut-elle les remplacer. Nous mettrons en valeur ces comparaisons avec des exemples précis d'utilisation de la PAC dans un domaine prometteur: celui de l'automobile.

Les énergies fossiles et l'énergie nucléaire possèdent un inconvénient majeur en commun: une grande pollution. Elles compensent ce défaut par une technologie sûre et efficace avec une production très importante. Le rendement de ces énergies est à peu près équivalent à celui d'une pile à combustible (aux alentours de 40%), la différence est qu'une centrale nucléaire ou la combustion d'hydrocarbures ont une production électrique à grande échelle. La PAC est pour l'instant incapable de rivaliser en termes de production avec ceux deux énergies.

Mais les réserves de combustibles fossiles de la planète sont fixes et, au rythme de consommation actuel, leur épuisement doit être envisagé. Pour donner un ordre de grandeur de la vitesse d'utilisation des combustibles fossiles, on considère que, au rythme actuel, l'humanité aura épuisé en moins de 200 ans les réserves accumulées pendant plusieurs centaines de millions d'années.

La PAC apparaît comme un dispositif basé sur le même principe que l'énergie éolienne. Une énergie propre, avec un bon rendement mais en faible quantité. Cependant il faut aussi tenir compte du fait que les coûts d'installation et d'entretien pour de telles installations sont élevés.

3.2. Atouts/Inconvénients : quel intérêt d'une PAC ?

Les piles à combustible sont un véritable enjeu à notre époque. En effet, dans une société de plus en plus à la recherche de production d'énergie économique mais avant tout écologique, les piles à combustibles s'inscrivent au premier plan.

3.2.1. Un enjeu énergétique

Les PAC sont un véritable enjeu énergétique, car en effet, depuis leur découverte, ces piles sont généralement vues comme une solution de production d'énergie électrique renouvelable. En effet, les PAC ont de nombreux avantages, de par leurs importants rendements, la diversité des applications permise grâce à une palette importante de types de piles à combustibles, et la mobilité accordée par celles-ci. De plus, cette production d'énergie s'accompagne d'une pollution moindre que les productions électriques actuelles; en effet, ces PAC, en plus de produire de l'énergie électrique, produisent également de la chaleur et de l'eau, qui ne sont donc pas une source de pollution directe.



3.2.2. *Un enjeu environnemental*

De nos jours, les principales sources d'énergie électrique sont polluantes. En effet, la production d'électricité à partir d'hydrocarbures, telles que les piles au lithium ou au zinc, ou encore le nucléaire sont porteurs de nombreuses pollutions dont les principales sont :

- les gaz à effet de serre (émission de dioxyde de carbone (CO₂) et d'oxyde d'azote ou de protoxyde d'azote (N₂O) pour les hydrocarbures).
- les métaux lourds (le plomb pour les piles traditionnelles comme les piles à lithium ou au zinc)
- les déchets radioactifs pour les combustibles nucléaires tels que l'uranium

Ainsi, la pile à combustible serait un atout majeur dans la production d'énergie électrique propre.

En effet, la pile à hydrogène possède de nombreux atouts tel que l'hydrogène qui est l'élément chimique prédominant sur Terre, se trouvant essentiellement sous la forme d'eau ou H₂O. De plus, le principe de la pile à combustible repose sur une production d'énergie électrique mais aussi d'eau. C'est donc ainsi une source d'énergie ne produisant aucune pollution.

Néanmoins comme tout outil, la pile à combustible présente des inconvénients. En effet, l'hydrogène présente aussi des désavantages. Son caractère inflammable et explosif au seul contact de l'air le rend manipulable difficilement. De plus, l'hydrogène ne se trouve pas naturellement sous la forme de dihydrogène H₂. Ainsi, des étapes de reformage de ce type de molécules est nécessaire avant son utilisation dans les PAC, et ce reformage implique souvent d'importantes pollutions. Néanmoins, il existe tout de même une possibilité de produire l'hydrogène à l'aide de bactéries, ce qui pourrait être une alternative non négligeable.

Par ailleurs, l'eau produite par les piles à combustible à hydrogène est rejetée sous la forme d'une vapeur ; ainsi, on peut penser que ces rejets de vapeur peuvent constituer un danger pour l'environnement, car il pourrait induire un changement climatique ou environnemental.

3.2.3. *Un enjeu économique*

Actuellement, et de plus en plus, des sources d'énergie alternatives sont recherchées pour éviter que la dépendance de la consommation de pétrole, et à ses dérivés, n'augmentent. En effet, les prix des barils de pétrole de 60\$ en mai 2015, soit de 53€, sont prévues à la hausse. Ainsi, les piles à combustibles, produisant de l'énergie électrique à partir d'eau et d'énergie solaire, c'est à dire deux sources abondantes et peu chères, sont considérées comme une génération économique d'énergie électrique.

Malgré les importants enjeux dans lesquels la PAC est impliquée, celle-ci possède, comme toute source d'énergie, des atouts ainsi que des inconvénients.

La pile à combustible a évidemment des désavantages, dont le plus important serait le coût de cette technologie. En effet, les matériaux nécessaires à sa fabrication sont généralement coûteux. C'est le cas notamment pour :

- Le catalyseur. Le catalyseur couramment utilisé est le platine dont le gramme vaut, en mai 2015, environ 30€. Malgré la diminution de la quantité dans la pile à combustible, ce matériel, trop coûteux, reste un problème économique.
- L'électrolyte. Pour la PAC PMFC, elle est composée de Nafion dont le coût est de 700\$/m².



- Les membranes. Les membranes, comportant des composants fluorés, sont coûteuses. En effet, leur prix était de 300 à 450€ par mètre carré en 2001 mais son prix a diminué depuis.
- Les plaques d'interconnexion. Celles-ci sont présentes dans les piles acides et sont composées de graphite non poreux. Ces plaques ont elles aussi un coût important.
- Par ailleurs, le dihydrogène produit une énergie de 3 kWh (environ 10 MJ) lorsqu'est brûlé un mètre cube, tandis que le méthane, pour un même volume libère 9,89 kWh (35,6 MJ). Ainsi, pour avoir un rendement équivalent à la production d'électricité à partir de méthane, le transport de dihydrogène sera en moyenne trois fois plus cher que le transport du méthane, sachant que le transport du méthane est plus onéreux à transporter que le pétrole.

3.3. Perspectives d'évolution

Les différents inconvénients que l'on a pu soulever dans la partie précédente ainsi que les différentes applications actuelles de la pile à combustible font de celle-ci une source d'énergie en devenir. Le nombre d'applications possibles pour la PAC est infini.

3.3.1. Diminuer le coût des PAC

Pour que la PAC devienne réellement un vecteur de la transition énergétique il est nécessaire de régler son problème majeur: celui du coût. Premièrement, on peut imaginer une diminution des coûts de production de la PAC en utilisant des matériaux moins chers.

Il existe aussi des recherches portant sur la rationalisation du catalyseur, c'est à dire la modification de sa forme qui pourrait permettre une catalyse plus efficace avec une même quantité de platine, ou son remplacement par un autre métal, comme le ruthénium par exemple.

Enfin, des expérimentations portent aujourd'hui sur la fabrication d'électrodes aux propriétés physiques intéressantes et moins onéreuses qui permettront d'éliminer le platine, matériau le plus cher de la pile.

3.3.2. La propulsion des véhicules

Dans le domaine des transports, l'intérêt énergétique doit être évalué en comparaison avec d'autres systèmes. La comparaison est délicate puisque peu de véhicules équipés de piles à combustible ont circulé. Cependant la propulsion des véhicules par pile à combustible est une idée extrêmement séduisante car elle permettrait de s'affranchir des sujétions des moteurs à combustion interne.

Ces derniers ont fait d'énormes progrès et possèdent encore de grandes possibilités d'améliorations. Mais inévitablement, il arrivera un moment où il ne sera plus possible de réduire leurs émissions. La pile à combustible s'imposera alors un jour comme la solution non polluante pour la propulsion des véhicules même s'il n'est pas possible d'indiquer un délai.

Mais avant d'en arriver là, il est nécessaire que la PAC résolve quelques problèmes majeurs:



La PAC confère une autonomie largement supérieure à un moteur thermique cependant le problème est toujours le même: le coût. En effet les PAC reviennent beaucoup plus chères que les moteurs à combustion interne. Les PAC les plus couramment utilisées coûtent environ 4500\$ par kilowatt alors qu'un moteur de voiture tourne autour de 30\$ par kilowatt.

Il faudra aussi certainement un gain d'un facteur dix en coût de revient pour que les piles à combustible puissent être utilisées dans l'automobile. La production en série ne devrait pas suffire pour abaisser de façon significative les prix de revient actuels. Il faudra pour cela certainement encore réaliser des progrès techniques importants.

La fiabilité de ces piles devra aussi être considérablement augmentée car les exigences du fonctionnement sur un mobile sont beaucoup plus importantes qu'à poste fixe.

Enfin une autre difficulté devra être résolue : l'alimentation de la pile en hydrogène.

Le choix devra être fait entre la fabrication de l'hydrogène à bord par reformage ou le stockage du gaz dans un réservoir.

Il y aura donc plusieurs étapes successives à franchir, dont celle des véhicules hybrides, avant d'obtenir une propulsion électrique utilisant seule une pile à combustible.



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Perspectives pour la poursuite de ce projet

Une multitude d'espoirs repose sur la pile à combustible comme source d'énergie indépendante aux énergies fossiles. En effet, lors de notre étude, nous avons pu constater que la pile à combustible est une des sources d'énergie fiables la plus propre. En effet, avec un rendement d'en moyenne quarante pourcent, la pile rejette peu voire aucun déchet.

De plus, il existe une grande variété de piles à combustibles, permettant de s'adapter à chaque type de besoin; autant pour une production d'électricité fixe en masse, que pour un moteur de voiture ou encore pour de petits appareils électroniques mobiles.

Cependant, même si elles sont nombreuses, les avancées scientifiques ne répondent, pas pour l'instant, à toutes les exigences de la société. De nombreux des obstacles à la production de masse et à l'utilisation quotidienne de la pile à combustible subsistent. Les différents types de piles ont leurs avantages mais également leurs inconvénients. Le problème de l'humidification régulée de la membrane subsiste mais il existe également d'autres difficultés quant à l'hydrogène.

Lors de notre projet, nous avons pu remarquer que le rendement énergétique de la pile à combustible est bon mais l'utilisation quotidienne de ce dispositif est limitée à cause du problème de la production et du stockage de l'hydrogène. C'est pour cela que nous avons fait une expérience sur un dispositif muni d'un panneau solaire. Ce dispositif permet ainsi de produire du dihydrogène à l'aide du panneau solaire et rend le module de la pile à combustible autonome. Cependant, ce dispositif n'avait pas un rendement très concluant à cause de la grande perte d'énergie due à la production d'hydrogène.

Enfin le plus grand frein au développement du système pile à combustible reste les frais de recherches et de production de la pile. Il faut prendre en compte le fait que la transition énergétique vers la pile à combustible entraînera un renouvellement de toutes les structures actuelles comme celui du parc automobile, ce qui entraînera des frais conséquents.

Enfin, comme nous avons pu le voir, l'un des grands espoirs de l'industrie automobile pour contrer ce type de problème est la création de « galettes » de dihydrogène. Afin de pouvoir rendre ce système viable, les méthodes de production d'hydrogène doivent être améliorées.

On remarque ainsi que, dans le domaine énergétique de pile à combustible, chaque problème a sa solution, il existe une multitude d'issues grâce aux recherches et aux innovations scientifiques.



5. CONCLUSIONS PERSONNELLES

Emmanuelle Fergon :

Le projet de P6 a été pour moi une très bonne expérience sur plusieurs niveaux. Tout d'abord, il m'a permis d'élargir mes connaissances sur la PAC et sur la production d'hydrogène. Cet aspect-là est important et intéressant pour moi, car je souhaite faire le département Energie et Propulsion l'année prochaine. Ainsi j'ai pu étudier les applications actuelles et futures de la PAC, les perspectives d'avenir dans le domaine de l'énergétique et j'ai également pu comparer les différentes sources d'énergie utilisées actuellement dans le monde. J'ai ainsi pu comprendre les problèmes auxquels le monde est confronté et surtout constaté que la PAC est réellement une source d'énergie d'avenir. Ces derniers points sont exactement ceux sur lesquels j'ai envie de me spécialiser, et m'ont beaucoup intéressée. J'ai également pu mettre en application certaines connaissances que nous avons acquises depuis que nous sommes à l'INSA, et cet aspect concret m'a plu, car je suis de nature très pragmatique. Mais au-delà de l'aspect instructif, le projet de P6 m'a également appris à gérer un travail de groupe. C'était, en effet, la première fois que je travaillais avec un groupe aussi important (nous étions sept). Chaque membre du groupe était impliqué dans le projet favorisant une bonne entente tout au long du projet. A chaque séance, nous arrivions à mettre nos recherches et travaux personnels en commun et ainsi n'avons eu aucun problème d'organisation. Cela m'a été très bénéfique et me le sera très certainement dans ma future vie professionnelle en tant qu'ingénieur.

Tina Hamdan :

Personnellement, j'ai trouvé que le projet physique a été une opportunité qui m'a permis de sortir du cadre scolaire et de m'engager avec d'autres personnes dans un sujet que nous ignorions. On s'est intéressé à la pile à combustible en abordant son évolution, ses différents types et ses différentes applications. On a étudié également le couplage de la PAC avec l'électrolyse. On a vu aussi pour l'électrolyse les différents types et son couplage avec les panneaux solaires. Ces nouvelles connaissances qui s'inscrivent dans le domaine de l'énergie et la thermodynamique me seront utiles sachant que je souhaite me spécialiser dans le département "Énergie et Propulsion". De plus, le thème de notre projet est un thème très intéressant: la pile à combustible et la production de l'hydrogène sont des méthodes en cours de développement. Les applications liées à ces 2 méthodes sont également en évolution. Ainsi, nous avons eu la chance de traiter un sujet au cœur de l'innovation ce qui permet d'élargir notre culture scientifique. Enfin, le projet physique m'a permis de développer mes capacités à travailler en équipe, une qualité primordiale recherchée chez les ingénieurs. J'ai appris à m'adapter avec ces différentes méthodes de travail, d'écouter les idées des autres membres du groupe et de travailler en commun avec eux afin d'atteindre l'objectif voulu.

David Lamidel :

Avant de commencer le projet, j'avais déjà entendu parler de la pile à combustible et de l'espoir que les scientifiques placent dans cette technologie. C'est d'ailleurs pour cela que ce projet m'intéressait tout particulièrement. J'ai donc pu approfondir mes connaissances sur la pile lors de ce projet. En effet, j'ai découvert qu'il existait plusieurs piles à combustible et que la PAC pouvait être une source d'énergie dans de nombreux domaines dont je ne pensais pas (comme le portable par exemple). De plus, je me suis rendu compte de l'importance du stockage de l'hydrogène. Le but est de transporter l'hydrogène sans danger, sans prendre trop d'espace. Le projet a donc été très instructif.



Ce projet P6 m'a aussi permis d'apprendre sur le travail de groupe. Notre groupe étant formé de 7 personnes, la communication au sein du groupe a été importante. Pour cela, nous avons mis un Google doc en place pour que tout le groupe puisse consulter le travail en cours. Un compte rendu chaque semaine, nous a aussi permis de faire des bilans sur l'avancement du projet dans son ensemble.

Voulant me spécialiser l'année prochaine dans le département Energie et Propulsion, le projet était donc une continuité dans la poursuite de mes études à l'INSA de Rouen.

Quentin François :

Ce projet de P6 sur les piles à combustible fut pour moi une bonne expérience sur de nombreux points. Il est vrai que les débuts n'ont pas été faciles. Comme nous ne nous connaissions pas les uns les autres il fallait d'abord apprendre à se connaître pour pouvoir travailler efficacement. En effet un groupe de 7 personnes pour un même projet implique nécessairement une bonne entente, une bonne organisation et surtout une bonne répartition du travail pour un maximum d'efficacité. Cette bonne répartition fut peut-être ce qui nous a manqué au début du projet et nous nous sommes retrouvés face à une masse de travail plus importante que prévu.

Cependant, après plusieurs séances nous nous sommes mis au point sur le travail que chacun devait accomplir. Nous avons aussi mis au point des groupes de personnes qui devaient travailler ensemble.

Ce projet m'a permis d'accroître sensiblement mes connaissances dans un domaine qui pourront me servir dans un futur proche. En effet comme j'envisage de m'orienter vers le département CFI de l'INSA de Rouen, le domaine de la PAC me concernait tout particulièrement. Ensuite ce projet m'a permis de mieux comprendre les pressions qui reposent sur un projet constitué d'un nombre important de personne. Il est nécessaire que l'organisation soit parfaite pour produire un travail de qualité. J'ai également de nouvelles personnes avec qui je pourrai travailler à l'avenir.

Rémi Marquerite :

Ce projet physique a été pour moi une grande découverte tout d'abord. Car je ne connaissais pas vraiment les PAC. Cette démarche scientifique a donc été une bonne opportunité pour découvrir cette technologie qui pourrait dans le futur devenir une des sources d'énergie majeures. Je n'étais pas non plus vraiment au courant du fonctionnement des panneaux photovoltaïques. J'ai donc pu en apprendre beaucoup plus lors de mes recherches pour comprendre comment l'énergie solaire était convertie en électricité pour ensuite alimenter un électrolyseur qui pourra enfin permettre de produire de grandes quantités d'électricité grâce à la pile à combustible.

Ce projet fut également une bonne expérience pour le travail de groupe. C'était la première fois que je réalisais un projet avec autant de personnes. Nous étions 7, ce qui peut au premier abord paraître problématique au niveau de la division du travail et des différentes tâches à accomplir.

Cet apprentissage s'est donc révélé bénéfique pour le travail de groupe tout en acquérant de nouvelles connaissances sur les énergies de demain.



Estelle Douchy :

En terminale, mon professeur de physique avait déjà parlé des piles à combustibles succinctement et montré une voiture miniature fonctionnant grâce à l'énergie fournie par l'une de ces piles. Mon intérêt n'était pas réel jusqu'à ce que je sache d'où provenait cette énergie. En effet, penser que de l'énergie pouvait être produite par les deux sources naturelles et abondantes que sont l'eau et le soleil me paraissait incroyable. De plus, portant une importance toute particulière au développement durable et au respect de la planète, savoir qu'il existait une alternative aux productions actuelles d'énergie, généralement polluantes, a augmenté mon attention sur ce sujet.

Par ailleurs, outre mon intérêt personnel pour ces piles, ce thème d'étude entrait parfaitement dans le cadre de la thématique que j'ai suivie ce semestre : Chimie et Procédés, et Énergétique et Propulsion. En effet, la partie portant sur le fonctionnement de la pile se base essentiellement sur l'électrolyse chimique de l'eau, ce qui a permis de faire une application directe des cours suivis dans l'EC CS2 ; et la partie de production d'électricité avec le thème de l'énergétique.

Ainsi, mes recherches personnelles ont été accentuées par ces motivations, ce qui m'a permis de m'épanouir dans mon travail et dans le projet en groupe constituant cet EC. Par la mise en commun du travail de chacun de nous, cela a permis d'élargir nos recherches, ayant des sources différentes, de se rendre compte de ce qui était important sur le sujet ou ce qui ne l'était pas, mais qui a peut-être rendu difficile le choix des parties concernant les piles à combustible à ne pas traiter dans ce rapport. De plus, par le choix en début de semestre du projet que l'on souhaitait traiter, cela a grandement contribué à la dynamique de notre groupe et donc de notre travail, car nous étions tous impliqués et intéressés par le sujet de la PAC.

Ainsi, les thèmes de l'énergie, de l'environnement et de la chimie étant les domaines qui m'interpellent le plus, le choix de ce sujet est apparu une évidence pour moi et j'ai été très heureuse d'avoir pu y participer.

Hubert OREFICE :

Ayant toujours été très intéressé par le domaine des énergies et des problématiques liées à la nécessité d'une transition énergétique, c'est logiquement que j'ai choisi le sujet concernant la pile à combustible dans le cadre du projet de P6. En effet, j'avais déjà entendu parler de la PAC mais je n'étais alors pas conscient de tout son potentiel. A travers le projet de P6, j'ai donc eu l'opportunité de considérablement approfondir mes connaissances sur le sujet et j'en suis très heureux.

D'autre part, le projet a été une nouvelle occasion pour moi de travailler en groupe ce qui est primordiale et très formateur en tant qu'élève ingénieur. En effet, cela requiert de bonnes qualités d'organisation, d'écoute, et de communication. Au sein de notre groupe, cela s'est très bien déroulé et la cohésion globale fut très bonne. Nous ne nous connaissions pas trop avant le projet et travailler ensemble dans un même but nous a permis de tisser des liens, ce qui est très appréciable.



Enfin, le fait d'avoir réalisé une expérience fut également très réjouissant. En effet cela nous a permis de sortir du cadre théorique de notre sujet, en apportant du concret. A travers l'expérimentation, on a pu faire notre propre protocole, mesures et interprétations sur un petit système de PAC lié à un panneau solaire et ainsi observer les opportunités d'avenir que peut offrir la pile à combustible.

En définitif, je garde donc un très bon souvenir de ce projet que je prendrai plaisir à renouveler, si l'occasion se présentait à nouveau. Le thème abordé m'a conforté dans ma grande volonté de m'orienter vers le domaine des énergies que ça soit dans ma future vie professionnelle ou dans mon cursus scolaire que j'orienterais au mieux dans ce sens.



6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques (valide au 03/05/2015)
- [2] <http://www.ac-grenoble.fr/> (valide au 03/05/2015)
- [3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque (valide au 14/05/2015)
- [4] <http://www.fuelcelltoday.com/> (valide au 08/05/2015)
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d'hydrog%C3%A8ne (valide au 10/05/2015)
- [6] <http://www.cea.fr/jeunes/themes/les-energies-renouvelables/l-hydrogene/modes-de-production-du-dihydrogene> (valide au 10/05/2015)
- [7] <http://www.mcphy.com/fr/produits/stockage-hydrogene-solide/> (valide au 10/05/2015)
- [8] <http://www.cea.fr/jeunes/themes/les-energies-renouvelables/l-hydrogene/distribution-et-stockage-du-dihydrogene> (valide au 10/05/2015)
- [9] http://www.developpement-durable.gouv.fr/_/14_Hydrogene_et_piles_a_combustible.pdf (valide au 23/05/2015)
- [10] http://www.alphea.com/temp/c8c6c_8veolia.pdf (valide au 20/05/2015)
- [11] Benjamin Blunier et Abdellatif Miraoui, « 20 Questions sur la pile à combustible », Technip, 2009
- [12] Méziane Boudellal, « La Pile à combustible – Structure, Fonctionnement, Applications », Dunod, 2012.



7. ANNEXES

7.1. Compte rendu expérimental

7.1.1. *Protocole*

1. Humidifier la pile: humidifier par l'extérieur la membrane échangeuse de protons avec de l'eau distillée afin de permettre un échange efficace.
2. Remplir le réservoir à eau avec de l'eau distillée. La pince supérieure de l'électrolyseur doit être fermée. La pince inférieure de l'électrolyseur doit être ouverte.
3. Fermez la pince supérieure de la pile à combustible. Enlevez le réservoir de compensation. Remplir le réservoir à gaz avec de l'eau jusqu'à ras bord. Remettre le réservoir de compensation en évitant de mettre les bulles d'air. L'ouverture ou la fermeture de pince inférieure importe peu dans cette étape.
4. Relier le panneau solaire à l'électrolyseur. Relier le ventilateur à la pile à combustible. Les deux pinces de la pile à combustible doivent être ouvertes.
5. Eclairer le panneau solaire avec une lampe de telle sorte à avoir un éclairage de 600 W/m^2 au milieu du panneau.
6. Refermer la pince inférieure de la pile à combustible quand il n'y a plus d'eau qui coule.

Dans cette configuration, l'électrolyseur produit de l'hydrogène qui est ensuite stocké dans le réservoir à gaz. Puis cet hydrogène est utilisé par la pile à combustible pour produire de l'électricité qui alimente le ventilateur.

7.1.2. *Electrolyseur : Production d'hydrogène:*

Pour mesurer la production d'hydrogène réalisée par l'électrolyseur:

- Brancher un ampèremètre et un voltmètre aux bornes de l'électrolyseur.
- Fermer la pince supérieure de la pile à combustible.
- Démarrer le chronomètre.
- Relever à intervalles régulières de volume, la tension, l'intensité et le temps.

On obtient le tableau suivant:

Volume d'H ₂ produit (cm ³)	Temps (s)	Intensité (A)	Tension(V)
0	0	0.17	1.65
5	420	0.17	1.65
10	730	0.17	1.65
15	967	0.17	1.65
20	1310	0.17	1.65
25	1620	0.17	1.65
30	1920	0.17	1.65

Efficacité de l'électrolyseur :

$$E_{\text{électrolyseur}} = \frac{V_{H_2}(\text{exp}) \text{ produit}}{V_{H_2}(\text{thq}) \text{ produit}}$$

Calculons V_{H_2} thq:

$$V = \frac{R * I * T * t}{F * P * z}$$

A déterminer pendant l'expérience:

- I : intensité aux bornes de l'électrolyseur mesurée par un ampèremètre.
- t: temps en s

Déjà déterminée:

- T : température ambiante en K (297K)
- P : pression en Pa (1.013*10⁵ Pa)
- z : nombre d'électrons "en excès" = 2
- R : constante des gaz = 8.314 J/(mol.K)
- F : constante de Faraday= 96485 C/mol

On obtient par exemple à t= 1920s:

$$V_{H_2}(\text{exp})\text{produit} = 30 \text{ cm}^3 ; V_{H_2}(\text{thq})\text{produit} = 41 \text{ cm}^3$$

D'où : $E_{\text{électrolyseur}} = 0.73$

Donc, l'électrolyseur utilisé pendant l'expérience produit 73% du volume qu'il est censé produire théoriquement, ce qui est plutôt important comme pourcentage.

Efficacité électrique de l'électrolyseur:

$$E_{\text{électrique}} = \frac{\text{Energie dégagée}}{\text{Energie électrique dépensée}} = \frac{V_{H_2\text{exp}} * H_0}{U * I * t}$$

avec Énergie dégagée = Chaleur emmagasinée par H₂ et H₀: valeur calorifique brute emmagasinée par l'hydrogène.

On a:

$$E_{\text{électrique}} = \frac{30 * 10^6 * 12745 * 10^3}{1.65 * 0.17 * 1920} = 0.71$$

Donc, l'électrolyseur utilise 71% de l'énergie qui lui est fourni pour produire de l'hydrogène. L'autre portion de l'énergie fournie est perdue par effet Joule. Sachant que l'efficacité d'un électrolyseur PEM est autour de 80%, notre électrolyseur semble présenter une bonne efficacité.



7.1.3. Pile à combustible: Consommation d'hydrogène:

Ensuite, nous allons maintenant nous intéresser à la consommation d'hydrogène par la pile à combustible. Pour cela:

- Ouvrir la pince supérieure et inférieure de la pile à combustible (pour dégager le H₂ stocké).
- Refermer la pince inférieure (pour commencer le stockage).
- Débrancher le ventilateur (afin de créer un potentiel aux bornes de la pile).
- Quand le réservoir est plein, couper l'alimentation et fermer la pince inférieure de l'électrolyseur.
- Brancher un ampèremètre et un voltmètre aux bornes de la pile.
- Brancher le ventilateur et démarrer le chronomètre.
- Relever à intervalles régulières de volume consommé, le temps, l'intensité et la tension.

On obtient le tableau suivant:

Volume consommé (cm ³)	0	5	10	15
Intensité (A)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tension(V)	0.7	0.7	0.7	0.7
Temps (s)	0	960	1980	3160

Efficacité de la pile à combustible:

$$E_{\text{pile à combustible}} = \frac{V_{H_2}(\text{exp}) \text{ consommé}}{V_{H_2}(\text{thq}) \text{ consommé}}$$

Le V H₂ (thq) consommé se calcul par la même formule que celle utilisé pour calculer le V H₂ (thq) produit.

On obtient par exemple a t= 3 160 s:

$$V_{H_2}(\text{exp}) \text{ consommé} = 15 \text{ cm}^3 ; V_{H_2}(\text{thq}) \text{ consommé} = 42 \text{ cm}^3$$

$$E_{\text{pile à combustible}} = \frac{15}{42} = 0,36$$

Donc, la pile à combustible utilisé pendant l'expérience consomme 36% du volume qu'il est censé consommé théoriquement, ce qui est plutôt faible.

Efficacité électrique de la pile à combustible:

$$E_{\text{électrique}} = \frac{\text{Energie électrique produite}}{\text{Energie maximale}}$$

$$\text{Energie maximale} = U * I * t = 221.2 \text{ J}$$

$$\text{Energie produite} = V_{H_2} * H_0 = 15 * 10^6 * 10800 * 10^3 = 162 \text{ J}$$

avec H₀: pouvoir calorifique l'hydrogène.

$$E_{\text{électrique}} = 0,73$$

