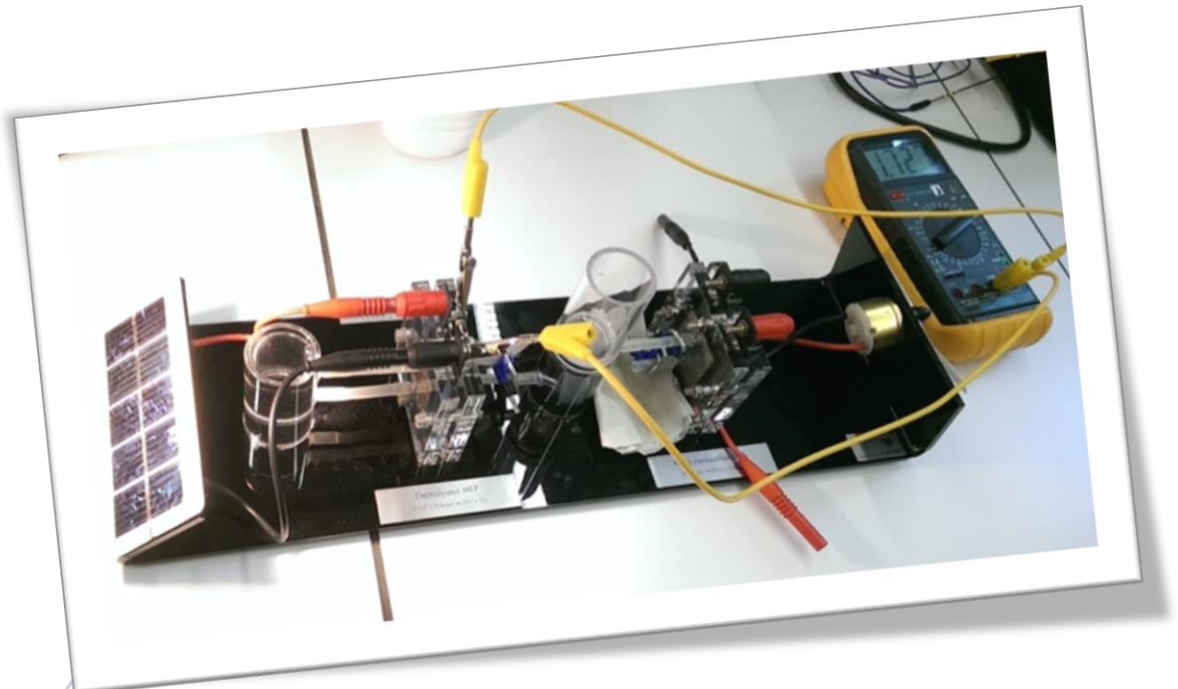


Projet P6

*Pile à combustible et production de
H₂ à partir d'un panneau solaire*

Sujet 39 – 26/05/14



Étudiants :

Elsa BEDU

Adrien GOLLI

Pierre QUINIO

Geoffroy BERCY

Sébastien SURBLED

Enseignant-responsable du projet :

Jamil Abdul Aziz

Date de remise du rapport : 16/05/2014

Référence du projet : STPI/P6/2014 – 39

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

Type de projet : ***Bibliographique et expérimental***

Objectifs du projet :

Étude du Fonctionnement de la pile à combustible.

Multiplés découvertes théoriques de la pile à combustible.

Mise en place d'un protocole expérimentale.

Mise en pratique en faisant fonctionner un moteur à l'aide d'une PAC

Mise en évidence des difficultés pour faire tourner l'hélice

Mots-clefs du projet :

Pile

Hydrogène

Soleil

Énergie

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	3
I. Fonctionnement de la pile à combustible.....	4
1. Historique	4
2. Fonctionnement général	5
3. Composants des PAC	6
4. Étude théorique.....	10
Phénomène de polarisation.....	10
Étude énergétique.....	12
5. Les autres types de PAC.....	14
II. Production de H ₂ à partir d'énergie photovoltaïque.....	18
1. Production de H ₂ : électrolyse.....	18
2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	21
III. Expérimentation	24
1. Schéma du dispositif.....	24
2. Compte rendu de l'expérimentation du 18/03/2014.....	25
3. Protocole.....	27
4. Compte rendu de l'expérimentation du 06/05/2014.....	28
IV. Conclusions générales.....	31
Conclusion finale.....	34
Conclusions personnelles :	35
Bibliographie.....	37
Annexe	38
Journal de bord	38
Photos réalisées lors de la seconde expérience :.....	41
Données de l'expérience réalisée par M. Abdul Aziz	42

INTRODUCTION

Parmi les multiples sources d'énergie dites « propres » ou « renouvelables » il s'en trouve une particulièrement intéressante découverte il y a bientôt deux siècles. Il s'agit de la pile à combustible (**que nous dénommerons régulièrement par l'abréviation PAC pour plus de commodités**). Son principe n'est pas nouveau, puisqu'il fut découvert dès 1839 par William R. Grove. À l'époque, cet avocat anglais, chercheur amateur en électrochimie, constate qu'en recombinaison du dihydrogène et du dioxygène, il est possible de créer simultanément de l'eau, de la chaleur et de l'électricité. La pile à combustible est née. Par la suite, seule la Nasa exploitera cette technologie, dans les années 60, pour fournir en électricité certains de ses vaisseaux Apollo. En effet, si le principe de la pile à combustible paraît simple, sa mise en œuvre s'avère rapidement complexe et coûteuse. Si la pile à combustible a l'avantage d'émettre très peu de polluants, il est en revanche nécessaire de lui fournir de l'hydrogène pour son fonctionnement.

Tout d'abord, précisons que dans une pile à combustible on évite la combustion dans l'air à haute température comme cela peut être le cas dans un moteur à explosion, pour la remplacer par une réaction chimique qui engendre par la suite un courant électrique. De ce fait les polluants (tels que l'oxyde d'azote), qui nécessitent une haute température dans l'air pour se produire ne sont plus émis lors de l'utilisation d'une pile à combustible

Si les PAC ne se sont pas développées jusqu'à maintenant, c'est qu'elles ont par ailleurs un net inconvénient : elles nécessitent de l'hydrogène pour fonctionner. Or l'hydrogène n'existe nulle part sur Terre sous une forme directement exploitable. Aussi il est nécessaire de produire de l'hydrogène avant de pouvoir faire fonctionner une PAC et cela requiert de l'énergie... Fournir de l'énergie à un système qui doit produire de l'énergie, voilà qui peut laisser planer quelques inquiétudes quant à la rentabilité du système. Ainsi, le rendement est de l'ordre de 20 à 40 % pour un moteur traditionnel (le reste étant de la chaleur dégagée dans l'atmosphère). Mais quel rendement peut-on alors atteindre avec une pile à combustible ? Nous essaierons ainsi de déterminer des valeurs de rendements envisageables de manière à savoir si la PAC peut représenter une alternative crédible ou non à des sources d'énergie plus traditionnelles (et polluantes).

Afin de mener à bien notre étude, nous avons à notre disposition un modèle pédagogique qui nous permet de comprendre de manière concrète le fonctionnement d'une PAC et les moyens à mettre en œuvre pour produire de l'électricité par ce biais. Ce modèle dispose d'un panneau solaire dont l'utilité sera expliquée et détaillée dans ce dossier.

Nous avons essayé de définir le fil conducteur de notre travail par une problématique qui se veut la plus exacte possible : **dans quelle mesure la PAC est-elle actuellement un enjeu du développement durable ?** La réponse à cette problématique se fera en plusieurs étapes.

Tout d'abord nous présenterons brièvement un historique de la pile en combustible avant d'expliquer précisément le fonctionnement – théorique – du type de PAC dont nous disposons.

Par la suite, il sera exposé les autres types de PAC existant ainsi que les différentes applications offertes par de telles piles.

Enfin, avant d'en venir à la partie expérimentale, nous expliquerons de quelle manière est produit le H₂ nécessaire au fonctionnement de la PAC.

I. FONCTIONNEMENT DE LA PILE À COMBUSTIBLE

1. Historique

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839. Toutefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation présentant alors de nombreuses contraintes pour une utilité limitée, contrairement à d'autres systèmes tels que le moteur à explosion ou la machine à vapeur, répondant aux attentes.

Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une "redécouverte" vers la fin du XXe siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène pour seuls produits. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique, à décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux, certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir d'hydrogène et d'oxygène.

Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Schönbein observe, en réalisant une électrolyse, que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience. Schönbein rencontre alors le chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillait à l'époque sur un projet de batteries électriques. Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes. Ceci débouche sur la première pile à combustible: il s'agissait d'une cellule

hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreuses et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Nous sommes en 1845.

Par la suite, la pile à combustible resta plus ou moins au fond des placards durant près d'un siècle et après quelques légères améliorations par différents scientifiques du début du XXe siècle, c'est Bacon qui, en 1935, met en œuvre le progrès le plus important en réalisant un prototype de pile à combustible remplaçant l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique d'une puissance de 1kW.

Le principe physique est alors établi et des dizaines de laboratoires et d'industriels vont se lancer dans le développement de piles à combustible. Néanmoins les coûts restent très élevés et sont un obstacle important à son utilisation, hormis pour la NASA qui peut se permettre de tels investissements. Ainsi elle l'utilise, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968. Le très long écart de temps (plus d'un siècle) qui s'est écoulé entre la réalisation du premier modèle de pile à combustible et les premières utilisations s'explique d'une part par le très fort développement qu'ont connu les autres types de générateurs d'énergie électrique et d'autre part par le fait que le coût des matériaux utilisés dans la pile à combustible reste encore élevé.

Dans les années 1980 alors que les États-Unis et le Japon vont poursuivre de manière très active leurs recherches, l'Europe (à l'exception de l'Allemagne) va d'abord se désintéresser de ces travaux avant que l'aggravation des problèmes environnementaux (notamment le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique) n'entraîne un regain d'intérêt pour ces systèmes.

2. Fonctionnement général

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui a pour but de convertir l'énergie chimique d'une réaction directement en énergie électrique. Il en existe différents types, que nous détaillerons par la suite. Cependant, pour le fonctionnement général de la pile et le détail de ses composants, nous prendrons l'exemple de la pile à membrane échangeuse de proton (PEMFC).

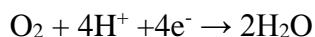
Le fonctionnement de la PEMFC fait intervenir une réaction d'oxydo-réduction afin de produire de l'électricité.

La pile à combustible est composée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, un matériau laissant passer les ions, mais pas les électrons. Elle est alimentée en H_2 et O_2 , qui vont permettre la réaction d'oxydo-réduction. Aussi, à chaque électrode ont lieu les deux demi-réactions suivantes :

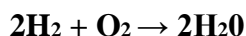
Réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode :



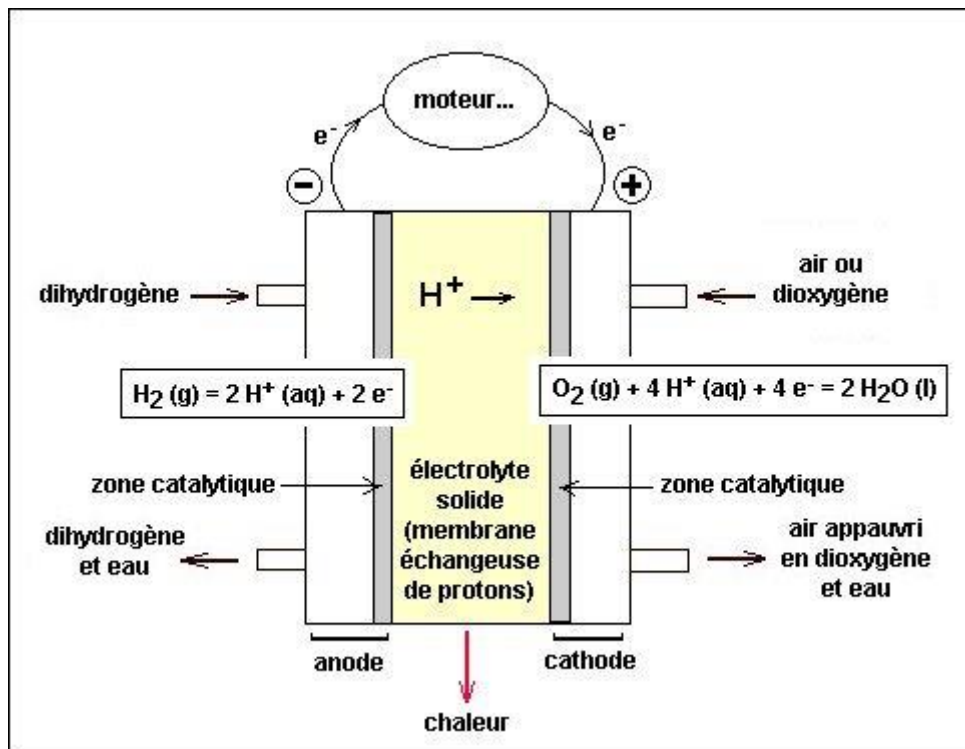
Réaction de réduction de l'oxygène à la cathode :



On obtient alors comme réaction finale :



On peut représenter le fonctionnement d'une pile à combustible par le schéma suivant :



Explications :

L'anode est alimentée en hydrogène provenant d'un réservoir tandis que la cathode est chargée de l'oxygène provenant de l'air. Au niveau de l'anode, la molécule de H_2 va se dissocier en ions H^+ et en électrons. Ces derniers vont être captés par l'anode et, ne pouvant traverser l'électrolyte, vont circuler dans un circuit externe, créant ainsi un courant électrique continu. En parallèle, les ions H^+ vont eux traverser l'électrolyte et arriver au niveau de la cathode, où va avoir lieu la réduction de l'oxygène : les ions H^+ vont se combiner à la molécule de O_2 et aux électrons pour former de l'eau, qui sera alors évacuée, sous forme de vapeur. La réaction va également produire de la chaleur.

Un catalyseur de platine, placé entre chaque électrode et l'électrolyte, permet d'augmenter la vitesse de la réaction. Il n'est par contre pas consommé lui-même.

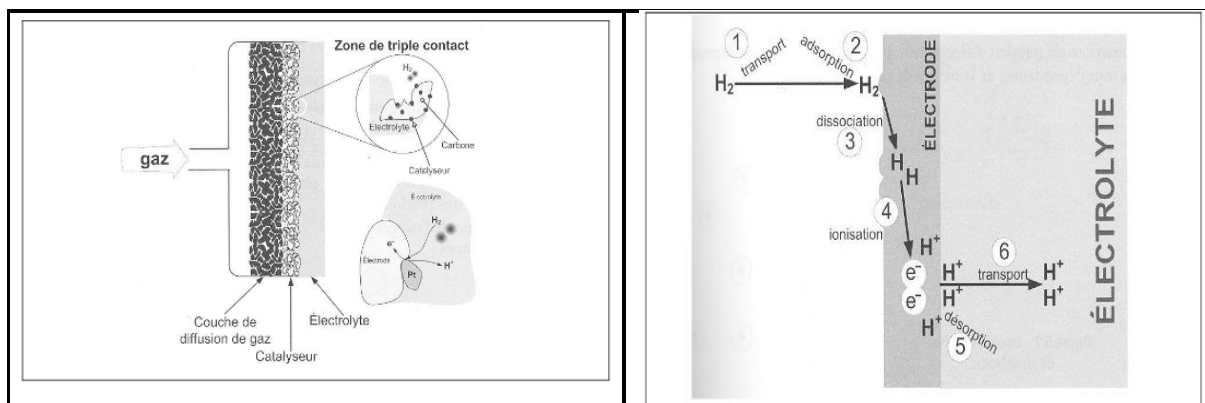
3. Composants des PAC

L'architecture interne des PAC est relativement semblable pour tous les différents types. Pour chacun, la pile est composée d'un électrolyte, entouré de deux électrodes poreuses. Ces électrodes sont elles-mêmes constituées de différentes couches ayant chacune des rôles précis.

Ainsi, une électrode est constituée de catalyseurs, de plaques de diffusion (ou plaques bipolaires) qui permettent la séparation des gaz et leur transport jusqu'à l'électrolyte et les catalyseurs). Pour la suite, on s'intéressera uniquement aux piles à membrane échangeuse de proton (PEMFC).

➤ Zone de triple contact :

C'est dans cette zone (entre l'électrode et l'électrolyte) qu'a lieu la réaction. Cette zone est le lieu de rencontre entre le gaz (H_2 ou O_2), l'ensemble électrode/catalyseur et l'électrolyte.



La réaction au niveau des électrodes commence par le transport du gaz (H_2) jusqu'à l'électrode (1) puis, son absorption par les plaques bipolaires (2). Le gaz est ensuite dissocié (3) puis ionisé (4), c'est à dire qu'il perd un électron. Enfin, les protons H^+ passent dans l'électrolyte (5) puis migrent vers la cathode (6). Ainsi, pour le fonctionnement optimal de la pile, l'ensemble électrode/catalyseur est pressé contre la membrane échangeuse de protons puis est recouverte par la couche de diffusion des gaz.

➤ Ensemble électrode/catalyseur :

Habituellement, les électrodes sont formées de carbone platiné sous forme de fines particules pour augmenter la surface active (lieu de la réaction). Un liant à base de polytétrafluoroéthylène (PTFE), hydrophobe, est régulièrement utilisé pour éviter que le carbone poreux ne soit gorgé d'eau. L'électrode doit évidemment transporter le courant électrique mais doit aussi assurer le transport des réactifs gazeux, une large surface de contact avec l'électrolyte pour optimiser la réaction.

Le catalyseur a également un rôle primordial puisqu'il permet que la réaction ait bel et bien lieu. Il est à noter cependant que la présence d'un catalyseur n'est nécessaire que dans le cas des PAC à faible températures (PMFC par exemple). Les PAC à haute température n'en nécessitent pas. Dans le cas des PMFC, les catalyseurs utilisés sont le platine à la cathode et un mélange platine/ruthénium à l'anode. Comme nous l'expliquions au précédent paragraphe, de fines particules (2 à 3nm) de ces métaux sont incorporées dans le maillage de carbone.

Seulement les catalyseurs comme le platine sont des métaux rares et donc extrêmement chers. Ainsi les chercheurs se sont depuis longtemps penchés sur ce problème et n'ont de cesse

de diminuer la quantité de platine nécessaire. Aujourd'hui, des électrodes n'incorporent plus que 1mg de platine par cm^2 .

Un autre problème des catalyseurs utilisés actuellement est leur sensibilité à certains polluants comme le monoxyde de carbone (CO). Cette molécule va se fixer plus facilement que le dihydrogène et va ainsi réduire la surface active. Ceci a donc comme conséquence de réduire l'efficacité de la pile. Cette pollution oblige à utiliser uniquement des réactifs quasi-purs mais qui sont bien sûr plus chers à produire. C'est pour cette raison que le catalyseur à l'anode est un mélange de platine et de ruthénium, le CO se fixant plus facilement sur ce dernier. D'autres pistes de recherches sont explorées pour encore diminuer le coût de ces électrodes et réduire la quantité de platine utilisée.

➤ **Électrolyte :**

De façon générale, l'électrolyte doit permettre le transport des ions tout en empêchant le passage des gaz et des électrons. Dans le cas de PEMFC, l'électrolyte est une membrane solide permettant la migration des protons H^+ de l'anode vers la cathode. À ce jour, dans la plupart des PEMFC, l'électrolyte est le NAFION (fabriqué par Dupont De Nemours). Il est formé d'une base de PTFE (polytétrafluoroéthylène –hydrophobe) et de groupes sulfoniques (SO_3^-).

La performance d'une membrane dépend essentiellement de sa conductivité ionique. Celle-ci dépend de son épaisseur et de son taux d'humidité. Un taux trop faible augmente la

résistance de la membrane alors qu'un taux trop fort diminue l'activité catalytique. Pour un fonctionnement optimal, le taux d'humidité de la membrane doit donc être régulé. Seulement, le coût élevé du Nafion ($700\$/\text{m}^2$) est un frein à une production à grande échelle. C'est pour

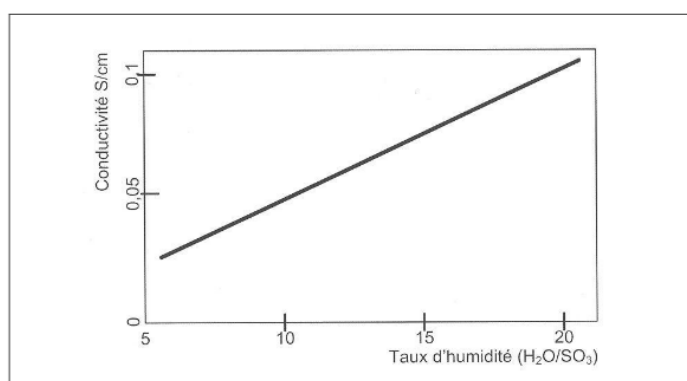


Figure 19 : Conductivité typique d'une membrane en Nafion en fonction du taux d'humidité.

cette raison que des recherches sont actuellement menées sur des membranes échangeuses de protons moins chères, plus performantes et plus faciles à recycler.

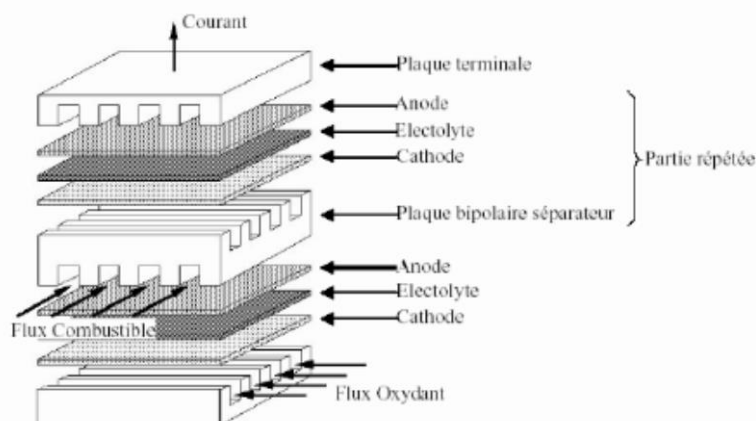
➤ **Couche de diffusion des gaz :**

Elle a avant tout pour rôle de permettre le passage des gaz vers l'électrolyte et l'ensemble électrode/catalyseur. Elle doit également être capable de laisser s'échapper l'eau formée par la réaction ainsi que la chaleur. Elle doit enfin être conductrice. Cette couche est généralement constituée de carbone et de PTFE. Cette couche doit présenter des propriétés homogènes sur toute sa surface pour diffuser au mieux le gaz et ainsi éviter que la réaction ne se produise sur une faible surface entraînant alors une surchauffe et un endommagement des composants. Le PTFE, hydrophobe assure une bonne élimination de l'eau produite par la réaction.

➤ Système réel

Pour un système réel avec une application concrète, le besoin de puissance impose l'utilisation de plusieurs cellules. Ainsi pour augmenter la tension disponible, plusieurs cellules (contenant chacune, membrane, électrode, catalyseur et couche de diffusion) sont assemblées pour former un module appelé *stack*.

L'élément séparant chaque cellule est appelé plaque bipolaire car il relie le pôle positif d'une cellule au pôle négatif d'une autre. Ces plaques ont plusieurs rôles et se doivent donc de posséder des caractéristiques particulières.



Son premier objectif est de collecter le courant produit par chaque cellule et de le diriger vers les électrodes de sorties, autrement dit vers les deux pôles de la pile. Les plaques de diffusion doivent donc avoir une conductivité électrique élevée.

Le second rôle de ces plaques est de fournir aux cellules les réactifs dont elles ont besoin. Ce transfert se fait comme on peut le voir sur le schéma ci-dessus à l'aide de rainures appelées canaux de distribution. D'un côté de la plaque, c'est le dihydrogène qui circule et de l'autre, c'est le dioxygène. Pour que les deux gaz ne puissent se mélanger, la plaque doit être imperméable aux gaz. Ces plaques bipolaires ont également pour rôle de réguler les flux d'eau pour soit l'évacuer, soit humidifier la membrane.

Ces plaques ont également un rôle dans la tenue mécanique de l'assemblage et se doivent de résister à la corrosion. Enfin, pour envisager une production de masse, les plaques bipolaires doivent être légères, durables et peu coûteuses. Il existe différents types de plaques bipolaires. Les premières sont des plaques de graphite usinées de façon à y incorporer des canaux de distribution. Du fait de l'usinage, ces plaques ont un coût assez élevé.

Une autre technologie consiste à disperser des charges (carbone, graphite,...) sur une plaque thermoplastique. Cette technologie a l'avantage d'être peu coûteuse et d'être très modulable vis à vis des spécifications imposées en adaptant certaines caractéristiques du matériau.

Un dernier type de plaque de diffusion est un empilement de fines couches d'acier inoxydable (traitées contre la corrosion) présentant des propriétés tout à fait adaptées (conductivité, étanchéité, tenue mécanique, facilité de mise en forme,...). Elles ont également

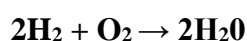
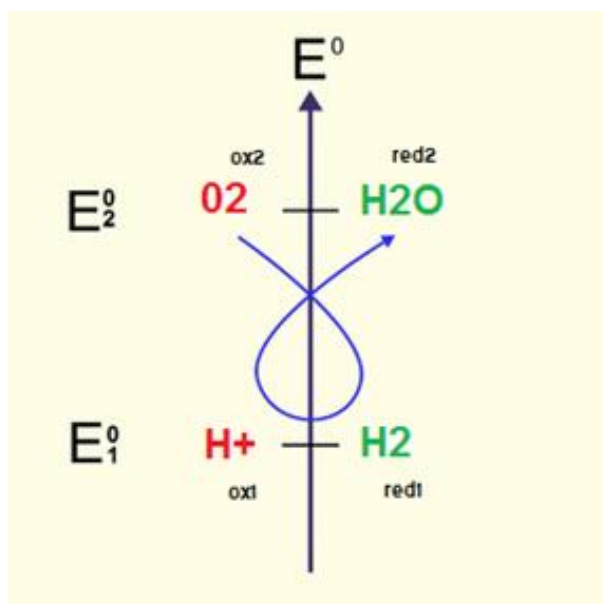
l'avantage d'être plus légères et moins chères à produire. Seulement, la corrosion et la fragilité des empilements constituent encore à ce jour des sujets de recherches.

4. Étude théorique

Nous allons maintenant nous intéresser au fonctionnement de la pile d'un point de vue électrique et thermodynamique. Cette étude est valable pour tous les types de pile à combustible.

Phénomène de polarisation

La PAC est un système électrochimique. Sa tension d'équilibre ΔE^0 correspond donc à la différence de potentiel à chaque électrode (dans les conditions normales de pression et température).



$E_1^0 = 0 \text{ V/ESH}$ (c'est l'électrode standard à hydrogène)

$E_2^0 = 1,23 \text{ V/ESH}$

La tension théorique d'une pile à combustible hydrogène-oxygène est donc de $\Delta E^0 = 1,23 \text{ V}$. Néanmoins, si l'eau est formée sous forme de vapeur, la tension fournie est de $1,185 \text{ V}$. Cette différence est due au changement d'énergie libre de Gibbs lors de la vaporisation de l'eau.

En pratique, la tension réelle aux bornes de la pile va également diminuer par rapport à la valeur théorique suite à des pertes irréversibles. Ces pertes, appelées phénomènes de polarisations, sont principalement distinguables sous trois formes : la polarisation d'activation, la polarisation de résistance (ou polarisation ohmique), et la polarisation de concentration.

➤ *Polarisation d'activation*

Elle est due au transfert de charges au niveau de l'interface électrode/électrolyte. Pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer à ce niveau, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation.

La polarisation d'activation est plus importante à la cathode, pour des raisons cinétiques de réduction de l'oxygène, plus lente que l'oxydation de l'hydrogène à l'anode. La polarisation d'activation est donc liée à l'énergie d'activation des réactions aux électrodes. Elle peut être estimée en utilisant l'équation de Tafel.

➤ *Polarisation de résistance (ou polarisation ohmique)*

Après activation, la densité de courant augmente mais on observe des pertes ohmiques dues à la résistance interne de l'électrolyte. En effet, la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique va entraîner une diminution de la tension aux bornes des électrodes. On observe donc une chute de tension η_{res} (perte ohmique), fonction principalement de la résistance électrique R_e de l'électrolyte, dont on peut calculer la valeur par analogie avec la loi d'Ohm,

soit:
$$\eta_{res} = R_e \times I$$

Les pertes dues à la polarisation de résistance peuvent être minimisées en agissant sur l'électrolyte :

- en réduisant sa résistance (en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte par exemple)
- en augmentant sa conductivité ionique (en jouant sur la nature du matériau, ou en augmentant la température...)

➤ *Polarisation de concentration*

Lorsque, à une électrode, il y a une perte de potentiel dû à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactifs, on a alors la formation d'un gradient de concentration. De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de concentration: la pression, la température, les molécules mises en jeu et leur concentration, la nature de l'électrode (porosité...), la faible diffusion du gaz à travers les électrodes, la dissolution des réactifs ou des produits dans l'électrolyte....

A des densités de courants élevées, la faible vitesse de transport des réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la contribution majeure à la polarisation de concentration. En effet le réactif étant consommé au fur et à mesure qu'il avance dans l'électrode, sa concentration va donc en diminuant. En revanche, la concentration des produits formés augmente.

Cette variation de concentration se traduit par une diminution des performances de la pile à combustible, à savoir : diminution de la tension fournie et de la vitesse de réaction.

La polarisation de concentration peut être réduite par optimisation de la distribution du réactif à la surface de l'électrode et de l'électrode (matériau, structure) en plus des conditions opérationnelles (température, pression).

➤ *Bilan*

Les phénomènes de polarisations s'additionnent. Ainsi, la tension réelle aux bornes d'une pile à combustible est la résultante de ces différentes polarisations.

$$E = E^0 - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{res}} - \eta_{\text{conc}}$$

Étude énergétique

Dans les piles à combustible, du fait de la réaction entre le dihydrogène et l'oxygène, de l'énergie est libérée. Elle se décompose en deux formes distinctes : l'énergie électrique et l'énergie thermique.

- De façon générale, l'énergie totale produite par la réaction correspond à la variation de l'enthalpie du système :

$$W_{\text{totale}} = \Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad (< 0)$$

| ΔH : variation d'enthalpie (J)

| T : température (K)

| ΔG : variation d'énergie libre (J)

| ΔS : variation d'entropie (J.K⁻¹)

Les deux termes de la relation précédente correspondent chacun à une des formes sous laquelle l'énergie est libérée.

- Ainsi, l'énergie électrique produite par la pile est donnée par la variation d'énergie libre à l'intérieur de la pile :

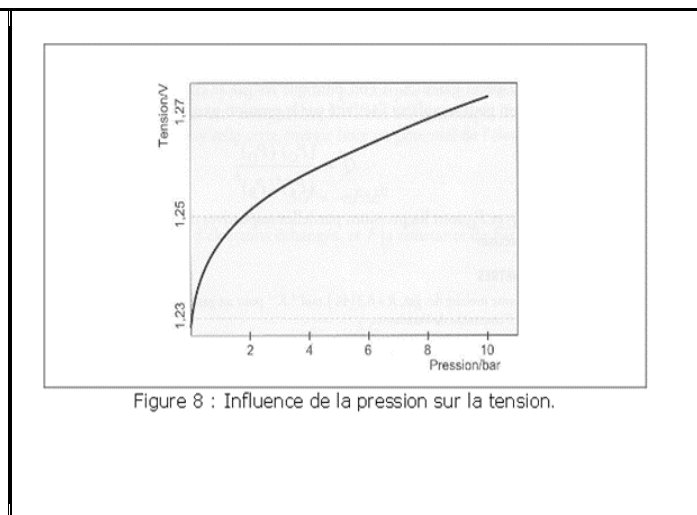
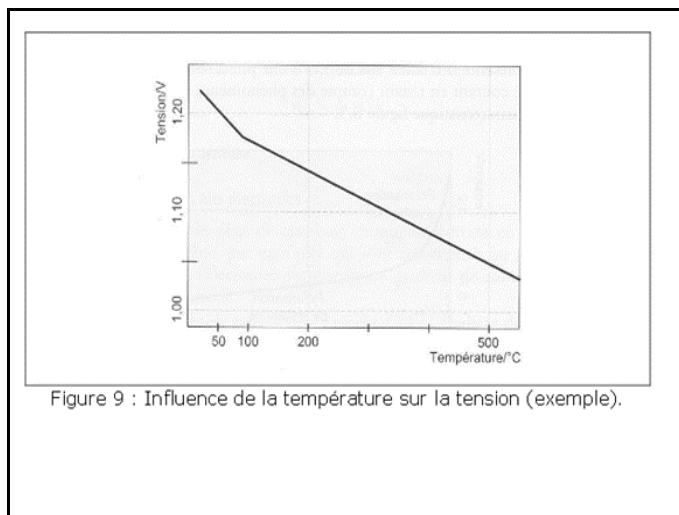
$$W_{\text{élec}} = \Delta G = -n \cdot F \cdot E \quad (< 0)$$

| n : nombre d'électrons échangés durant la réaction

| E : potentiel de la réaction (V)

| F : constante de Faraday (C.mol⁻¹)

On peut remarquer que l'énergie électrique dégagée dépend de la température ($\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$). Le graphique de gauche (ci-après) montre que lorsque la température augmente, la tension aux bornes de la pile et par conséquent $|W_{\text{élec}}|$ diminuent.



L'énergie électrique fournie est également fonction de la pression. En effet, la formule de Nernst nous donne :

$$E = E^0 - \frac{R \times T}{n \times F} \times \ln(Q) = E^0 - \frac{R \times T}{2 \times F} \times \ln\left(\frac{1}{P_{H_2} \times P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}\right)$$

| E : potentiel de la réaction (V)

| T : température (K)

| E⁰ : potentiel standard de la réaction (V)

| F : constante de Faraday (C/mol)

| R : constante des gaz parfaits

| P(H₂) : pression partielle de H₂

| n=2 : nombre d'électrons échangés

| P(O₂) : pression partielle de O₂

Avec le graphique de droite, on remarque que lorsque la pression des deux réactifs augmente, la tension aux bornes de la pile et |W_{élec}| augmentent également.

De même l'énergie dissipée sous forme de chaleur se calcule de la façon suivante :

$$W_{\text{chaleur}} = T \cdot \Delta S (< 0)$$

Cette énergie peut cependant être valorisée, c'est ce que l'on appelle la cogénération.

Rendement électrique :

Pour connaître le rendement électrique théorique d'une pile à combustible, on s'intéresse au rapport entre la variation d'énergie libre du système et la variation d'enthalpie. Ainsi, aux conditions standard de température et de pression (P=1bar et T=298K) on a :

$$W_{\text{élec}} = -237 \text{ kJ}$$

η=83% pour l'eau liquide en produit (ΔH⁰ = -283 kJ/mol).

η=95% pour l'eau gazeuse en produit (ΔH⁰ = -242 kJ/mol).

On peut noter qu'à haute température, ce rendement diminue (74% à 1000°C).

Ce rendement correspond au rendement maximum de la pile. Il ne tient pas compte de la baisse de tension en circuit fermé. En effet, en fonctionnement pratique, le potentiel de la pile est inférieur à 1,23V, comme nous l'avons vu avec les phénomènes de polarisations.

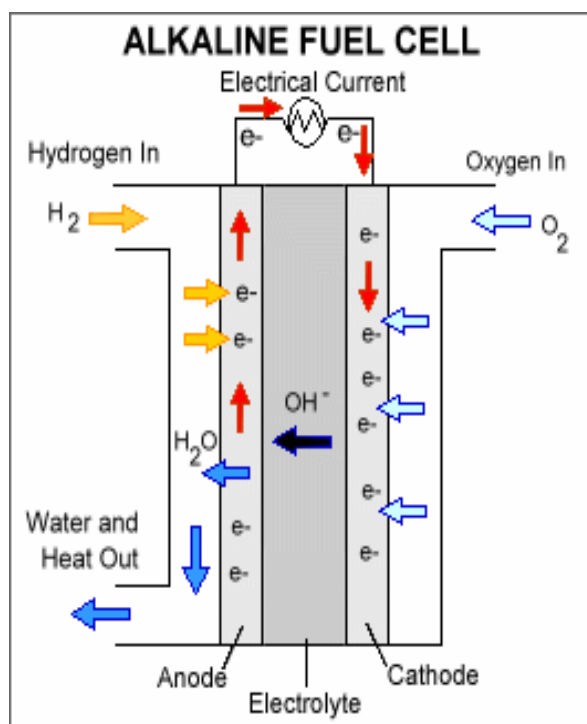
5. Les autres types de PAC

Il existe différentes technologies de pile à combustible (déjà commercialisées ou en cours de développement) qui font intervenir chacune des réactifs différents et dont la température de fonctionnement diffère. Toutes ces spécifications font que chaque technologie a des applications propres. Voyons donc quelles sont les différents types de PAC, leurs particularités, leurs qualités et leurs défauts.

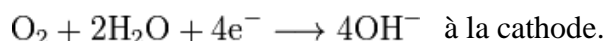
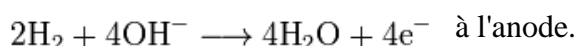
➤ PAC à basse température

❖ AFC (Alkaline Fuel Cell)

Cette technologie de PAC est l'une des plus anciennes et des plus répandues. Apparue dans les années 1960, elle a été utilisée notamment pour les missions spatiales Gemini ou Apollo.



Les réactifs de la pile sont le dihydrogène et le dioxygène et elle produit de l'eau, de la chaleur et de l'électricité. La particularité de cette pile est que l'électrolyte est liquide (souvent l'hydroxyde de potassium KOH) et apporte des ions OH⁻ nécessaires au passage du courant dans la pile. La température de fonctionnement est comprise entre 60° et 90°C. Les demi-réactions sont donc :



Performances : Le rendement des AFC peut atteindre jusqu'à 70%.

Atouts : Les AFC sont les PAC les moins coûteuses à ce jour et leur technologie est tout à fait maîtrisée.

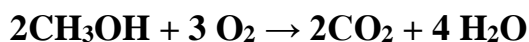
Inconvénients : Pour le bon fonctionnement de la pile, les solutions doivent rester pures et de ce fait les réactifs doivent être purs. Ainsi le dioxygène ne peut pas être fourni par de l'air pur.

❖ PEMFC (Polymer Exchange Membran Fuel Cell)

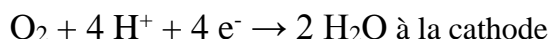
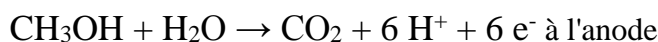
En français, PEMFC signifie Pile à Combustible à Membrane Échangeuse de Proton. C'est avec ce type de PAC que nous avons réalisé nos expérimentations.

❖ DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

Les PAC à méthanol direct sont très voisines des piles à échangeurs de protons mais avec cette technologie, le combustible n'est plus le dihydrogène mais le méthanol :



Là aussi l'électrolyte est une membrane laissant passer les protons mais les réactions à l'anode et à la cathode sont différentes :



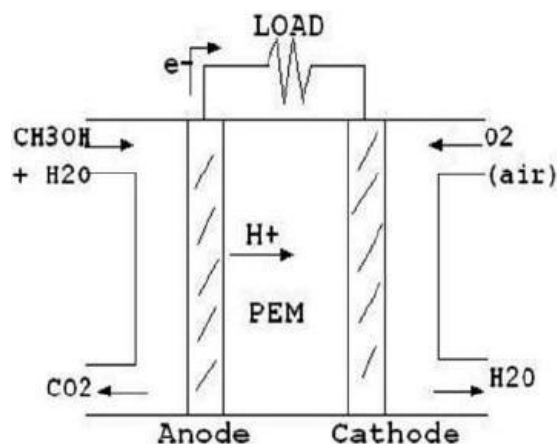
Les températures de fonctionnement sont de l'ordre de 60-90°C.

Performances : le rendement des DMFC est de l'ordre de 20%, ce qui est assez faible.

Avantages : le principal avantage de ces piles est le stockage du combustible. En effet le méthanol est bien plus simple et sûr à stocker que le dihydrogène. De plus il prend moins de place.

Inconvénients : Cependant la puissance délivrée est faible par rapport aux autres types de PAC. De plus l'un des produits est le dioxyde de carbone qui est un gaz à effet de serre.

On peut également trouver des piles où le méthanol est remplacé par l'éthanol, moins dangereux et plus performant énergétiquement.



Schematic of a DMFC

➤ PAC à haute température

❖ SOFC (Solid Oxyd Fuel Cells)

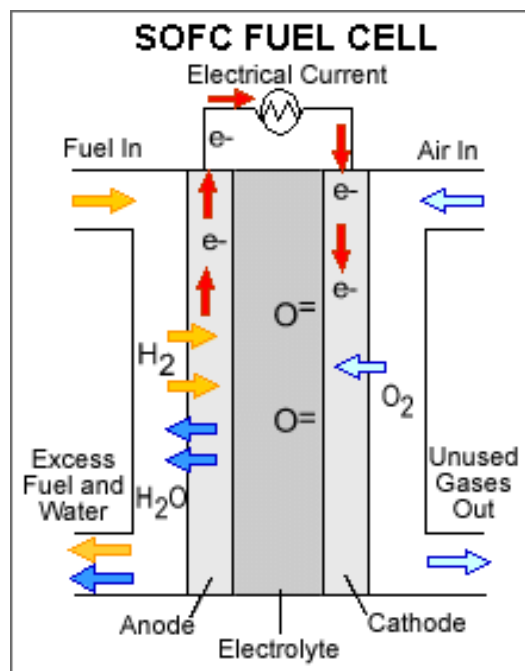
Les piles à oxyde solide (SOFC en anglais) fonctionnent à des températures variant de 450°C à 1000°C. Le fonctionnement de la pile consiste à réduire les molécules de dioxygène en O^{2-} au niveau de la cathode. Cette réduction se réalise à l'aide d'un oxyde solide (d'où le nom de la pile), généralement du manganite de lanthane dopé au strontium : $\text{O}_2 + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{O}^{2-}$

Les anions formés vont ensuite migrer à travers l'électrolyte pour réagir avec le dihydrogène à l'anode, formée généralement de nickel poreux ou d'un mélange de nickel et d'oxyde de zirconium dopé à l'yttrium) : $2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

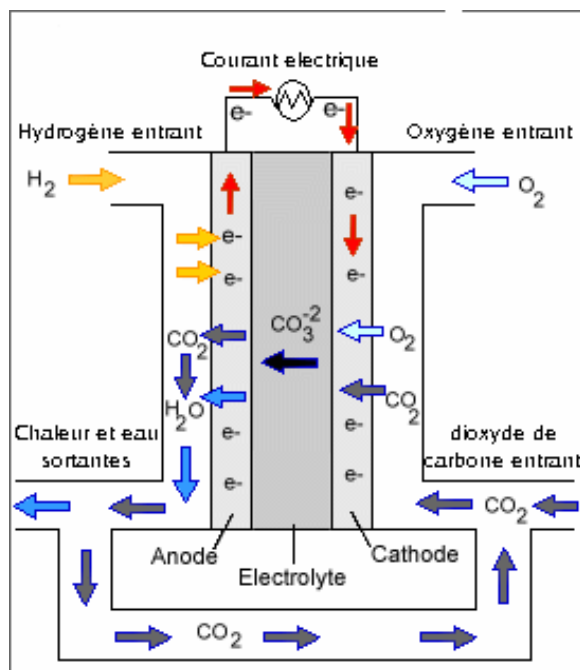
Performances : Le rendement des SOFC est de l'ordre de 50 à 60% mais peut atteindre près de 80% avec le couplage d'une turbine à gaz et un système de récupération de la chaleur.

Avantages : Du fait des hautes températures de fonctionnement, ces piles sont bien moins sensibles aux impuretés tels que le monoxyde ou le dioxyde de carbone ce qui les rend bien plus souples d'utilisation. De plus, du fait de la température de fonctionnement, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à des métaux rares en tant que catalyseur. Ainsi, le prix de fabrication des SOFC en est diminué.

Inconvénients : Le principal défaut de ces piles est leur température de fonctionnement qui pose des problèmes au niveau des matériaux utilisés mais aussi au niveau de l'énergie qu'il faut fournir à la pile au démarrage. Ainsi, les principales études actuellement menées visent à réduire la température de fonctionnement sans pour autant sacrifier les performances de ces piles.

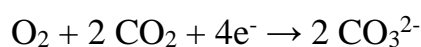


❖ MCFC (Molten-carbonate fuel cell)



La pile à combustible à carbonate fondu (MCFC) est le type de pile présentant les meilleurs rendements parmi les différentes autres technologies. Le fonctionnement de ce type de pile nécessite l'apport de dioxygène, de dihydrogène et de dioxyde de carbones

A la cathode, à l'aide d'une électrode en oxyde de nickel, la réaction suivante se produit :



Les ions CO₃²⁻ produits vont alors migrer à travers l'électrolyte. Dans ce type de PAC, il est composé de sels de carbonate fondu en suspension dans une matrice céramique poreuse et chimiquement inerte d'électrolyte solide

d'alumine bêta. Arrivés au niveau de l'anode, les ions CO₃²⁻ vont réagir avec le dihydrogène selon la réaction suivante :



Le dioxyde de carbone formé à l'anode peut ensuite être récupéré pour être réutilisé comme combustible à la cathode.

Performances : Le rendement des MCFC peut atteindre près de 60% voire même 85% lors de la mise en place d'un système recyclant la chaleur produite par la réaction.

Avantages : Comme nous venons de le voir, le principal avantage de cette technologie est le rendement obtenu. De plus ce type de PAC n'est pas sujet à la pollution du CO ou CO, ce qui permet de recycler les gaz issus de la combustion d'hydrocarbures.

Inconvénients : Le principal inconvénient des MCFC réside dans la corrosion des éléments de l'électrolyte qui conduit à la réduction de la durée de vie des piles. Enfin, la réutilisation du CO₂ produit à l'anode complexifie le système.

❖ PAFC (Phosphoric acid fuel cells)

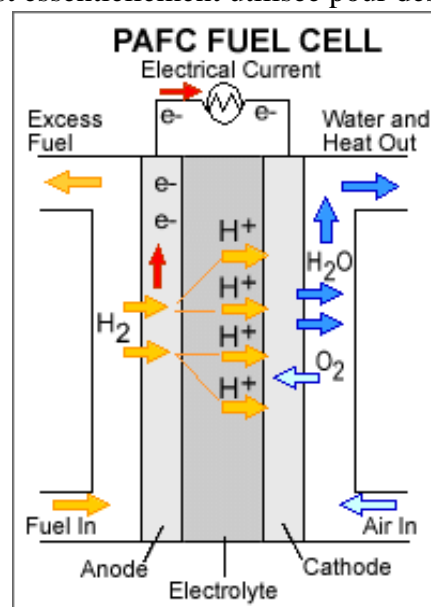
Les piles à combustible à acide phosphorique sont l'un des types de pile les plus aboutis et les plus commercialisées aujourd'hui. Cette technologie est essentiellement utilisée pour des applications stationnaires.

La particularité des piles à combustible à acide phosphorique est justement que l'électrolyte est composé d'acide phosphorique liquide conducteur de protons (H₃PO₄). Mise à part l'électrolyte et la température de fonctionnement, le principe est sensiblement le même que pour les PEMFC.

À l'anode, le dihydrogène s'oxyde $2 \text{H}_2 \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$

A la cathode, le dioxygène se réduit $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Le bon fonctionnement de la pile nécessite une température d'utilisation variant de 190°C à 210°C.



Performances : Les PAFC peuvent atteindre des rendements de l'ordre de 80% lorsque la chaleur de la réaction est récupérée.

Avantages : L'un des principaux avantages des PAFC est leur prix de fabrication qui est sensiblement peu élevé par rapport à d'autres technologies de PAC. C'est ce qui explique que cette technologie est à ce jour la plus mature. De plus, la durée de vie des PAFC est relativement élevée (40000 h environ).

Inconvénients : Du fait de la température de fusion de l'acide phosphorique (42°C), il est nécessaire de conserver en permanence la température de la pile au-delà de cette valeur pour éviter que l'électrolyte ne se solidifie. Deuxièmement, cette technologie n'est pas adaptée à une production de faible puissance ce qui la condamne à des applications uniquement stationnaires.

Il est à noter que pour chacune des technologies énumérées ici (que ce soit à basse température ou à haute température), il existe des variantes, en cours de développement basées sur de nouvelles techniques, de nouveaux combustibles ou de nouveaux matériaux.

II. PRODUCTION DE H₂ À PARTIR D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

1. Production de H₂ : électrolyse

➤ Présentation et principe

Une électrolyse c'est avant tout une réaction chimique forcée. Toute réaction chimique a un sens dit « spontané » et l'autre « forcé ». Le sens spontané est le sens de réaction naturel du système : aucun apport d'énergie n'est nécessaire pour qu'elle s'effectue. Le système tend alors à se rapprocher naturellement de l'équilibre. Le sens dit forcé quant à lui est la réaction inverse qui ne peut avoir lieu que si l'on apporte de l'énergie au système. On force alors le système à s'écarter de son équilibre naturel. Pour observer ce phénomène, on utilise le quotient réactionnel qui nous permet de quantifier l'avancement de la réaction.

Par exemple, prenons la réaction : $\alpha A + \beta B \xrightarrow{\text{sens direct}} \gamma C + \delta D$

Le quotient réactionnel associé est alors :
$$Q_r = \frac{[C]^\gamma [D]^\delta}{[A]^\alpha [B]^\beta}$$

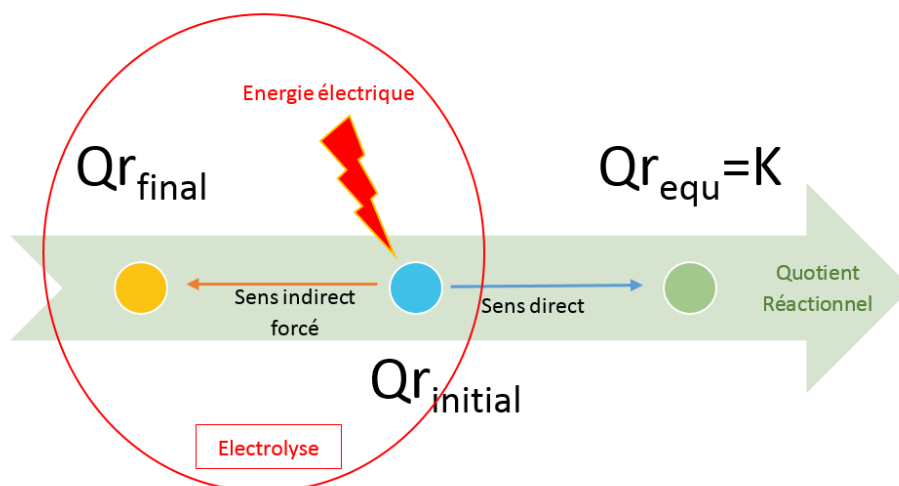
Quand on est à l'équilibre, on obtient $Q_{r_{eq}}=K$, une constante propre à la réaction qui nous indique le sens de réaction :

Si $Q_r > K$, le système va évoluer spontanément vers l'équilibre dans le sens direct.

Si $Q_r < K$, le système va évoluer spontanément vers l'équilibre dans le sens indirect.

Si $Q_r = K$, le système est à l'équilibre.

Dans le cas de l'électrolyse, en apportant de l'énergie au système on le force donc à réagir dans le sens indirect, ce qui l'éloigne de l'équilibre.

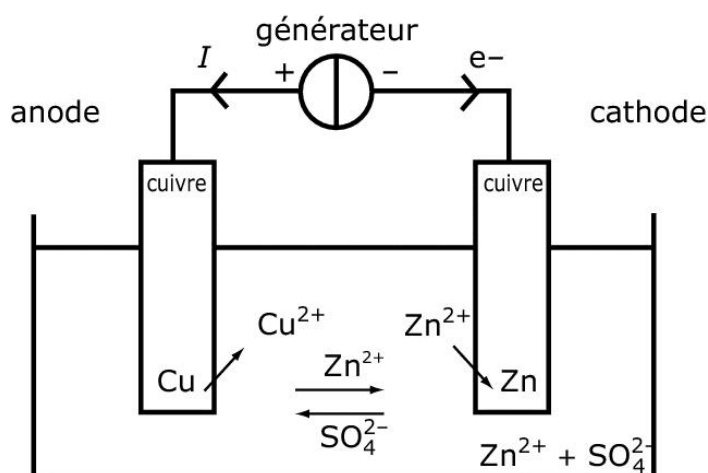


Principe de l'électrolyse :

L'électrolyse est une méthode qui permet de forcer une réaction chimique grâce à une activation électrique. Il s'agit d'un procédé très utilisé dans l'industrie car il permet notamment de séparer des molécules et de synthétiser des composés chimiques difficiles à obtenir par une réaction spontanée (*électro*=électricité et *lyse*= séparer).

L'électrolyseur est composé d'un générateur de tension qui est relié à deux électrodes métalliques. L'anode est celle reliée au pôle positif, la cathode est celle reliée au pôle négatif. Ces deux électrodes sont alors plongées dans une cuve contenant un électrolyte. Il s'agit d'une solution conductrice composée d'ions mobiles, c'est-à-dire capables de transporter des charges lorsque l'on y applique un courant.

Prenons par exemple un dispositif possédant des électrodes de cuivre (Cu), placées dans une solution de Sulfate de Zinc ($Zn^{2+} + SO_4^{2-}$). On a alors le schéma suivant :

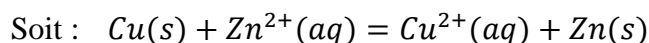
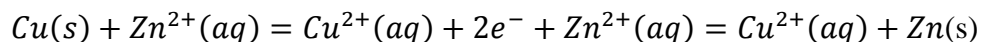


La différence de potentiel entre les deux électrodes entraîne alors les deux réactions suivantes en forçant le déplacement des charges portées par les ions :

Une oxydation au niveau de l'anode de la forme : $Cu(s) = Cu^{2+}(aq) + 2e^{-}$

Une réduction au niveau de la cathode de la forme : $Zn^{2+}(aq) + 2e^{-} = Zn(s)$

La réaction globale observée est alors :



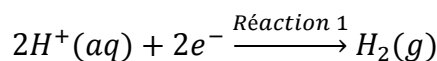
Ce dispositif nous permet ainsi de récupérer du zinc à partir de l'électrolyte : l'électrolyse est ainsi très utilisée pour purifier les métaux.

➤ **Application au dispositif**

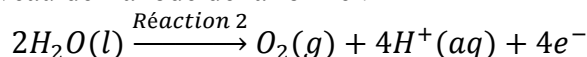
Dans le cas de la pile à combustible, il n'y a pas de métaux mis en jeu, mais le principe de l'électrolyse reste le même. En effet les réactions mises en jeu suivent le même principe que précédemment grâce à la différence de potentiel entre les électrodes que l'on impose. La

réaction qui a alors lieu est appelée hydrolyse car elle permet de casser les molécules d'eau (*hydro*=eau et *lyse*=séparer), on a ainsi :

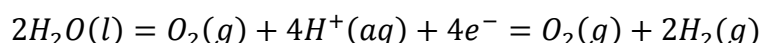
- une réduction au niveau de la cathode de la forme :



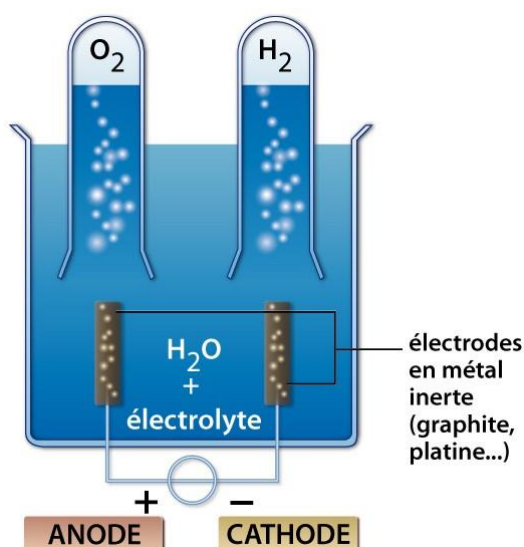
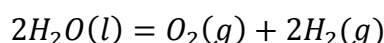
- une oxydation au niveau de l'anode de la forme :



La réaction globale observée est alors :



Soit :



Grâce à ce dispositif, on peut ainsi observer un dégagement de dioxygène $O_2(g)$ au niveau de l'anode, et de dihydrogène $H_2(g)$ au niveau de la cathode comme le montre le schéma ci-dessus. Le dihydrogène ainsi obtenu peut alors être utilisé par la pile à combustible.

➤ Étude théorique

Il est possible de prévoir quel sera le volume de dihydrogène généré par la pile grâce à une formule très simple, la formule de Faraday.

$$V_{H_2} = \frac{R \times I \times T \times t}{F \times P \times 2}$$

Avec :

R = Constante universelle des gaz parfaits = 8,314 J/mol/K

I = Intensité (mA)

T = Température (K)

t = Temps (s)

F = Constante de Faraday = 96 485,3365 s.A/mol

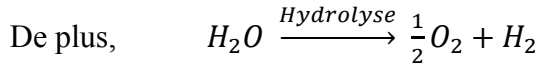
P = Pression ambiante (Pa)

Il est possible de retrouver cette formule assez facilement. On suppose tout d'abord que H_2 est un gaz parfait, ce qui nous donne :

$$P_{H_2} \times V_{H_2} = n_{H_2} \times R \times T \quad \Leftrightarrow \quad V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \times R \times T}{P_{H_2}}$$

Exprimons maintenant n_{H_2} sous une autre forme. On sait que à l'intérieur de l'électrolyseur se produit la réaction suivante : $H_2O \xrightarrow{\text{Hydrolyse}} \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$

Donc pour chaque mole de H_2O consommée, il y a 2 moles d'électrons fournies.



Donc il y a autant de mole de H_2O consommée qu'il y a de mole de H_2 produite. Ainsi, $n_{H_2} =$

$$n_{H_2O}^{\text{consommé}} = \frac{n_{\text{électron}}}{2} = \frac{Q}{2F} = \frac{I \times t}{2F}$$

Il ne nous reste plus qu'à remplacer l'expression de n_{H_2} dans l'équation des gaz parfaits ce qui nous donne bien : $V_{H_2} = \frac{R \times I \times T \times t}{F \times P \times 2}$

2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

➤ L'effet photoélectrique

Les cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs (comme le silicium) sont soumises à un phénomène particulier lors d'une exposition à la lumière. En effet, sous l'action d'un rayon incident lumineux, les photons arrachent les électrons externes du silicium, ce qui leur permet de circuler dans le matériau.

Ce phénomène, appelé **l'effet photoélectrique**, permet aux cellules photovoltaïques de directement transformer l'énergie lumineuse des photons en électricité. La cellule produit ainsi un courant électrique continu.

➤ Le dopage

La production d'électricité de la cellule peut être améliorée en créant une différence de potentiel en son sein dès sa fabrication. On appelle cette technique le **dopage**.

Il s'agit en fait de diviser la cellule photovoltaïque en deux parties, l'une enrichie en électron et l'autre pauvre en électron. Pour cela, on ajoute d'autres atomes au silicium (comportant 4 électrons périphériques). La couche dopée n (négativement) comporte des atomes de phosphore présentant 5 électrons périphériques alors que la couche dopée p (positivement) possède des atomes de bore avec 3 électrons périphériques. En les mettant en contact, on crée ainsi une différence de potentiel électrique et les électrons excédentaires de la couche n sont diffusés dans la couche p .

C'est alors en traversant la cellule photovoltaïque que les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p . Ils empruntent ensuite un circuit fermé allant de la

couche positive à la couche négative. Par cette migration d'électrons, il y a donc production d'électricité.

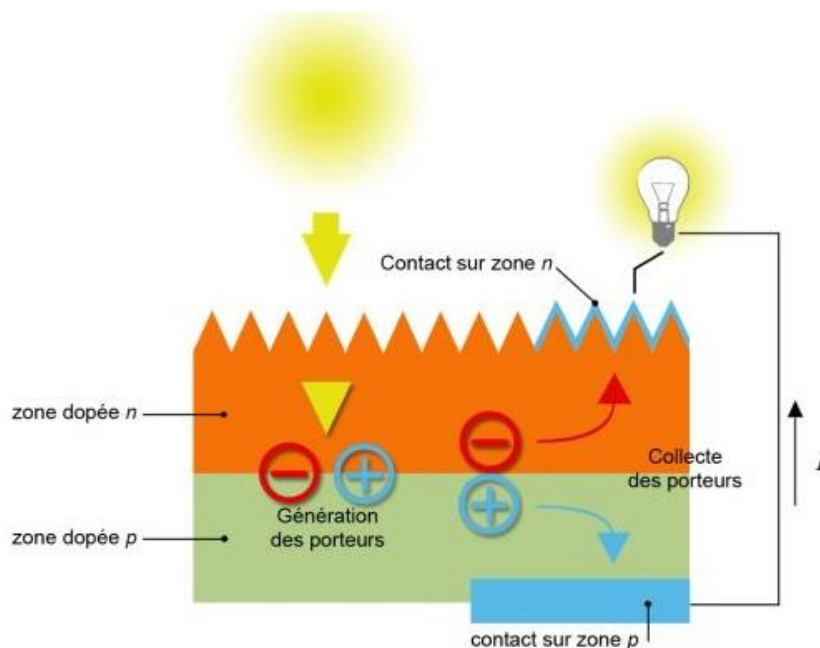


Figure 1 Constitution d'une cellule photovoltaïque

➤ Différentes technologies.

Il existe plusieurs types de panneaux solaires, qui peuvent être classés en fonction de leur matériau de composition, influant sur leur rendement et leur coût de production.

On a d'abord le solaire photovoltaïque non concentré. Il s'agit d'un système possédant des cellules à matériau semi-conducteur comme le **silicium cristallin**. Ce matériau représente 85% du marché des panneaux photovoltaïques. Il existe deux types de silicium cristallin: le **monocristallin** (un seul bloc de silicium cristallisé), très coûteux à produire mais avec un bon rendement (12% à 20%) ; et le **poly cristallin**, peu coûteux mais avec rendement moindre (11% à 15%).

Ensuite, on a le solaire photovoltaïque concentré. À l'aide de miroirs convergents ou de lentilles de Fresnel, on concentre les rayons lumineux sur une cellule multi jonction. La particularité de cette cellule est qu'elle possède plusieurs couches de matériau, et connaît les meilleurs rendements (30 à 40 %). D'autre part, l'avantage de ce dispositif est que l'on n'utilise qu'une

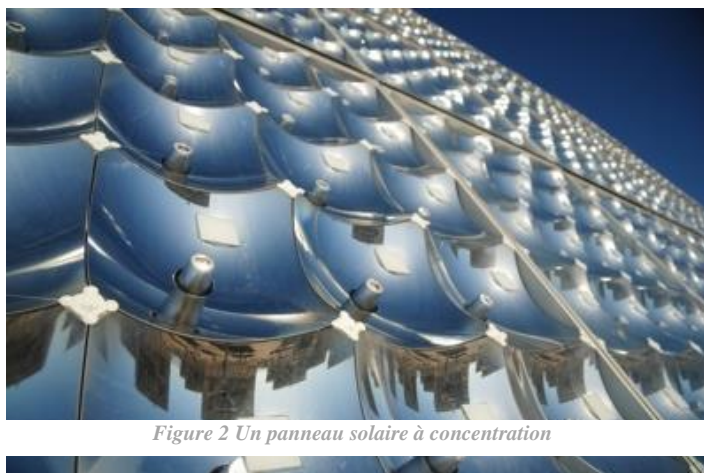


Figure 2 Un panneau solaire à concentration

seule cellule, réduisant le coût de fabrication du panneau. Cette technologie innovante est utilisée dans des centrales électriques comme celle de SOITEC en Californie.

Il existe également des cellules photovoltaïques en polymère. Elles ont l'avantage d'être légères et souples (donc moins fragiles) et très peu coûteuses, mais leur rendement maximal est de 5%. Elles n'apparaîtront sur le marché qu'à partir de 2015.

Remarque : Si les cellules photovoltaïques ont des rendements variables, cela est dû au fait que la production électrique dépend de trois principaux facteurs : l'ensoleillement journalier, l'inclinaison des panneaux et la température. À Rouen, l'ensoleillement varie de 800 à 1000 kW/m², contre 1200 à 1400 kW/m² à Nice. Quant à l'inclinaison, il est recommandé en France d'incliner ses panneaux solaires de 30° par rapport à l'horizontale pour avoir une production électrique optimale.

➤ Applications à notre dispositif :

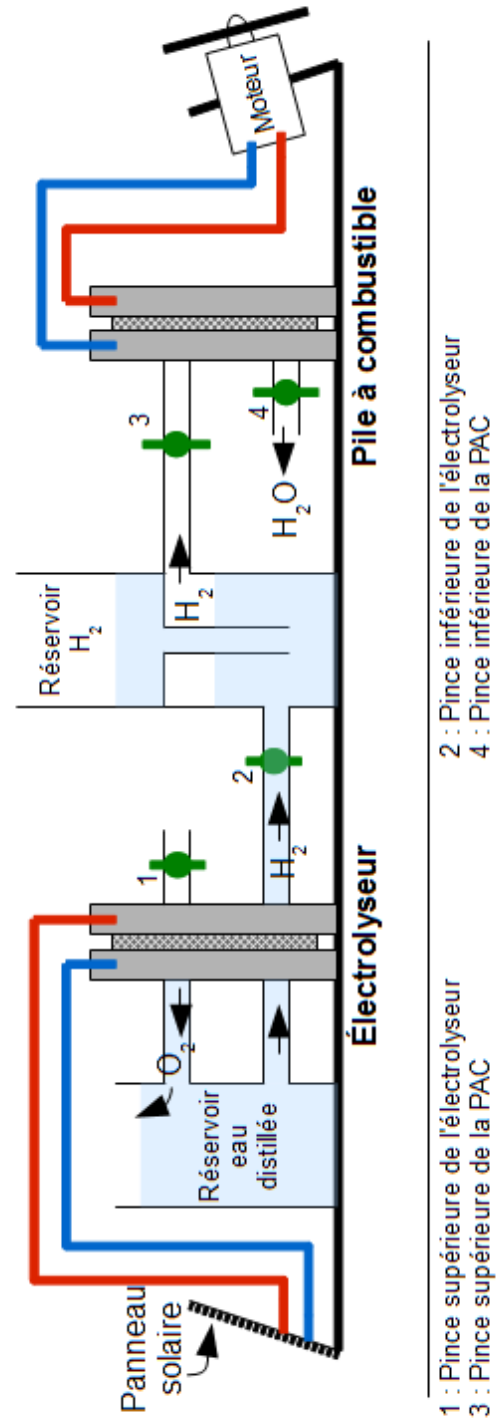
La surface de notre panneau solaire est $S=90\text{cm}^2$, et a une puissance $P_{\text{elec}}=0.5\text{W}$. Nous n'utiliserons pas de lumière naturelle mais de la lumière artificielle avec une inclinaison telle que l'éclairement reçu par le panneau soit 750W/m² au centre et de 250W/m² sur les bords, soit une moyenne d'environ $H=420\text{W/m}^2$. De plus, pour éviter d'endommager le panneau, nous éloignerons la source lumineuse de 30cm. (*On éloigne la source lumineuse d'au moins 15 cm, distance pour laquelle on obtient un éclairement inférieur à 800W/m², ce qui correspond à un éclairement journalier déjà fort. On ne souhaite pas dépasser cette valeur pour ne pas risquer d'endommager le panneau.*)

$$\text{Le rendement d'un panneau solaire s'exprime : } \eta = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{solaire}}} = \frac{P_{\text{elec}}}{H \times S} = \frac{0.5}{420 \times 90 \cdot 10^{-4}}$$

On obtient un rendement d'environ 13% ce qui est cohérent avec l'intervalle de rendement indiqué précédemment puisque notre panneau solaire est en silicium poly cristallin.

III. EXPÉRIMENTATION

1. Schéma du dispositif



2. Compte rendu de l'expérimentation du 18/03/2014

Pour cette première expérimentation du dispositif nous n'avons pas préparé de protocole détaillé l'objectif étant justement de découvrir la PAC pour ensuite réaliser de manière autonome le fonctionnement du dispositif lors d'une seconde séance.

Le dispositif est composé d'un panneau solaire, d'un électrolyseur, d'un réservoir à gaz, d'une pile à combustible PEMFC et d'un ventilateur (hélice).

Première manipulation :

En premier lieu, nous avons rempli le réservoir d'eau avec de l'eau distillée. Nous avons fait de même avec le réservoir de H_2 pour permettre de visualiser le volume de H_2 produit (en ajustant le niveau d'eau jusqu'au trait de jauge).

Après cela, nous avons mis en place le panneau solaire. Nous voulions un éclairage d'environ $500W/m^2$ sans jamais dépasser $800W/m^2$ afin d'éviter de griller les cellules du panneau solaire. Nous avons positionné notre lampe de telle sorte que l'éclairage soit le plus homogène possible entre les différentes cellules du panneau solaire. Ainsi, nous avons environ $750W/m^2$ au centre du panneau et $250W/m^2$ sur les côtés. Pour ce faire, nous avons positionné la lampe à 15cm du panneau solaire.

Nous avons ensuite branché l'électrolyse. Cependant, nous avons oublié d'ouvrir la pince inférieure de l'électrolyse qui permet de transmettre le H_2 au réservoir. De ce fait, il s'est formé une petite surpression au niveau de l'électrolyse.

Après avoir ouvert la pince inférieure, nous avons observé un dégagement gazeux au niveau du réservoir destiné à accueillir le H_2 , ce qui a prouvé le bon fonctionnement de l'électrolyse. A ce stade, nous avons branché en dérivation un voltmètre aux bornes de la pile à combustible qui affichait une tension de 0V ce qui était logique puisque nous n'autorisons pas le passage du H_2 vers la pile.

Nous avons donc ouvert l'arrivée de H_2 et le potentiel aux bornes de la pile est passé à environ 0,2 – 0,3mV et s'est stabilisé autour de cette valeur, ce qui nous paraissait très faible et très éloigné de la valeur seuil permettant de mettre en mouvement l'hélice qui est d'environ 400mV. C'est alors que nous nous sommes rendu compte que nous n'avions pas humidifié la membrane de la PAC.

Deuxième manipulation :

Nous avons humidifié la membrane en faisant rentrer de l'eau distillée dans la PAC par la pince supérieure, celle qui en fonctionnement normal permet l'alimentation de la pile en H_2 . Nous avons ensuite mis en place le dispositif comme décrit précédemment. Nous avons alors

fait tourner la pile à combustible tout en laissant ouvert la pince inférieure jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'écoulement d'eau. Nous avons également sorti les bulles d'air pouvant se former au niveau de la pince supérieure. Nous avons très vite remarqué que la tension aux bornes de la pile augmentait très rapidement. La tension s'est rapidement élevé à 50mV puis nous avons stoppé l'expérience à 70mV afin de lancer une acquisition à l'aide de synchronie.

Troisième manipulation :

Cette fois la membrane était humidifiée. Dans un premier temps, nous avons laissé le réservoir se remplir avec 15cm³ de H₂ sans alimenter la pile. Au cours du temps, nous avons ainsi pu mesurer la production de H₂ dans l'électrolyse.

Temps	4 min 40sec	8 min 10sec	14 min
Volume de H ₂ produit (cm ³)	5	10	15

Ces mesures, bien qu'approximatives nous ont donné une idée de la production de H₂ au cours du temps. Ainsi la production de H₂ se situe autour de 1,2cm³/min.

Après avoir rempli le réservoir, nous avons ouvert la pince supérieure afin de lancer le fonctionnement de la pile. Dans le même temps, nous avons lancé une acquisition dans synchronie afin de visualiser l'évolution de la tension de la pile au cours du temps. La tension s'est alors directement élevée à une valeur de 100mV. Nous avons par ailleurs observé que la production de H₂ de l'électrolyse était supérieure à la consommation de la pile puisque le volume de H₂ dans le réservoir continuait d'augmenter.

Nous avons ainsi laissé la pile et l'électrolyse en fonctionnement durant environ une heure. Au bout de 20 minutes de fonctionnement, nous nous sommes rendu compte que nous ne pouvions atteindre les 400mV nécessaires à la mise en mouvement du ventilateur. C'est pourquoi nous avons réfléchi à la raison pour laquelle nous n'obtenions pas une tension suffisante. Nous avons alors réalisé que la membrane n'avait pas été entièrement humidifiée puisque une partie de la membrane se trouvait au-dessus de l'arrivée par laquelle nous avons injecté l'eau distillée. Il était donc nécessaire de retourner le dispositif afin d'humidifier la membrane dans sa totalité. Nous avons néanmoins continué l'expérience afin d'obtenir une acquisition.

Quatrième expérience

Nous avons recommencé l'expérience en retournant le dispositif pour humidifier complètement la membrane. Après avoir effectué les réglages nécessaires, nous avons lancé une nouvelle fois la pile sans acquisition.

Dès le début, nous avons observé une tension de 264 mV aux bornes de la pile ce qui était bien supérieur aux expériences précédentes. Cela montre l'importance de l'humidification totale de la membrane pour l'expérience.

À partir de 15 minutes, nous étions à 310 mV ce qui nous permettait de faire tourner brièvement l'hélice si nous lui donnions un peu d'élan. Au bout de 40 minutes, la tension aux bornes de la pile à combustible s'est alors stabilisée autour de 370 mV. On peut supposer qu'il

s'agit environ du potentiel critique car lorsque l'on branchait l'hélice, elle se mettait en mouvement toute seule le temps de quelques rotations avant de ralentir puis s'arrêter. Cela était dû aux frottements ainsi que la légère baisse de tension au niveau de la pile. Nous n'avons pas atteint les 400 mV indiqués par manque de temps ce qui nous obligera à effectuer une nouvelle série d'expériences.

3. Protocole

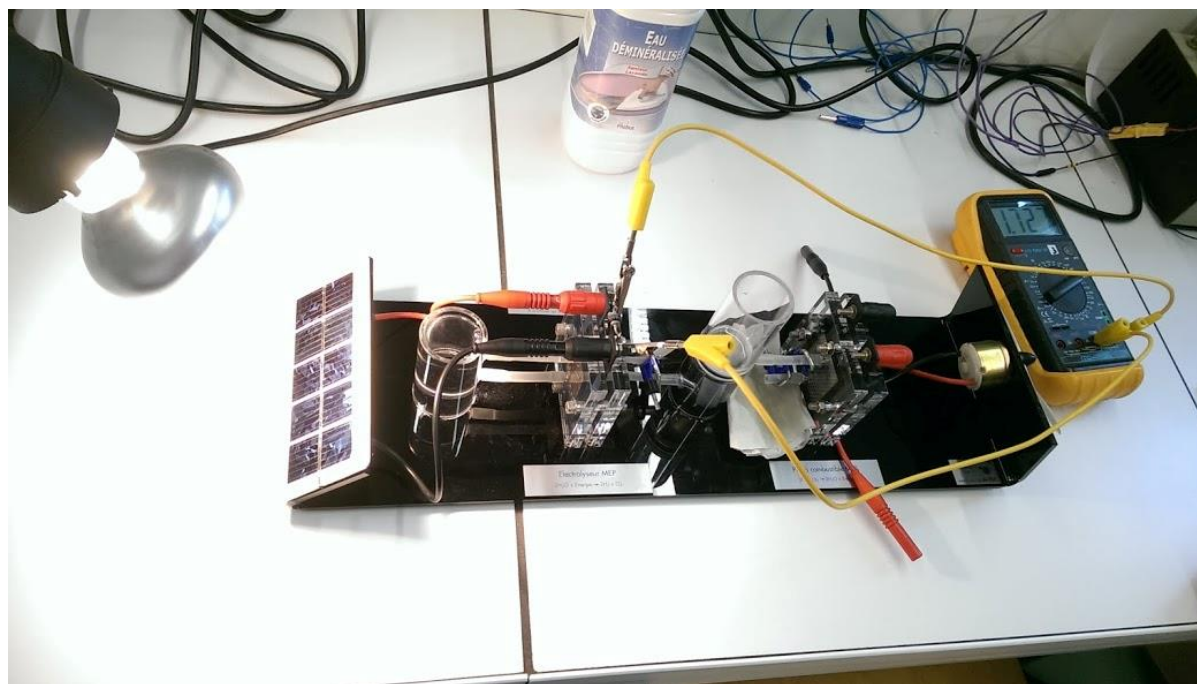
Suite à la première expérience nous avons rédigé un protocole pour la seconde expérience afin de faciliter la mise en œuvre de la manipulation.

Matériel à apporter : appareil photo / thermomètre / chronomètre / 2 voltmètres / chiffons

- Humidifier la membrane de la pile en retournant la pile dans tous les sens pour que cela soit homogène.
- Fermer la pince supérieure et ouvrir la pince inférieure de l'électrolyseur.
- Remplir d'eau le réservoir du bas de l'électrolyseur à raz bords d'eau distillée puis refermer avec la partie du haut de sorte à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air dans le dispositif.
- Régler le panneau solaire : La lampe doit être à environ 15 cm du centre du panneau pour obtenir 250 W/m^2 sur les côtés et 750 W/m^2 au centre
- Fermer la pince supérieure de la pile à combustible et brancher l'électrolyseur au panneau solaire. Faire tourner le dispositif à vide pour remplir le réservoir de dihydrogène en dessous de la pince supérieur de la PAC.
- Mesurer l'intensité avec un ampèremètre au niveau du panneau solaire
- Mettre en place un voltmètre sur le panneau solaire.
- Mettre un chiffon sous la pince inférieure de la PAC et ouvrir cette dernière. Ouvrir la pince supérieure de la PAC et observer l'eau chassée de la membrane. Une fois chassée entièrement, fermer les pinces de la PAC, débrancher le panneau puis re-régler le dispositif.
- Paramétrer synchronie en branchant sur la PAC
- Ouvrir la pince entre l'électrolyseur et le réservoir de dihydrogène
- Vérifier rapidement la position du panneau solaire
- Préparer un chronomètre et lancer le système en branchant le panneau. Mesurer la production de H_2 en fonction du temps
- Quand on a 15 cm^3 de H_2 ouvrir la pince supérieure de la PAC pour commencer l'expérience.
- Quand on a obtenu 370 mV essayer de mettre en route le moteur (la tension nominale ne fonctionne pas normalement), et recommencer une fois à 400 mV (cela devrait fonctionner).
- Une fois l'expérience finie, débrancher le panneau et l'électrolyseur pour pouvoir observer la consommation de H_2 par la PAC

4. Compte rendu de l'expérimentation du 06/05/2014

Manipulation :



Nous n'avons pas humidifié la membrane de la pile car l'enseignant avait déjà fait fonctionner la pile le matin même afin de faciliter une montée en potentiel rapide. Nous avons réussi à obtenir un éclairage pour le panneau solaire similaire à celui de l'expérience précédente, à savoir environ **223 W/m² sur les côtés et 750 W/m² au centre**. Par ailleurs, nous avons rempli le réservoir du bas de l'électrolyseur à raz bords avec de l'eau distillée.

Nous avons alors fait tourner à vide l'ensemble du dispositif afin d'en chasser les bulles d'air. Ensuite nous avons fermé la pince supérieure de l'électrolyseur pour accumuler le dihydrogène dans le réservoir et mesurer sa production.

Temps	3 min 30sec	7 min 42sec	11 min 11sec
Volume de H ₂ produit (cm ³)	4	9	14

On note ainsi une vitesse de production du dihydrogène d'environ **1,25 cm³/min**, résultat similaire à celui de la manipulation précédente. La légère différence peut s'expliquer par un éclairage sensiblement différent et l'imprécision de la lecture des mesures.

Nous avons par ailleurs mesuré l'intensité à travers le panneau solaire et obtenu une valeur d'environ **164 mA**. Nous avons également relevé une tension constante de **1,715 V** aux bornes de l'électrolyseur.

Enfin, nous avons branché Synchronie afin d'observer la courbe de tension aux bornes de la pile à combustible jusqu'à obtention d'une tension d'environ 400 mV, valeur pour laquelle

l'hélice tourne. On a observé en quelques secondes une augmentation très rapide de la tension jusqu'à une valeur supérieure à 400mV à notre grande surprise. Nous avons donc branché l'hélice qui s'est, comme prévu, mise en rotation directement. Nous avons alors pu arrêter l'acquisition de Synchronie. Cette augmentation rapide du potentiel est due au travail effectué le matin même par M. Abdul Aziz.

Nous avons donc pu consacrer le reste de notre temps à mesurer précisément la vitesse de consommation du dihydrogène et effectuer les premiers calculs de rendements.

Temps	17 min 17sec	34 min	50 min 30 sec
Volume de H ₂ consommé (cm ³)	5	10	15

Nous avons donc obtenu une vitesse de consommation égale à **0,297 cm³/min**. On remarque la faible valeur de ce résultat par rapport à la vitesse de production. Finalement, lorsque l'hélice est débranchée on relève une tension d'environ **552 mV** ce qui prouve bien que des conditions initiales idéales telles qu'une bonne humidification permettent d'avoir un bien meilleur fonctionnement de la pile. Par ailleurs, nous avons mesuré l'intensité du courant à travers la pile et nous avons obtenu 19,7 mA ce qui nous a permis de déduire la puissance délivrée par la pile :

$$P = U \cdot I = 19,7 \cdot 552 \cdot 10^{-6} = \mathbf{10,8 \text{ mW}}$$

On peut remarquer que cette valeur se rapproche de la puissance nominale du moteur : 20 mW. Ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur, la différence expliquant la faible vitesse de rotation du moteur On note ainsi un facteur de charge de : $10,8/20 = 54 \%$.

➤ Calcul des rendements :

Électrolyseur :

Pour le rendement volumique, on calcule le volume théorique de dihydrogène produit pendant 11 min 11s à l'aide de la formule de faraday.

$V_{H_2} = \frac{R \times I \times T \times t}{F \times P \times 2}$	R = 8,314 J/mol/K	I = 164 mA	T = 296 K
	t = 671 s	F = 96 485,3365 s.A/mol	P = 10 ⁵ Pa

Ainsi, $V_{\text{théorique}} = 28,16 \text{ cm}^3$

Pour le même intervalle de temps, on mesure le volume de dihydrogène produit : On obtient $V_{\text{expérimental}} = 14 \text{ cm}^3$

Le rendement volumique est donc : $\eta_{\text{volumique}} = V_{\text{expérimental}}/V_{\text{théorique}} = 49,7\%$

Pour le rendement énergétique, on compare l'énergie électrique obtenue avec l'énergie calorifique nette du volume de gaz produit. Cette énergie calorifique nette correspond à l'énergie thermique dégagée par la combustion du dihydrogène.

$\eta_{\text{énergétique}} = V_{\text{théorique}} \cdot H^{\circ} / U \cdot I \cdot t = 79,5\%$	$t = 671 \text{ s}$	$H^{\circ} = 10800 \text{ kJ/m}^3$	$U = 1,715 \text{ V}$	$I = 164 \text{ mA}$
---	---------------------	------------------------------------	-----------------------	----------------------

On peut remarquer que ce rendement est équivalent à bon nombre d'électrolyseurs du commerce.

Pile :

Comme pour l'électrolyseur, on peut définir un rendement volumique pour la pile :

$$\eta_{\text{volumique}} = V_{\text{théorique}} / V_{\text{expérimental}}$$

On calcule le volume théorique de dihydrogène consommé à l'aide de la formule de Faraday pour le temps de l'expérience. Le volume expérimental est le volume réel consommé par la pile pendant le temps de l'expérience. Les valeurs suivantes sont considérées pour une expérience de 3030 secondes.

Ainsi, on a $V_{\text{théorique}} = 8.39 \text{ cm}^3$

$$V_{\text{expérimental}} = 15 \text{ cm}^3$$

Ainsi, $\eta_{\text{volumique}} = V_{\text{théorique}} / V_{\text{expérimental}} = 56\%$

On peut également définir un rendement énergétique de la pile avec le rapport entre l'énergie calorifique emmagasinée par le dihydrogène et l'énergie électrique délivrée par la pile.

$\eta_{\text{énergétique}} = \frac{U \times I \times t}{V_{\text{H}_2} \times H^{\circ}}$	$U = 552 \text{ mV}$ $H^{\circ} = 10800 \text{ kJ/m}^3$	$I = 19,7 \text{ mA}$ $V(\text{H}_2) = 15 \text{ cm}^3$	$t = 3030 \text{ s}$
---	--	--	----------------------

Ainsi, $\eta_{\text{énergétique}} = 20\%$. Comme on peut le voir à l'aide de la formule le rendement de la pile à combustible dépend de la puissance. Ainsi, le rendement sera d'autant meilleur que la puissance délivrée par la pile est proche de sa puissance nominale disponible.

Enfin, pour vérifier la viabilité du système que nous avons à disposition, nous avons calculé le rapport entre l'énergie délivrée par le panneau solaire pour former un volume V de dihydrogène et l'énergie délivrée par la pile grâce à ce même volume V .

Ce rendement est donc (avec système = pile + électrolyseur) :

$$\eta_{\text{système}} = \frac{U_{\text{pile}} \times I_{\text{pile}} \times t_{\text{pile}}}{U_{\text{électrolyse}} \times I_{\text{électrolyse}} \times t_{\text{électrolyse}}}$$

Si on prend $V = 15 \text{ cm}^3$, $t_{\text{pile}} = 3030 \text{ s}$ et $t_{\text{électrolyse}} = 718 \text{ s}$ (on l'obtient par régression linéaire avec les données mesurées). Finalement, on a $\eta_{\text{système}} = 16 \%$. Cette valeur est nettement inférieure aux rendements de tels systèmes commercialisés qui affichent des rendements allant de 30 à 50 %.

Ce résultat est tout de même à relativiser. Comme nous l'avons expliqué plus haut, nous n'avons pas atteint la puissance maximale que la pile pouvait fournir. Ainsi, le rendement calculé serait plus élevé dans ces conditions.

IV. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

➤ *Les avantages des PAC*

Les piles à combustibles présentent de multiples avantages par rapport à d'autres sources d'énergie et notamment par rapport à des énergies fossiles tels que le gaz ou le pétrole.

Tout d'abord les rendements de ce type de pile sont bien supérieurs à d'autres sources. Le rendement des PAC s'échelonne en effet entre 40 et 70% même pour des systèmes de petite taille. En comparaison, le rendement d'un moteur thermique ne dépasse pas 30%. Un autre avantage de taille est le fait qu'une pile à combustible ne rejette pas de gaz à effet de serre et ne pollue donc pas. Il faut toutefois remarquer que la production de dihydrogène nécessite de l'énergie et l'impact sur l'environnement des piles à combustible dépend justement de cette production. En effet, si le dihydrogène est produit à partir d'hydrocarbures, la pile polluera bien plus que si le combustible est produit par des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire par exemple. Les PAC sont également silencieuses et ne provoquent pas de vibrations à l'inverse d'une combustion par exemple. L'autre avantage des piles à combustible est que, contrairement aux énergies solaires ou éoliennes, le dihydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile peut être stocké, et donc utilisé en continu.

Du fait de tous ces avantages, les PAC font l'objet de recherches poussées pour réduire ou atténuer leurs défauts et permettre des applications industrielles.

➤ *Trois types d'applications*

Les applications des piles à combustible peuvent se diviser en trois branches distinctes :

- ❖ **Les PAC stationnaires** pour produire de l'électricité et de la chaleur pour les besoins d'une maison, d'un bâtiment, d'une entreprise ou d'un quartier. Le stationnaire est certainement le domaine où les avancées ont été les plus significatives. En effet, les PAC en question sont déjà à l'étape de la production industrielle et déjà des centaines de piles sont en service dans le monde. Le marché est actuellement dominé par deux entreprises américaines, UTC Power et FuelCell Energy. Les gammes de pile s'échelonnent de 1 à 7 kW pour la production individuelle et de 200kW à plusieurs MW pour la production collective ou industrielle. Pour ce type d'application, ce sont essentiellement les PEMFC, les MCFC et les SOFC qui sont utilisées.

Les piles à combustibles se montrent parfaitement adaptées à la production électrique pour les habitations car en plus d'un rendement électrique assez élevé, notamment par rapport aux centrales au fioul ou au charbon, il est possible de récupérer la chaleur dégagée durant la réaction pour chauffer l'eau ou l'air des logements. C'est ce que l'on appelle la cogénération. Ainsi le rendement des piles à combustible peut monter jusqu'à 80% voire 90%.

Les applications concrètes existent déjà. En 2000 par exemple, EDF a utilisé une PAC pour fournir en électricité et en chauffage un groupe HLM à Chelles (Seine et Marne) équivalent à une population de 200 personnes.

- ❖ **Les PAC embarquées** pour équiper des véhicules de tous types (automobiles, camions, engins spatiaux, ...).

Après avoir équipé certains engins spatiaux tels que les vaisseaux Apollo ou les navettes spatiales américaines, les PAC font l'objet d'intenses recherches pour l'embarquement sur des véhicules terrestres. De nombreux constructeurs ont d'ores et déjà présenté leur prototype, tous fonctionnant à l'aide de PEMFC. La société canadienne Ballard en collaboration avec l'allemand Daimler a lancé une expérimentation sur des bus fonctionnant à l'aide de PAC. Ces bus sont actuellement en service dans plusieurs villes canadiennes, américaines et européennes. D'autres constructeurs tel que Ford, GM, PSA ou encore Renault ont également créé leur prototype. Mais les recherches les plus poussées se tournent actuellement vers une motorisation électrique hybride fonctionnant à l'aide d'une batterie classique et d'une PAC (Fuel Cell Hybrid Vehicle), notamment avec Toyota. Le constructeur japonais a en effet sorti en 2005 un bus FCHV et en 2008 une voiture FCHV capable d'atteindre 155km/h et ayant une autonomie d'environ 830km.

Des recherches sont également menées pour équiper des sous-marins ou des bateaux à l'aide de piles à combustible. Par exemple, le sous-marin militaire allemand U32 est équipé d'un système de propulsion hybride diesel-PEMFC. Pour les applications sous-marines militaires, les PAC peuvent se montrer très intéressantes du fait de leur haut rendement et de leur silence lors du fonctionnement. Quelques sous-marins civils équipés de PAC ont également vu le jour (Urashima 600, Idefx). Au niveau des bâtiments de surface, de nombreux prototypes ont vu le jour à travers le monde (voilier, taxis, bateau à moteur, ...).

- ❖ **Les PAC de petites tailles** capables d'équiper des appareils portatifs tels que des téléphones mobiles, des baladeurs ou encore des ordinateurs portables.

Ce segment est d'autant plus prometteur que les technologies de batterie actuelles sont arrivées à maturité et qu'il paraît difficile d'en augmenter sensiblement les performances. Dans le même temps la demande pour une autonomie plus importante des téléphones mobiles et des ordinateurs portables ne cesse d'augmenter. Ainsi les PAC, semblent pouvoir fournir une réponse crédible à cette demande.

La solution qui semble à ce jour la plus crédible et celle qui est l'objet des plus sérieuses recherches : une micro-pile de type PEMFC ou DMFC couplée à une batterie Li-ion. La pile permettant de recharger la batterie. Ainsi on pourra recharger notre portable uniquement en changeant la cartouche de combustible, c'est à dire en quelques

secondes. L'autonomie devrait être également deux à trois fois plus importante entre deux recharges qu'actuellement.

➤ *Les inconvénients*

Malgré les nombreux avantages que nous avons vus, les piles à combustibles sont loin d'envahir notre quotidien et de devenir incontournables. Ceci s'explique notamment par tous les problèmes non résolus qui les empêchent d'être viables pour la production à l'échelle industrielle.

À ce jour, le premier défaut des PAC est le prix. En effet, la majorité des PAC font appel à des métaux précieux en tant que catalyseur, comme le platine par exemple. Certains composants comme les membranes ou les électrodes en graphite sont aussi très coûteux. La production de masse permettrait également de réduire les coûts de façon significative. Selon certains experts, ces problèmes de prix devraient être résolus d'ici une dizaine d'années.

La fiabilité et la durée de vie des piles à combustible sont deux autres défauts qui empêchent actuellement la production à grande échelle. En effet, actuellement la durée de vie des PAC n'est généralement de quelques milliers d'heures. Seulement, pour pouvoir être rentable, il faudrait que la durée de vie des appareils atteigne entre 20000 et 40000 heures. De plus, de nombreux types de PAC sont très sensibles aux impuretés (monoxyde et dioxyde de carbone par exemple). Ainsi, il est nécessaire d'avoir des combustibles très purs, ce qui est évidemment coûteux. En plus de la pureté, le combustible des PAC pose d'autres problèmes. Le premier d'entre eux est la dangerosité. En effet, le dihydrogène est extrêmement inflammable et ceci est bien évidemment un frein à l'industrialisation des PAC. Enfin, la production du dihydrogène est également problématique. Même s'il est possible de produire du dihydrogène par électrolyse de l'eau, il faudrait de grandes quantités de courant pour une production de masse. Une technique plus applicable est d'obtenir du dihydrogène à partir d'hydrocarbure. Or ceci est contraire à l'objectif des PAC de devenir une alternative aux énergies fossiles. Une dernière technique serait l'utilisation de réacteurs nucléaires faisant intervenir à haute température deux réactifs contenant de l'hydrogène. Ainsi, on voit qu'avant de devenir une réelle alternative aux énergies fossiles et polluantes, il faudra trouver des solutions applicables à tous ces inconvénients.

Conclusion finale

La pile à combustible est la base de beaucoup d'espoirs quant à l'indépendance énergétique vis-à-vis des énergies fossiles. Il en existe différents types adaptés à toutes les situations : certaines pour de grosses installations fixes, d'autres pour les véhicules et des plus réduites pour pouvoir équiper les appareils électroniques qui nous entourent.

Les progrès réalisés par l'industrie dans le développement de ces piles sont réels, malheureusement ils ne sont pas à la hauteur des exigences de notre société. Chacune des piles étudiées avaient leur propre force. Néanmoins, elles restent pour l'instant handicapées par des contraintes non négligeables telles que le coût du dispositif ou l'humidification de la membrane : des progrès sont donc encore à faire.

Dans le cadre de notre expérience nous nous sommes rendu compte que les rendements des piles à combustibles sont bons (jusqu'à 50%, comme pour un module photovoltaïque), mais leur utilisation reste limitée par les difficultés de stockage et la production du dihydrogène nécessaire à leur fonctionnement.

Le dispositif que nous avons étudié produit lui-même son dihydrogène, ce qui le rend autonome. Malheureusement, cette autonomie implique de grandes pertes d'énergies avec le panneau solaire et l'électrolyse, rendant ce système difficile à utiliser à cause de son mauvais rendement.

L'un des grands espoirs de l'industrie automobile pour contrer ce type de problème est la création de « galettes » de dihydrogène dans des usines ultra performantes. Cela permettrait d'obtenir des rendements attrayants pour les investisseurs ainsi que procurer plus de sécurité aux utilisateurs : rappelons le, le dihydrogène est un gaz explosif or ces galettes ne sont pas inflammables. Mais pour que cela soit possible, il va falloir améliorer les méthodes de production du dihydrogène. Cela met en évidence le point commun de toute cette filière énergétique : ses débouchés sont infinis à la condition de nets progrès technologiques dans le domaine.

Conclusions personnelles :

Geoffroy Bercy :

De mon point de vue, ce projet de P6 est une très bonne expérience. Il a tout d'abord été l'occasion de travailler une fois de plus en groupe, un mode de travail auquel nous seront confrontés dans la vie active. L'entente a été parfaite au sein du groupe et l'ambiance très agréable. Tous les membres du groupe ont été impliqués, travailleurs et sérieux pour mener ce projet. L'organisation était également plutôt bonne. Les tâches de chacun ont été bien définies et nous nous y sommes tous tenus parfaitement.

En ce qui concerne le projet à proprement dit, il m'a particulièrement intéressé. Je connaissais simplement le principe général des PAC et ce projet a donc été très instructif. J'ai pu découvrir tous les types de PAC, leur fonctionnement précis et leurs applications. Ce projet m'a d'autant plus intéressé que le problème environnemental et la question de la production énergétique sont des sujets qui me passionnent et me tiennent à cœur. Ce projet est donc en tout point une très bonne expérience.

Pierre Quinio:

Avant de commencer ce projet de physique je n'avais que peu de connaissances concernant les piles à combustibles. Cela se limitait en fait à savoir qu'elles étaient une source alternative d'énergie prometteuse, voire même miraculeuses, sans pour autant savoir comment elles fonctionnaient réellement.

De ce fait, ce projet m'a permis d'approcher et de comprendre l'une des énergies du futur que nous allons être amené à côtoyer. Aimant comprendre les choses qui m'entourent, ce fut un réel plaisir de devoir jongler entre physique et chimie en passant par la thermodynamique tout au long de ce projet: cela m'a permis de donner un sens à beaucoup de choses apprises depuis que je suis à l'INSA. Enfin, la possibilité d'apprendre une nouvelle fois à travailler en groupe fut réellement gratifiante et me sera, j'en suis sûr, bénéfique dans ma vie professionnelle.

Sébastien Surbled:

Au début du projet, je n'avais que peu d'idées de ce qu'était une pile à combustible. Grande fut ma surprise lorsque j'ai appris toutes les possibilités d'applications de notre dispositif ! Elles sont de ce fait indénombrables, car les piles à combustibles sont l'avenir des énergies renouvelables. La production d'électricité et de dihydrogène sera indispensable, ne serait-ce déjà que pour les moteurs à hydrogène. Mon seul regret à propos de ce projet est l'efficacité du dispositif : le fait que le panneau solaire génère plus d'électricité que la pile à combustible a été pour moi assez décevant.

Ce projet m'a d'autre part permis d'approfondir mes connaissances en chimie, en thermodynamique et de découvrir le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. J'ai également pu améliorer ma capacité à travailler en groupe, et cela ne m'en sera que bénéfique.

Elsa Bedu:

J'ai trouvé très intéressant de travailler sur la pile à combustible car c'est réellement un sujet au cœur de l'actualité et qui tend à résoudre l'une des plus grande problématique de notre monde : trouver une source alternative d'énergie, et qui plus est non polluante. Mes connaissances sur le sujet, à l'origine, étaient néanmoins plutôt maigres. J'ai donc été très heureuse de pouvoir me familiariser avec le fonctionnement d'une pile à combustible, d'en découvrir ses constituants et ses applications. D'autre part j'ai également pu élargir mes connaissances sur les panneaux solaires et le fonctionnement d'une électrolyse. L'étude du fonctionnement d'une pile H₂ a été d'autant plus intéressante, à mon sens, qu'elle a été accompagnée d'expériences sur un petit dispositif, ce qui nous a réellement permis d'ajouter une notion pratique à nos connaissances théoriques. On pourra néanmoins regretter une chose sur ce point : le fait que nous n'ayons pas réussi, lors de notre deuxième expérience, à observer de nous-même l'augmentation de la tension aux bornes de la pile jusqu'à obtention d'un potentiel suffisant pour actionner l'hélice.

Pour finir, j'ai trouvé que le travail de groupe s'est particulièrement bien déroulé. En effet, nous avons su nous fixer des objectifs d'une séance à l'autre et se répartir le travail. En définitive, ce projet aura été très instructif, sur un point de vue scientifique mais également personnel.

Adrien Golli :

Ce projet physique a été l'occasion de travailler à plusieurs sur un même sujet tout au long de ce semestre. Les deux aspects les plus enrichissants auront été incontestablement de découvrir le fonctionnement d'une pile à combustible mais aussi de mener à bien ce projet à travers le travail d'un groupe investi de bout en bout. Si l'on regarde quelques mois en arrière il est intéressant de voir que le principe même du fonctionnement d'une pile à combustible m'était totalement inconnu. Ne parlons même pas des différents types de pile à combustible qu'il existe, je pensais qu'il n'existait qu'un seul type de dispositif. A la relecture de notre rapport, je me rends maintenant compte du chemin qui a été parcouru et de la quantité impressionnante de connaissances auxquelles j'ai pu accéder grâce à ce projet. Par ailleurs, la méthode de travail, l'organisation du groupe, l'échange continu et les initiatives de chacun au fil du semestre sont autant d'éléments qui m'ont permis d'emmagasiner de manière progressive de l'expérience : être capable de cerner les aspects clés ensemble ou encore échanger à la moindre incertitude pour dissiper tout doute ou problème sont des éléments essentiels à la formation d'un ingénieur et qui nécessitent donc d'être appréhendés le plus tôt possible.

En définitive, outre les compétences et les connaissances acquises grâce à ce projet, je conserverai la satisfaction d'avoir été dans un groupe sérieux, organisé et investi du début à la fin.

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet utilisés :

Médiapart. *De l'hydrogène renouvelable au méthane renouvelable.* <<http://blogs.mediapart.fr/blog/jean-lucien-hardy/180214/de-lhydrogene-renouvelable-au-methane-renouvelable>>

CEA. *Animation expliquant le principe et le fonctionnement d'une pile à combustible* <<http://www.cea.fr/var/cea/storage/static/fr/jeunes/animation/aLaLoupe/Pile/pile.swf>>

Wikipédia. *Pile à combustible.* <fr.wikipedia.org/wiki/Pile_à_combustible>

Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles <www.afhypac.org>

LENNTECH *L'électrolyse* <<http://www.lenntech.fr/electrolyse.htm>>

CNRS. *Principe de l'électrolyse* <<http://www.cnrs.fr/cnrsimages/chimieaulycee/THEMES/electrolyse/principe.htm>>

EDF ENR. *Les types de panneaux solaires.* Disponible sur : < <http://www.edfenr.com/le-photovoltaique/types-de-panneaux-solaires-n798-1.aspx> > (consulté le 19 mai 2014).

Groupe ALCEN. *Solaire photovoltaïque.* <<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>> (consulté le 22 avril 2014)

Association HESPUL. *Rendement d'un système photovoltaïque.* <<http://www.photovoltaique.info/Rendement-d-un-systeme.html>> (consulté le 19 mai 2014).

Estimer la production. <<http://www.photovoltaique.info/Estimer-la-production.html>>

EcologieShop. *Le rendement d'un panneau photovoltaïque.* <<http://www.ecologie-shop.com/conseils/fonctionnement-d-un-panneau-photovoltaïque-le-rendement-dun-panneau-photovoltaïque-25>> (consulté le 19 mai 2014).

Futura Sciences *La pile à combustible* <<http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/energie-renouvelable-pile-combustible-3652/>>

Fichiers PDF :

<www.alpea.com/upload/e8405_piles_combustible.pdf>

<https://moodle.umons.ac.be/pluginfile.php/5918/mod_resource/content/1/piles_a_combustible.pdf>

<http://www.alpea.com/upload/e8405_piles_combustible.pdf>

<http://www.afhypac.org/images/documents/fiche_5.2.1_les_pac_rev.mars_2013.pdf>

<https://moodle.umons.ac.be/pluginfile.php/5918/mod_resource/content/1/piles_a_combustible.pdf>

Document :

Modèle pédagogique *Pile à combustible PEMPower 1-Eco.*

ANNEXE

Journal de bord

Séance 1 : 03/02

Début de notre journal de bord:

- familiarisation avec le principe photovoltaïque et le fonctionnement d'une pile à combustible.
- prise de connaissance du rapport de l'année précédente.
- problématisation globale du sujet.

Pour la prochaine séance, nous essaierons d'être au point sur tous les types de piles à combustible existants et leur fonctionnement théorique.

Séance 2 : 10/02

Voici la suite de notre journal de bord.

- Nous avons planifié notre projet (voir le plan ci-joint)
- Nous nous sommes répartis les tâches
- On a saisi les enjeux du sujet

Prévisions pour la semaine prochaine:

- Recherche d'une problématique détaillée par chacun, mise en commun et délibération
- Découverte du fascicule détaillé du projet
- Approfondissement de la théorie

Séance 3 : 17/02

- Mise en commun des problématiques
- Délibération de la problématique:

"Dans quelle mesure la PAC est-elle actuellement un enjeu du développement durable?"

- Première lecture du dossier fourni sur la PAC
- Recherche sur le principe de la pile appliqué à notre système
- Étude de la première loi de Faraday (rendements électrolyse) et compréhension de la partie rendement photovoltaïque sur dossier
- Le plan a été détaillé pour pouvoir répartir le travail pendant les vacances
- Le dossier va être numérisé pour pouvoir l'étudier personnellement

Pour les vacances : début du rapport

Séance 4 : 10/03

Voici ce que nous avons fait ce jour:

- * prise de connaissance du dispositif
- * mise en commun du travail réalisé pendant les vacances

- * révision du plan
- * définition du travail à effectuer pour la semaine prochaine

Nous avons également convenu d'une date pour une première manipulation, le mardi 18 mars à partir de 15h. Cela vous convient-il ? En conséquence notre objectif est de définir les manipulations et les mesures à effectuer ainsi que répondre aux questions qui ont pu être soulevées jusqu'alors.

Séance 5 : 17/03

Voici ce que nous avons fait ce jour:

- * Nous avons défini un intervalle d'ensoleillement (nous travaillerons avec un éclairage d'environ 500W/m²)
- * Nous avons également rédigé le protocole de l'expérience qui sera réalisée le lendemain (le 18/03)
- * Nous avons étudié minutieusement le dossier
- * Nous nous sommes familiarisé avec le solarimètre

Pour la semaine prochaine, nous définirons nos objectifs en fonction des résultats de demain (le 18/03)

Séance 6 : 24/03

Aujourd'hui :

- Nous avons rédigé un compte rendu de l'expérience effectuée la semaine précédente, pour en tirer toutes les conclusions nécessaires.
- Nous avons effectué quelques applications numériques à propos du rendement de l'électrolyseur et de la pile, ainsi qu'une étude approfondie de la loi de Faraday.
- Nous avons été sensibilisé au phénomène de polarisation.

La séance prochaine :

- Nous trouverons un créneau pour effectuer la seconde manipulation.
- Nous continuerons de rédiger le dossier.

Séance 7 : 07/04

Aujourd'hui :

- nous avons finalisé le compte rendu de l'expérience qui a été réalisée afin de préparer la prochaine expérience (qui a par ailleurs été fixée au mardi 6 mai à 14h)
- nous avons effectué plusieurs modifications sur le plan et la répartition des tâches
- au cours de nos recherches nous avons trouvé d'autres sites et documents utiles à la rédaction du dossier, notamment à propos des rendements et de la polarisation de la membrane.

La séance prochaine :

- mise en commun des avancées de chacun sur le dossier
- préparation d'un protocole détaillé pour la prochaine expérience

Séance 8 : 14/04

Aujourd'hui :

- nous avons mis en commun les avancées de chacun sur le dossier.- nous avons préparé un protocole détaillé pour l'expérience du mardi 6 mai.
- nous avons réparti le travail à faire pendant les vacances.

Séance 9 : 05/05

Aujourd'hui :

- préparation de l'expérience de demain;
- homogénéisation, explication du travail effectué par chacun au cours des vacances afin de s'assurer du bon avancement du dossier;

Demain : réalisation de l'expérience en suivant le protocole réalisé avant les vacances.

Semaine prochaine : exploitation des résultats de l'expérience et début de la phase de finalisation de la partie théorique du dossier.

Séance 10 : 12/05

Comme prévu, nous avons exploité les résultats de la dernière manipulation et réalisé le compte rendu de cette manipulation en y intégrant les calculs de rendements du dispositif. Par ailleurs, nous avons mis en commun le travail réalisé jusqu'ici pour notre dossier afin de cibler les derniers éléments à parachever.

Semaine prochaine : finalisation du dossier et rédaction de la conclusion et préparation de notre soutenance orale.

Séance 11 : 19/05

Aujourd'hui, nous avons rédigé la conclusion finale de notre projet et procédé à la relecture du rapport en ajoutant des transitions et en modifiant quelques aspects afin de faciliter la compréhension.

Semaine prochaine : remise du rapport et préparation de notre soutenance orale.

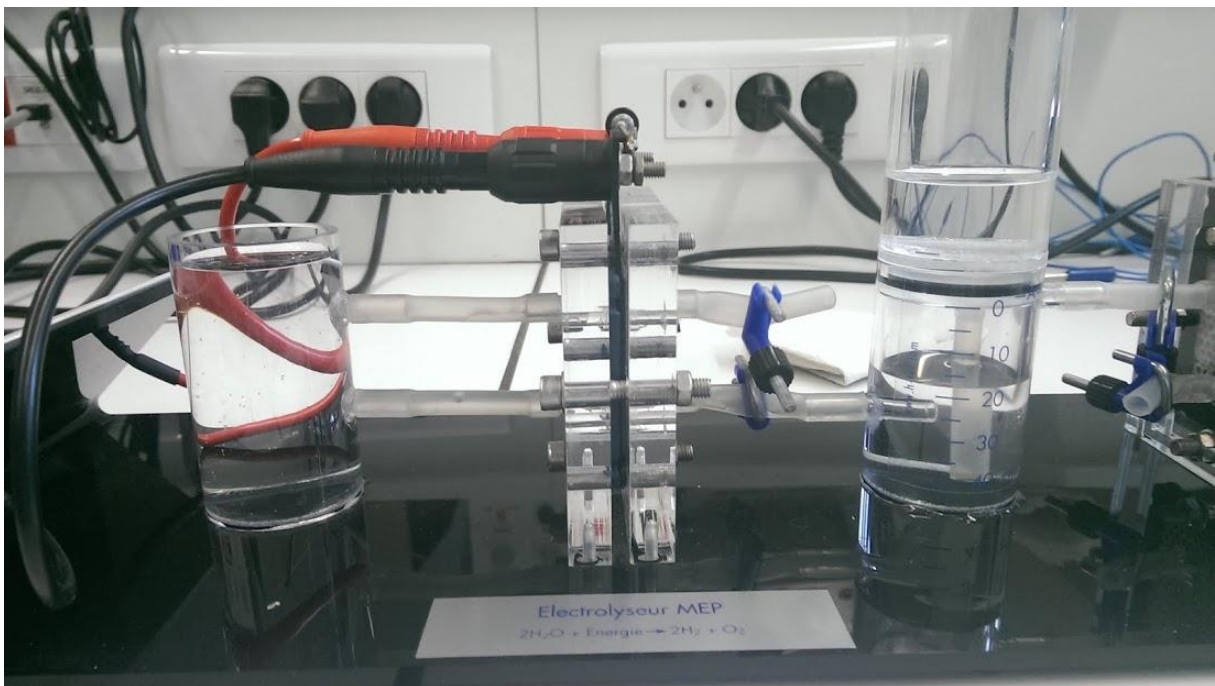
Séance 12 : 26/05

Aujourd'hui, nous avons rendu le dossier et, au cours de la séance, nous avons abordé les sujets et les éléments que nous présenterons lors de notre soutenance orale. Pour la semaine prochaine, nous prévoyons d'avancer le diaporama.

Séance 13 : 02/06

Aujourd'hui, nous avons pris en note les remarques que vous nous avez faites à propos de notre rapport afin d'en tenir compte et de réaliser certaines modifications (précisions, corrections, ...). Dans le même temps nous avons essayé de définir les aspects qui seront abordés lors de notre soutenance. Initialement nous projections de proposer une explication du fonctionnement avant d'aborder des dispositifs réels, c'est à dire proposer une vision plus large de la problématique. Cependant, comme vous nous l'avez indiqué il faut s'en tenir aux aspects abordés dans le dossier et nous avons donc redéfini le plan de la présentation.

Photos réalisées lors de la seconde expérience :



Données de l'expérience réalisée par M. Abdul Aziz

Heure	Temps (minutes)	Tension de la PAC en mV
8h50	0	85
9h02	12	106,5
9h12	22	134,5
9h23	33	171,5
9h32	42	201,4
9h48	58	236,1
9h54	64	253,6
10h13	83	290,8
10h27	97	311,1
10h37	107	326,5
10h48	118	339,8
10h58	128	350,6
11h11	141	365,4
11h23	153	377,7
11h39	169	412

