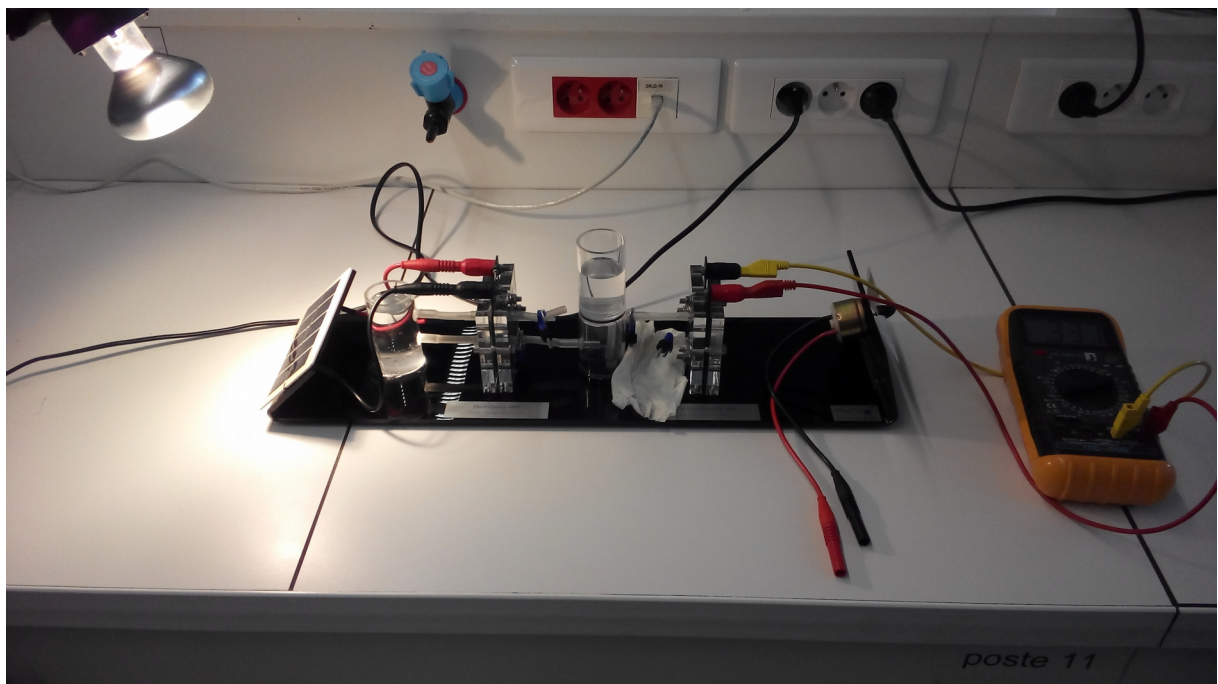


Projet de Physique P6
STPI/P6/2015 – 2016

Pile à combustible et production d'hydrogène à partir d'un panneau solaire.



Etudiants :

Mathilde JEMELEN

Marina JAMAR DE BOLSEE

Mélodie BOILLET

François BRUN

François PAILLART

Enseignant-responsable du projet :

J. ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : **13/06/2016**

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – 2016**

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

Type de projet : ***Théorique et expérimental.***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Les objectifs du projet sont de découvrir les piles à combustible à travers leur fonctionnement mais également leur histoire, les différents types qui existent et leur avenir dans la société. De plus, nous avons mis en pratique ce que nous avons appris durant des expériences réalisées pendant ce projet. Ainsi, nous avons pu vérifier certains faits théoriques rencontrés lors de nos recherches.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : ***pile à combustible, hydrogène, énergie***

TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	7
2. Organisation du travail.....	8
3. Généralités sur la pile à combustible.....	8
3.1. Production de l'hydrogène.....	8
3.1.1. Les types de production actuels.....	8
3.1.2. Vers une production en accord avec l'environnement.....	9
4. Théorie de la pile à combustible.....	10
4.1. Principaux constituants.....	10
4.1.1. Le cœur de la pile.....	10
4.2. Principe d'une pile à combustible.....	12
4.3. Les différents types de piles.....	15
4.3.1. Tableau récapitulatif des différentes piles à combustible existantes.....	15
5. Applications des piles à combustible et innovations.....	17
5.1. Applications actuelles.....	17
5.1.1. Le transport (alimentation principale).....	17
5.1.2. Les APU (alimentation auxiliaire).....	18
5.1.3. Le stationnaire.....	19
5.1.4. Le portable.....	20
5.2. Problèmes et limites rencontrés actuellement.....	20
5.3. Nouveautés et applications futures.....	21
6. Expériences.....	24
6.1. Présentation du montage.....	24
6.2. Protocole et réalisation de l'expérience.....	25
6.3. Résultats de l'expérience et exploitation.....	26
6.3.1. Résultats.....	26
6.3.2. Étude de l'électrolyse.....	27
6.3.3. Etude de la pile à combustible.....	28
7. Conclusions et perspectives.....	29
8. Bibliographie.....	30

8.1. Livres.....	30
8.2. Liens internet.....	30
9. Annexes	32
9.1. Histoire de la pile à combustible.....	32
9.1.1. Les débuts de la production d'hydrogène.....	33
9.2. Les différents accessoires.....	34
9.3. Les différents types de piles.....	35
9.3.1. Pile à combustible à hydrogène.....	35
9.3.2. Pile à combustible au méthanol.....	36
9.3.3. Pile à combustible à l'éthanol.....	37
9.3.4. Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC).....	37
9.3.5. Pile à combustible alcaline (AFC).....	38
9.3.6. Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC).....	38
9.4. Carnet de bord.....	40
9.5. Répartition du travail.....	41
9.6. Conclusions personnelles.....	41
9.7. Table des illustrations.....	42

NOTATIONS, ACRONYMES

PAC : pile à combustible

PEMFC : pile à membrane échangeuse de protons

DMFC : pile à alimentation directe en méthanol

PAFC : pile à acide phosphorique

AFC : pile alcaline

MCFC : pile à carbonates fondus

SOFC : pile à oxydes solides

EnR : Energies renouvelables

1. INTRODUCTION

Notre civilisation, en constante augmentation et modernisation, a besoin de plus en plus d'énergie pour se développer et assurer son autonomie. Cependant, cette énergie doit répondre à plusieurs critères. Elle doit être abondante, facile et rapide à utiliser, avec un coût de production et d'utilisation peu élevé, et bien sûr renouvelable.

Ainsi, depuis plusieurs années, la recherche énergétique est devenue un sujet de préoccupation majeur. De ce fait, la pile à combustible attire de plus en plus les regards (elle ne rejette que de l'eau...)

Une pile à combustible est un système dans lequel l'énergie chimique d'un composé est convertie directement en énergie électrique et thermique. On peut donc parler de générateur électrochimique d'énergie et non de source d'énergie. Cette pile utilise comme réactifs des combustibles (comme l'hydrogène et l'oxygène) pour ne produire que de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. On comprend tout de suite l'intérêt de cette technologie... Cependant, pour que cette pile réponde au critère lié à l'environnement, il faut que l'hydrogène soit produit de manière propre. En effet, le dihydrogène est considéré comme un vecteur énergétique (moyen de transporter de l'énergie d'un endroit à un autre), mais à l'inverse de l'oxygène (très présent naturellement dans l'atmosphère), ce dernier doit être produit... ce qui pose plusieurs problèmes (voir plus loin). Le dihydrogène est alors un moyen pour stocker de l'énergie qui pourra ensuite être convertie en électricité ou sous une autre forme en cas de besoin.

La pile à combustible se différencie d'une batterie. En effet, contrairement à une batterie, il est possible de modifier la quantité des réactifs au sein d'une pile puisque le système est "ouvert". Ainsi, l'énergie produite par une pile n'est pas constante car dépendante des quantités de réactifs utilisées.

De plus, la pile requiert un grand nombre d'accessoires pour fonctionner comme un détendeur ou un système de refroidissement, alors que la batterie se suffit à elle-même. Par ailleurs, on peut noter que les électrodes d'une pile à combustible ne sont pas consommées à la différence des électrodes des batteries.

Dans la réalisation de ce projet, nous nous sommes fixés les objectifs suivants : Tout d'abord, par les recherches, avoir une idée claire du fonctionnement d'une PAC et des principes physiques qui y sont mis en jeu. Nous voulions aussi nous faire une idée sur les différentes technologies de PAC existantes, ainsi que sur leurs usages dans le monde. Ensuite, par l'expérience, nous voulions réussir à faire fonctionner une pile à combustible, et vérifier par une série de mesures quelques données théoriques sur ce dispositif.

En réalisant ce sujet, nous voulions également développer nos capacités de travail en groupe, ainsi que nos capacités de recherche et de synthèse en travaillant sur un sujet vaste.

2. ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour les recherches théoriques, nous avons plusieurs parties conséquentes à développer : la théorie sur le fonctionnement de la pile à combustible, les différents types existants, son utilisation actuelle, ses limites, etc... Nous nous sommes donc répartis en 3 groupes (souvent deux personnes) : chaque groupe travaillait pendant une semaine sur une partie précise, et à la séance suivante les parties étaient échangées. Au fil des semaines, une partie passait donc d'un sous-groupe à l'autre jusqu'à ce qu'elle soit finie. Cette manière de travailler nous permettait de relire ce que nous faisons respectivement, de le compléter, mais également d'avoir une connaissance globale du sujet . Ainsi, nous évitions que chacun ait une "partie de spécialité" tout en n'ayant que de vagues notions sur les autres.

Lors des séances, nous travaillions sur ce que nous avons à faire, mais surtout nous nous coordonnions et décidions ensemble des changements à apporter dans la structure du rapport (ce qui arrivait lorsque, par exemple, nous découvrions de nouveaux axes de recherche).

C'était aussi lors des séances que nous faisons la majorité du travail de relecture. Plusieurs fois, nous fîmes des groupes de 3 personnes pour travailler sur une seule partie car elle nécessitait plus de travail, ou au contraire d'une seule personne car il restait peu d'éléments à traiter.

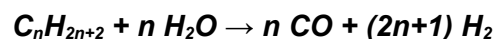
3. GÉNÉRALITÉS SUR LA PILE À COMBUSTIBLE

3.1. Production de l'hydrogène

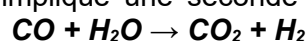
Pour fonctionner, une pile à combustible nécessite généralement deux combustibles : le dioxygène et le dihydrogène . Cependant, celui-ci n'existe qu'avec de l'oxygène (H₂O), du soufre (H₂S) et du carbone. Le dihydrogène n'existe donc pas à l'état natif, c'est pourquoi, on doit le produire. Il existe de nombreuses méthodes de production qui ont évolué au cours du temps. Il peut par exemple être produit par décomposition (thermique ou électrochimique) des molécules grâce à une source d'énergie (solaire, éolien, fossile combustible, etc...).

3.1.1. Les types de production actuels

On peut recenser diverses manières de produire de l'hydrogène comme, par exemple, le vapo-reformage du méthane. Cette technique consiste à soumettre un carburant gazeux (le méthane) à de la vapeur d'eau, pour réaliser différentes réactions chimiques (ces réactions se passent à très haute température, sous pression normale et en présence d'un catalyseur). La réaction générale est la suivante :



De plus, cette réaction en implique une seconde appelée réaction du gaz à l'eau (water gas schift) :



Ce mode de production de l'hydrogène représente 95 % de l'hydrogène produit car c'est le moins cher actuellement. Cependant, son impact environnemental est très important, tout comme les risques liés à la production (l'hydrogène est inflammable...). C'est pourquoi l'électrolyse de l'eau reste la meilleure technique actuelle, trouvant un bon équilibre en coûts et impacts sur l'environnement.

3.1.2. *Vers une production en accord avec l'environnement*

On remarque que la production d'hydrogène actuelle est polluante. C'est pourquoi les scientifiques travaillent sur divers procédés pour rendre cette production de plus en plus respectueuse de l'environnement.

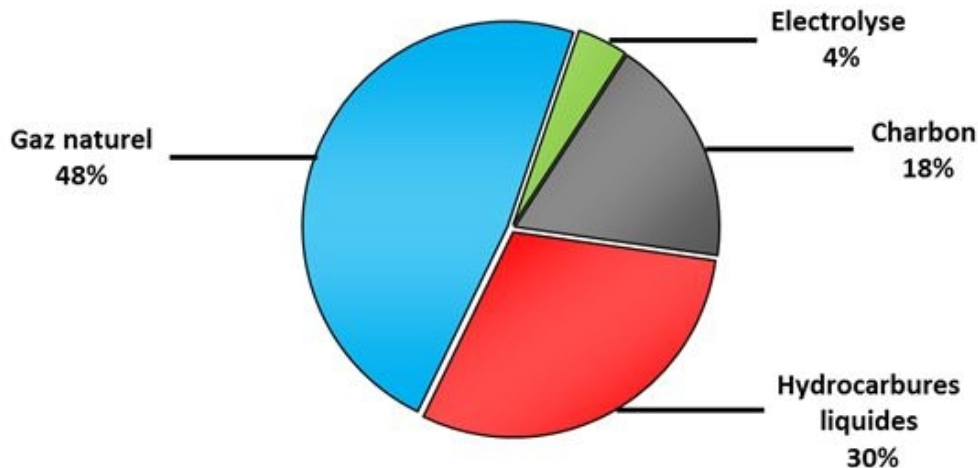
L'électrolyse reste une méthode utilisée uniquement dans quelques pays où l'électricité est bon marché. Pour que l'électrolyse soit en accord avec l'environnement, il faut que l'électricité provienne de sources propres. Il est par exemple possible de coupler la production d'hydrogène avec la production d'électricité réalisée grâce à des énergies renouvelables.

Une autre méthode pour bénéficier d'électricité naturelle serait d'utiliser la foudre. Le centre de recherche Tesla Research Facility envisage d'utiliser l'énergie électrique des éclairs captés au sommet de tours spéciales. Cette énergie serait ensuite délivrée vers des électrolyseurs, permettant ainsi de produire l'hydrogène. Cependant, cette méthode est en cours de recherche, et ce dispositif devra être implanté dans les endroits où les orages sont fréquents.

En France, au Commissariat de l'énergie atomique, la CEA, des études sur les plantes, et plus particulièrement les micro-organismes, sont en cours. En effet, les micro-organismes tels que les algues vertes et les cyanobactéries, lorsqu'ils sont en présence de lumière, rejettent du dihydrogène... L'eau absorbée par ces micro-organismes est décomposée, On parle de décomposition photo-biologique de l'eau. Cependant, cette production est très lente. Les scientifiques tentent donc de modifier le génome de ces espèces, afin qu'elles produisent plus de dihydrogène. Ainsi, grâce à l'exploitation de certaines espèces vivantes, la production d'hydrogène ne serait pas polluante puisqu'elle nécessite uniquement de la lumière du soleil, des micro organismes et de l'eau. Mais ce n'est encore qu'un projet.

Une autre méthode est la décomposition thermochimique de l'eau. Pour cela, il suffit d'utiliser une espèce chimique capable de réaliser des cycles, de l'eau et des outils optiques tels que des miroirs et des lentilles. Ces outils optiques auront pour but de concentrer les rayons lumineux dans un espace, ce qui aura comme conséquence d'augmenter la température dans cet espace.. Le but de cette méthode est de produire de l'hydrogène à partir d'un cycle thermochimique. Le cycle se déroule en plusieurs étapes : une espèce chimique (par exemple l'oxyde de zinc) passe dans le concentrateur solaire où il est chauffé à une température pouvant aller jusqu'à 2000°C. L'oxyde de zinc se décompose en zinc et oxygène. Le zinc, une fois refroidi, est mis en contact avec l'eau, et réagit avec celle-ci pour donner comme produits de l'oxyde de zinc et de l'hydrogène. Ainsi, c'est par l'exploitation d'une source de chaleur et d'une série de réactions chimiques que l'on peut obtenir de l'hydrogène. Dans notre cas, la source de chaleur est dite propre car non polluante mais on aurait pu aussi utiliser l'énergie des centrales nucléaires.

En somme, diverses méthodes sont aujourd'hui utilisées pour produire de l'hydrogène. Ces méthodes doivent faire face à plusieurs problèmes comme le rendement, la qualité de l'hydrogène ou encore les conséquences sur l'environnement.



Source : UFE selon données IFPEN

Illustration 1: Origines de production de l'hydrogène en 2011

4. THÉORIE DE LA PILE À COMBUSTIBLE

4.1. Principaux constituants

Une pile à combustible est composée d'un ensemble d'éléments que l'on peut regrouper en deux grandes parties : le cœur de la pile et les accessoires. On remarque tout d'abord que la pile ne possède aucune partie mécanique mobile. De ce fait, elle n'émet aucun bruit, ce qui en fait un avantage non négligeable.

4.1.1. Le cœur de la pile

Le cœur de la pile regroupe une succession d'« ensembles élémentaires » (ou « cellules élémentaires »). Un ensemble élémentaire est composé de :

- deux plaques bipolaires,
- deux électrodes, l'anode et la cathode, permettant la migration des espèces chimiques entre elles,
- un électrolyte séparant les deux électrodes : substance liquide ou solide conductrice d'ions, permettant la migration d'espèces ioniques
- de fils de conduction reliant les deux électrodes.

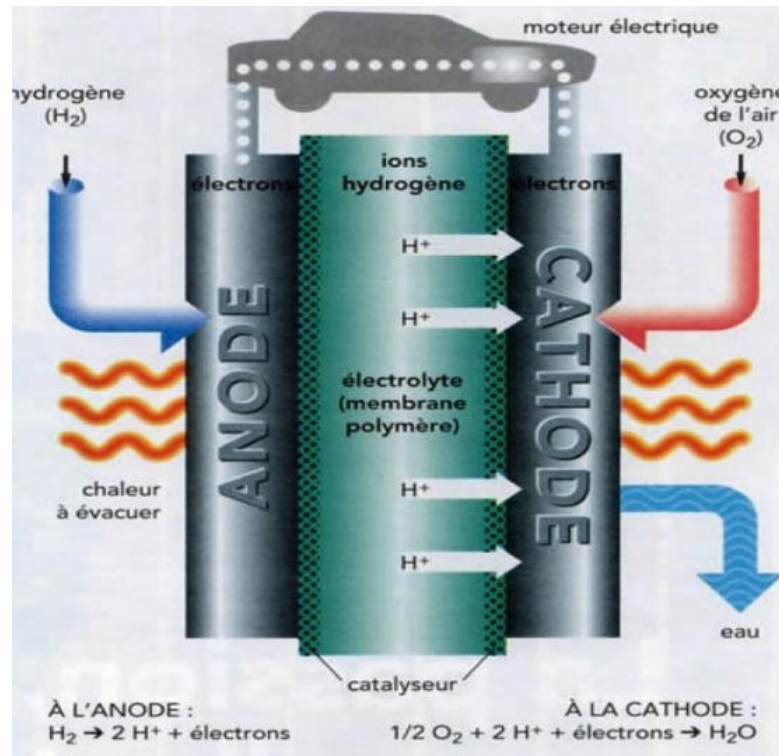


Illustration 2: Schéma d'un cœur de pile à combustible

Les deux plaques bipolaires forment la base extérieure d'un ensemble élémentaire. Ces plaques sont appelées bipolaires car elles permettent de relier le pôle positif d'une cellule et le pôle négatif de la cellule suivante. Elles ont plusieurs fonctions. Tout d'abord, elles doivent assurer le maintien des cellules élémentaires et les protéger de diverses contraintes extérieures comme d'éventuelles vibrations.

Ensuite, elles approvisionnent en gaz les électrodes. C'est pour cela que les plaques sont préalablement usinées pour laisser passer les réactifs à travers de petits canaux. Toutefois, le matériau des plaque doit être imperméables aux gaz pour qu'il n'y ait ni fuite, ni perturbation des réactions par l'air. Par ailleurs, les plaques bipolaires transmettent le courant électrique, et évacuent la chaleur produits au cours des réactions vers les autres ensembles élémentaires. C'est pourquoi le matériau qui compose les plaques (par exemple le graphite) doit posséder de bonnes conductivités électriques et thermiques.

Un peu plus au centre de l'ensemble élémentaire, on trouve les deux électrodes. Ce sont les supports des réactions chimiques. Les électrodes doivent être suffisamment grandes afin d'avoir une surface d'échange importante. Sur chaque électrode, on distingue deux zones, la zone de diffusion et la zone active :

- la zone de diffusion est constituée d'un matériau poreux aux gaz et à l'eau. Elle possède de très bonnes conduction thermique et électrique. Les réactifs traversent cette zone pour ensuite atteindre la zone active,

- la zone active est l'endroit où les réactifs et la membrane (électrolyte) se rencontrent. Lorsqu'il y a contact entre ces éléments, on parle de zone triple. C'est-à-dire que 3 éléments sont en contact : les électrons, un réactif et l'eau (ou encore l'électrode, l'électrolyte et un réactif). C'est également l'endroit où l'on place des particules catalytiques (généralement du platine) afin que la réaction se fasse à une vitesse acceptable.

Au centre même de la pile se situe l'électrolyte (membrane pour les piles de type PEMFC). C'est toujours un milieu conducteur de protons. Dans les PEMFC La membrane doit constamment être en présence d'eau puisque chaque proton, pour migrer, doit être entourés de 2 à 5 molécules d'eau . Les catalyseurs, ainsi que la température, ne jouent aucun rôle dans la réaction chimique au niveau de son équation, mais ont un impact sur la vitesse de réaction. En présence du platine, la vitesse de la réaction est multipliée par 10. De même, l'augmentation de la température favorise la conduction des protons. On peut ainsi faire varier le rendement...

Il faut cependant noter que la pile à combustible est constituée d'empilements de plusieurs cellules élémentaires reliés entre eux, appelés "Stack". Cependant, pour que la pile fonctionne, il faut ajouter différents équipements auxiliaires (voir annexe : les différents accessoires).

4.2. Principe d'une pile à combustible

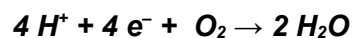
Le principe de fonctionnement d'une cellule de pile à combustible est le suivant : on a une oxydation sur l'électrode d'un combustible, associée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant. Ainsi, le fonctionnement de cette pile repose sur les réactions d'oxydoréduction. Elle fonctionne sur le principe inverse de l'électrolyse.. Les couples mis en jeu sont: H^+/H_2 et O_2/H_2O .

La borne négative est en contact avec l'arrivée de dihydrogène tandis que la borne positive avec celle du dioxygène. À la borne négative de la pile, appelée l'anode, a lieu la réaction d'oxydation suivante :

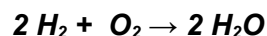


Les électrons éjectés par cette réaction passent dans l'électrode, et remontent le circuit de la borne négative vers la borne positive grâce aux fils conducteurs : il y a donc création d'un courant (que l'on va récupérer). Les ions H^+ passent à travers une membrane imperméable au dihydrogène qui n'est pas une espèce ionique), et sont conduits jusqu'à la cathode grâce à un électrolyte.

Les électrons et les protons sont ensuite captés au niveau de la borne positive (la cathode) et engendrent cette réaction de réduction d'équation :



Finalement, l'équation de la réaction d'oxydoréduction d'une PEMFC est :



C'est donc par le passage et le déplacement des électrons dans le circuit que du courant est généré.

Cependant, pour que le déplacement des H^+ soit possible, il faut que la membrane soit humidifiée. Comme mentionné plus haut, le transfert des protons est assuré par l'eau de la membrane et par l'action du champ électrique. Si la membrane est asséchée, les performances de la pile à combustible vont être réduites, et celle-ci peut même être dégradée irréversiblement. Cependant, Il ne faut pas qu'il y ait trop d'eau, autrement des gouttelettes noieraient les électrodes et bloqueraient l'arrivée des gaz.

On remarque que la pile à combustible, ne rejetant que de l'eau, peut être considérée comme un générateur complètement propre. De plus, les réactifs sont l'oxygène (qui peut

être celui de l'air) et du dihydrogène. En conclusion, la pile à combustible est un système propre favorable au développement durable.

Par ailleurs, la pile à combustible produit également de la chaleur. Cette chaleur peut être réutilisée pour alimenter un générateur thermique et ainsi augmenter le rendement du système. Un tel procédé produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur s'appelle la cogénération (voir la partie « applications-stationnaire »).

L'équation de Nernst permet de calculer la tension développée en fonction de la pression partielle des réactifs gazeux (l'hydrogène et l'oxygène) et des produits (ici l'eau), dans les conditions normales de température et de pression. Cette équation s'écrit de la manière suivante :

$$E = E^0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \frac{a_{\text{OX}}^x}{a_{\text{red}}^y}$$

Illustration 3: Équation générale de Nernst

La tension fournie à 25°C et 1 bar vaut environ 1.219 V, quand le courant circulant dans la pile est nul.

Au point de fonctionnement « nominal » (normal) de la pile , on a en général pour une cellule élémentaire de PEMFC : $V = 0,7$ et $I = 0,45 \text{ A/cm}^2$ (source [34])

Ce qui donne une puissance dégagée théorique de :

$$P = U \times I = 0,315 \text{ W}$$

On remarque alors que lorsque les pressions partielles augmentent, la tension fournie par la pile augmente logarithmiquement. Toutefois, lorsque la température augmente, la tension diminue...

Grâce aux équations de Nernst, on peut associer un potentiel théorique à chaque pile. Mais le potentiel réel d'une PAC est moins élevé que celui-ci, à cause de phénomènes produisant des pertes de tensions irréversibles. On appelle ces phénomènes des polarisations. Leur ampleur dépend directement de la densité de courant de la pile (généralement en A/cm^2). Il y en a 3 types dans la pile à combustible. Chaque type est dominant dans une certaine gamme de densité de courant (faible, moyenne et élevée) :

- Polarisation d'activation
- Polarisation ohmique
- Polarisation de concentration

On obtient donc l'expression suivante pour le potentiel réel d'une cellule de pile à combustible :

$$E_{\text{PAC}} = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{activation}} - \eta_{\text{ohmique}} - \eta_{\text{concentration}}$$

Pour la suite de ce paragraphe, on se basera sur une pile PEMFC.

Pour les faibles densités de courant (qui surviennent lors du “démarrage” des piles à combustible), la polarisation dominante est la polarisation d’activation. Elle a un profil logarithmique. Elle est due à la cinétique lente des réactions chimiques de transferts de charges, à l’interface électrode/membrane. La réduction de l’oxygène est la réaction la plus lente, surtout au niveau de la cathode.

Les énergies d’activation nécessaires au démarrage des réactions sont aussi responsables de cette polarisation. L’équation de Butler-Volmer permet de les relier à la densité de courant.

On rappelle l’équation d’Arrhenius :

$$k \text{ (constante de vitesse)} = A * \exp(-E_{activation} / RT)$$

La température étant un facteur cinétique de ces réactions, on peut diminuer ce phénomène en l’augmentant. Les catalyseurs (platine) augmentent la vitesse en diminuant l’énergie d’activation. On peut écrire cette formule pour calculer la polarisation d’activation :

$$\eta_{activation} = \xi_1 + \xi_2 * T + \xi_3 * T * \ln(CO_2) + \xi_4 * T * \ln(I_{PAC})$$

IPAC est le courant de fonctionnement, et les ξ des coefficients dépendant du type de pile utilisé. CO₂ correspond à la concentration en O₂ au niveau de la zone triple de la cathode, où il se trouve dissout dans un film d’eau.

Pour les densités de courant moyennes, qui correspondent souvent au régime normal de fonctionnement, c’est la polarisation ohmique qui est la plus importante. La chute de tension provoquée par ce phénomène est linéaire, en relation directe avec la densité de courant, car elle est provoquée par les résistances électriques des éléments des cellules. Elle peut donc s’exprimer avec la loi d’Ohm :

$$\eta_{ohm} = I_{PAC} * (RM+RC)$$

On doit distinguer la résistivité électronique (résistance à la conduction des électrons), et la résistivité ionique (résistance à la conduction des ions). RC est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons (pour la cellule entière), tandis que RM est la résistance de la membrane à la conduction des protons, qui est importante. Elle augmente avec le manque d’eau et les faibles températures, ce qui justifie l’humidification de la membrane (et les fortes températures de certaines PAC). Elle peut être calculée ainsi :

$$r_{memb} \text{ (Ohm.cm}^2\text{)} = e_{memb} / \sigma_{memb}$$

avec e l’épaisseur et σ la conductivité de la membrane en S.cm⁻¹.

Enfin, si de hautes densités de courant sont appliquées à la pile, la polarisation de concentration est dominante. Avec la formule du potentiel de Nernst, on voit que le potentiel à l’équilibre dépend des concentrations des réactifs, et notamment de la pression partielle en dioxygène (PO₂). Si ces dernières baissent, le potentiel diminue. Les PAC ont un débit en gaz limité, qui limite donc la consommation des réactifs : à partir d’une certaine quantité de courant demandée (I_{max}), l’alimentation en dioxygène devient insuffisante et le potentiel s’effondre. On peut écrire :

$$\eta_{concentration} = -B * (1 - J/J_{max})$$

B est une constante empirique (trouvée par l'expérience) qui dépend de l'état de fonctionnement de la pile et de sa nature. J est la densité de courant de fonctionnement permanent, et J max la densité de courant maximale de la pile.

Pour une PEMFC, on obtient ce type de diagramme (chaque partie de courbe différente est due à l'une des 3 polarisations) :

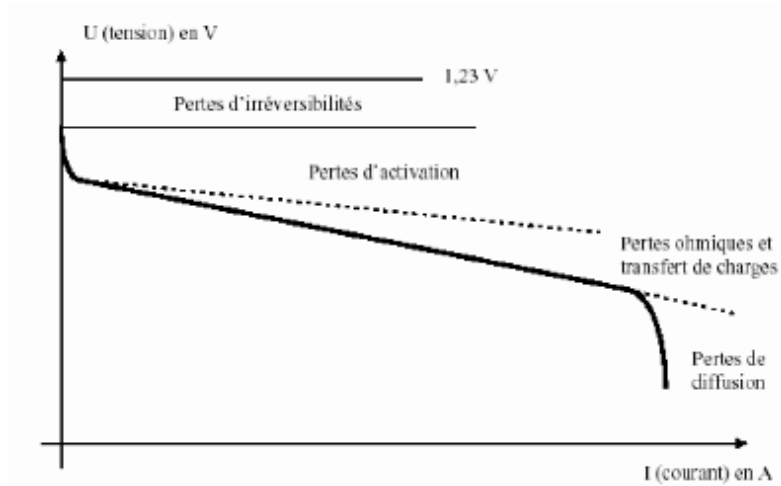


Illustration 4: Diagramme

4.3. Les différents types de piles

Il existe différents types de piles à combustible. Chacune d'elle présente divers avantages et inconvénients (voir annexe).

4.3.1. Tableau récapitulatif des différentes piles à combustible existantes

Type de PAC	Electrolyte	Combustibles	Ions	Combustants	Température	Applications	Inconvénients
Pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC)	Membrane polymère solide	H ₂	H ⁺	O ₂ (ou air)	60°C	Transport Stationnaire Portable	Coût des catalyseurs Membrane humidifiée Gestion de l'eau formée
Pile à alimentation directe en méthanol (DMFC)	Membrane polymère	CH ₃ OH	H ⁺	O ₂ (ou air)	110°C	Transport Stationnaire Portable	Coût des catalyseurs Production CO ₂ Gestion de l'eau formée Faible rendement
Pile à acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique	H ₂	H ⁺	O ₂ (ou air)	200°C	Stationnaire	Électrolyte corrosif Coût des catalyseurs Maintient température à 200 degrés Celsius
Pile alcaline (AFC)	Hydroxyde de potassium	H ₂	OH ⁻	O ₂ (ou air)	80°C	Transport	Système complexe pour la gestion de l'électrolyte Utilisation de l'H ₂ et l'O ₂ purs
Pile à carbonates fondus (MCFC)	Carbonates de métaux alcalins	H ₂	(CO ₃) ²⁻	O ₂ (ou air)	650°C	Stationnaire	Gérer électrolyte corrosif Long temps démarrage Faible densité courant
Pile à oxydes solides (SOFC)	Céramique	CO, CH ₄ , H ₂	O ²⁻	O ₂ (ou air)	1000°C	Stationnaire Transport	Electrolyte corrosif Long temps de démarrage Coût des constituants

5. APPLICATIONS DES PILES À COMBUSTIBLE ET INNOVATIONS

5.1. Applications actuelles

La pile à combustible est déjà utilisée dans différents domaines . Ses avantages en font souvent une alternative aux piles et batteries : au niveau énergétique, une PEMFC stocke 3 fois plus d'énergie qu'une batterie Li-ion. Elle a généralement une durée de vie plus longue, une bonne autonomie, elle se recharge plus vite, et surtout elle ne se décharge pas en dehors de l'utilisation.

Les PAC ont également d'autres avantages pratiques : certains types peuvent supporter de fortes variations de pression et de température. Leur masse générale reste faible, et enfin elle produisent de l'énergie de manière moins polluante.

On peut définir 4 grands domaines d'applications pour les piles à combustibles: les applications dans le domaine des transport (terrestre, maritime et aéronautique), des APU, dans le domaine du stationnaire, et dans le domaine des engins portable.

5.1.1. *Le transport (alimentation principale)*

Concernant le domaine aérien, même si diverses expériences ont prouvé la possibilité de faire fonctionner des avions légers avec des piles à combustible (DLR, entreprise allemande, a fait voler en 2009 un tel appareil); et que des études sont toujours menées pour utiliser l'hydrogène comme carburant, l'utilisation des piles à combustible pour la propulsion d'engins aériens conséquents ne semble pas opportune.. Il faut savoir que l'utilisation du kérosène pour la propulsion des avions, en plus d'un meilleur rapport masse/puissance, bénéficie d'avantages économiques qui ne facilitent pas l'émergence de nouveaux modes de propulsion. De plus, les PAC offrent un rapport poids/puissance bien inférieur à ceux des carburants.

De même, les performances actuelles des PAC ne permettent pas encore d'envisager leur utilisation pour la propulsion principale de navires importants. Quelques études sont en cours (projets notables dans la marine de guerre américaine). Une telle alimentation est possible pour des petits bateaux, mais comme pour les avions il s'agit de marchés de niche, peu intéressants pour les industriels, où même les démonstrations de faisabilité se comptent sur les doigts de la main.

En revanche, les PAC interviennent de manière significative dans la propulsion de sous-marins. On les y utilise souvent pour leur autonomie supérieure à celle des batteries, leur meilleur rapport masse/énergie et leur fonctionnement plus discret. Depuis 1960, elles ont alimenté des sous-marins scientifiques comme militaires (notamment les sous-marins U31 utilisés par l'Allemagne).

C'est sans doute dans le domaine terrestre que la PAC aurait le plus d'opportunités. Environ 1000 véhicules alimentés avec une pile à combustible ont été construits entre 1997 et 2009 (certains, il est vrai, à titre de prototypes uniques). Les bus sont plébiscités pour tester la pile à combustible sur des véhicules du quotidien : plusieurs programmes depuis 2000 ont permis d'en lancer sur les réseaux de transports d'une poignée de villes

(Londres...). Des voitures à hydrogène sont également mises en circulation, mais ces opérations sont bien plus des tests que de véritables commercialisations...

Concernant les deux-roues et les trains, aucun projet n'a encore dépassé le stade des prototypes. Par contre, cette technologie est déjà utilisée concrètement chez certains véhicules utilitaires. La pile à combustible remplace les batteries de plusieurs centaines de chariots élévateurs dans le monde, surtout à cause de son faible temps de rechargement par rapport aux batteries.

Le principal frein de l'utilisation des PAC sur des véhicules est le carburant. En produire suffisamment, et de manière acceptable (rentable et peu polluante) constitue un vrai défi... sans parler du coût de l'installation du réseau de distribution (une "station hydrogène" coûterait entre 2.5 et 4 millions d'euros).

Pour finir, les batteries font concurrence aux PAC car malgré tout, elles gardent des avantages que ces dernières n'ont pas. Les batteries sont plus maîtrisées industriellement et moins coûteuses, elles ne nécessitent qu'une simple prise de courant pour le rechargement (une station "batterie" ne coûterait que 250 000 euros). Et si elles n'ont pas la même capacité énergétique, elles restituent par contre la quasi-totalité de l'énergie emmagasinée contre environ 50% pour les PAC.

Au vu de ces problèmes, les véhicules hybrides semblent une option plus crédible pour l'avenir proche : moteur électrique batterie/PAC, mais surtout moteur diesel/électrique, où le moteur électrique serait utilisé pour les trajets réduits.

5.1.2. Les APU (alimentation auxiliaire)

Les APU servent principalement à assurer la production électrique quand l'alimentation principale est coupée (moteurs de véhicules). Mais elles peuvent également supporter une partie des dépenses énergétiques lorsque le générateur principal fonctionne.

La pile à combustible offre d'intéressants avantages pour ce type de générateurs, principalement une plus grande autonomie et une réduction des nuisances (bruit et pollution). Or, ils se retrouvent dans de très nombreuses applications...

A ce titre, la pile à combustible est utilisée dans le domaine spatial depuis de nombreuses années (alimentation électrique de navettes spatiales ou des satellites). Les missions Gemini et Apollo, par exemple, ont fait des retours remarquablement positifs sur cette source d'énergie (disponibilité à 99% sur 100 000 heures de fonctionnement)

Pour les véhicules terrestres, de véritables essais commerciaux (concernant principalement l'alimentation de camping-cars) de générateurs PAC transportables ont vu le jour.

Dans le domaine maritime, plusieurs programmes et essais sont effectués pour tester l'utilisation d'APUs sur des navires. La pile à combustible est testée dans ce rôle avec d'autres technologies (Diesel...) .

Les APU “pile à combustible” dans le milieu aéronautiques sont en développement. Elles doivent obéir à de nombreuses contraintes pour y être utilisées (poids, rendement énergétique...), ce qui pèse sur les projets. On tente actuellement d'alimenter des systèmes électriques embarqués de plus en plus exigeants par des PACs, et même d'en concevoir d'autres spécifiquement adaptés à son usage (démarreurs électriques, climatisation...).

Enfin, les PAC peuvent être utilisées comme APU pour des applications stationnaires, surtout en tant que générateur de secours (plusieurs milliers de PAC sont utilisées ainsi dans le monde). Dans certains pays très étendus ou à réseau électrique insuffisamment déployé, on pense à les utiliser en tant que générateurs pour certaines installations (stations relais). Avec des piles à combustibles, elles pourraient être autonomes plusieurs semaines (ce qui n'est pas possible actuellement avec des batteries). Et ce n'est qu'un seul exemple...

5.1.3. Le stationnaire

Pour des installations stationnaires, la PAC présente deux avantages supplémentaires : d'abord, la possibilité de réaliser des cogénérations. C'est à dire de récupérer la chaleur produite par la pile en même temps que l'électricité, pour l'utiliser ensuite.

La cogénération est particulièrement intéressante pour des applications domestiques, où le chauffage peut être ainsi assuré. Utilisée de cette manière, le rendement énergétique de la pile à combustible pourrait atteindre 90% ... A l'heure actuelle, des milliers de ces dispositifs sont utilisés dans le monde (surtout en Europe, en Amérique du Nord et au Japon), souvent avec l'aide financière de l'état. Le Japon possède un intérêt particulier pour cette technologie, sans doute renforcé par sa volonté de sortir du nucléaire. Le programme ENE-FARM a permis d'y lancer commercialement de telles PAC, à combustibles variés. 120 000 étaient installées au Japon en 2015.

Mais pour s'imposer vraiment dans ce domaine, la PAC doit répondre à diverses contraintes liées à la variation des besoins énergétiques, journaliers et saisonniers (pas besoin de chauffage en été). Cela suppose une gestion de la chaleur, une redistribution d'électricité dans le réseau secteur en cas de surplus, et l'utilisation d'autres sources d'énergie en cas de pic de consommation. Ajoutons encore que la durée de vie souhaitée (40 000 heures) de ce dispositif n'est qu'en voie d'être atteinte. Les unités de micro-cogénérations à moteur Stirling (combustion) au Japon, font concurrence aux unités PAC (autonomie proche de 10 ans).

Cependant, les PAC pourraient être vraiment avantageuses dans un réseau électrique décentralisé. Le système centralisé (comme en France) est fait de sorte que l'électricité est produite, puis envoyée dans le réseau qui est à sens unique aux clients. Si des unités de production chez les clients rejettent de l'électricité dans le réseau (surplus), l'énergie est donc perdue. Le principe du réseau décentralisé est de permettre aux générateurs des particuliers d'envoyer leur excédent d'électricité dans le réseau, de manière à ce qu'elle puisse être redistribuée à d'autres usagers. En France, EDF a initié un projet d'installation nationale de tels réseaux (Smart Grid).

Et en fin de compte, malgré l'avantage de l'électrolyse, les piles à combustible semblent peu concurrentielles face aux autres technologies dans le domaine des grandes centrales (centrales à gaz prévues dans l'avenir pouvant atteindre 400MW, contre 2.8 MW pour les quelques centrales PAC installées par la société Fuel Cell Energy). Des centrales à électrolyse sont bien en fonctionnement, comme à Utsira en Norvège, mais toujours dans une optique de test, ou pour des situations particulières.

5.1.4. Le portable

Pour terminer, les PAC sont aussi utilisées dans le domaine portable. Cet usage s'est bien développé ces dernières années. Cependant, leur principal point faible reste leur autonomie. En effet, aujourd'hui les utilisateurs de téléphones mobiles, ordinateurs portables, lecteurs MP3, etc ... ont de grandes demandes concernant l'autonomie de leurs appareils. Pour tenter de palier à ce problème, le fabricant BIC a donc décidé de développer (en collaboration avec les fabricants de micro-piles à combustible) des cartouches de combustible que l'on changerait comme pour un stylo plume. Mais dans tout les cas, quelle que soit la méthode employée, les techniques restent très coûteuses et la puissance peu élevée, ce qui empêche encore une mise sur le marché.

Une des applications qui a le mieux fonctionné dans ce domaine reste le prototype de téléphone de Toshiba présenté en 2008 au congrès mondial du mobile. Celui-ci était un hybride possédant une batterie lithium-ion standard et une pile à combustible DMFC. Cependant, il avait tendance à trop chauffer et n'a donc pas pu être mis en vente.

Parmi l'ensemble de ces applications, on retrouve un point commun : leur développement s'est accéléré ces 10 dernières années, par l'amélioration des rendements et la réduction des coûts. La mise sur le marché commence même pour certains prototypes, preuve que la pile à combustible devient un concurrent sérieux aux batteries classiques.

5.2. Problèmes et limites rencontrés actuellement

En résumé, afin que l'usage des PAC se généralise, des problèmes importants doivent être résolus. Pour être une solution efficace à grande échelle, il faut satisfaire les aspects suivants: le coût, le rendement énergétique, la facilité d'utilisation/distribution et l'impact écologique.

Le prix d'une PAC est en général élevé. Le platine, utilisé comme catalyseur dans la majorité des PAC utilisées actuellement, coûte très cher (il représente 25% du prix de la pile) et aucune alternative satisfaisante n'a encore été découverte. En outre, la fabrication d'une PAC requiert de nombreuses étapes: cela augmente le coût global (matériel, temps de travail importants...) et impose une longue période de fabrication.

Le rendement énergétique d'une pile à combustible reste également peu élevé : la majorité des PAC sont de type PEMFC, qui n'ont qu'un rendement énergétique de 40-50%. Comme abordé dans la partie 1, il existe de nombreux types de PAC ayant un meilleur rendement, mais elles amènent d'autres problèmes à résoudre avant de pouvoir les remplacer. La pile à combustible alcaline, par exemple, possède un meilleur rapport coût/puissance, mais ces combustibles sont des gaz purs et son électrolyte est corrosif... Parfois, la PAC n'atteint pas la durée de vie requise.

Les problèmes de l'approvisionnement en combustibles surviennent ensuite : les combustibles des PAC peuvent être difficiles à produire et à utiliser. Comme mentionné précédemment, l'hydrogène doit être produit artificiellement et pose de nombreux problèmes. C'est un gaz inflammable, ce qui impose de nombreuses contraintes pour son utilisation. L'hydrogène pose aussi des problèmes de stockage pour un usage quotidien : le stocker sous forme liquide nécessite des ressources qui limitent son utilisation à grande échelle, et une isolation thermique importante pour éviter l'évaporation. Le stockage sous forme de gaz doit encore s'améliorer pour répondre aux exigences de densité volumique pour une utilisation quotidienne. La densité massique est en cause dans le stockage sous forme solide, de même que sa difficulté de mise en œuvre. Les combustibles des autres PAC peuvent aussi être inflammables, et même corrosifs ou toxiques (méthanol des piles DMFC...) avec toutes les contraintes que cela entraîne.

On doit également se poser des questions sur les réseaux de distribution à grande échelle des combustibles. Pour les PEMFC, comme mentionné précédemment, mettre en place un réseau d'approvisionnement collectif en dihydrogène serait très coûteux : stations, tuyaux, camions-citernes... et ce sera sans doute le cas pour les autres types de piles à combustibles...ajouté au problème du prix des PAC, il semble très difficile de faire une exploitation viable économiquement de cette technologie. C'est pourtant indispensable pour que son usage se généralise.

Pour finir, malgré la réputation d'énergie "verte" liée aux PAC, ces piles posent des problèmes environnementaux. Pour les PEMFC, la production actuelle de dihydrogène génère beaucoup de pollution, si bien que l'avantage écologique des piles à hydrogène est sérieusement diminué. D'autres méthodes existent pour produire le dihydrogène, mais elles ne sont pas couramment utilisées. Ces méthodes présentent plus ou moins des problèmes de coût et de rentabilité énergétique. De même, les autres types de PAC utilisent des combustibles dont la production est souvent polluante car complexe.

5.3. Nouveautés et applications futures

De nombreux projets voient actuellement le jour afin de répandre l'utilisation de la pile à combustible. D'autant plus que cette énergie est perçue comme l'une des solutions majeures pour lutter contre le réchauffement climatique. Pour cela, différentes caractéristiques doivent être améliorées. Nous allons donc présenter un projet actuel, celui nommé le "Honda FCV Concept".

Ce projet est une étude de la commercialisation de nouvelles voitures à PAC. Afin de parvenir à cette nouvelle génération de véhicules, Honda est parvenu à réduire le volume de ses PAC de 33% tout en conservant une densité de puissance permettant d'améliorer les performances de 60%. Le réservoir permet d'avoir une autonomie annoncée par Honda de 700 km maximum. De plus, le plein de ce réservoir peut se faire en 3 minutes.

Ces recherches placent donc Honda comme le grand pionnier dans l'étude et le développement des véhicules fonctionnant grâce aux PAC. La démonstration de ces modèles est prévue pour fin 2016.

Par ailleurs, les voitures à PAC vont se développer dans le domaine sportif avec notamment la Pininfarina H2 Speed.



Illustration 5: Pininfarina H2 Speed

Ce nouveau bolide a été révélé pendant le salon automobile de 2016 qui s'est déroulé à Genève. Cette voiture va révolutionner le domaine des courses sportives. En effet, cette voiture peut réaliser d'excellentes performances sans consommer une goutte d'essence. Grâce à l'hydrogène, cette voiture peut passer de 0 à 100km/h en seulement 3.4 secondes avec sa puissance de 503 ch.

Ainsi, cette voiture peut rivaliser avec les autres bolides de courses au niveau de la vitesse. Mais c'est aussi une voiture écologique car elle ne rejette que de l'eau et aussi elle apporte un certain confort car elle n'émet aucun bruit.

Une autre forme d'utilisation de la pile à combustible est en cours de recherche. Elle est basée sur le couplage avec des énergies renouvelables. En effet, la PAC offre un autre avantage important : la possibilité de stocker de l'énergie.

Le principe est le suivant : l'électricité fournie par le panneau solaire va permettre la transformation de l'eau en dioxygène et en dihydrogène selon le principe de l'électrolyse. On comprend tout l'intérêt d'un tel montage quand on considère que ces deux éléments sont les combustibles dont a besoin une PAC...Par ailleurs, la pile à combustible est d'autant plus intéressante sur le plan environnemental lorsqu'elle est couplée à des énergies renouvelables. Littéralement, un couplage ENR est un couplage impliquant des énergies renouvelables, un dispositif électrolyseur et une PAC. Nous allons juste traiter ici le cas du couplage pile à hydrogène/panneau solaire.

En application concrète dans la vie courante, un tel dispositif pourrait alimenter un dispositif en électricité de manière autonome. S'il y a du soleil, les panneaux solaires fournissent au dispositif l'énergie, mais en utilise une partie pour produire du dioxygène et du dihydrogène. En cas de temps couvert, la pile à combustible fournit l'électricité en utilisant les stocks ainsi créés, et reconstitue le stock d'eau à partir duquel les panneaux solaires reproduiront l'opération.

Une application à grande échelle du couplage ENR/panneau solaire est la plateforme Myrte développée en Corse, près d'Ajaccio. Le but de ce projet est de limiter les perturbations qu'engendrent les importantes variations de consommation du réseau électrique: «sur les îles, les réseaux électriques sont trop petits pour supporter les à-coups brutaux d'une production irrégulière», explique Philippe Poggi, chercheur de l'Université de Corse (Le Figaro).

Ainsi, la plateforme est composée d'un large champ de panneaux photovoltaïques de 3700 m² couplé à un système innovant de production et de stockage d'hydrogène. L'énergie solaire est alors convertie en énergie électrique par l'intermédiaire des panneaux photovoltaïques. Puis cette énergie électrique est convertie sous forme de matière et plus particulièrement en dihydrogène par électrolyse qui est ensuite stockée. De cette manière, l'énergie est conservée sous forme d'hydrogène et pourra être redesservie lorsque les demandes en électricité augmenteront. Grâce à l'implantation de panneaux solaires, le site est capable de générer une puissance maximum de 560 kW.

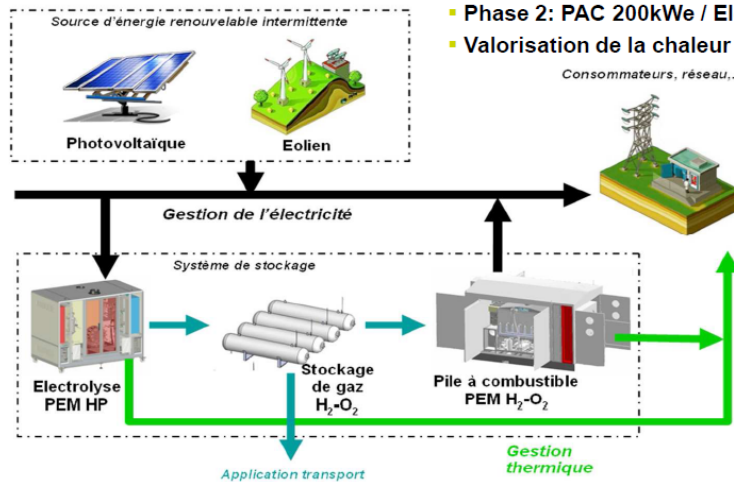
Le rendement énergétique total d'un couplage ENR est cependant plus faible que si l'on utilisait le générateur seul (par exemple, avec un système Eolienne/Panneaux solaires // Electrolyse // PAC , seulement près de 40% de l'énergie exploitable produite par les générateurs est réutilisable).

MYRTE : Stockage des EnR en réseau insulaire – Cas de la Corse

► Centrale solaire Photovoltaïque et stockage de l'énergie sous forme H₂

◆ Démonstrateur grande échelle pour l'écrêtage des réseaux électriques

- Puissance PV : 550kWp
- Phase 1: PAC 50kWe / Electrolyseur 10Nm³/h
- Phase 2: PAC 200kWe / Electrolyseur 40Nm³/h
- Valorisation de la chaleur



6. EXPÉRIENCES

6.1. Présentation du montage

Pour notre expérience nous avons utilisé le modèle pédagogique PEMPower 1-Eco.

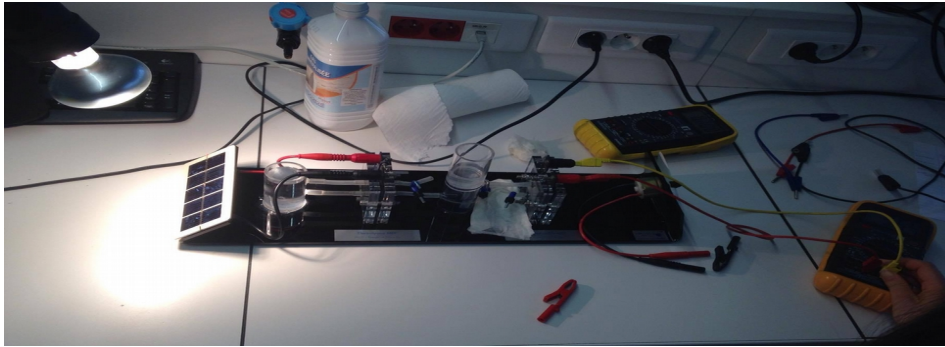


Illustration 6: Photographie du montage

Ce montage est constitué d'un panneau solaire, de tuyaux, d'un réservoir à eau, d'un réservoir à gaz gradué, d'un ventilateur, d'un électrolyseur et évidemment d'une pile à combustible PEMFC. Pour réaliser notre expérience nous avons aussi eu besoin d'une lampe, de pinces crocodiles, d'un solarimètre, de l'eau distillée ainsi qu'un multimètre.



Illustration 8: Panneau solaire relié au reste du circuit

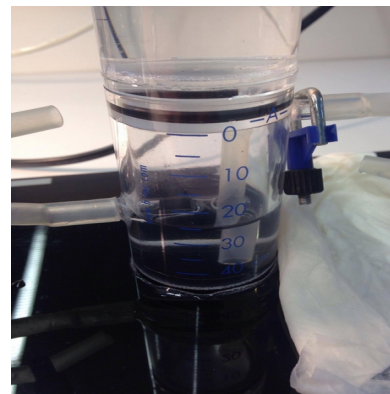


Illustration 7: Réservoir de dihydrogène

Les caractéristiques de PEMPower 1-Eco sont les suivantes :

<u>Panneau solaire :</u>	<u>Electrolyseur :</u>	<u>Réservoir à gaz :</u>	<u>Pile à combustible PEMFC :</u>	<u>Ventilateur :</u>
surface : 90cm ²	superficie d'électrodes : 16 cm ²	volume : 40 cm ³	superficie d'électrodes : 16 cm ²	puissance: 20mV
courant : 300 mA	puissance : 2 W		puissance (H2/O2) : 600 mV	
tension : 2,5 V	tension autorisée : de 0 à 1,9 V		puissance (H2/air) : 300 mV	
puissance électrique : 0,5 W	courant autorisé : de 0 à 2 A		Tension : de 0,3 à 0,9 V	

On positionne une lampe à environ 30cm du panneau solaire, de tel façon à ce que l'on mesure sur le panneau solaire un éclairage d'environ 700W/m² au centre et 300W/m². Pour mesurer le rendement du panneau photovoltaïque, nous devons estimer une moyenne de l'éclairement reçue par le panneau. Soit une moyenne M d'environ M=500W/m².

On peut calculer le rendement d'un panneau solaire avec la formule suivante :

$$\eta = p_{elec} / p_{solaire} = p_{elec} / M \times S = 0.5 / 500 \times 90.10^{-4} = 11\%$$

Notre rendement est d'environ 11%. Notre panneau solaire était un polycristallin et pour ce type de panneau le rendement est compris entre 9% et 15%. Notre rendement correspond bien à cette intervalle.

A partir de tous ces résultats sur les rendements des différentes parties qui composent notre montage, on peut aboutir à un rendement global. Soit r(total) le rendement global de notre pile:

$$\eta_{total} = \eta_{pile} * \eta_{panneau} * \eta_{electrolyse} = 0.67 * 0.11 * 0.67 = 5\%$$

Conclusion: Le rendement que l'on a obtenu est très faible comparé à la valeur du rendement indiqué par le système.

6.2. Protocole et réalisation de l'expérience

Nous avons branché un multimètre aux bornes de la membrane pour effectuer des mesures de tension (3).

Nous avons ensuite rempli le réservoir à eau avec de l'eau distillée. Puis nous avons humidifié la membrane, cette étape est très importante car elle permet à la pile de fonctionner (ouverture des pinces entre le réservoir(8) et la partie contenant la membrane(4), jusqu'à ce que de l'eau finisse par couler du tuyau de sortie(9)). On ouvre la pince afin de retirer l'excédent d'eau, pour ne pas fausser les résultats.

Après cela, nous avons relié le panneau solaire à l'électrolyseur. Comme source lumineuse, nous avons utilisé une lampe , à une certaine distance du panneau solaire pour qu'il ne chauffe pas trop. Nous avons mesuré à l'aide d'un solarimètre 600W/m².

Nous avons par la suite refermé toute les pinces en s'assurant que de l'eau ne coulait plus et qu'il n'y ai pas de bulles d'air dans les tuyaux. A partir de ce moment l'hydrogène est stocké.

Nous avons attendu environ 3h en faisant régulièrement des mesures (toutes les 5 min environ) où nous relevions la production d'hydrogène (lecture directe sur le réservoir gradué (1)) et la tension aux bornes de la membrane (grâce au multimètre (3)).

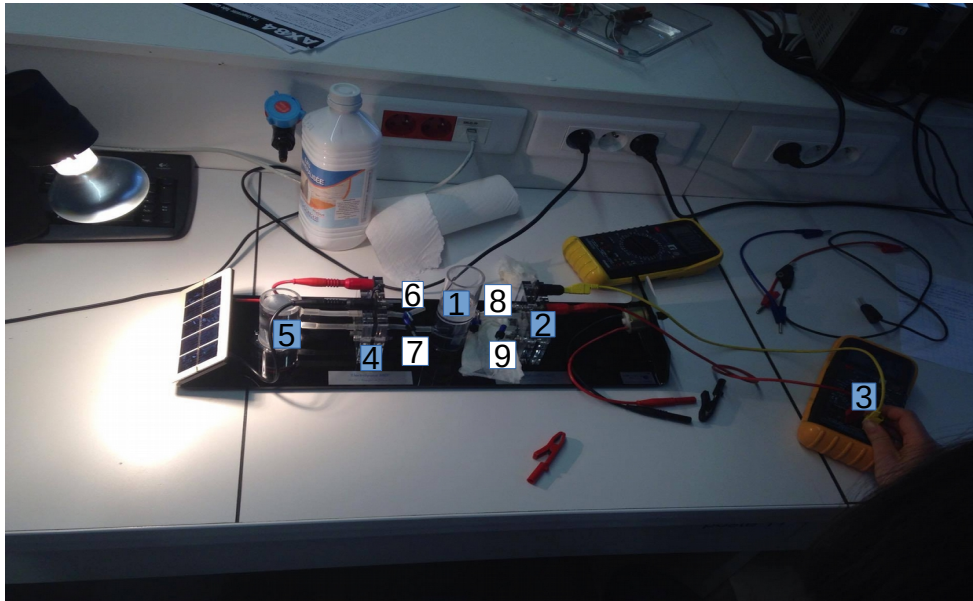


Illustration 9: Photographie du montage (2)

Enfin, le ventilateur ne se déclenchant qu'à partir d'une tension de 400 mV, nous l'avons branché après 137 minutes.

Lors de notre expérience, nous avons réalisé de nombreuses mesures à intervalle de temps régulier. Notre objectif était de mettre en évidence certaines caractéristiques de la pile à combustible, et de retrouver certaines valeurs théoriques de rendement de la PAC.

6.3. Résultats de l'expérience et exploitation

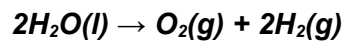
6.3.1. Résultats

Temps (min)	Intensité (mA)	Tension (mV)	Volume H2 (cm3)	Puissance (mW)
0	0	0	0	0
12	2,1	99,1	10	0,20811
17	1,4	105	13	0,147
20	2,7	120,7	15	0,32589
25	3,7	131	18	0,4847
30	4,1	147	24	0,6027
35	4,3	157	28	0,6751
40	5	177,4	34	0,887
45	5,4	190	38	1,026

55	6	224	45	1,344
60	7	234	50	1,638
70	8,3	257	61	2,1331
75	8,7	270	65	2,349
80	9,4	281	70	2,6414
85	9,9	295	76	2,9205
91	10,2	306	82	3,1212
95	10,9	320	85	3,488
100	11,1	326	90	3,6186
107	12,5	340	96	4,25
110	12,8	351	100	4,4928
120	14,6	365	105	5,329
127	15,8	380	110	6,004
135	26	391	115	10,166
137	26,3	408	117	10,7304

6.3.2. Étude de l'électrolyse

On rappelle que l'électrolyse permet la réaction suivante :



avec comme équation de la réaction à l'anode : $2H_2O(l) \rightarrow O_2(g) + 4H^+ + 4e^-$

et l'équation de la réaction à la cathode : $2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2HO^-(aq)$

On peut réaliser le tableau d'avancement suivant :

	$2H_2O(l) = 2H_2(g) + O_2$		
Etat initial	$n(H_2O)$	0	0
Etat final	$n(H_2O)-2x_{max}$	$2x_{max}$	x_{max}

Illustration 10: Tableau d'avancement de la réaction

Tout d'abord nous nous sommes intéressés à la vitesse de production de l'hydrogène par électrolyse :

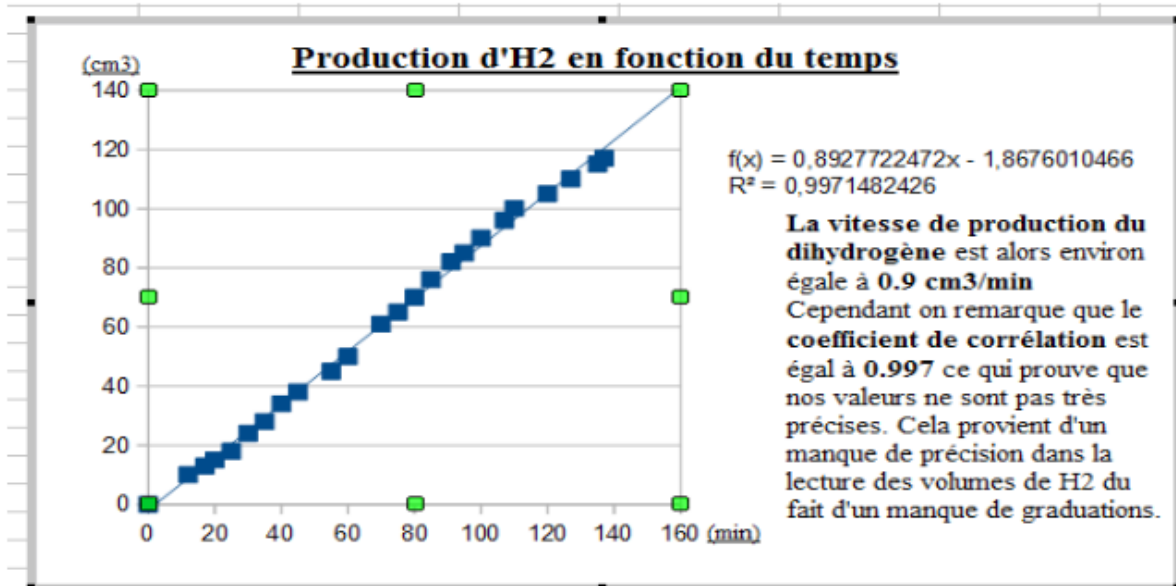


Illustration 11: Régression linéaire de la production de dihydrogène en fonction du temps

On souhaite calculer le rendement de l'électrolyse. Pour cela on calcule la quantité de dihydrogène théorique que l'on aurait dû obtenir :

F : Constante de Faraday = 96 485,3329 C.mol⁻¹

V_m : Volume molaire dans les conditions normales de température et de pression (P=1 bar et T=20°C) =24 L.mol⁻¹

V_{H₂} : Volume de dihydrogène en L

$$V_{(H_2)th} = 2 * x_{max} * V_m = 2 * \text{nombre d'électron} * V_m / 4 = \text{Quantité de charge} * V_m / (2 * \text{Constante de Faraday}) = I * t * V_m / 2 * F = 170 * 10^{-3} * 137 * 60 * 24 / (2 * 96485) = 117 \text{ cm}^3$$

$$\text{rendement} = V_{(H_2)exp} / V_{(H_2)th} = 117 / 174 = 67 \%$$

Par ailleurs, il est possible de calculer la puissance délivrée lors du fonctionnement de la cellule :

$$P = U * I = 1,8 * 170 * 10^{-3} = 0,306 \text{ W}$$

Or, la puissance expérimentale d'une cellule élémentaire au point de fonctionnement nominal est 0,315 W (2,8 % d'écart). Cet écart est inférieur à 5 %, et les valeurs de tension/densité de courant au point nominal peuvent être légèrement différentes de celles théoriques. On peut donc dire que la valeur théorique est confirmée par la valeur expérimentale.

6.3.3. Etude de la pile à combustible

Une fois que l'on a eu une tension au niveau de l'entrée de la PAC d'environ 400mV , on a branché le moteur. En effet, à cette tension, la puissance de la pile est d'environ 10.7mW. Cette valeur est du même ordre de grandeur que la puissance requise par le moteur, qui est de 20 mW. Cela explique son fonctionnement lorsque l'on a une intensité de 400mV. Ainsi, le moteur se met à tourner, puis après plusieurs minutes il s'arrête, sans avoir

consommé tout le dihydrogène disponible. En 10min, la pile avait consommé 3cm³ de dihydrogène.

Pour calculer le rendement électrique de la pile il faut d'abord calculer la quantité d'électricité théorique :

$$\begin{aligned} Q_{th} &= nb \text{ d'électrons} * \text{constante de Faraday} = 4 * x_{max} * F = 4 * (V_{(H_2)}/2V_m) * F \\ &= (3*10^{-3} * 2/24) * 96485 = 23,7 \text{ C} \end{aligned}$$

Soit Q_{exp} la quantité d'électricité produite. $Q_{exp} = I*t = 0.0264*10*60 = 15,84 \text{ C}$

$$\eta_{elec} = Q_{exp}/Q_{th} = 15.84/23.7 = 0.67$$

Remarque : Notre pile à combustible a un rendement d'environ 67% et se situe donc bien dans l'intervalle 50-80% des rendements des autres piles à combustible.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail nous a permis de découvrir le fonctionnement de la pile à combustible en détails (principe d'oxydoréduction, phénomènes de surtension, structure d'une pile...). Nous avons également pu appréhender les différents types existants aujourd'hui, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leurs domaines d'utilisation. D'autre part, nous sommes arrivés à faire fonctionner un montage de type ENR. Nous avons aussi retrouvé des valeurs théoriques par l'expérience (rendement, puissance, etc...). En résumé, nous avons rempli les objectifs fixés au départ, tant au niveau de la théorie que de l'expérience.

De plus, ce projet nous a permis une fois de plus de développer nos capacités de travail de groupe, d'organisation et de répartition du travail. Plus personnellement, ce projet a été l'occasion de s'entraîner au travail de recherche et de synthèse. Il a aussi permis de compléter des connaissances personnelles.

En poursuite de ce projet, il pourrait être intéressant d'étudier une pile à combustible d'une autre technologie que PEMFC, pour acquérir d'autres connaissances en étudiant un mécanisme de fonctionnement différent et faire des comparaisons de rendement. Mais ces autres dispositifs sont souvent plus chers, et encombrants...

8. BIBLIOGRAPHIE

8.1. Livres

[1] Méziane Boudellal, "La pile à combustibles : Structure - Fonctionnement - Applications", DUNOD, 2007

[2] Benjamin Blunier et Abdellatif Miraoui, "20 questions sur la pile à combustible", TECHNIP, 2009

8.2. Liens internet

[3] <http://www.caradisiac.com/Honda-FCV-Concept-persiste-et-signe-En-direct-du-salon-de-Geneve-2015-101406.htm>, date de validité 11/04/2016

[4] http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/344_345_jan_fev_07/LAntoni_n344-345_p80-94_w.pdf, date de validité 18/04/2016

[5] <http://pile-combustible-hydrogene.e-monsite.com/pages/l-histoire-de-la-pile-a-combustible-hydrogene.html#gGrz09t5igozGC5y.99>, date de validité : 22/02/2016

[6] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Vaporeformage>, date de validité 26/02/2016

[7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse>, date de validité 22/02/2016

[8] http://tpe09.free.fr/partie3_1.php, date de validité 29/02/2016

[9] <http://observatoire-electricite.fr>, date de validité 29/02/2016

[10] <http://www.largus.fr/geneve/pininfarina-h2-speed-la-supercar-a-hydrogene-au-salon-de-geneve-2016-7482384.html>, date de validité 23/05/2016

[11] <https://tpepilecombustible.wordpress.com/>, date de validité 03/03/2016

[12] <http://eduscol.education.fr/orbito/pedago/pileh2/pile1.html>, date de validité 11/04/2016

[13] www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/IMG/doc/textes_piles_a_combustible.doc, date de validité 03/03/2016

[14] <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/piles-a-combustible-cest-pour-aujourd'hui-ou-pour-demain-10121/>, date de validité 18/04/2016

[15] <http://www.agence-nationale-recherche.fr/Colloques/Energies2012/presentations/plenieres/Hydrogene-et-pile-a-combustible.pdf>, date de validité 14/03/2016

[16] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/chimie-production-hydrogene-plus-abordable-grace-energie-solaire-48112/>, date de validité 21/03/2016

[17] http://a.bougaud.free.fr/TS_specialistes_chimie/C03_piles_combustible_1.pdf, date de validité 18/03/2016

[18] <http://www.cder.dz/download/za-3.pdf>, date de validité 14/03/2016

[19] http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Presentation_HELION-_17032011_-_PROV__cle01e46c.pdf, date de validité 21/03/2016

- [20] <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/piles-a-combustible-cest-pour-aujourd'hui-ou-pour-demain-10121/>, date de validité 18/04/2016
- [21] http://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/344_345_jan_fev_07/LAntoni_n344-345_p80-94_w.pdf, date de validité 18/04/2016
- [22] http://www.ineris.fr/centredoc/Techniques_prod_H2_web.pdf, date de validité 21/04/2016
- [23] <http://www.3af.fr/article/technologies/les-piles-combustible-dans-l-aeronautique>, date de validité 25/04/2016
- [24] <https://fuelcellsworks.com/archives/2015/09/23/ene-farm-installed-120000-residential-fuel-cell-units/>, date de validité 21/04/2016
- [25] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/chimie-production-hydrogene-plus-abordable-grace-energie-solaire-48112/>, date de validité 28/04/2016
- [26] <http://www.lefigaro.fr/sciences/2012/01/10/01008-20120110ARTFIG00418-stockage-de-l-energie-solaire-la-corse-innove.php>, date de validité 2/05/2016
- [27] http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Presentation_HELION-_17032011_-_PROV__cle01e46c.pdf, date de validité 2/05/2015
- [28] <http://matieresscientifiques.fr/terminale-S/chimie/pile-et-electrolyse/fiche-de-cours/fiche-pile-et-electrolyse.html>, date de validité 2/05/2015
- [29] <http://www.cnrs.fr/cnrs-images/chimieaulycee/THEMES/electrolyse/principe.htm>, date de validité 9/05/2016
- [30] http://www.cder.dz/download/Art8-2_4.pdf, date de validité 12/05/2016
- [31] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01175993/document>, date de validité 12/05/2016
- [32] <http://www.science-et-vie.com/2010/05/presque-5-000-km-avec-un-litre-dessence/>, date de validité 12/05/2016
- [33] <http://www.memoireonline.com/01/13/6842/Etude-dun-systeme-energetique--pile-combustible-destine--une-application-residentielle12.png>, date de validité 9/05/2016
- [34] http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_5.2.2_pemfc_rev.oct2014_ta.pdf

9. ANNEXES

9.1. Histoire de la pile à combustible

Les débuts de la pile à combustible remontent à plus de deux siècles. En effet, un des premiers pas vers celle-ci a été réalisé par le chimiste britannique Henri Cavendish en 1766, qui est parvenu à isoler du dihydrogène (ou hydrogène, par abus de langage). C'est ensuite Sir Humphry Davy qui fait avancer les choses en réalisant la première électrolyse de l'eau. Mais c'est en 1839 que la pile à combustible a vraiment été découverte par le chimiste allemand Friedrich Schoenbein. À l'époque, le principe ne fût pas approfondi ni exploité puisque personne n'en voyait l'utilité.

Entre 1839 et 1842, la première pile à combustible a été modélisée par William Robert Grove. Celle-ci était constituée d'une cellule d'hydrogène-oxygène, d'électrodes en platine et d'acide sulfurique.

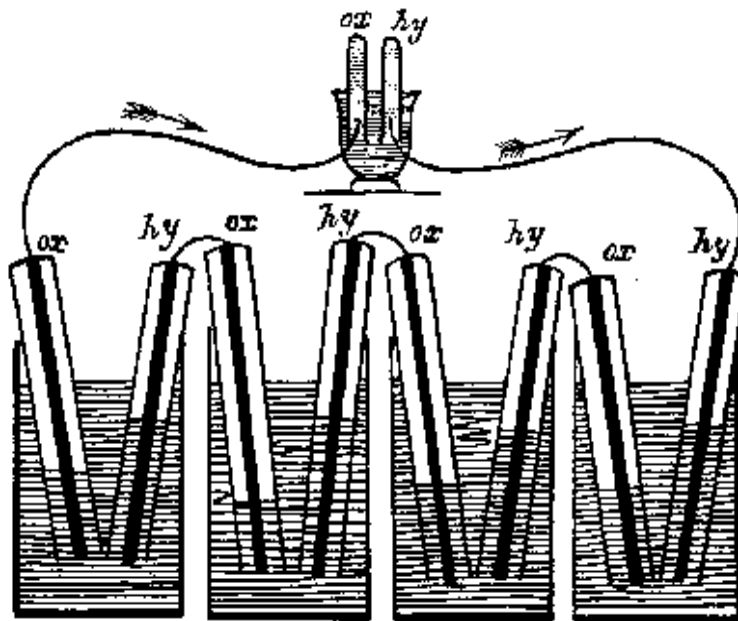


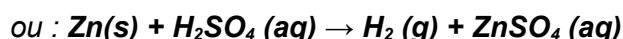
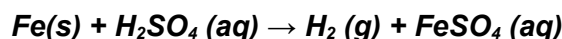
Illustration 12: Expérience de William Robert Grove

Il faudra attendre 1932 pour que l'étude de la pile à combustible reprenne de manière conséquente. Ainsi en 1953 et 1959, l'ingénieur britannique Henry Thomas Bacon construisit des prototypes de PAC de 1 kW et 5 kW. Leur utilisation démarra en 1960. Depuis ce jour, la NASA utilise ce type de piles pour alimenter électriquement des systèmes auxiliaire sur ses véhicules spatiaux (Capsules Apollo et Gemini). Enfin, depuis 1980, les États-Unis et le Japon poursuivirent activement leurs recherches, contrairement à l'Europe (excepté l'Allemagne) qui s'en désintéressa totalement .

Depuis sa création, la pile à combustible a connu de nombreuses améliorations, telles que le perfectionnement des électrodes (1899) ou encore l'optimisation de la température de fonctionnement. On est notamment parvenu à fabriquer des piles de plus en plus petites. La plus petite a été créée par des chercheurs de l'université de l'Illinois aux États-Unis. Cette dernière mesure 3mm de côté pour 1mm d'épaisseur. Même si cette pile fournit une très faible puissance, c'est un réel exploit car tout est stocké dans ce minuscule espace (dont l'hydrogène).

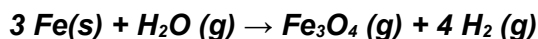
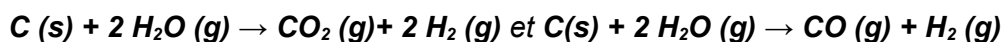
9.1.1. Les débuts de la production d'hydrogène

La production d'hydrogène commença en 1766, avec comme pionnier Henry Cavendish. À l'époque, afin de produire de l'hydrogène, on faisait réagir des copeaux de fer (ou de zinc) avec de l'acide sulfurique (et de l'eau) d'après la réaction chimique suivante :



Cependant, on s'aperçût un peu plus tard que l'hydrogène obtenu n'était pas pur (dû à des résidus de soufre et d'arsenic contenus dans le zinc) et possédait une odeur désagréable. De plus, utiliser cette méthode devint compliqué lorsque l'on chercha à en gonfler des ballons à gaz vers 1883 : des milliers de kilogrammes de copeaux de fer et des centaines de touries (type de bonbonne) d'acide sulfurique étaient nécessaires... Les chercheurs de l'époque ont donc essayé de trouver d'autres moyens de produire du dihydrogène.

Sachant que l'eau (H₂O) est constituée d'hydrogène (H) et d'oxygène (O), Cavendish et Lavoisier se sont penchés sur l'étude de la décomposition de l'eau. Lavoisier a testé deux réactions faisant intervenir de l'eau :



Cependant, ces 2 méthodes posaient les mêmes problèmes de stockage des réactifs (principalement le fer).

A partir de 1800, deux chimistes britanniques se sont intéressés à une autre méthode de production d'hydrogène : l'électrolyse de l'eau. Cependant, celle-ci n'avait pas de réelle application à l'époque. Son étude ne fût donc reprise que quelques temps plus tard.

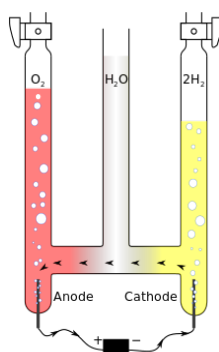
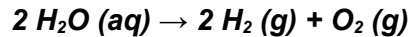
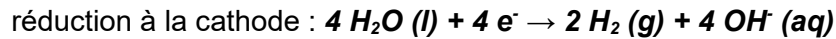
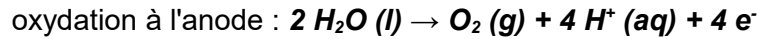


Illustration 13: Schéma de l'électrolyse de l'eau

Le principe de l'électrolyse est de réaliser une réaction chimique grâce à une activation électrique. Il y a donc conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Dans notre cas, on utilise l'électrolyse de l'eau suivant l'équation de réaction suivante :



Deux réactions simultanées permettent d'obtenir cet hydrogène :



Malgré son coût (plus cher que la production par reformage du méthane), cette méthode donne une qualité d'hydrogène meilleure que toutes les autres méthodes. De plus, elle possède un bon rendement (environ 90%).

9.2. Les différents accessoires

Tout d'abord, il faut gérer l'alimentation en combustibles (H_2 et air) avec des réseaux de tuyaux/compresseurs. Cela peut inclure des dispositifs préparant le combustible en aval (production de H_2) tels qu'un réacteur. Un appareil intermédiaire est également nécessaire afin d'humidifier la membrane dans les PEMFC, ou encore directement les combustibles. Pour contrôler le flux des réactifs et la pression à l'intérieur de la pile, on a besoin de compresseurs. Enfin, il est important de mettre en place un système de purification de l'électrolyte, particulièrement pour les piles PEMFC (humidification nécessaire) et les piles AFC, où l'électrolyte peut "s'encrasser" au fil du temps. Pour cela, on fait souvent passer l'électrolyte dans un circuit extérieur.

Un générateur peut aussi s'avérer nécessaire dans les phases de démarrage, où la pile peut demander de l'énergie. De plus, même quand la pile ne fonctionne pas, les équipements auxiliaires peuvent avoir besoin de courant, et donc d'un générateur externe. Il peut aussi y avoir besoin de régulateurs pour adapter la tension sortante au type d'application. Enfin, l'agencement des stacks a une influence directe sur le courant/la tension, et doit donc être réalisé en conséquence.

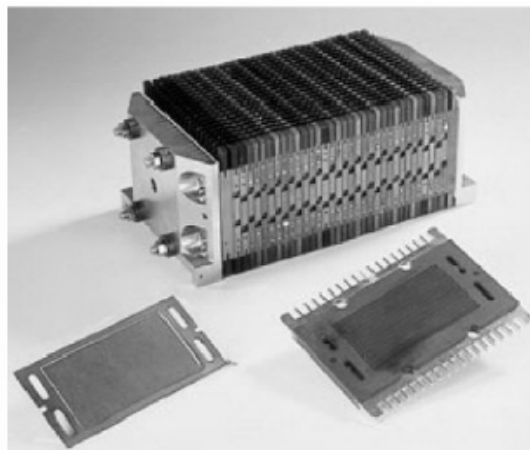


Illustration 14: Stack (empilement de plusieurs PAC)

Le maintien à température optimale, ainsi que l'évacuation de la chaleur, peuvent s'effectuer simplement par circulation de l'air (pour les faibles puissances) ou par des circuits à fluides caloporteurs (notamment pour les MCFC et SOFC) avec pompes et capteurs. Au sein de la pile, on peut également diriger la chaleur afin de réchauffer certains éléments et avoir un rendement optimal, ce qui suppose tout un réseau thermique. On peut aussi récupérer la chaleur pour des applications extérieures (cogénération) avec divers dispositifs.

Les sous-produits doivent également être contrôlés. Ils peuvent être simplement rejetés dans l'atmosphère, avec ou sans opérations préalables (brûleur...), stockés pour un autre usage ou encore déplacés ailleurs dans la pile (réactifs n'ayant pas réagi).

Pour terminer, afin de contrôler automatiquement ces composants, il faut une gestion électronique de ceux-ci, ce qui passe par le biais de capteurs et d'automates. Tous les systèmes nécessaires doivent être conçus et optimisés en fonction du type de pile, de sa taille, de son prix, de l'application désirée. Une grande variété de facteurs est donc à prendre en compte. Une pile à combustible constitue donc un modèle réduit de centrale électrochimique. On appelle d'ailleurs l'équilibre entre tous les dispositifs nécessaires le "balance of plant" (équilibre d'usine).

9.3. Les différents types de piles

9.3.1. Pile à combustible à hydrogène

C'est le principal type de pile à combustible. Ses grands avantages sont qu'elle ne rejette que de l'eau et qu'elle ne consomme que des gaz. Toutefois le platine, utilisé comme électrolyte, est un matériau très coûteux. Le rendement de cette pile est de 50 % à 60%.

On a d'abord la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC), qui est la plus commune. Elle permet la production simultanée d'eau, d'électricité ainsi que de chaleur et fonctionne à environ 60 degrés Celsius. Comparés aux autres systèmes de piles à combustibles, la PEMFC a comme avantages d'être compacte, d'avoir un temps de démarrage/réponse très rapide, et d'être insensible au CO₂ comme aux basses températures. Ses inconvénients sont son coût, sa sensibilité au CO, et la nécessité de garder la membrane humidifiée. Sa durée de vie comme sa fiabilité restent à améliorer.

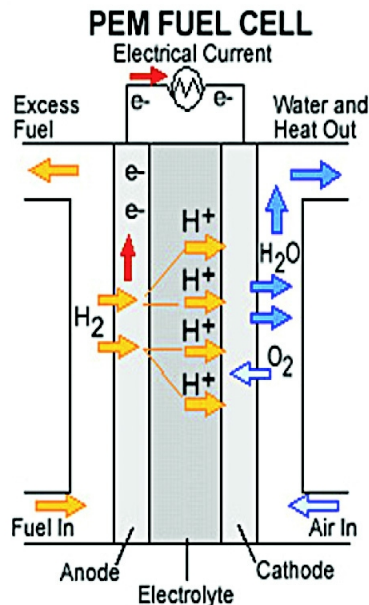


Illustration 15: Schéma d'une PEMFC (schéma similaire aux autres PAC, seuls les ions échangés diffèrent)

La pile à oxyde solide (SOFC) fonctionne sous le même principe, mais la membrane échangeuse de protons est remplacée par une "membrane à oxyde solide". Les combustibles restent les mêmes, mais ce sont des ions O_2^- qui circulent dans l'électrolyte. Cette pile est envisageable sous deux structures différentes : tubulaire ou plane (cette dernière présentant encore deux variantes: en structure classique, ou concentrique avec arrivée par le centre du combustible). La température permettant à l'électrolyte d'avoir la conductivité ionique désirée est très élevée (900-1000 degrés C.) et nécessite de lourdes infrastructures. Grâce à cette température élevée, les catalyseurs peuvent être du nickel ou un mélange d'oxyde, qui sont relativement peu coûteux. Cependant, le temps de démarrage de cette pile est très long. Ce système offre cependant les avantages suivants : l'électrolyte utilisé est stable, son rendement électrique est élevé (légèrement plus que les PEMFC) et il est possible de mettre en place avec elles des cogénérations très efficaces. De plus, d'autres combustibles que l'hydrogène peuvent théoriquement être utilisés.

9.3.2. Pile à combustible au méthanol

Il existe deux types de piles : les RMFC (Reformed Methanol Fuel Cell) et les DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). Dans les RMFC, le méthanol est reformé (converti en dihydrogène) avant d'être introduit dans une cellule élémentaire, tandis que pour les DMFC, le méthanol est introduit directement.

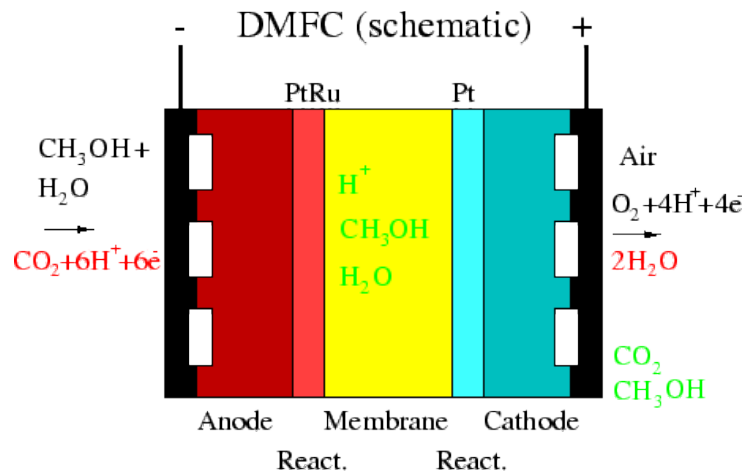


Illustration 16: Schéma de fonctionnement d'une DMFC

La pile DMFC est une dérivée du type PEMFC, la grande différence est qu'on utilise le méthanol comme combustible. De nombreux produits intermédiaires sont formés lors de la réaction d'oxydoréduction. Comme les piles PEMFC, cette technologie présente comme avantage un système simple et compact, à démarrage et réponse rapide, pouvant fonctionner même à basse température. Contrairement à la pile PEMFC, la membrane ne doit presque pas être humidifiée...

Le méthanol est un combustible facile à utiliser (dilué dans l'eau, à température ambiante). Cependant, en plus des inconvénients liés aux PEMFC, la réaction en jeu produit du CO_2 , et son rendement réel est faible. Mentionnons également la toxicité du méthanol.

9.3.3. Pile à combustible à l'éthanol

La pile DEFC (Direct Ethanol Fuel Cells) utilise de l'éthanol comme combustible. L'avantage de ce combustible est qu'il est beaucoup moins toxique que le méthanol. Les autres avantages et les inconvénients sont les mêmes que ceux de la pile DMFC. Il y a cependant un problème plus important : les réactions secondaires, où de nombreux sous-produits sont formés (par décomposition), ce qui réduit considérablement son rendement.

Ils doivent donc être oxydés ou éliminés à leur tour à l'aide de catalyseurs difficiles à trouver. C'est en partie pour ça que cette pile est beaucoup moins développée à l'heure actuelle que la pile DMFC.

9.3.4. Pile à combustible à acide phosphorique (PAFC)

Dans cette pile, l'électrolyte employé est solide (acide phosphorique stabilisé en matrice). Le principe reste le même que les piles PEMFC (utilisation de l'hydrogène comme combustible, électrodes quasiment identique...).

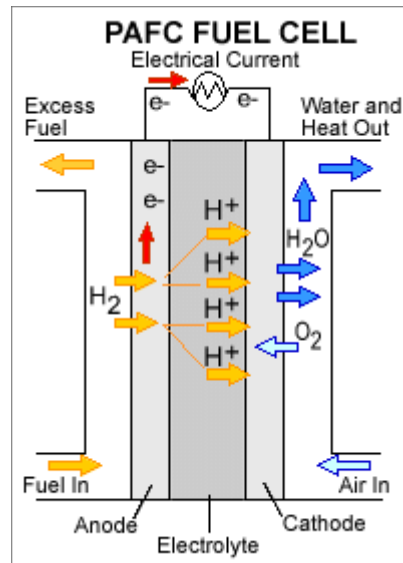


Illustration 17: Schéma d'une PAFC

Le temps de démarrage de la pile est long : entre 1 et 3 heures . De plus, en dessous de 190°C, l'électrolyte se dissout dans l'eau. Au dessus de 210°C, l'électrolyte se décompose. Il faut donc maintenir constamment la pile à une température de 200°C, ce qui est sans doute l'inconvénient majeur de ce type de pile. De plus, la pile est sensible au soufre, et son prix reste élevé à cause de l'utilisation du platine comme catalyseur. Les avantages de cette pile sont les suivants : elle est insensible au CO₂ (souvent présent dans l'atmosphère), et sa température de fonctionnement reste relativement facile à atteindre. Cette pile est utilisée dans l'industrie et par l'armée.

9.3.5. Pile à combustible alcaline (AFC)

Dans la pile à combustible alcaline, combustibles utilisés sont les mêmes que dans la PEMFC, mais ce sont les ions OH⁻ qui circulent dans l'électrolyte. L'eau est donc produite à l'anode et décomposée à la cathode. La réaction est effectuée en milieu alcalin, d'où son nom.

Cette pile fonctionne à une température entre 60 et 90°C. Elle peut également fonctionner en dessous de 0°C. De plus, les électrolytes et le catalyseur(fabriqués à partir de nickel et d'argent) sont assez peu coûteux. Les temps de réponses et de démarrage sont relativement rapides. Il est également possible, à partir de cette pile, d'obtenir un rendement électrique élevé. Cependant, cette pile reste sensible au CO₂ et nécessite des gaz purs. De plus, la corrosion de l'électrolyte pose un problème supplémentaire. Ces piles restent cependant celles ayant le meilleur rapport coût/puissance délivré à ce jour.

9.3.6. Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC)

Dans la pile à combustible à carbonate fondu, le combustible est encore l'hydrogène. Ce sont des ions (CO₃)²⁻ qui circulent dans l'électrolyte. Du CO₂ est produit à l'anode et doit être déplacé à la cathode pour que la réaction ait lieu. L'électrolyte est un mélange de carbonate. Il est liquide aux températures de fonctionnement de la pile, c'est à dire entre 600 et 700°C. Les électrodes sont des plaques poreuses en alliage métallique (nickel), qui sont également les catalyseurs.

Comme pour les piles de type SOFC, le catalyseur est peu coûteux. La cogénération est également possible. La particularité de cette pile est la production d'hydrogène nécessaire à la réaction en interne.

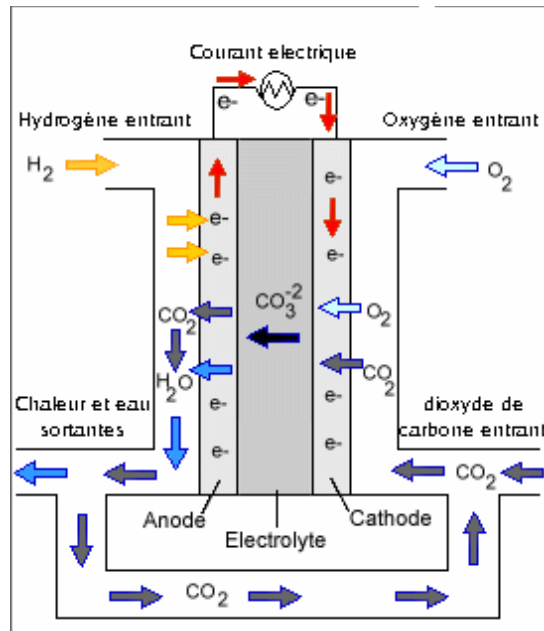


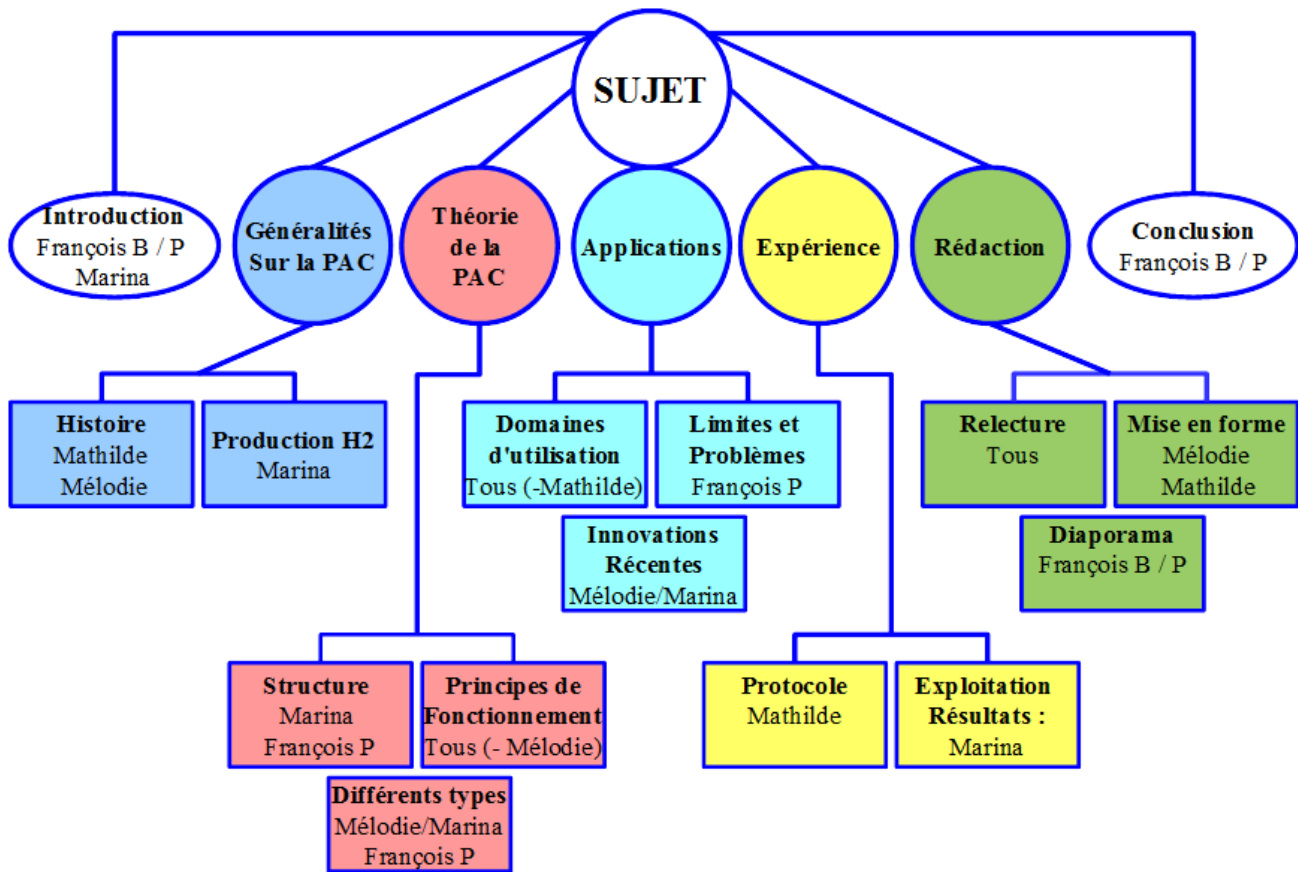
Illustration 18: Schéma d'un MCFC

Cette pile n'est plus sensible au CO, elle est cependant sensible au soufre, qui empêche les réactions à l'anode à une concentration de quelques ppm. Quelques heures sont nécessaires pour le démarrage, et la densité du courant électronique fourni est faible comparée aux autres piles (200 mA/cm^2 contre plusieurs A/cm^2 pour la pile PEMFC). Cela ne l'empêche pas d'être utilisée dans des installations industrielles de puissance élevée. Enfin, l'électrolyte pose plusieurs problèmes : il faut le contrôler, à cause de la consommation des ions carbonates. Ensuite, il y a corrosion à l'anode ainsi qu'à la cathode.

9.4. Carnet de bord

N°	Ce que l'on a fait	Ce que l'on va faire à la suivante
1	Réalisation Gdoc, répartition du travail, recherches sur le principe de fonctionnement de la PàC	Recherches sur les différents points
2	Relecture des travaux, recherche de nouvelles sources (notamment bibliographiques) Recherches sur le projet de PàC en Corse	Relecture, mise en forme, élaboration d'un plan précis
3	Plan définitif, relecture et poursuite des recherches	
4	Affinement des points mal compris, recherches complémentaires sur les parties théoriques incomplètes	Continuer la partie théorique
5	recherches complémentaires et apprentissage de la partie théorique + complément sur les applications	Recherche sur les points théoriques abordés et répartis lors de la séance, rédaction de ce qui a été fait
6	Lecture du dossier expérience, Repérage de ce qu'on n'a pas encore rédigé et rédaction	rédaction partie théorique
7	Expérience (4h)	Réaliser le protocole et l'exploitation des résultats
8	Mise en forme du dossier et compilation des différentes parties	Finir l'exploitation des résultats Réaliser introduction et conclusion du dossier Prévoir pour le diaporama
11	Finir exploitation des résultats Relecture de l'introduction Début du travail sur le diaporama	Finir la rédaction du rapport
12	Finitions du dossier, mise en page, bibliographie	relecture, impression, relier
13	Diaporama	

9.5. Répartition du travail



9.6. Conclusions personnelles

Mathilde Jemelen : Ce projet a été très bénéfique pour moi. En effet j'ai développé ma capacité de travail en groupe en écoutant les idées de chacun et en s'aidant mutuellement. Le fait de se fixer des objectifs régulièrement m'a forcée à effectuer un travail de recherche et de rédaction fréquents. La partie pratique (l'expérience) m'a beaucoup plu et apporté, car après des semaines de théories nous avons enfin pu mettre en application tout ce que nous avons appris jusque là. Ce projet m'a également permis d'acquérir et d'améliorer mes connaissances concernant la pile à combustible, ces principaux constituants, les différents types de piles, le couplage ENR ainsi que les nouveautés et les innovations concernant la PAC.

Marina Jamar De Bolsee : Pour conclure, je ne tire de ce projet que des points positifs : d'une part, une expérience très enrichissante du point de vue culturel, avec de meilleures connaissances sur un objet futuriste, et d'autre part une expérience humaine, qui nous a montré que la communication, et donc les échanges d'idées, étaient l'un des axes les plus importants dans la conception de projets. De plus, le travail en groupe et la répartition du travail sur le long terme nous a permis d'atteindre nos objectifs concernant le rendu obtenu dans les délais prévus.

Mélodie Boillet : La réalisation de ce projet m'a apporté différentes choses, tant sur le plan personnel que scientifique. En effet, n'étant pas du tout dans les domaines de physique et chimie, ce projet m'aura permis de continuer à étudier dans ces spécialités, chose que je n'aurais peut-être plus l'occasion de faire. De plus, n'étant pas à l'aise en général dans les travaux de groupe, je pense que sa réalisation m'aura appris à faire davantage confiance à mes camarades et à pouvoir partager les différentes idées de chacun.

François Brun : Ce projet, en plus de m'avoir permis de développer mes capacités de travail en groupe et d'organisation, a également été une continuité de mon TPE réalisé en 1ère (autre grand travail d'ampleur). En effet, je m'étais à l'époque concentré sur les énergies propres dont (entre autres) les biocarburants et le solaire. Le thème des piles à combustible de ce projet est donc une suite logique à mon TPE, particulièrement dans une époque où les enjeux énergétiques sont un sujet majeur.

François Paillart : En premier lieu, la réalisation de ce dossier m'a permis d'acquérir des connaissances techniques globales sur les PAC. Ce fut aussi un bon entraînement pour synthétiser un sujet vaste (ce que j'avais du mal à faire au début de l'année) et surtout travailler en équipe : plus qu'à n'importe quel moment, il a fallu faire des répartitions du travail, planifier des axes de recherche, s'adapter aux changements... J'ai aussi appris à mieux utiliser un logiciel de travail collaboratif (gdoc). Je pense que l'apport le plus important de ce projet pour moi a été l'amélioration de mes méthodes de travail en groupe, plus exactement identifier les problèmes pour veiller à ce qu'ils ne se reproduisent pas.

9.7. Table des illustrations

Index des illustrations

Illustration 1: Origines de production de l'hydrogène en 2011.....	10
Illustration 2: Schéma d'un cœur de pile à combustible.....	11
Illustration 3: Équation générale de Nernst.....	13
Illustration 4: Diagramme.....	15
Illustration 5: Pininfarina H2 Speed.....	22
Illustration 6: Photographie du montage.....	24
Illustration 7: Réservoir de dihydrogène.....	24
Illustration 8: Panneau solaire relié au reste du circuit.....	24
Illustration 9: Photographie du montage (2).....	26
Illustration 10: Tableau d'avancement de la réaction.....	27
Illustration 11: Régression linéaire de la production de dihydrogène en fonction du temps...28	
Illustration 12: Expérience de William Robert Grove.....	32
Illustration 13: Schéma de l'électrolyse de l'eau.....	33
Illustration 14: Stack (empilement de plusieurs PAC).....	34
Illustration 15: Schéma d'une PEMFC (schéma similaire aux autres PAC, seuls les ions échangés différent).....	36
Illustration 16: Schéma de fonctionnement d'une DMFC.....	37
Illustration 17: Schéma d'une PAFC.....	38
Illustration 18: Schéma d'un MCFC.....	39