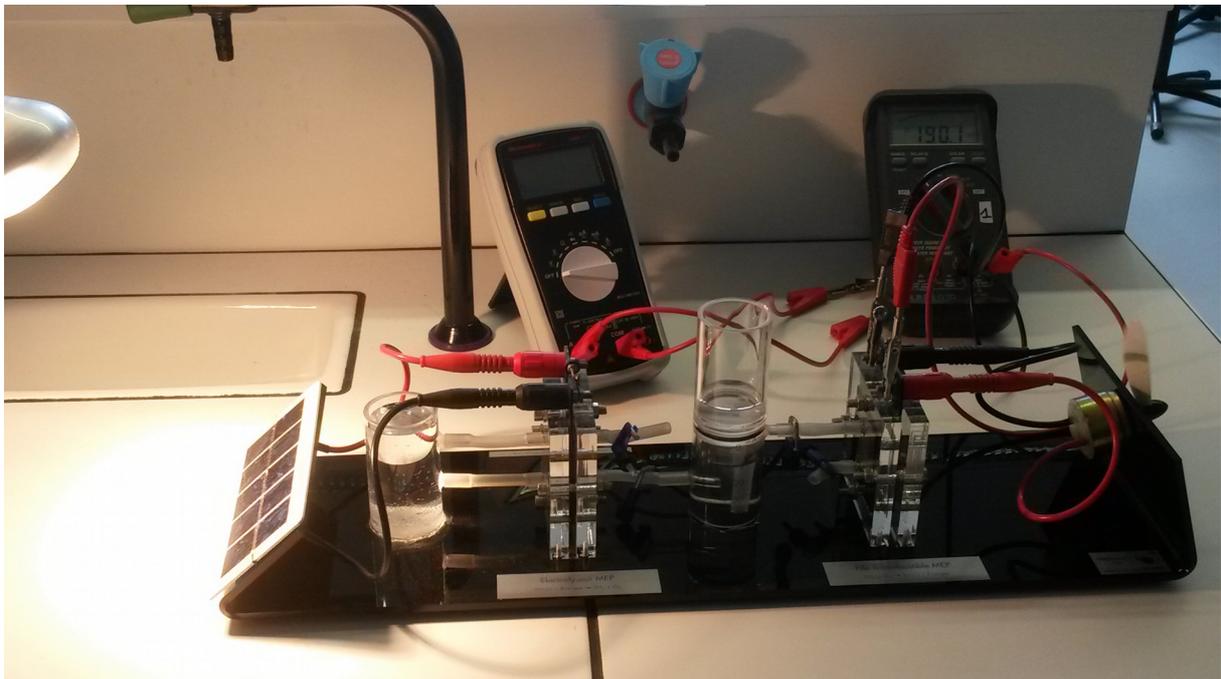


PILE A COMBUSTIBLE ET APPLICATIONS



Etudiants :

Caroline GOUMENT

Ghita LOUALI

Lucille MAGNE

Claire PELLETIER

Quentin PETRI

Enseignant-responsable du projet :

Jamil ABDUL AZIZ

Date de remise du rapport : **12/06/2017**

Référence du projet : **STPI/P6/2017 – 40**

Intitulé du projet : ***Pile à combustible et applications***

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

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Les objectifs de ce projet sont de nous faire découvrir la pile à combustible à travers l'étude de son fonctionnement mais aussi les différents types de piles existants et leurs applications possibles dans le monde aujourd'hui. De plus, l'expérience réalisée ainsi que la visite de l'entreprise nous ont permis d'appliquer de façon concrète ce que nous avons appris au cours de ce projet. Nous avons également pu mettre en évidence les avantages et les difficultés liées à l'utilisation de ces piles.

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

pile à combustible, production hydrogène, énergie renouvelable

TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	7
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. La pile a combustible : description et principe de fonctionnement.....	8
3.1. Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?.....	8
3.1.1. Définition.....	8
3.1.2. Les principaux composants d'une PàC et leurs fonctions.....	9
3.1.3. Les autres constituants facilitant les réactions.....	10
3.2. Les différents types de PàC.....	11
3.2.1. Les principales caractéristiques des piles existantes.....	11
3.2.2. Les réactions à l'anode et à la cathode pour chaque pile.....	11
3.3. La production de dihydrogène.....	12
3.3.1. Production d'H ₂ par l'électrolyse de l'eau.....	12
3.3.2. Production d'H ₂ par reformage du méthane.....	13
3.3.3. Autres méthodes de production de dihydrogène.....	15
4. Applications des piles a combustible.....	15
4.1. Les applications actuelles.....	16
4.1.1. Dans les transports.....	16
4.1.2. Le stationnaire.....	16
4.1.3. Le mobile/portable.....	17
4.2. Les inconvénients des PàC.....	18
4.3. Les perspectives futures.....	19
5. Visite d'une entreprise: PowiDian.....	20
5.1. Généralités sur l'entreprise.....	20
5.2. Notre visite (lundi 24 avril 2017).....	20
6. L'expérience.....	23
6.1. Le montage.....	23
6.2. Protocole et expérience.....	23
6.3. Résultats expérimentaux et interprétation.....	24

6.3.1. Le panneau solaire.....	24
6.3.2. La pile à combustible.....	25
6.3.3. L'électrolyse.....	26
7. Conclusions et perspectives.....	27
8. Conclusions personnelles.....	27
9. Bibliographie.....	29
9.1. Les livres et magazines.....	29
9.2. Les sites internet.....	29
10. Table des illustrations.....	30
11. Annexes.....	31
11.1. Quelques dates importantes dans l'Histoire de la PàC.....	31
11.2. Les différents types de piles à combustible en détail.....	31
11.2.1. Piles à combustible à hydrogène.....	31
11.2.2. Pile à combustible à acide phosphorique.....	32
11.2.3. Pile à combustible au méthanol.....	33
11.2.4. Pile à combustible alcaline.....	33

NOTATIONS, ACRONYMES

PàC = pile à combustible

PEMFC (ou MEP) = pile à membrane échangeuse de protons

SOFC = pile à oxydes solides

PAFC = pile à acide phosphorique

AFC = pile alcaline

MCFC = pile à carbonates fondus

DMFC = pile à alimentation directe en méthanol

SAGES = Smart Autonomous Green Energy Station

ENR = énergies renouvelables

1. INTRODUCTION

D'année en année, il devient de plus en plus urgent de trouver une alternative aux énergies fossiles. En effet, elles sont polluantes et leurs réserves s'amenuisent. Or nous consommons de plus en plus d'énergie, c'est pourquoi la production d'énergies renouvelables est devenue une préoccupation majeure. Il existe plusieurs sources d'énergies renouvelables comme la géothermie, l'hydraulique, l'éolien et le solaire mais ce ne sont pas les seules.

La pile à combustible est également une façon de produire de l'énergie de façon durable. Il s'agit d'un système qui convertit l'énergie chimique apportée par des combustibles (tels que le dihydrogène ou le dioxygène) en énergie électrique et thermique. Contrairement aux systèmes utilisant des énergies fossiles, ici la transformation ne s'accompagne d'aucune émission de gaz à effet de serre et autres produits nocifs pour l'environnement, à condition que les combustibles soient produits de façon durable. Par exemple, le dihydrogène par exemple est un vecteur d'énergie (moyen de transporter de l'énergie d'un endroit à un autre) mais il ne se trouve que difficilement à l'état naturel. Or c'est grâce à lui que l'on peut stocker de l'énergie sous forme chimique. Sa production est donc un enjeu majeur du développement de la pile à combustible.

Dans la suite de ce rapport, chacun des points évoqués ci-dessus sera développé de façon à expliquer le fonctionnement d'une pile à combustible et à éclaircir les enjeux que représentent cette technologie dans le monde d'aujourd'hui.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Avant d'entamer le projet, nous avons tenu à dresser un planning de travail bien réparti dans le temps et conforme aux attentes et exigences du projet, afin d'optimiser au maximum les séances et d'être plus productifs. Nous avons toutefois adapté ce planning au cours des séances. Ainsi, nous avons consacré la première séance à la répartition de la recherche documentaire. Tous les membres du groupe se sont informés sur la partie concernant l'explication du principe général de fonctionnement de la pile à combustible, Ghita a développé les principaux constituants et les applications, Caroline a fait des recherches sur les différents types de piles à combustible, leurs caractéristiques, et a rédigé les résultats de l'expérience, Claire s'est occupée de la partie portant sur le couplage ENR/PàC et a rédigé le protocole expérimental. Enfin, Lucille s'est chargée de la partie production d'hydrogène et relation avec l'entreprise, et Quentin s'est penché sur les applications actuelles et futures des PàC. Nous avons enregistré les informations collectées dans un document commun partagé avec tous les membres du groupe, alimenté au fur et à mesure des séances. Nous avons pensé qu'il serait intéressant d'effectuer une visite d'entreprise afin de visualiser une application concrète de la pile à combustible et de discuter avec des professionnels. Nous avons donc visité l'entreprise PowiDian proche de Tours, et Quentin s'est occupé de rédiger le rapport de cette visite. Nous avons continué la rédaction du rapport en parallèle et la mise en place de la bibliographie sur à peu près 5 séances. Ensuite, nous nous sommes attaqués à l'expérience pratique qui s'est étalée sur une matinée, avant d'exploiter les résultats. Enfin, les 3 dernières séances jusqu'à la semaine 23 ont été consacrées à achever le rapport, et à réaliser le diaporama de la soutenance orale ainsi que le poster.

3. LA PILE A COMBUSTIBLE : DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

3.1. Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?

3.1.1. Définition

Il s'agit d'une pile dans laquelle la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant tel que l'oxygène. Les piles classiques (H_2/O_2) sont alimentées en hydrogène et produisent de l'eau.

Les électrons qui circulent dans un circuit externe produisent un courant électrique qui est par la suite récupéré pour faire fonctionner différents appareils électriques.

Une réaction chimique se produit entre l'anode et la cathode. Si l'électrolyte est un polymère, la relation correspondante est : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O + \text{électrons} + \text{énergie}$.

Calculons maintenant la tension aux bornes d'une cellule élémentaire de pile à combustible d'équation : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$.

Pour cela, nous avons besoin de son équation de Nernst : $E = E^0 + \frac{RT}{nF} * \ln(Q)$

$$\text{avec } Q = \frac{P_{H_2O}}{(P_{O_2}^{1/2} * P_{H_2})} = \frac{1}{(0.21^{1/2} * 1)} = 2.18$$

E^0 énergie du couple $O_2/H_2O = 1,229 \text{ V}$

n le nombre d'électrons mis en jeu (ici 2)

On obtient donc, pour une pile de type PEMFC¹ fonctionnant à 100°C, une tension théorique de 1,219 V par cellule de PàC.

En réalité, on obtient plutôt une tension aux alentours de 0.6-0.7V en sortie d'une cellule de PàC. En effet, il y a beaucoup de pertes de chaleur et le fonctionnement d'une pile n'est pas parfait. Ainsi, toute l'énergie n'est pas convertie en électricité.

La tension d'une cellule étant relativement faible par rapport aux utilisations pour lesquelles elle est destinée, on connecte en série plusieurs cellules de PàC. On réalise ces assemblages car la tension produite par une cellule élémentaire seule est de l'ordre de 0,6V. En les associant, on peut ainsi obtenir des tensions et puissances supérieures. Cet assemblage s'appelle un "stack". La tension théorique aux bornes du stack est alors :

$$U_{\text{stack}} = N_{\text{cellules}} * E_{\text{cellule}}$$

1 Nous développerons le fonctionnement de ce type de pile dans la suite du rapport.

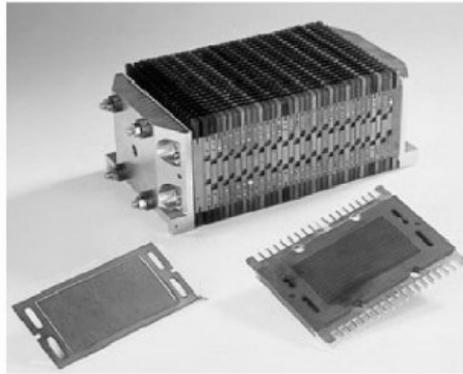


Illustration 1: Stack de PàC.

Source : <http://www.memoireonline.com/01/13/6842/Etude-dun-systeme-energetique--pile-combustible-destine--une-application-residentielle.html>

3.1.2. Les principaux composants d'une PàC et leurs fonctions

Pour permettre la production d'électricité, plusieurs composants entrent en jeu. Nous prendrons ici le cas de la pile à combustible qui utilise l'hydrogène. Elle comprend uniquement des parties fixes, ainsi ce dispositif est très silencieux (de l'ordre de 40 à 50 dB à un mètre, soit moins que le volume sonore d'une conversation).

Dans une cellule, on trouve tout d'abord deux électrodes :

- L'anode, reliée au pôle positif, est chargée en dihydrogène (le combustible) provenant d'un réservoir. La réaction de dissociation est : $\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$;
- La cathode, reliée au pôle négatif, est chargée en dioxygène. La réaction est : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$.

Ces deux électrodes sont séparées par un électrolyte, un matériau liquide ou solide qui a la capacité de bloquer le passage des électrons et assure la bonne diffusion de l'hydrogène (sous forme de protons H^+). Le plus souvent, l'électrolyte est un polymère contenant du platine mais sa nature dépend du type de pile utilisée.

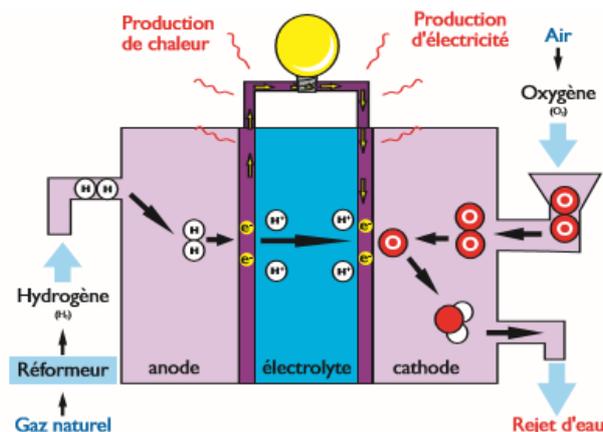


Illustration 2: Schéma simplifié du fonctionnement d'une PàC.

Source : <http://www.veolia.com/sites/g/files/dvc181/f/assets/documents/2014/04/pile-combustible.pdf>

Dans l'anode, on constate une dissociation des molécules d'hydrogène. Les ions H^+ se diffusent dans l'électrolyte tandis que les électrons sont forcés de circuler dans un circuit externe générant un courant électrique en continue.

Dans la cathode, les ions H^+ , les électrons et les atomes d'oxygène se regroupent et s'associent pour former de l'eau. La réaction produit de la chaleur qui peut être récupérée. La pile à combustible continue de fonctionner tant qu'elle est approvisionnée en réactifs.

Enfin, le courant électrique produit est transformé en courant alternatif afin que l'on puisse l'utiliser dans notre vie quotidienne.

3.1.3. Les autres constituants facilitant les réactions

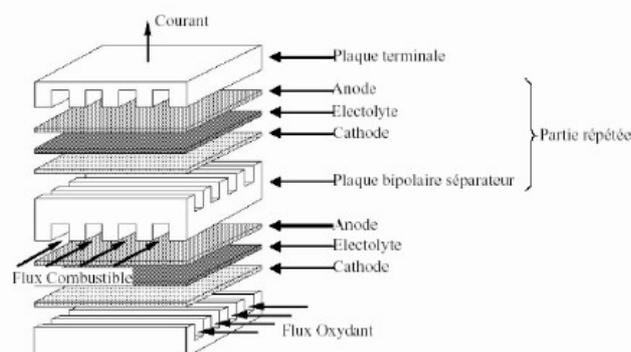


Illustration 3: Schéma de la composition intérieure d'un stack

Source : <http://www.memoireonline.com/01/13/6842/Etude-dun-systeme-energetique--pile-combustible-destine--une-application-residentielle.html>

La PàC présente également des constituants permettant d'accélérer la cinétique des réactions d'oxydoréductions qui ont lieu dans la pile et ainsi d'améliorer le rendement.

Ainsi, l'utilisation d'un catalyseur au niveau de l'anode et/ou de la cathode permet de faciliter les échanges électroniques. Le catalyseur est choisi en tenant compte de la nature de la réaction ainsi que de la température. Le rôle de ce catalyseur dans l'oxydation de l'hydrogène à l'anode et dans la réduction de l'oxygène à la cathode est essentiel pour le rendement de la pile. On utilise encore aujourd'hui principalement le platine, qui est déposé en couches minces sur la surface des deux électrodes, mais en plus grande quantité sur la cathode, la réaction de réduction y étant plus difficile à catalyser. Le platine est utilisé car il a la propriété de se lier aux atomes d'hydrogène. Quand il est au contact de dihydrogène, il capte donc les atomes d'hydrogène en dissociant H_2 . Ainsi, les atomes libres d'hydrogène peuvent facilement réagir avec O_2 . Cependant, le platine est un métal rare et très coûteux, ce qui rend la pile à combustible très chère et nuit à sa compétitivité. Des nanomatériaux catalytiques sont maintenant étudiés pour surmonter cet obstacle majeur.

En contact avec l'anode et la cathode, on trouve les plaques bipolaires. Elles jouent plusieurs rôles importants dans la PàC :

- Elles sont conductrices du courant, c'est-à-dire qu'elles permettent le passage des électrons de l'anode vers la cathode ;
- Elles permettent une diffusion homogène des gaz jusqu'aux électrodes et l'évacuation des produits ;
- Elles ont un rôle mécanique qui est de maintenir les cellules élémentaires dans l'empilement ;

- Et enfin, elles sont également conçues pour évacuer la chaleur produite lors de la réaction.

Les piles à combustible sont donc constituées d'un empilement de cellules élémentaires séparées par les plaques bipolaires.

3.2. Les différents types de PàC

Aujourd'hui, on compte 6 types de PàC différents. Elles se différencient les unes des autres notamment par la nature de l'électrolyte, leurs températures de fonctionnement et leurs applications. Chacune d'elles possède des avantages et des inconvénients multiples.

3.2.1. Les principales caractéristiques des piles existantes

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Signification	Pile alcaline	Pile à membrane échangeuse de protons	Pile à alimentation directe en méthanol	Pile à acide phosphorique	Pile à carbonates fondus	Pile à oxydes solides
Température de fonctionnement	60 à 80°C	60 à 100°C	70 à 110°C	180 à 220°C	620 à 660°C	800 à 1000°C
Electrolyte	Hydroxyde de potassium (KOH)	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique (H ₃ PO ₄)	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ dans du LiAlO ₂	Céramique (ZrO ₂ et Y ₂ O ₃)
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Combustible	H ₂	H ₂	CH ₃ OH	H ₂	H ₂	CO, H ₂
Oxydant	O ₂	O ₂ /Air	O ₂ /Air	O ₂ /Air	O ₂ /Air	O ₂ /Air
Applications	Transport (spatial, NASA)	Transport (automobile) Portable Stationnaire	Transport Portable Stationnaire	Stationnaire	Stationnaire	Transport (automobile) Stationnaire

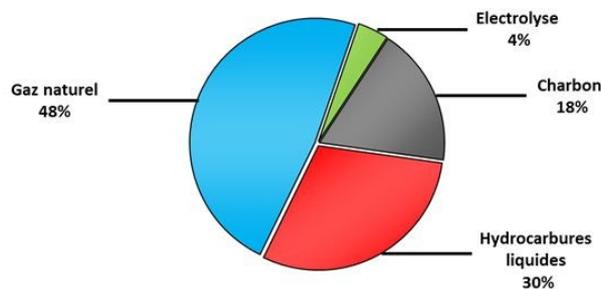
3.2.2. Les réactions à l'anode et à la cathode pour chaque pile

Piles à Combustible	Réaction à l'anode	Réaction à la cathode
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

3.3. La production de dihydrogène

Pour fonctionner, les piles à combustible les plus couramment utilisées ont besoin de dihydrogène, H_2 (souvent appelé hydrogène). L'atome d'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers. Cependant, dans la nature, on ne le trouve pas sous la forme de H_2 , il est généralement lié à d'autres atomes (molécules H_2O , H_2S). La molécule d'hydrogène H_2 doit donc être fabriquée pour pouvoir être utilisée dans les PàC. Le fait qu'il faille dépenser de l'énergie pour produire de l'hydrogène avant de s'en servir pour produire à nouveau de l'énergie explique que l'hydrogène soit un vecteur d'énergie et non une source d'énergie. A l'heure actuelle, la plupart de l'hydrogène est produit à partir de sources fossiles comme le gaz naturel par procédé de reformage du méthane à la vapeur. A long terme, il est prévu d'augmenter la production d'hydrogène grâce à des énergies renouvelables comme l'éolien ou le solaire.

Origines de l'hydrogène produit dans le monde en 2011



Source : UFE selon données IFPEN

Illustration 4: Provenance de l'hydrogène produit dans le monde en 2011.

Source : <http://observatoire-electricite.fr/notes-de-conjoncture/Le-role-de-l-hydrogene-dans-un-mix>

3.3.1. Production d' H_2 par l'électrolyse de l'eau

L'électricité produite à partir des énergies renouvelables peut être utilisée pour réaliser une électrolyse de l'eau.

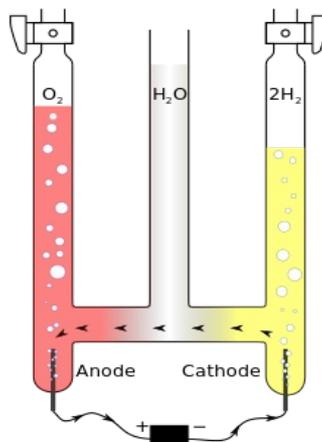


Illustration 5: Schéma du fonctionnement de l'électrolyse de l'eau.

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse_de_l%27eau

L'électrolyse de l'eau consiste à décomposer l'eau H_2O en dioxygène O_2 et en dihydrogène H_2 à l'aide d'un courant électrique. Celui-ci dissocie la molécule d'eau en ions HO^- et H^+ qui forment de l' O_2 et du H_2 selon les réactions suivantes:

- A l'anode : $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$;
- A la cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$.

Ce qui nous donne comme équation finale: $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$.

Il existe deux familles d'électrolyseurs:

- les électrolyseurs alcalins: l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium KOH, une membrane entre la cathode et l'anode sépare l'hydrogène et l'oxygène tout en permettant le passage des ions. Les électrodes sont généralement en nickel ;
- les électrolyseurs à électrolyte membrane polymère (SPE: solid polymer electrolyte), c'est elle qui joue le rôle d'électrolyte.

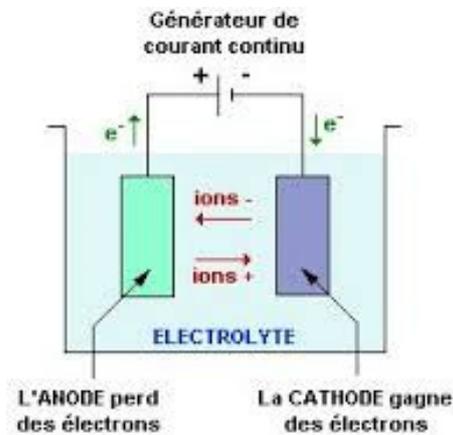


Illustration 6: Principe général de l'électrolyse.

Source : <http://tpe-electrophorese-adn.e-monsite.com/>

L'hydrogène ainsi obtenu peut être utilisé pour faire fonctionner une PàC et donc produire de l'électricité. Ce procédé a l'avantage de permettre le stockage de l'énergie produite à partir des éoliennes et des panneaux solaires. En effet, ceux-ci ne produisent pas forcément de l'électricité au moment où on en a besoin et il est difficile de la stocker dans la mesure où les batteries dont on dispose n'ont pas des capacités suffisamment grandes pour accueillir tout le surplus d'électricité produit. Utiliser ce surplus d'électricité pour créer de l'hydrogène que l'on peut par la suite réutiliser pour faire fonctionner une pile à combustible est donc un moyen de réduire les pertes d'électricité et de stocker de l'électricité. Cependant le rendement de l'électrolyse n'est pas encore suffisamment bon pour que ce procédé se généralise: on consomme plus d'électricité que l'on en produit. De plus, l'hydrogène produit par électrolyse revient environ quatre fois plus cher que celui produit à partir de sources d'énergies fossiles c'est pourquoi cette méthode est peu répandue.

3.3.2. Production d' H_2 par reformage du méthane

Aujourd'hui, 95% de l'hydrogène est produit à partir de sources d'énergies fossiles comme les gaz naturels ou le pétrole. Un des procédés qui les utilisent est la production de dihydrogène par reformage du méthane.

Ce procédé consiste à faire réagir des composés hydrogénés ou du charbon avec de la vapeur d'eau ou de l'oxygène. Les composés hydrogénés peuvent être des hydrocarbures ou des alcools, ici nous étudierons le vaporeformage du gaz naturel.

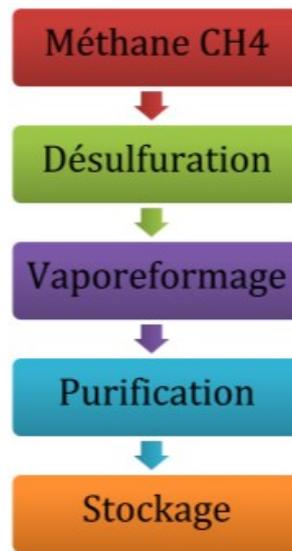


Illustration 7: Etapes de production d'hydrogène par reformage du méthane.

Source : https://wehicles.com/wiki/Production_Hydrogene_Vaporeformage

Le gaz naturel contient majoritairement du méthane mais aussi d'autres gaz et des composés soufrés. Or les PàC ne supportent pas le soufre, tout comme certains des catalyseurs utilisés pour le vaporeformage. Avant de pouvoir réaliser le vaporeformage, une étape de désulfuration est donc nécessaire afin d'éliminer les composés soufrés du gaz naturel. Pour cette étape on utilise de l'hydrogène de façon à transformer les composés soufrés en H₂S.

Lors du vaporeformage, le méthane réagit avec de la vapeur d'eau sur un catalyseur, généralement le nickel ou un métal précieux comme le ruthénium. Le but de ce catalyseur est de favoriser la formation de l'hydrogène et non celle du monoxyde et du dioxyde de carbone. Cette réaction est très endothermique, donc pour la déplacer dans le sens de la création d'hydrogène la vapeur d'eau doit être à haute température (750 à 850°C). Industriellement, on utilise également des pressions élevées (entre 10 et 40 bar).

Le reformage du méthane se fait selon cette équation : $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}_{(\text{vap})} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$.

Pour obtenir plus d'hydrogène, on réalise une deuxième étape, le Water-Gas Shift qui transforme le CO₂ en CO en produisant de l'hydrogène : $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$.

La combinaison de ces deux équations donne : $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$.

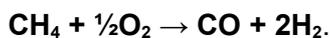
En théorie, cette méthode produit 80% de dihydrogène et 20% de dioxyde de carbone. En réalité, la réaction n'est pas totale et il reste également du monoxyde de carbone, de la vapeur d'eau et du méthane n'ayant pas réagi. Le mélange obtenu est donc purifié pour ne garder que de l'hydrogène.

Si ce procédé est majoritairement utilisé pour produire de l'hydrogène, c'est parce qu'il est le moins coûteux (environ 1.50€/kg d'H₂). Cependant, il présente l'inconvénient de rejeter du dioxyde de carbone, or réduire les émissions de CO₂ est un des enjeux de la PàC. Si on utilise le vaporeformage du méthane malgré le fait qu'il implique de rejeter du CO₂, c'est parce qu'après utilisation de l'hydrogène ainsi produit, au total, le bilan de CO₂ rejeté est moins élevé qu'avec les sources d'énergie complètement fossiles. Par exemple, une

voiture qui roule à l'essence rejette (entre la fabrication du carburant et son utilisation) environ 120 à 150 g de CO₂/km contre 80g CO₂/km pour une voiture utilisant de l'hydrogène produit par reformage du méthane. De plus, avec ce procédé, le CO₂ se trouve concentré là où on le produit et il n'est pas dispersé immédiatement. Les chercheurs s'intéressent donc à la possibilité de récupérer ce dioxyde de carbone pour l'enfouir dans d'anciens puits de pétrole. Cette méthode est appelée Captage et Stockage du dioxyde de carbone (CCS pour les anglophones).

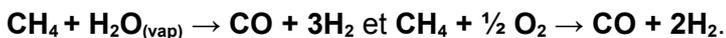
3.3.3. *Autres méthodes de production de dihydrogène*

- L'oxydation partielle : Cette réaction consiste en une oxydation incomplète d'hydrocarbures, comme le méthane. Dans les faits, on place de l'oxygène en quantité moindre que ce que la stœchiométrie exige. Cette réaction est exothermique et ne nécessite pas forcément de catalyseur. Pour le méthane, la réaction principale est :



L'inconvénient de ce procédé est que, si l'on utilise de l'air, les sous-produits de la réaction sont plus compliqués à éliminer que pour le vaporeformage (CO, azote, éthane, éthylène, méthanol, ...). De plus cette réaction produit environ 40% d'H₂, rendement faible par rapport au vaporeformage. A noter que l'oxydation partielle peut aussi être faite à partir d'alcools.

- Vaporeformage du méthanol : Même principe que pour le vaporeformage du méthane mais dans des conditions opératoires différentes.
- Reformage autotherme : Combine à la fois le vaporeformage et l'oxydation partielle. cette réaction se fait en présence d'un catalyseur à une pression supérieure à 20 bar. Cette méthode permet le reformage de méthanol ou d'hydrocarbures. Pour le méthane, les réactions suivantes se produisent :



La chaleur dégagée lors de l'oxydation et transmise au gaz de synthèse est récupérée et réutilisée pour former de la vapeur d'eau.

- Production de dihydrogène en utilisant la biomasse : Grâce à la fermentation anaérobie de matières organiques (nourriture, fumier, ...) du gaz est formé, gaz pouvant contenir jusqu'à près de 70% de méthane. On utilise alors le procédé classique de production d'hydrogène par reformage de méthane appliqué à ce gaz.

La gazéification de la biomasse se fait en injectant de l'air ou de la vapeur d'eau à température relativement faible.

4. APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLE

La pile à combustible semble avoir un avenir prometteur dans trois grands secteurs majeurs de l'industrie et des nouvelles technologies : le transport, le stationnaire et le portable. Elle est au cœur des nouvelles installations de part les nombreux atouts qu'elle possède. En effet, comme on a pu le voir, l'hydrogène permet de générer de l'électricité, sans nuisance sonore et pollution atmosphérique. L'autonomie des installations des piles à combustible et leur grande facilité et rapidité d'utilisation font d'elles d'excellentes ressources d'énergie.

4.1. Les applications actuelles

4.1.1. Dans les transports

Il s'agit du domaine phare de la pile à combustible. Elle s'est développée à partir des années 1990 afin de satisfaire les besoins de ce secteur en particulier. L'hydrogène est une énergie transportable, l'électricité devient en conséquence disponible quand on en a besoin et partout où on en a besoin. L'hydrogène est directement utilisé sur le terrain, par exemple par les pompiers et les médecins du SAMU lors de leurs interventions.

Depuis plus de vingt ans, de nombreux prototypes ont vu le jour dans le domaine des transports :

- L'entreprise française PSA a mis au point les prototypes Partner Hydro-Gen et Taxi présentés en 2001 ;
- Nissan associé à Renault a réalisé les prototypes Xterra et X-Trail ;
- Air Liquide a développé son bus Scania dans le cadre d'un projet européen.

L'autonomie de ces véhicules légers utilisant l'hydrogène comme combustible est de l'ordre de 500 km.

Le stockage de l'hydrogène peut être fait de différentes manières dans le cadre de l'utilisation automobile :

- Sous forme liquide à -250°C ;
- Sous pression de plus 500 bars ;
- Par l'utilisation de nanostructures de carbone comme les nanotubes de carbone mono-feuillets (SWNT). L'hydrogène est absorbé par cette structure pour une pression de 100 bars à 10°C puis rejeté dans des conditions proches de l'atmosphère. Ce processus est réversible ;
- Dans un composé chimique de la forme C_nH_m ou NH_3 , qui a l'avantage d'être facile à distribuer avec les infrastructures actuelles tout en étant renouvelable, mais qui peut être très toxique (dans le cas NH_3) et qui demande des conditions réactionnelles spécifiques très strictes.

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la pile à hydrogène demeure le coût de production particulièrement élevé par rapport à celui de l'utilisation de moteurs thermiques, performants, mais extrêmement polluants. C'est pour cela qu'il faut distinguer s'il s'agit d'équiper un véhicule lourd ou léger car il est demandé au véhicule léger environ 3000h de fonctionnement pour une durée de vie d'une dizaine d'années alors que le véhicule lourd exige une durée de fonctionnement cent fois plus longue.

De plus, changer le type de carburant des voitures inclut la mise en place de nombreuses stations "hydrogène" afin de permettre aux voitures de pouvoir se recharger en combustible ce qui a un coût non négligeable.

Enfin, la pile à combustible produit de l'eau lors de ce fonctionnement. Cette eau doit donc être stockée dans la voiture dans un conteneur approprié qui devra être vidé quand il sera plein.

4.1.2. Le stationnaire

Une des utilisations de la PàC est la production d'électricité pour des structures plus ou moins grandes de façon à les rendre autonomes ou presque. C'est notamment le secteur d'activité de l'entreprise PowiDian qui conçoit des stations de production d'énergie

autonomes pour fournir de l'énergie dans des endroits isolés comme par exemple à la Réunion dans le cirque de Mafate, plateau isolé où vivent 300 personnes. Cet espace était uniquement alimenté par des panneaux solaires individuels avant que l'entreprise ne l'équipe d'une station autonome. Cette station utilise un couplage PàC/panneaux solaires : de l'électricité est produite par les panneaux solaires qui alimentent un électrolyseur, l'électrolyseur produit de l'hydrogène qui est utilisé dans la PàC, le fonctionnement de la station sera développé dans la suite de ce rapport.

Sur le même principe, le CEA, l'Université de Corse Pasquale Paoli, l'entreprise HELION et le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Énergies Alternatives travaillent sur la plateforme MYRTE en Corse. La Corse étant une île, son réseau électrique est de petite capacité et reçoit une forte demande de consommation d'électricité. La plateforme MYRTE a donc pour but de développer un système de couplage énergie renouvelable/PàC de façon à produire de l'hydrogène par électrolyse pendant les heures de faible consommation et de le restituer sous forme d'électricité pendant les heures de forte demande d'électricité. Pour ce faire la plateforme est composée de 3700 m² de panneaux photovoltaïques couplés à un système de production et de stockage d'hydrogène. Actuellement, la plateforme peut générer une puissance de 5600kW. Cette solution permettrait de soutenir le réseau électrique corse sans avoir recours aux énergies fossiles. Pour le moment, l'objectif est de déterminer le fonctionnement le plus efficace de ce dispositif en étudiant le vieillissement des matériaux et des systèmes et les différences de rendement en fonction de la programmation du logiciel de gestion.

La pile à combustible peut également fournir de l'électricité et de la chaleur simultanément dans des habitations individuelles en exploitant le principe de cogénération. La cogénération consiste à produire et à utiliser simultanément deux types d'énergie, ici il s'agit d'exploiter la chaleur produite par la PàC lors de la production d'électricité. La société Veolia Environnement étudie en ce moment cette solution dans le nord de la France dans des HLM où ont été installées des PàC alimentées par du gaz naturel.

De nombreux projets de ce genre émergent, soutenus par les collectivités territoriales et par de grands groupes comme EDF ou Veolia, mais le frein majeur à une commercialisation de masse reste le coût élevé de la PàC.

4.1.3. Le mobile/portable

La dernière forme d'utilisation de la pile à combustible est une pile à combustible miniaturisée permettant la production d'électricité pour des téléphones portables, ordinateurs portables et autres appareils portatifs. Ces piles à combustible sont la plupart du temps couplées avec une pile Lithium-ion afin de permettre la production d'un courant continu. Actuellement, l'autonomie d'un téléphone portable utilisant une pile à combustible est de près de 3 jours et 3 heures pour un ordinateur portable.

Le stockage de l'hydrogène s'effectue alors de 4 manières différentes :

- Sous forme d'hydrogène liquide ;
- Sous forme d'iodure métallique, c'est à dire l'insertion d'hydrogène dans des structures métalliques (exemple MgH₂). L'inconvénient majeur de ce procédé est qu'il prend beaucoup de place mais il a pour avantage d'être endothermique et auto limitant. Ainsi, en cas de fuite, la température baisse ce qui permet de stopper le dégagement de H₂ ;
- Sous forme d'une solution de NaBH₄, l'hydrogène étant dégagé selon la réaction suivante : $\text{NaBH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}_2 + \text{NaBO}_2$;
- Enfin sous forme de méthanol avec une pile à combustible de type DMFC.

Les inconvénients de l'utilisation de nano-piles à combustible pour des applications portables sont le prix, l'autonomie relativement faible, l'encombrement et enfin la difficulté pour

recharger ces piles, requérant soit une batterie externe, soit un générateur à hydrogène ou alors d'acheter des recharges.

Actuellement, l'utilisation d'une pile à combustible pour des appareils portables n'est pas une alternative viable aux utilisations de batteries classiques sauf dans des domaines précis comme par exemple dans le militaire.

4.2. Les inconvénients des PàC

Bien que la PàC présente de nombreux avantages notamment écologiques, il existe toutefois, à plus grande échelle, des limites à son utilisation liées principalement aux aspects suivants : le coût, le rendement énergétique, la facilité d'utilisation/distribution et l'impact écologique.

En ce qui concerne le prix, on peut tout d'abord souligner que le catalyseur utilisé dans la majorité des PàC aujourd'hui est le platine, métal très coûteux qui représente 25% du prix de la pile. Aucune alternative assez satisfaisante n'a encore été trouvée si ce n'est l'utilisation du palladium, un métal parfois utilisé comme catalyseur pour l'industrie chimique en remplacement du platine. D'autre part, la fabrication d'une PàC requiert de nombreuses étapes, ce qui augmente le coût global (matériel utilisé, temps de travail important, transport...).

Le rendement énergétique d'une PàC reste également peu élevé : la majorité des piles sont de type PEMFC, qui n'ont qu'un rendement énergétique de 40% à 50%. Il existe néanmoins d'autres types de PàC avec un meilleur rendement, mais présentant d'autres problèmes. La PàC possède une durée de vie n'excédant pas quelques milliers d'heures. Pour qu'elle devienne rentable, il faudrait que cette espérance de vie augmente jusqu'à atteindre 20 000 à 40 000 heures.

Viennent ensuite les inconvénients liés à l'approvisionnement en H₂, gaz qui peut être difficile à produire et à utiliser. Dans un premier temps, le dihydrogène n'est pas une source d'énergie mais un vecteur énergétique. Il n'existe que très peu à l'état naturel. Il faut d'abord dépenser de l'énergie pour en produire à partir d'eau ou d'hydrocarbures avant de récupérer à nouveau de l'énergie à l'aide d'une PàC. Dans un second temps, c'est un gaz inflammable et explosif au seul contact de l'air, ce qui le rend difficilement manipulable et impose de nombreuses contraintes pour son utilisation. Il est donc nécessaire de produire des réservoirs de H₂ assez étanches avec une isolation thermique importante pour éviter toute fuite, et qui, en cas d'accident, doivent laisser s'échapper rapidement le gaz plus léger que l'air pour éviter tout risque d'explosion. Par ailleurs, l'eau produite par les PàC à hydrogène est rejetée sous forme de vapeur. Ces rejets combinés à l'oxygène peuvent constituer un danger pour l'environnement, car ils pourraient perturber la couche d'ozone. 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.

On doit également se poser des questions sur les réseaux à grande échelle de distribution 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 piles, il semble très difficile de faire une exploitation viable économiquement de cette technologie. Cela est pourtant indispensable pour que son usage se généralise.

Pour finir, malgré la réputation d'énergie « verte » liée aux PàC, 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 de problèmes de

coût et de rentabilité énergétique. De même, les autres types de PàC utilisent des combustibles dont la production est souvent polluante car complexe.

4.3. Les perspectives futures

Il est clair qu'en l'état actuel des choses, la pile à combustible n'est pas une alternative viable économiquement comparée aux générateurs d'énergie classiques (que ce soit les centrales utilisant des énergies fossiles ou même des centrales aux énergies renouvelables). En effet, les problèmes technologiques, structurels et économiques empêchant le développement de ces piles sont nombreux, que ce soit la faible densité électrique de ces piles, le manque d'infrastructures adéquates pour produire et distribuer l'hydrogène, leur rendement peu élevé ou encore l'utilisation du platine comme catalyseur.

Cependant, dans certains pays comme l'Allemagne et le Japon, la recherche sur les technologies à hydrogène est extrêmement plébiscitée. Plusieurs perspectives pour l'avenir se dégagent ainsi et parmi elles, on trouve :

- L'utilisation d'hydrogène pour stocker de l'énergie électrique. En effet, l'hydrogène à pour avantage que s'il est stocké sous forme gazeuse ou liquide dans de grandes cuves, les fuites énergétiques sont bien moins importantes que pour le stockage dans des batteries. Cependant, cette technologie est dépendante du rendement futur des piles à combustible ;
- L'utilisation de piles à combustible individuelles. La présence de piles à combustible dans chaque logement couplé à un complexe électrolyseur pourrait permettre l'indépendance énergétique de chaque foyer. C'est une perspective explorée notamment en Allemagne, où la conscience écologique est très forte. Malheureusement, une pile à combustible actuelle est bien trop coûteuse pour que ce genre d'installation puisse être démocratisé, sauf dans des endroits très reculés où l'approvisionnement en énergie est très compliqué et coûteux (par exemple les sous-marins de l'armée, les zones de hautes montagnes...) ;
- L'utilisation de piles à combustible à haute température dans des stations autonomes. Ces piles sont le plus souvent des piles aux méthanol ou utilisant des électrolytes liquides tels que la potasse ou l'acide phosphorique à haute température (500-600°C) ou d'électrolyte solide tel qu'une céramique en zircone dopée avec de l'yttrium à 600-1000°C. Elles permettent d'éviter l'utilisation du platine comme catalyseur en le remplaçant par un oxyde de cérium et du ruthénium, les rendant ainsi moins onéreuses. Le rendement de ce genre de pile est de l'ordre de 40 à 50% ;
- L'utilisation d'hydrogène dans le domaine du transport. L'utilisation d'hydrogène dans les transports permettrait de réduire grandement la pollution routière et a déjà pour avantage une grande autonomie. Cependant, la démocratisation de ce genre de moyen de transport est freinée par le prix de l'hydrogène bien trop élevé (près de 3 fois plus cher que l'essence) et nécessiterait l'installation de nombreuses stations hydrogène (l'équipement de 1000 stations service coûterait près de 100 milliards d'euros). Ce genre d'utilisation sera sans doute limité à certaines villes ou à l'utilisation de certains moyens de transport tels que les bus, les véhicules des gardes forestier ou encore les transports d'urgence comme les ambulances circulant autour d'une même zone et pouvant donc se réapprovisionner aux mêmes stations.

5. VISITE D'UNE ENTREPRISE: POWIDIAN

5.1. Généralités sur l'entreprise

Afin de compléter nos connaissances dans l'exploitation de la pile à combustible, nous avons effectué une visite dans l'entreprise PowiDian.

PowiDian est une spin off d'Airbus créée en octobre 2014 par deux co-fondateurs. Cette entreprise a pour objectif la mise en place de différents complexes générateurs autonomes d'électricité à partir de piles à combustible, majoritairement de type PEM. La start-up travaille notamment avec EDF, MOSS, Airbus DS et AEG Power Solutions et a été primée à la COP21 dans la catégorie Atténuation. Ils ont travaillé notamment sur la construction d'un générateur autonome dans la station du Parc de la Vanoise, ainsi que sur d'autres projets pour EDF Réunion, pour l'armée de l'air et pour la gendarmerie nationale.

5.2. Notre visite (lundi 24 avril 2017)

Cette visite a permis de nous informer sur l'exploitation d'une pile à combustible (pourquoi et comment l'utiliser), domaine qui n'était que peu développé dans la plupart des sources documentaires que nous avons utilisées.

Commençons par le "pourquoi" de l'exploitation de la pile à combustible. Premièrement, l'utilisation d'une pile à combustible PEM ne dégage que de la vapeur d'eau et est ainsi écologique. De plus, elle permet le stockage d'énergie sous la forme d'hydrogène gazeux. Or, le stockage d'énergie par batterie prend beaucoup plus de place, est plus lourd et enfin a beaucoup plus de perte énergétique au cours du temps qu'une pile à combustible de même capacité. Enfin, couplé à un système générateur d'hydrogène par électrolyse, un complexe générateur d'électricité utilisant une pile à combustible peut être indépendant de tout approvisionnement en matière première, à part l'eau.

Le système SAGES, basé sur le 100% renouvelable, est utilisé par PowiDian. La source d'énergie utilisée est renouvelable. Il peut s'agir du solaire (panneaux solaires), de l'éolien, ou encore de la biomasse (plus rare). Le stockage batterie est privilégié pour le court terme car il prend beaucoup de place, est très lourd et très cher tandis que le stockage hydrogène sert pour le long terme.



Illustrations 8: Les panneaux solaires de l'installation de PowiDian.

Mais comment l'hydrogène est-il stocké ? L'hydrogène peut être stocké de deux manières différentes, soit dans des cuves basse pression à 30 bar soit dans des cuves haute

pression à près de 200 bar. Les cuves haute pression ont pour avantage de pouvoir stocker plus d'hydrogène dans un espace plus restreint mais nécessitent un compresseur et plus de maintenance multipliant ainsi le coût de stockage. Le rendement énergétique est de près de 1kW/h pour 16kg mais la technologie des piles à combustible ne cesse de s'améliorer.

Une pile à combustible fonctionne toujours à puissance constante : il est donc indispensable de l'utiliser avec une batterie afin de pouvoir moduler la puissance envoyée au réseau électrique (entre 100 W et 500 kW) dans le cas d'une utilisation domestique.



Illustration 9: Installation réservoirs, électrolyseur et piles à combustible de PowiDian.

La question qu'on pourrait se poser pour de nouvelles technologies de générateurs est la question de la maintenance. Dans le cas d'un complexe avec pile à combustible, la maintenance peut idéalement s'effectuer tous les six mois et nécessite moins de maintenance qu'un système standard. La seule opération d'entretien est l'humidification tous les 28 jours de la membrane afin d'éviter qu'elle s'assèche et se craquelle. Toutefois, cette opération se fait automatiquement. De plus, les actions principales telles que l'entretien des filtres ne demandent pas beaucoup de qualification et peuvent donc être effectuées facilement sauf en cas de pannes majeures. Aussi, il existe des systèmes de contrôle à distance permettant de repérer rapidement les anomalies et les coûts OPEX sont réduits rendant ainsi le retour sur investissement rapide. La durée de vie estimée de telles installations est d'environ 15 ans.

Concernant les dangers des piles à combustible, ceux-ci sont au final assez différents des dangers des générateurs classiques. Le risque principal serait une fuite d'hydrogène en intérieur car en présence de 18% d'air celui-ci explose. En revanche en extérieur, l'hydrogène est particulièrement léger et aura donc tendance à monter très vite dans l'air ce qui limite les risques. Afin d'éviter des explosions dues à des fuites dans un système exploitant une pile à combustible, différentes zones ATEX à des endroits stratégiques sont placées dans les armoires électriques.

Passons maintenant à l'analyse d'un exemple d'installation créée par PowiDian au Col du Palet dans le parc de la Vanoise. Cette station autonome dispose d'un générateur d'hydrogène, combiné à plusieurs piles à combustible de type E-2500 et à des panneaux solaires. Elle combine un système de stockage par batterie avec un système de stockage sous forme gazeuse. Elle permet ainsi de produire de l'énergie sur le court terme (alternance jour/nuit) et sur le long terme (saisons). En effet, durant la journée, les panneaux solaires alimentent quatre batteries Lithium-ions 48V (utilisées pour leur légèreté) jusqu'à ce qu'elles soient chargées à 95%. Ensuite, les panneaux solaires activent l'électrolyseur, produisant de l'hydrogène qui sera par la suite stocké dans de grandes cuves. Ainsi, une pile à combustible couplée à quatre onduleurs permet de générer un courant alternatif utilisable.

Dans le cadre du refuge du Col du Palet, de l'énergie solaire peut être utilisée instantanément en été et en même temps, de l'énergie est stockée sous forme d'hydrogène par réaction d'électrolyse. Ensuite en hiver, quand il y a moins de soleil, les réserves en hydrogène sont utilisées.

Cependant, la pile hydrogène possède également de nombreux inconvénients. En effet, elle supporte assez mal une utilisation en puissance très variable. De plus, l'hydrogène doit être de bonne qualité afin de ne pas dégrader la pile. Celle-ci est également très sensible aux changements de température : en effet, si la température est trop basse, l'eau peut geler et craquer la membrane, et si la température est trop élevée, la membrane risque de se dessécher et de se craqueler, sans compter les problèmes de refroidissement et les nuisances sonores engendrées par son fonctionnement qui peuvent atteindre 80 dB à 45°C. Enfin, dernier inconvénient et pas des moindres, une pile PEM de 30 kW coûte près de 85000 dollars à elle seule, le coût de stockage de l'hydrogène est élevé et le coût estimé de l'électricité pour une installation telle que celle du col du Palet est entre 135 à 150 euros du MW.

PowiDian disposait également d'une pile à combustible au méthanol. Celle-ci utilise une solution de 30% de méthanol et 70% d'eau. L'avantage de ce type de pile par rapport à une pile à combustible PEM est que la solution qu'elle utilise est liquide et possède une meilleure densité. Cependant, elle dégage du CO₂ et nécessite un préchauffage de près de 30 min qui demande beaucoup d'énergie (atteindre 2500W). De plus, s'il y a une erreur de préchauffage, la pile doit être redémarrée.

Pour conclure, nous pouvons dire que cette visite de PowiDian a été très instructive. Elle nous a en effet permis de découvrir les piles à hydrogène sous un aspect beaucoup plus pratique. Pour l'instant, la pile à combustible est loin d'être une alternative viable à des générateurs d'électricité plus classiques à part pour des lieux isolés ou l'acheminement de matières premières est très difficile. Cependant, cette technologie encore balbutiante s'améliore d'années en années, notamment grâce à l'optimisation des stacks, et il existe de nombreuses pistes d'optimisation des piles à combustible telles que la cogénération chaleur/électricité développée en Allemagne.

6. L'EXPERIENCE

6.1. Le montage

Afin de réaliser notre expérience, nous avons utilisé le modèle de pile PEMPower 1-Eco.

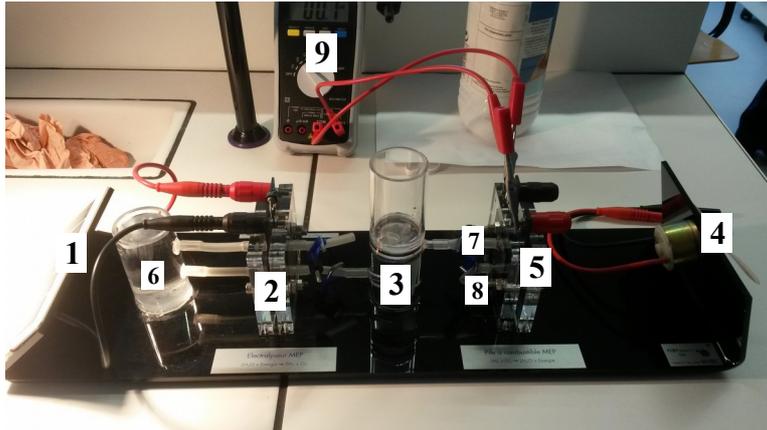


Illustration 10: Photographie du montage expérimental.

Ce modèle pédagogique est constitué d'un panneau solaire (1), d'un électrolyseur (2), d'un réservoir d'eau (6), d'un réservoir gradué pour contenir le dihydrogène (3), d'une hélice (4), de tuyaux (7 et 8) et d'une pile à combustible MEP (5). Nous avons également ajouté au montage un multimètre (9), des fils, une lampe et de l'eau distillée et nous avons utilisé un solarimètre pour régler l'éclairement sur le panneau solaire.

Les caractéristiques des différentes parties de ce montage sont les suivantes :

<u>Panneau solaire :</u>	<u>Electrolyseur :</u>	<u>Réservoir à H2 :</u>	<u>PEMFC :</u>	<u>Ventilateur :</u>
Surface : 90 cm ²	Surface électrode : 16 cm ²	Volume : 40 cm ³	Surface électrode : 16 cm ²	Puissance : 20 MW
Intensité : 300 mA	Puissance : 2 W		Puissance (H ₂ /O ₂) : 600 mW	
Tension : 2,5 V	Tension acceptée : de 0 à 1,9 V		Puissance (H ₂ /air) : 300 mW	
Puissance : 0,5 W	Intensité acceptée : de 0 à 2 A		Tension : de 0,3 à 0,9 V	

Source : manuel de la PEMPower 1-Eco

6.2. Protocole et expérience

Nous nous sommes préalablement informés des recommandations et des dangers potentiels liés à l'utilisation de ce montage. Il faut bien penser à humidifier la membrane de la pile pour ne pas l'endommager et il est conseillé dans le manuel d'ouvrir les fenêtres pour évacuer l'hydrogène fabriqué en cas de fuite. Ceci n'a pas été nécessaire dans notre cas car la production de dihydrogène était minimale.

1. Nous avons commencé par brancher le multimètre en parallèle aux bornes de la pile à combustible pour mesurer la tension ainsi que l'intensité.

2. Nous avons ensuite rempli d'eau distillée les deux réservoirs prévus à cet effet.
3. Nous avons pris soin d'humidifier la membrane de la pile pour assurer le bon fonctionnement de celle-ci, puis nous avons effectué les branchements de l'électrolyseur au panneau solaire.
4. Ensuite, nous avons positionné la lampe à environ 20 cm du panneau solaire. A l'aide du solarimètre, nous avons mesuré l'intensité émise par notre source lumineuse. Au milieu du panneau, nous avons environ 550 W/m². La tension aux bornes de l'électrolyseur est de 1,8 V.
5. La production d'H₂ étant maintenant commencée, nous avons attendu que tous les tuyaux du montage se vident de l'eau qu'ils contenaient et qu'il se remplissent d'hydrogène, pour fermer hermétiquement les vannes.
6. On attend ensuite que le réservoir d'hydrogène se remplisse, toutes vannes fermées. Passé 35 cm³, nous avons effectué une première purge du réservoir et de la membrane avec l'hydrogène, c'est-à-dire que nous avons ouvert toutes les vannes afin de laisser l'hydrogène circuler dans la membrane. L'eau est alors retombée dans le réservoir.
7. Enfin, une fois l'hydrogène évacué, nous avons refermé la vanne de sortie d'eau et avons laissé la vanne de passage de l'hydrogène du réservoir à la membrane ouverte.
8. La plus longue partie de l'expérience a consisté à attendre que la quantité d'hydrogène produite génère une tension suffisante pour actionner l'hélice. Pour cela, nous avons fait des mesures à intervalles de temps réguliers de l'intensité et de la tension aux bornes de la pile et de la quantité d'H₂ dans le réservoir.
9. Enfin, le ventilateur ne démarrant que pour une tension supérieure à 400 mV, nous l'avons branché après 190 minutes.

6.3. Résultats expérimentaux et interprétation

6.3.1. Le panneau solaire

Nous avons éclairé notre panneau solaire à l'aide d'une lampe placée à environ 20cm du panneau. A l'aide d'un solarimètre nous avons mesuré l'éclairement reçu par le panneau solaire, il était de 551 W/m² au centre et de 410W/m² et 342W/m² sur les côtés. Nous en avons déduit un éclairement moyen noté e_{moy} (=434 W/m²) qui nous a permis de déterminer la puissance reçue par le panneau solaire et de la comparer à la puissance électrique théorique transmise par le panneau.

$$P_{solaire} = e_{moy} * S = \frac{(410+342+551)}{3} * 90 * 10^{-4} = 3,91 W \text{ et } P_{elec} = 0,5 W$$

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{solaire}} = \frac{0,5}{3,91} = 0,12 \text{ Notre rendement est donc de } 12 \%$$

Il s'agit d'un panneau solaire polycristallin dont le rendement se trouve généralement entre 9 et 15 %. Ici, nous sommes bien dans cet intervalle.

6.3.2. La pile à combustible

Au cours de l'expérience, nous avons mesuré la tension, l'intensité et le volume de dihydrogène produit pendant 190 minutes. Nous en avons ensuite déduit la puissance générée par la pile selon la formule : $P_{\text{expérimentale}} = U \cdot I$.

Nous avons regroupé nos mesures expérimentales dans le tableau suivant :

Temps (en min)	Tension (en mV)	Intensité (en mA)	Volume de H ₂ (en cm ³)	Puissance (en mW)
0	0	0	0	0
10	93,2	3,11	9	0,289852
15	100,6	3,5	17	0,3521
20	107,9	3,6	25	0,38844
25	115,4	3,9	29	0,45006
30	122,8	4,2	33	0,51576
35	130	4,5	37	0,585
40	136,3	4,7	40	0,64061
45	145	5	45	0,725
50	152,3	5,34	49	0,813282
55	160	5,6	53	0,896
60	167,4	6	57	1,0044
65	174,8	6,32	61	1,104736
70	182	6,67	66	1,21394
75	190	7	70	1,33
80	198,4	7,4	74	1,46816
85	208,2	7,9	78	1,64478
90	217,4	8,36	82	1,817464
95	227,4	8,85	86	2,01249
100	237,9	9,35	90	2,224365
105	247	9,92	95	2,45024
110	257,3	10,48	99	2,696504
115	266,2	11,01	102	2,930862
120	280,4	11,08	104,5	3,106832
125	291,5	11,71	108,5	3,413465
130	300,8	12,35	112	3,71488
135	313,8	13,18	116	4,135884
140	317,3	14,22	120	4,512006
145	324,7	15,82	124	5,136754
150	332,8	16,40	128	5,45792
155	346,4	17,48	132	6,055072
160	352,8	18,43	135	6,502104
165	358,2	18,93	138	6,780726
170	372,4	19,69	142	7,332556
175	378,3	20,61	146	7,796763
180	389	21,34	150	8,30126
185	395	22,18	154	8,7611
190	402	23,09	158	9,28218

6.3.3. L'électrolyse

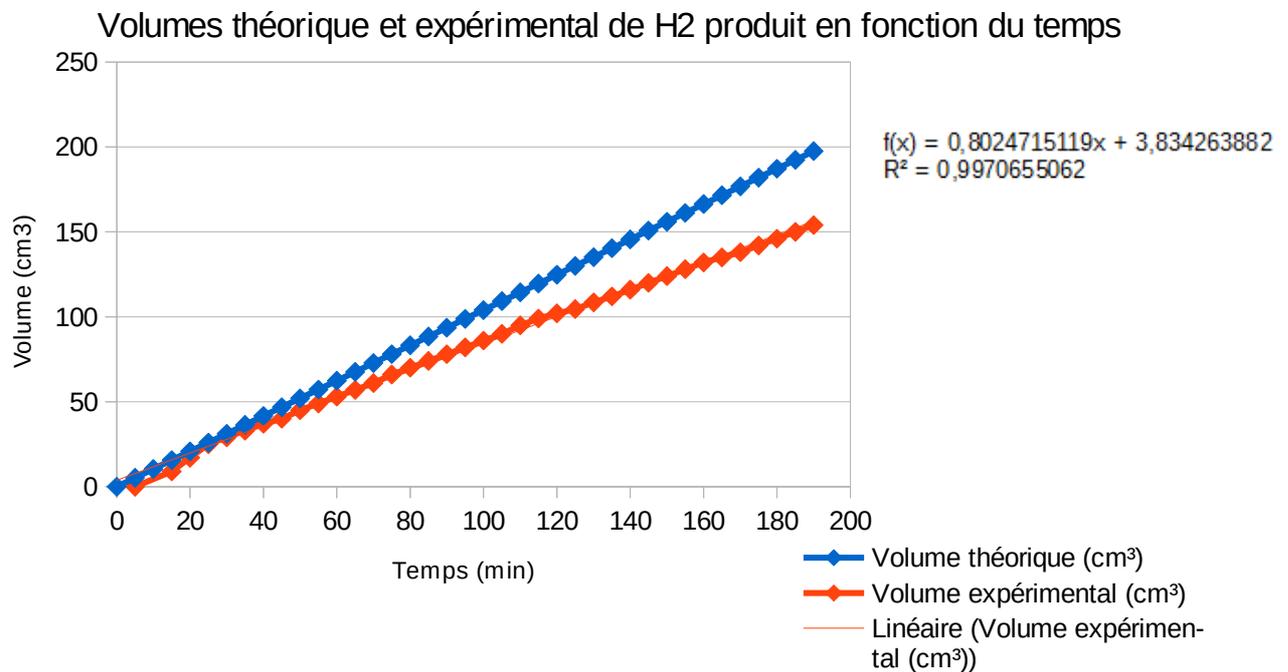
Tout d'abord, il est possible de calculer la puissance générée par la pile lors de son fonctionnement. Pour cela, on applique la formule suivante :

$$P_{\text{théorique}} = U \cdot I = 1,8 \cdot 170 \cdot 10^{-3} = 306 \text{ mW}$$

En comparant ce résultat avec la puissance expérimentale d'une cellule élémentaire, soit **0,311 W**, on obtient un écart relatif inférieur à 5%. Les valeurs théorique et expérimentale sont donc cohérentes.

Ensuite, on souhaite déterminer le volume d' H_2 , et plus précisément, la vitesse de sa production par électrolyse au cours du temps avec notre montage.

Pour rappel, l'électrolyse se fait selon la réaction bilan suivante : $2 H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 2 H_{2(g)}$



D'après le graphique, la vitesse de production de H_2 est d'environ $0,8 \text{ cm}^3/\text{min}$. De plus, on constate que le coefficient de corrélation est de l'ordre de $0,997$, ce qui nous signale que nos valeurs sont assez précises. Toutefois, on remarque tout de même une incertitude provenant du manque de précision sur la lecture des volumes d'hydrogène, les graduations du réservoir (3) étant peu précises.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au cours de ce projet, nous avons découvert et/ou approfondi nos connaissances sur la pile à combustible et notamment sur les différents types de PàC, leur fonctionnement et leurs applications présentes et futures. Cette technologie est encore peu utilisée et, au-travers de l'expérience que nous avons menée et de notre visite d'entreprise, nous nous sommes rendus compte de l'importance et de la difficulté du développement des PàC, qui sont une alternative prometteuse aux énergies fossiles.

De plus, en visitant l'entreprise PowiDian, nous avons eu l'opportunité de voir une utilisation concrète du sujet de notre projet et nous avons également eu un aperçu du fonctionnement d'une start-up innovante et de la place d'un ingénieur dans ce genre de structure. Cette visite nous a montré qu'un ingénieur se devait d'être polyvalent et capable de travailler en équipe. Nous avons développé cette dernière qualité en travaillant sur ce projet en groupe. Travailler en équipe nous a poussé à confronter nos points de vue, nous avons également amélioré nos compétences en recherches documentaires, rédaction de rapport et en relations avec les entreprises.

Pour aller plus loin dans ce projet, il serait intéressant de pouvoir étudier un type de PàC autre que la MEP. En effet, la majorité de notre rapport repose sur le fonctionnement d'une pile MEP et nous n'avons pas pu comparer expérimentalement à un autre type de pile. Pour cela, il faudrait notamment que la température de fonctionnement de certains types de piles, tels que la SOFC, soit abaissée pour pouvoir les utiliser plus facilement.

8. CONCLUSIONS PERSONNELLES

- **Caroline Goument** : Le projet P6 a été pour moi une opportunité d'acquérir de nouvelles connaissances sur une source d'énergie d'avenir qui m'était totalement inconnue quand nous avons commencé. J'ai ainsi beaucoup appris sur le principe de fonctionnement des piles à combustible, les différents constituants et types de piles existants ainsi que les applications actuelles et à venir que nous en faisons. J'ai également pu en apprendre beaucoup sur la production d'hydrogène et les couplages énergies renouvelables hydrogène et PàC. Ce projet était également un travail d'équipe qui a nécessité de définir nos recherches, de répartir le travail entre nous et de s'entraider quand les informations, issues de nos recherches, ne concordaient pas.

La partie expérimentale et la visite de l'entreprise m'ont beaucoup apporté car ils m'ont permis de mettre en pratique ce que nous n'avions vu que théoriquement au travers de nos recherches documentaires.

Ce projet m'a donc été très bénéfique sur le plan personnel, mais aussi sur le plan scientifique car il m'a permis de découvrir et de comprendre une nouvelle source d'énergie qui pourrait être très présente dans le futur.

- **Ghita Louali** : J'ai toujours été intéressée par le domaine environnemental, les sources de production d'énergie futures comme la biomasse et donc par les problématiques liées à la préservation de notre écosystème naturel pour les générations futures dans le cadre du développement durable. Découvrir qu'il existait une alternative aux productions actuelles d'énergie, généralement polluantes, a donc augmenté mon intérêt pour ce projet.

Ce sujet m'étant totalement inconnu au départ, j'ai été très surprise de découvrir tous les avantages de ce moyen de production énergétique qui constitue sans aucun doute l'un des axes de recherche futurs.

Par ailleurs, ce projet fut une nouvelle occasion d'apprécier le travail en groupe, très formateur dans le cursus d'ingénieur en préparation à la vie professionnelle, et qui requiert beaucoup de qualités telles une bonne communication et capacité d'écoute, de la patience, de l'efficacité dans le travail, et de l'organisation.

En somme, le bilan de ce projet est très positif, dans la mesure où ce dernier m'a confortée dans mon choix de devenir ingénieure, me permettant d'apprécier le côté pratique des choses grâce notamment à la visite effectuée, de prendre une nouvelle fois conscience de la polyvalence dont l'ingénieur se doit de faire preuve, et de me rendre compte que nous sommes acteurs de demain.

- **Lucille Magne** : Ce projet m'a permis de découvrir le fonctionnement des piles à combustible, en particulier les PEMFC. En effet, je ne connaissais pas cette technologie et je comprends désormais leur fonctionnement. De plus, grâce à la visite de l'entreprise PowiDian, je comprends mieux l'utilité et les applications des piles à combustible.

Au-delà des connaissances théoriques apportées par ce projet, j'ai appris à mieux travailler en équipe et à prendre des initiatives au sein d'un groupe.

Finalement, grâce à ce projet j'ai appris à mettre en pratique des connaissances théoriques à travers l'expérience que nous avons réalisé et notre visite.

- **Claire Pelletier** : J'ai trouvé ce projet très intéressant car il m'a fait acquérir de nouvelles connaissances sur un sujet d'avenir qui est la pile à combustible. J'ai appris beaucoup notamment concernant son principe de fonctionnement, la production d'hydrogène, les principaux constituants et les applications qui en découlent.

Ce projet était très complet car, en plus du travail de recherche bibliographique, l'expérience et la visite de l'entreprise PowiDian m'ont permis de me confronter à une application pratique de la pile à combustible.

Non seulement ce projet m'a permis de mettre en application mes compétences de rédaction et de synthèse, mais j'ai pu également améliorer ma capacité à travailler en équipe. En effet, il a fallu se répartir le travail, l'échanger (grâce à la plate-forme collaborative google docs) et procéder à des relectures fréquentes, ce qui n'était pas toujours facile.

Mais en fin de compte, je ne retiens de ce projet que des aspects positifs sur les plans personnel et scientifique.

- **Quentin Petri** : Ce projet a été très formateur pour moi notamment concernant la réalisation et l'accomplissement d'un travail en petite équipe.

Concernant le sujet de notre projet, je ne connaissais que très peu de choses sur les piles à combustible avant de choisir ce thème et je pense que ce projet m'a permis une nouvelle compréhension des énergies vertes en général.

Enfin, il est clair que ce projet était très intéressant car il permettait de mettre en œuvre une démarche bien différente de ce qu'il nous était demandé jusque là. Auparavant les exercices étaient bien plus orientés vers la synthèse mais sur ce projet il fallait également savoir être bien plus pointu et précis.

Finalement, je pense que ce projet est formateur m'a permis aussi bien d'apprendre à mieux travailler en groupe, de mieux connaître les piles à combustibles et enfin d'expérimenter une nouvelle forme de restitution de connaissances.

9. BIBLIOGRAPHIE

9.1. Les livres et magazines

- [1] Méziane Boudellal, "La pile à combustible : structure, fonctionnement, applications", *Dunod*, 2007
- [2] Méziane Boudellal, "La pile à combustible : l'hydrogène et ses applications (2^{ème} édition)", *Dunod*, 2012
- [3] Benjamin Blunier, Abdellatif Miraoui, "20 questions sur la pile à combustible : l'hydrogène, vecteur énergétique de demain ?", *Technip*, 2009
- [4] "Les énergies bas carbone", *Clefs CEA*, n°61, 2013.

9.2. Les sites internet

- [5] <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOCATJ/TOCATJ-6-17.pdf> (valide à la date du 20/03/2017)
- [6] http://energie2020.fr/wp-content/uploads/2014/08/AMI_IA_hydrogene_energie_combustible.pdf (valide à la date du 20/03/2017)
- [7] http://www.afhypac.org/documentation/mobilite-h2-france/H2MF_PR_end_of_year_update_EN_V3.pdf (valide à la date du 27/03/2017)
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=cBiKvVGljXM>, vidéo « L'hydrogène et les piles à combustible, comment ça marche ? » (valide à la date du 03/05/2017)
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=7Bn9Gp5kuyI>, vidéo C'est pas Sorcier « hydrogène : combustible du futur ? » (valide à la date du 03/05/2017)
- [10] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00828240/document> (valide à la date du 24/04/2017)
- [11] http://www.ulb.ac.be/sciences/intra/inforsc_archives/nrj/vico.htm#Anchor-Le-35064 (valide à la date du 13/03/2017)
- [12] http://myrte.univ-corse.fr/La-plateforme_a4.html (valide à la date du 27/03/2017)
- [13] <http://pilecombustible.free.fr/dossier.php#princip> (valide à la date du 27/03/2017)
- [14] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differents-types-de-pile-combustible> (valide à la date du 15/04/2017)
- [15] <http://www.veolia.com/sites/g/files/dvc181/f/assets/documents/2014/04/pile-combustible.pdf> (valide à la date du 17/05/2017)
- [16] <http://www.pile-a-combustible.com/dmfc.html> (valide à la date du 13/03/2017)
- [17] <http://voiture-dihydrogene.revulublog.com/recapitulatif-des-principales-caracteristiques-d-une-pile-a-combustibl-a79218291> (valide à la date du 03/05/2017)
- [18] <http://www.planete-hydrogene.com/fr/lhydrogene-energie/pile-a-combustible/ses-avantages.html> (valide à la date du 03/05/2017)

10. TABLE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1: Stack de PàC.....	9
Illustration 2: Schéma simplifié du fonctionnement d'une PàC.....	9
Illustration 3: Schéma de la composition intérieure d'un stack.....	10
Illustration 4: Provenance de l'hydrogène produit dans le monde en 2011.....	12
Illustration 5: Schéma du fonctionnement de l'électrolyse de l'eau.....	12
Illustration 6: Principe général de l'électrolyse.....	13
Illustration 7: Etapes de production d'hydrogène par reformage du méthane.....	14
Illustrations 8: Les panneaux solaires de l'installation de PowiDian.....	20
Illustration 9: Installation réservoirs, électrolyseur et piles à combustible de PowiDian.....	21
Illustration 10: Photographie du montage expérimental.....	23
Illustration 11: Fonctionnement simplifié d'une PEMFC.....	32
Illustration 12: Fonctionnement simplifié d'une SOFC.....	32

11. ANNEXES

11.1. Quelques dates importantes dans l'Histoire de la PàC

- **1802** : Sir Henry Davy théorise le principe de la PàC.
- **1839** : Découverte du principe de la PàC par l'allemand Christian Schönbein. Après avoir réalisé une électrolyse de l'eau, il se rend compte qu'en coupant le courant, l'électrolyse se fait dans l'autre sens.

William Grove, avocat anglais et électrochimiste amateur, conçoit la première PàC en laboratoire.

- **1939-1953** : Francis T. Bacon reprend les travaux sur la PàC et développe un prototype capable de délivrer une puissance de l'ordre du kW.
- **1960** : La NASA utilise la PàC dans ses vaisseaux spatiaux pour produire de l'eau.
- **A partir de 1960** débutent des études plus approfondies sur le fonctionnement des piles à combustible.

11.2. Les différents types de piles à combustible en détail

11.2.1. Piles à combustible à hydrogène

Il s'agit du type de pile le plus couramment utilisé. Son rendement est de l'ordre de 50 %, soit 50% de l'énergie de l'hydrogène est convertie en électricité et les 50 autres pourcents sont évacués sous forme de chaleur. Cette pile couplée à un moteur interne est ainsi plus efficace qu'un moteur à combustion interne seul. Cependant, le matériau utilisé pour l'électrolyte, le platine, est aujourd'hui très coûteux.

- La PEMFC est la plus commune. Elle fonctionne correctement à température ambiante, toutefois ses conditions optimales de fonctionnement se situent autour de 80°C et 1 à 4 atm. Elle produit de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Comparés aux autres types de piles à combustible, la PEMFC a un temps de démarrage quasiment instantané : en quelques secondes à température ambiante, elle atteint près de 65% de sa puissance nominale ce qui la rend compatible par exemple avec les besoins des moyens de transport. De plus, les technologies mises en œuvre sont assez faciles à développer industriellement et sont insensibles aux faibles températures. Cependant, ces piles présentent quelques inconvénients : elles craignent la présence de CO, le coût reste élevé et il faut en permanence contrôler la teneur en eau, c'est-à-dire l'humidité de la membrane afin que les échanges de protons se fassent au maximum.
 - La SOFC, pile à oxydes solides, fonctionne de la même manière à l'exception que la membrane échangeuse de protons devient une membrane à oxydes solides. Il s'agit d'une pile qui fonctionne à haute température (autour de 1000°C) et nécessite des infrastructures conséquentes/importantes. La température élevée de ces piles permet d'utiliser des catalyseurs moins coûteux que pour les PEMFC. En contrepartie, le temps de démarrage de la pile est beaucoup plus long. Ces piles restent cependant tout aussi avantageuses que les PEMFC car leur rendement est légèrement plus
-

élevé, l'électrolyte utilisé est stable et en théorie, d'autres combustibles que l'hydrogène peuvent être utilisés.

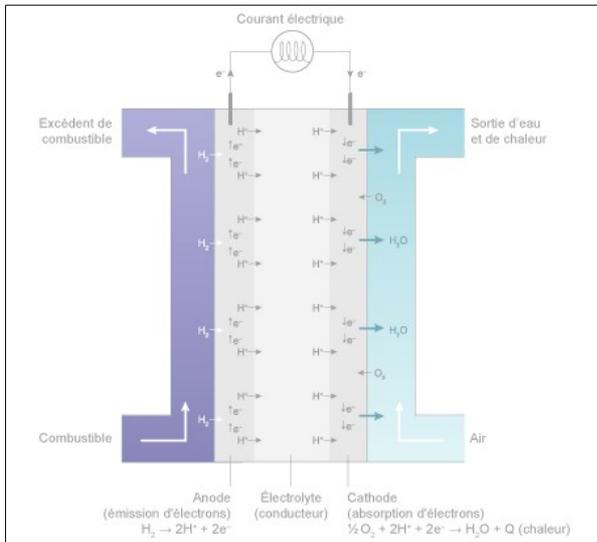


Illustration 11: Fonctionnement simplifié d'une PEMFC

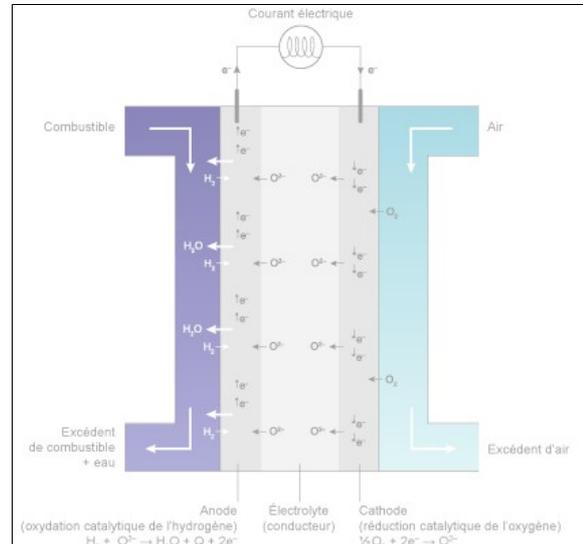
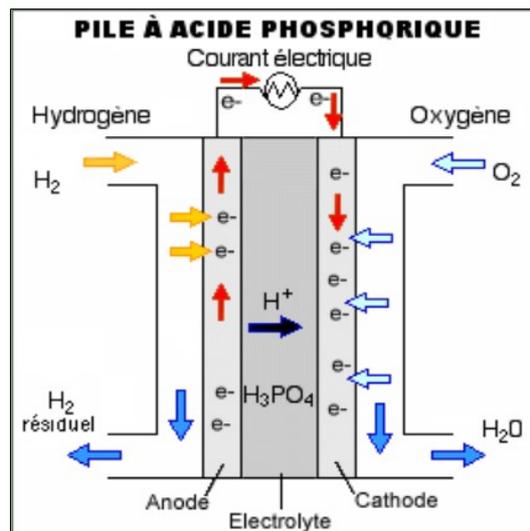


Illustration 12: Fonctionnement simplifié d'une SOFC

Source : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pile-a-combustible>

11.2.2. Pile à combustible à acide phosphorique

La PAFC présente les mêmes réactions à la cathode et l'anode que la PEMFC. Son électrolyte est de l'acide phosphorique liquide immobilisé par des matrices de particules et son catalyseur est le platine. Elle fonctionne à partir de gaz naturel et l'eau produite est évacuée sous forme de vapeur par l'air. Un échangeur placé entre chaque cellule de la pile permet d'évacuer la chaleur.



Cette pile présente de nombreux avantages : insensibilité au CO₂, bonne durée de vie (supérieur à 40 000 heures), bon rendement (proche de 40%).

Cependant, elle reste assez chère car le catalyseur est constitué de métaux rares. En dessous d'une certaine température, l'électrolyte se liquéfie ce qui oblige l'utilisateur à maintenir le dispositif à une certaine température même à l'arrêt. Enfin, elle est peu adaptée aux applications à faible puissance.

11.2.3. Pile à combustible au méthanol

Il existe deux types de piles au méthanol : les DMFC et les RMFC². Celles auxquelles nous nous sommes intéressés dans le rapport sont les DMFC.

Le méthanol, utilisé comme combustible, est directement introduit dans la pile. Lors de la réaction, de nombreux produits intermédiaires se forment. Néanmoins, la pile ayant un temps de démarrage rapide et fonctionnant à basse température, elle reste assez facile à utiliser.

Il faut tout de même mentionner que le méthanol est un produit chimique toxique et que le rendement de cette pile reste très faible (de l'ordre de 20-30%) par rapport aux autres types de piles.

11.2.4. Pile à combustible alcaline

Cette pile a été utilisée dans le cadre des missions Apollo. Son électrolyte, la potasse ou KOH, est le plus souvent mis en circulation à l'aide d'une pompe. Cependant, l'hydroxyde de potassium a tendance à réagir avec le CO₂ environnant, formant ainsi du carbonate K₂CO₃. Ce carbonate induit une diminution du rendement de la pile car il bloque les ports de la membrane de l'électrolyte.

L'avantage principal de ces piles est qu'elles n'utilisent pas de catalyseurs précieux. Le catalyseur en nickel est le plus courant et suffit pour faire les réactions.

En utilisant de l'hydrogène pur, les AFC peuvent atteindre un rendement supérieur à 65% et générer une tension autour de 1,0 V. Elles ont une durée de vie de 6000 heures environ.

Les AFC sont encore très peu utilisées en raison de leur sensibilité au CO₂ et de leur courte durée de vie mais présentent un fort potentiel pour le futur. Elles ont notamment été installées sur des prototypes de taxis écologiques londoniens.