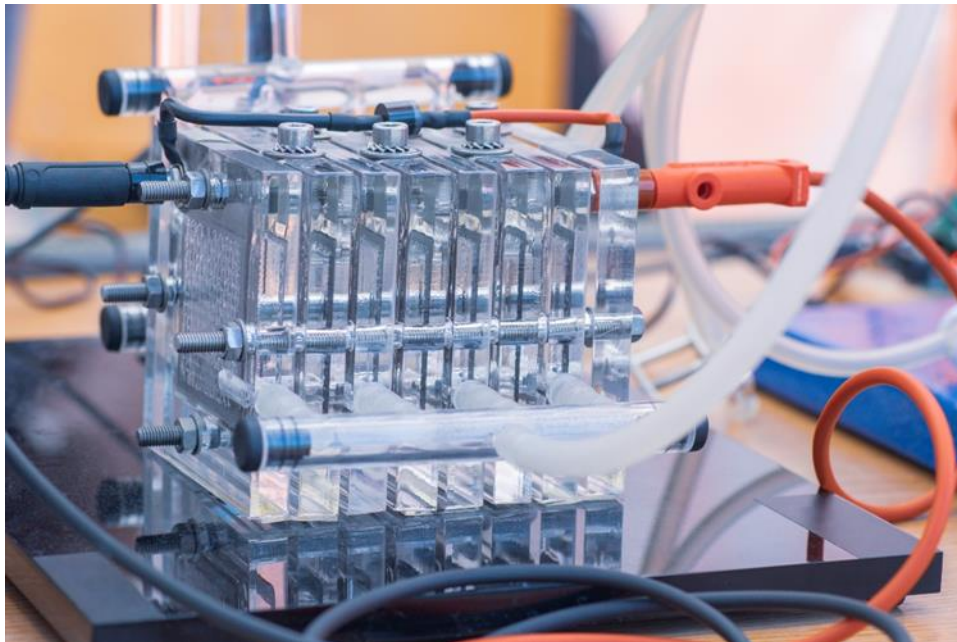


Électrolyseur et pile à combustible



Etudiants :

Malcolm BELIN
Bernard ESSAGA
Maxence HENRY
Anna HOERNER

Enseignant-responsable du projet :

Abdellah HADJADJ

Date de remise du rapport : **16/06/2023**

Référence du projet : **STPI/P6/2023 – 006**

Intitulé du projet : ***Électrolyseur et pile à combustible***

Type de projet : ***Bibliographique***

Objectifs du projet :

- ***Explication des moyens de production et de stockage de l'hydrogène***
- ***Etude théorique de la pile à combustible***
- ***Approfondissement de son application dans le milieu industriel***
- ***Mise en application avec les plans d'une PAC pour le futur***

Mots-clefs du projet :

- ***Hydrogène***
- ***Pile à combustible***
- ***Secteur automobile***

Remerciements :

Tout d'abord, nous tenons à adresser nos remerciements à Monsieur Abdellah Hadjadj, enseignant responsable de notre groupe, de nous avoir accompagné tout au long du semestre et de nous avoir apporté les réponses nécessaires à la réalisation de notre projet.

Nous remercions également le groupe de P6 numéro 21, et plus particulièrement Gabriel Gibergues et Lucile Huillet, pour leur partage d'expérience sur leur maquette de pile à combustible à hydrogène.

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction	7
2.	Méthodologie / Organisation du travail	7
3.	Focus sur l'hydrogène	8
3.1.	Les principaux moyens de production d'hydrogène	8
3.2.	Les différents moyens de stockage de l'hydrogène	9
4.	Fonctionnement théorique d'une PAC	10
4.1.	Les différents types de PAC	10
4.2.	La place de la PAC dans le milieu industriel	13
4.3.	La place de la PAC dans l'automobile	14
4.3.1.	Une solution d'avenir zéro émission ?	14
4.3.2.	Dimensionnement du réservoir	15
4.3.3.	Recharge en station	16
5.	Proposition de plan pour l'avenir	17
5.1.	Description du fonctionnement approfondi de la PAC choisie, la PEMFC	17
5.2.	Modélisation et dimensionnement	19
5.3.	Les difficultés liées à la réalisation de ce projet à l'INSA	21
6.	Conclusions et perspectives	22
7.	Bibliographie	23
8.	Annexes	26
8.1.	Diagrammes de Gantt	26
8.2.	Exemple d'un stockage chimique de l'hydrogène : la PowerPaste	27
8.3.	Tableau résumant les caractéristique des principales PAC	28
8.4.	Courbe de polarisation et point de fonctionnement	29
8.5.	Schéma résumant le fonctionnement et l'assemblage d'une PEMFC	30

NOTATIONS, ACRONYMES

PAC : pile à combustible

H₂ : dihydrogène, que nous appellerons également par abus de langage hydrogène

O₂ : dioxygène, que nous appellerons également par abus de langage oxygène

FCEV : fuel cell electric vehicle (Véhicule électrique à pile à combustible)

BEV : Battery electric vehicle (Véhicule électrique à batterie)

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

DMFC : Direct Methanol Fuel Cell

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell

AFC : Alkaline Fuel Cell

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

AMFC : Alkaline Membrane Fuel Cell

MEA : membrane electrode assembly

PEM : proton-exchange membrane, ou encore polymer-electrolyte membrane

GDL : gaz diffusion layer

PTFE : polytétrafluoroéthylène

LED : light-emitting diode

P : puissance, en Watt (W)

I : intensité, en Ampère (A)

U : tension, en Volt (V)

1. INTRODUCTION

Notre projet porte sur l'étude de la pile à combustible, de son fonctionnement à son utilisation en passant par la fabrication de son combustible le plus commun, l'hydrogène. Ce projet a pour finalité d'être une étude théorique sur la pile à combustible en général, ainsi que sur la possibilité, à terme de plusieurs années de projet P6 autour de ce sujet, de construire une pile artisanale par des élèves comme cela a pu être le cas par le passé avec le banc à hydrogène.

Ce projet est important et particulièrement intéressant car la pile à combustible est une technologie qui suscite un intérêt croissant dans le monde. En effet, elle présente un enjeu majeur dans divers domaines, tels que le secteur de l'énergie, les transports et même les applications portables, et elle pourrait offrir une solution prometteuse aux problèmes environnementaux et énergétiques auxquels nous sommes confrontés. Son utilisation croissante contribue à créer un monde plus respectueux de l'environnement et moins dépendant des combustibles fossiles. De même, l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de favoriser une transition vers un avenir plus durable.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous avons commencé le projet en nous renseignant de manière individuelle sur l'hydrogène, l'électrolyse et les piles à combustibles. Nous avons ensuite fixé ensemble les axes principaux de notre sujet et avons découpé le projet en sous tâches que nous avons réparties dans le nombre de semaine qui nous était imparti. Chaque tâche était caractérisée par un niveau de difficulté estimée, représenté par un numéro qui lui était associé (1 pour facile, 2 pour intermédiaire et 3 pour difficile), ainsi que par une couleur qui déterminait l'avancement de celle-ci (vert pour "terminée", orange pour "à faire" et rouge pour "en retard"). Ces informations étaient regroupées dans un diagramme de Gantt que nous mettions à jour ensemble chaque semaine. Nous avons découpé notre groupe de quatre en deux binômes et chaque groupe présentait tour à tour l'avancement réalisé depuis la séance précédente grâce à un support visuelle. Cela nous a permis de poser nos questions au professeur, d'affiner nos objectifs à courts termes et de modifier notre diagramme de Gantt en conséquence. En [annexe 1](#) sont présent le premier diagramme de Gantt obtenu après la première séance de P6 avec notre professeur, ainsi que le diagramme de Gantt final à la date de rédaction de ce rapport. On remarque une différence entre les deux diagrammes, notamment sur l'évaluation de la difficulté de certaines tâches qui a été modifiée. De plus, la longueur et la programmation des objectifs ont changé, surtout ceux concernant le dimensionnement et la modélisation de la pile, qui nous ont posé plus de problèmes que prévus.

3. FOCUS SUR L'HYDROGENE

3.1. Les principaux moyens de production d'hydrogène

Les piles à combustible les plus courantes nécessitent du dihydrogène pour fonctionner. Cependant le H₂ ne se trouve qu'en très faible quantité sur Terre, il faut donc le synthétiser. Se pose alors la question suivante : « Comment synthétiser du dihydrogène ? »

Puisqu'il existe plusieurs moyens de produire de l'hydrogène, nous étudierons chacune des trois catégories de production de ce dernier. Nous étudierons d'abord la méthode la plus utilisée c'est-à-dire la production à partir de combustibles fossiles, puis nous étudierons des méthodes plus écologiques que sont les productions à partir de sources d'énergies renouvelables, pour finir par la production par photolyse.

- Production à partir de combustibles fossiles :

Le Vaporeformage du gaz naturel est le procédé le plus utilisé aujourd'hui pour produire du dihydrogène, du fait de son faible coût (2€ le kilogramme d'H₂). Son principe repose sur la réaction d'hydrocarbures, comme le méthane par exemple, en présence de vapeur d'eau à très haute température ($C_nH_{(2n+2)} + nH_2O \rightarrow nCO + (2n+1) H_2$). Réaction à laquelle s'ajoute une réaction secondaire nommée réaction du gaz à l'eau ($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$). Comme nous pouvons le constater sur ces équations de réactions chimiques, ces dernières produisent du dihydrogène. Cependant, on peut également remarquer que ce procédé est très polluant puisqu'il génère entre autres beaucoup de gaz à effet de serre. Sans oublier qu'il est limité puisqu'il nécessite une ressource elle-même limitée, les gaz naturels.

La gazéification du charbon fait partie des procédés qui s'appuient sur la consommation de combustibles fossiles. Ce procédé consiste à brûler un composé solide (le plus souvent du charbon de bois) pour obtenir un gaz riche en hydrogène mais aussi des émissions polluantes. Il présente de ce fait les mêmes problèmes que le vaporeformage.

- Production par électrolyse :

L'électrolyse de l'eau est le procédé le plus connu, et le seul qui peut être non polluant s'il est alimenté avec de l'énergie verte. En effet, il se résume à la décomposition des molécules d'eau à l'aide d'un courant électrique pour obtenir d'un côté de l'oxygène (O₂) et de l'autre de l'hydrogène (H₂). Il peut avoir une empreinte carbone très faible lorsque l'électricité utilisée est bas carbone ou provient de sources renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne. L'hydrogène produit est alors appelé hydrogène vert. L'inconvénient majeur de l'H₂ obtenu par électrolyse est son prix, cinq fois plus élevé que celui du vaporeformage, ce qui fait que 95% de l'hydrogène produit dans le monde vient aujourd'hui de ressources fossiles. Cela peut s'expliquer en partie par son faible rendement à basse température, mais également par le coup des matériaux nécessaire à la mise en place de cette méthode. Cependant, des recherches sont menées pour essayer de baisser le prix de cet hydrogène, notamment en remplaçant les électrodes de platine par un matériau de fer et de soufre peu coûteux, ou en augmentant son rendement grâce à des procédés à haute température.

- Production par photolyse :

Certains végétaux sont capables de produire de l'hydrogène grâce à la photolyse de l'eau, technique permettant d'utiliser l'énergie solaire pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène en utilisant des catalyseurs spéciaux. Bien que cette méthode puisse être réalisée en laboratoire, la mise à l'échelle de cette technologie pour une production industrielle reste

un défi. Les coûts et la stabilité des catalyseurs, ainsi que la nécessité d'une infrastructure solaire adéquate empêchent pour le moment sa mise en œuvre.

De plus il existe également des micro-organismes et bactéries pouvant produire de l'hydrogène lorsqu'ils fermentent des matières organiques, telles que les déchets agricoles ou les algues.

3.2. Les différents moyens de stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène est un enjeu majeur pour le développement du secteur. En effet, il pourrait être utilisé comme vecteur énergétique en remplaçant certaines énergies fossiles déjà utilisées. De plus, comme il peut être produit à partir d'électricité, il pourrait apparaître comme un moyen efficace de stocker sur de longues durées de l'électricité intermittente, éolienne ou solaire par exemple, que nous ne sommes pas capables de stocker autrement pour le moment. Il suffirait d'ensuite reconvertir cet hydrogène en électricité durant les heures de pointe sur le réseau via une pile à combustible pour améliorer la flexibilité des réseaux électriques.

Dans un premier temps, il est nécessaire de noter que l'hydrogène à l'état naturel, du fait de sa faible masse molaire et sa viscosité très basse, est un gaz très volatil. Il est donc nécessaire de le stocker dans un endroit très étanche et de surveiller tout risque de fuite. De plus, ce gaz est très inflammable et explosif, ce qui rend son stockage dangereux. Ainsi, le stockage sous forme d'hydrogène comprimé à haute pression est la technologie la plus employée. Différents types de réservoirs sont utilisés pour stocker cet hydrogène gazeux. Ils sont classés en quatre catégories : type I, II, III et IV, en fonction de la pression et des caractéristiques des matériaux. Ces réservoirs ont été développés progressivement, en particulier pour des applications mobiles où les pressions couramment utilisées sont de 350 ou 700 bars. Les réservoirs de type I sont entièrement métalliques, ceux de type II sont métalliques avec une virole renforcée en fibre de carbone, tandis que les réservoirs de type III sont entièrement bobinés avec une enveloppe interne métallique qui supporte une partie des contraintes liées à la pression. Quant aux réservoirs de type IV, ils sont entièrement bobinés avec une enveloppe interne en polymère. Les matériaux composites utilisés pour la fabrication de ces réservoirs sont principalement des polymères thermdurcissables, bien que des recherches soient en cours pour utiliser des polymères thermoplastiques, offrant ainsi une meilleure recyclabilité des matériaux. Des études sont également menées sur la possibilité de fabriquer des réservoirs conformables, c'est-à-dire de forme irrégulière, qui s'adaptent à l'espace dans lequel ils seront installés, permettant ainsi des économies d'espace significatives. Enfin, un nouveau type de réservoir, le type V, entièrement constitué de matériau composite sans enveloppe interne, est en cours de développement. Ces avancées devraient permettre de réduire les coûts et le poids des réservoirs.

Mais l'hydrogène peut aussi se conserver sous forme liquide. En effet, celui-ci se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de $-252,87^{\circ}\text{C}$. Ainsi, à $-252,87^{\circ}\text{C}$ et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de 71 kg/m^3 , ce qui le rend le stockage liquide intéressant par rapport au stockage gazeux puisqu'à cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. Cependant, la liquéfaction de l'hydrogène nécessite une consommation importante d'énergie (environ 40% de l'énergie contenue dans le gaz). De plus, elle implique des réservoirs à l'isolation thermique très poussée, et donc encombrante, pour maintenir l'hydrogène à cette température et éviter les pertes par évaporation.

Enfin, l'hydrogène peut être stocker chimiquement sous forme de composés solides, dans des matériaux capables d'absorber l'hydrogène tels que les hydrures métalliques ou les matériaux poreux. Ces matériaux peuvent libérer cet hydrogène lorsqu'ils sont chauffés ou soumis à une pression appropriée. Cette forme de stockage présente une densité volumique très intéressante malgré une densité massique faible, mais la cinétique, la température et la pression de cyclage restent des points en développement. Un exemple de cette forme de stockage est présent en [annexe 2](#).

L'ammoniac peut aussi être utilisé comme moyen de stockage, car il est plus facilement stockable et transportable que l'hydrogène gazeux, cela dû au fait qu'il peut être liquéfié à des pressions et des températures moins élevées. L'ammoniac peut ensuite être converti en hydrogène gazeux dans un reformeur catalytique. Ce reformeur utilise la vapeur d'eau pour décomposer l'ammoniac en hydrogène et en azote ($\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \leftrightarrow 2 \text{NH}_3$). De plus, l'ammoniac liquide est plus compact que certains carburants comme l'essence, l'éthanol ou le kérosène. Enfin, il est moins cher et moins inflammable que l'hydrogène gazeux, ce qui en fait une alternative intéressante pour les applications industrielles et de transport. Malgré ces biens faits, Il est important de noter que l'utilisation de l'ammoniac présente également des inconvénients, tels que sa toxicité et les émissions de gaz à effet de serre associées à sa production. Par conséquent, les recherches se poursuivent pour développer des technologies plus efficaces et durables pour l'utilisation de l'ammoniac comme producteur d'hydrogène.

Chaque méthode de stockage a ses avantages et ses limites en termes de densité énergétique, de sécurité, de coûts et de facteurs de durabilité. Le choix de la méthode de stockage dépend des besoins spécifiques de l'application et des considérations économiques et techniques. Pour la réalisation de notre PAC, nous avons convenu que le plus simple serait d'utiliser de l' H_2 stocké sous forme gazeuse. Cette conclusion vient du fait qu'une PAC utilise ses combustibles sous forme gazeuse, et que nous ne disposons pas des dispositifs nécessaires pour changer l'état du H_2 qui serai stocké sous une autre forme.

4. FONCTIONNEMENT THEORIQUE D'UNE PAC

4.1. Les différents types de PAC

La pile à combustible est une technologie qui produit de l'électricité, de la chaleur et parfois de l'eau grâce à l'oxydation d'un combustible réducteur et la réduction d'un oxydant sur des électrodes opposées. Cependant, ce n'est pas une technologie qui a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre ou de produire de l'électricité propre : tout dépend du type de combustible utilisé.

Une PAC est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Chaque cellule comprend trois éléments de base, à savoir une électrode de type anode émettrice d'électrons (lieu de l'oxydation) ; une électrode de type cathode collectrice d'électrons (lieu de la réduction) et un électrolyte séparant les deux électrodes. L'électrolyte permet le passage des ions tout en bloquant le passage des électrons, les obligeant ainsi à emprunter un circuit externe où leur énergie peut être exploitée.

On classe les piles à combustible selon la nature de leur électrolyte. Celui-ci peut être acide dans le cas où des ions positifs (les protons H^+) se déplacent de l'anode à la cathode, ou basique (déplacement d'anions OH^- , O^{2-} ou CO_3^{2-}) dans le cas inverse. L'électrolyte détermine la nature de la pile, ses caractéristiques et sa température de fonctionnement. Chaque type de pile a donc un rendement et un usage différent.

Les piles à combustible avec électrolyte acide :

- Les piles à hydrogène « PEMFC »

Les PEMFC utilise de l'hydrogène gazeux pur comme combustible. Ces piles sont compactes, possède un électrolyte constitué d'une membrane solide en polymère à échange de protons (PEM) et fonctionnent à basse température (entre 50 et 90°C). Au niveau de l'anode, l'hydrogène se sépare en protons (H^+) et en électrons (e^-). Les protons traversent la membrane vers la cathode, tandis que les électrons suivent un chemin externe, créant un courant électrique. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène de l'air réagissent pour former de l'eau. Ces piles affichent un rendement de l'ordre de 40 à 60 % et ont l'avantage de démarrer rapidement et à pleine puissance. Cela leur permet notamment d'alimenter des véhicules ainsi que des applications stationnaires de petite taille comme des systèmes de secours électrique ou des sources d'énergie pour les bâtiments. Les PEMFC possède efficacité énergétique élevé et une faible émission de polluants. Cependant, elles nécessitent un approvisionnement en hydrogène pur, ce qui peut poser des défis en termes de stockage, de transport et d'infrastructure.

- La pile à méthanol « DMFC »

À la place de l'hydrogène, ces piles utilisent directement comme combustible du méthanol liquide (CH_3OH) comme source d'hydrogène, ce qui facilite son stockage et son transport. Au niveau de l'anode, le méthanol est oxydé en dioxyde de carbone (CO_2), protons (H^+), et électrons (e^-). Les protons se déplacent vers la cathode en passant à travers l'électrolyte qui, comme sur les PEMFC, est constitué d'une PEM ; tandis que les électrons suivent un chemin externe pour fournir de l'électricité. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène de l'air réagissent pour former de l'eau. Les DMFC fonctionnent à des températures relativement basses, généralement entre 60 et 120 °C. Elles sont principalement utilisées dans les applications portables, telles que les téléphones et les petits dispositifs énergétiques, en raison de la facilité de stockage et d'utilisation du méthanol. Cependant, elles sont généralement moins efficaces que d'autres types de piles à combustible et peuvent rencontrer des problèmes de recyclage et de sécurité liés à l'utilisation du méthanol.

- Les piles à acide phosphorique « PAFC »

Ces piles utilisent comme électrolyte de l'acide phosphorique (H_3PO_4) liquide emprisonné dans une matrice solide poreuse. Elles fonctionnent généralement à des températures élevées, typiquement autour de 150-200 °C, ce qui permet une bonne conductivité de l'acide phosphorique et favorise les réactions électrochimiques. Les PAFC sont souvent utilisées dans des applications stationnaires, telles que la production d'électricité dans des bâtiments, des installations industrielles ou des centrales électriques de petite échelle ; mais également dans des systèmes de cogénération. Elles offrent un rendement élevé, une bonne durabilité et une résistance aux contaminants. Cependant, elles nécessitent une purification préalable de l'hydrogène d'alimentation.

Les piles à combustible avec électrolyte basique :

- La pile à potasse liquide « AFC »

L'AFC utilise un électrolyte alcalin, généralement une solution d'hydroxyde de potassium (KOH), pour faciliter les réactions chimiques. Au niveau de l'anode, l'hydrogène est oxydé en ions hydroxyde (OH^-), protons (H^+) et électrons (e^-). Les ions hydroxyde migrent à travers l'électrolyte vers la cathode, tandis que les électrons suivent un chemin externe, générant un

courant électrique. À la cathode, les ions hydroxyde, les électrons et l'oxygène de l'air réagissent pour former de l'eau. Les AFC fonctionnent généralement à des températures relativement élevées, entre 60 et 90 °C. Elles sont principalement utilisées dans des applications spatiales en raison de leur durée de vie et leur efficacité élevée. Cependant, elles nécessitent une purification préalable de l'hydrogène d'alimentation.

- La pile à oxyde solide « SOFC »

La SOFC est bien adaptée à la cogénération (la génération d'électricité et de chaleur). Elle a pour électrolyte un oxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium (YSZ) qui permet la conduction des ions oxyde (O^{2-}) entre les électrodes. Grâce à sa température de fonctionnement, entre 500 et 1000°C, la SOFC permet d'utiliser divers combustibles contenant de l'hydrogène grâce à des procédés de reformage interne. Cela signifie qu'elle peut fonctionner avec des combustibles tels que le gaz naturel provenant du réseau, sans nécessiter d'hydrogène pur. Elle présente un excellent rendement électrique, généralement compris entre 40 et 70 %, ainsi qu'un rendement thermique élevé. Une partie de la chaleur produite par la pile est réutilisée pour son propre fonctionnement, et la chaleur résiduelle, qui est à une température élevée, peut être récupérée facilement. Cependant, cette pile est relativement lourde, sensible aux vibrations et moins adaptée aux arrêts fréquents ; ce qui fait qu'elle est principalement destinée à des utilisations stationnaires, comme la production d'électricité pour des logements collectifs, par exemple.

- La pile à combustible à l'ammoniac (expérimentation)

Dérivé azoté de l'hydrogène, l'ammoniac est un vecteur énergétique intéressant pour la production d'électricité verte. Des expérimentations sont actuellement en cours pour alimenter des piles à combustible avec ce composé chimique. De plus, l'infrastructure pour l'ammoniac existe déjà, puisqu'il s'agit de l'un des composés les plus synthétisés dans le monde d'après le CNRS, tandis que pour l'hydrogène, de nouvelles stations de ravitaillement doivent être construites. L'ammoniac, en tant que produit chimique fabriqué en masse et à faible coût, peut donc être utilisé directement avec des piles à combustible à membrane alcaline échangeuse d'anions (AMFC), qui fonctionnent comme les PEMFC mais qui utilise un transfert d'ions hydroxyde à travers l'électrolyte et non de protons ; ou encore avec des SOFC. Le développement de ces piles ont permis de surmonter les obstacles liés à l'utilisation généralisée de ces systèmes. Cependant, elles n'en sont pas encore au stade de la commercialisation, et des recherches supplémentaires sont nécessaires.

L'avantage de l'ammoniac est qu'il ne libère pas de CO_2 . Son introduction dans tout système de combustion entraîne donc une décarbonisation partielle de ce procédé. Mais ce n'est pas sans inconvénients, dont notamment l'oxydation de l'ammoniac diffusé à la cathode qui peut générer des oxydes d'azote (N_xO_y), qu'il convient alors de traiter, ainsi que du protoxyde d'azote (N_2O), gaz à effet de serre à éviter.

Ainsi, chaque pile à combustible présente des avantages et des inconvénients spécifiques liées à leurs caractéristiques, ainsi que des applications adaptées à chaque technologie. Vous pouvez retrouver un tableau résumant les informations importantes de chacune de ces piles en [annexe 3](#). Nous allons ensuite nous intéresser dans un premier temps à leur utilisation dans le milieu industriel en général, puis plus particulièrement dans les FCEV qui comprennent des PAC de type PEMFC.

4.2. La place de la PAC dans le milieu industriel

- Secteur de l'énergie :

En plus de jouer un rôle crucial dans la transition énergétique, les piles à combustible sont des producteurs d'énergie particulièrement efficaces, qui atteignent un rendement d'environ 90% par la production combinée d'électricité et de chaleur. A titre de comparaison : une centrale électrique conventionnelle n'atteint généralement pas plus de 40%. De plus, contrairement aux combustibles fossiles comme le charbon et le pétrole, certaines piles à combustible utilisent des réactions chimiques pour convertir l'hydrogène en électricité, sans produire d'émissions nocives. Cela en fait une alternative attrayante pour la production d'électricité, aussi bien à grande échelle que pour des besoins domestiques. Un autre avantage de la PAC dans le secteur de la production d'énergie est le fait que l'on utilise des réservoirs externes, on peut donc stocker une grande quantité d'hydrogène, ou d'un autre combustible, dans un espace relativement petit. En effet, l'autonomie d'un dispositif alimenté par une PAC est limitée uniquement par la quantité de combustible qu'il est possible de lui acheminer. Ainsi produire de l'électricité avec ce dispositif apparaît moins encombrant que de grandes centrales électriques. De plus, la pile à combustible peut être couplée à des sources d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire et éolienne, pour stocker l'électricité excédentaire (en transformant cette électricité en hydrogène par électrolyse, puis en stockant celui-ci dans une PAC) et la restituer lorsque la demande est élevée. Pour donner un exemple, GRDF a lancé, en juin 2018, une opération visant à installer des nouvelles piles à combustible dans des maisons individuelles en France, en cohérence avec le Plan Hydrogène initié par le gouvernement.

- Secteur des transports :

L'utilisation de la pile à combustible dans les transports offre de nombreux avantages. Elle permet de remplacer les moteurs à combustion interne traditionnels, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et améliorant la qualité de l'air. Les véhicules à pile à combustible fonctionnent en convertissant l'hydrogène en électricité qui alimente ensuite un moteur électrique. Même s'ils fonctionnent à l'aide de moteurs électriques, les FCEV offrent une autonomie plus élevée et un temps de recharge plus court par rapport aux véhicules 100% à batteries électriques. Un autre avantage des FCEV est que, contrairement aux véhicules à combustion interne, ils ne génèrent ni vibration, ni bruit. De plus, la pile à combustible peut également être utilisée dans d'autres modes de transport, tels que les trains, les bateaux et même les drones, ouvrant ainsi la voie à une mobilité plus propre et plus durable. Dans ce mouvement, on peut parler de MSC, qui a installé une pile à combustible embarquée dans un navire de croisière. En effet, un démonstrateur de pile à combustible de type SOFC 50 kW a été intégré au navire de croisière MSC Europa des Chantiers de l'Atlantique en 2022. Ce projet, financé par l'ADEME marque un pas significatif vers des paquebots plus respectueux de l'environnement.



Figure 1 : MSC World Europa

- Applications portables :

La pile à combustible trouve également des applications dans le domaine des appareils portables. Les PAC légères et de petite taille peuvent être utilisées pour alimenter des dispositifs tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables et les appareils médicaux. Elles offrent une autonomie prolongée par rapport aux batteries conventionnelles et peuvent être rechargées rapidement. Dans des environnements où l'accès à une source d'électricité est limité, la PAC devient une solution pratique et efficace. Par exemple, Ballard, via sa filiale Protonex, a présenté, en 2015, son générateur Squad Power Manager destiné à des opérations militaires de l'US Army. Début 2018, 5 000 unités étaient en service dans l'armée. D'après France Hydrogène, il serait capable de fournir jusqu'à 300 W sous 28V.



Figure 2 : Le générateur Squad Power Manager Protonex

4.3. La place de la PAC dans l'automobile

Dans cette partie nous étudierons d'abord la place des piles à combustible dans l'automobile, puis nous traiterons les questions de dimensionnement de leur réservoir.

4.3.1. Une solution d'avenir zéro émission ?

Aujourd'hui les véhicules zéro émission prennent de plus en plus de place dans le débat concernant le développement durable. Nous expliciterons d'abord pourquoi un avenir porté uniquement par les voitures électriques à batteries (BEV) n'est pas envisageable. Nous aborderons ensuite les solutions apportées par les piles à combustible.

Dans l'optique d'un monde uniquement transporté par des véhicules « verts », les BEV sont apparus en premier sur le marché. Cependant ces derniers présentent une limite majeure qui est celle de leur temps de charge. En effet celui-ci est loin d'être négligeable et il ne sera jamais possible de le réduire à moins de trente minutes. Et ce, même en utilisant une charge rapide qui, par ailleurs, abîme la batterie. Ainsi, les batteries électriques ne permettent pas une utilisation intensive. Nous tenons à souligner que les exemples d'utilisation intensive les plus fréquents incluent les longs voyages de plus de 500 km, ainsi que l'utilisation dans des véhicules spéciaux tels que les bus et les bennes à ordures. En effet ces types de véhicules, en raison de leur nature d'utilité publique, requièrent des horaires de travail prolongés, soit 2 fois 8 heures ou même 3 fois 8 heures par jour, pour une utilisation optimale.

Au-delà de l'utopie dans laquelle chaque véhicule est « zéro émission », il apparaît clairement que l'utilisation des BEV comme unique solution de remplacement des véhicules thermiques est impossible. En considérant un exemple simple, il est facile de mettre en évidence les défauts d'une telle idée. Explicitons : faire le plein dans une station essence prend environ 5 minutes contre 30 minutes pour la recharge d'un BEV. En considérant que chaque voiture qui s'arrête est électrique et que la borne est autant fréquentée qu'une station essence, on se rend vite compte que la file d'attente à la borne s'agrandira à une vitesse folle. Entraînant par la même occasion des embouteillages et toutes autres inconvenances intrinsèques à ceux-ci. En somme, la voiture électrique à batterie n'a pas le potentiel nécessaire pour remplacer la voiture thermique à cause de son temps de recharge qui constitue un problème majeur.

Les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV), eux, remédient à ce problème. Bien que plus énergivores, ces derniers permettent un usage intensif. Un avenir de véhicules zéro émission pour tous les usages est alors envisageable. Ce qui explique aussi pourquoi les PAC sont majoritairement utilisées dans le milieu automobile. En effet, les FCEV présentent la même autonomie que les BEV sans l'inconvénient du temps de recharge. En réalité, par leur conception, les FCEV se rechargent aussi vite que les véhicules thermiques. Effectivement, puisque les FCEV se recharge avec du dihydrogène, le remplissage du réservoir prend le même temps que le remplissage d'un réservoir avec de l'essence.

Cependant, bien que les FCEV pallient le problème du temps de recharge des BEV, ces derniers présentent un inconvénient qui n'est pas des moindres : leur consommation d'énergie. Bien que les FCEV présentent approximativement le même rendement que les BEV (qui s'élève entre 40 et 50%), nous pouvons considérer ces véhicules comme plus énergivores. En effet par rapport aux BEV qui récupèrent l'électricité dès qu'elle est produite, les FCEV eux nécessitent plusieurs procédés jusqu'au moment où ils consomment réellement l'énergie fournie par la pile. Expliquons, pour un BEV les pertes d'énergie se font principalement au moment de la production d'électricité. Le souci des FCEV est qu'une étape supplémentaire s'ajoute au processus pour acheminer le dihydrogène au véhicule : celle de la production de dihydrogène. En effet, comme expliqué précédemment, l'hydrogène est soit produit via des moyens très polluant, soit par électrolyse. Puisque nous souhaitons construire un avenir vert, nous considérerons uniquement le cas de l'électrolyse en espérant que l'électricité qui alimente ce processus soit verte. Le souci étant que, en considérant que le dihydrogène est produit par électrolyse, nous pouvons affirmer que l'électricité utilisée pour sa production n'est pas entièrement consommée. En outre, lors de la compression de l'hydrogène – nécessaire pour le stocker dans une voiture – des pertes énergétiques ont également lieu. Donc des pertes d'énergie apparaissent déjà au début de la chaîne qui alimente notre véhicule en hydrogène, sans considérer celles qui apparaissent lors de la production de l'électricité, rendant ainsi les FCEV plus énergivore que les BEV.

Malgré cet inconvénient les FCEV se présentent aujourd'hui comme les meilleurs véhicules pour nous diriger vers notre rêve collectif d'avenir de développement durable conduit par les véhicules zéro émission.

Penchons-nous alors sur les questions de dimensionnement des PAC dans les véhicules.

4.3.2. Dimensionnement du réservoir

En premier lieu, rappelons que le pouvoir calorifique inférieur (c'est-à-dire la quantité de chaleur totale dégagée par la combustion) d'un kilogramme de dihydrogène est de 33,33 kWh. En considérant qu'une PAC a un rendement de 50%, on peut affirmer que la PAC fournit alors 16,7 kWh pour un kilogramme de dihydrogène. Energie accompagnée de chauffage en cogénération (dû aux pertes) qui s'avère plus que bénéfique en hiver.

En outre, pour une voiture à pile à combustible, on cherche à atteindre la même autonomie qu'une voiture thermique, qui s'élève à environ 500-700 kilomètres par plein. Sachant que pour une autonomie de 100 km, un FCEV nécessite environ 15 kWh, on conclut qu'il nous faudra stocker 5 kg de dihydrogène utile (qui sera consommé par la PAC) afin d'obtenir les 75 kWh qui nous assurerons une autonomie « classique ».

Rappelons aussi que les FCEV actuels stockent le dihydrogène sous forme de gaz à 700 bars, et que sous cette forme nous comptons 20 kg de réservoir pour 1 kg de dihydrogène utile. En effet puisque le gaz est à 700 bars le réservoir se doit d'être assez solide pour ne pas éclater sous la pression, ce qui explique une telle masse de réservoir pour seulement 1 kg de dihydrogène. En somme, pour une autonomie classique, nous utilisons des réservoirs

d'environ 100 kg, ce qui correspond à 2 voire 3 réservoirs de 70 cm de diamètre par 1 mètre de long offrant soit 1,4 ou 2,1 m³.

Nous savons qu'une PAC est un assemblage de cellule d'environ 1 mm d'épaisseur. Estimons que l'on souhaite une puissance de 70 kW, ce qui équivaut à 95 Chevaux-vapeur. On considère que notre PAC fonctionne de manière optimale, donc à son point de fonctionnement qui est à 0,5 ampère par centimètre carré de cellule. Ce point assure une même quantité de puissance thermique que de puissance électrique délivrée. En se référant à la courbe de polarisation des piles à combustible actuelles on détermine la tension que peut délivrer une cellule de 1 cm² au point de fonctionnement (Voir [annexe 4](#)). Ainsi, à partir de la tension et de l'intensité, on obtient une puissance de $P = I * U = 0,5 * 0,7 = 0,35$ W par cm². Etant donné que nous souhaitons alimenter un moteur de 70 kW, on en déduit qu'il nous faudra 200 000 cm² de cellule. En sachant qu'une cellule fournit 0,7 V, que l'addition des cellules implique l'addition du voltage fournit par la PAC, et en considérant que l'on utilise un moteur qui demande 600V, on en conclut qu'il nous faudra 857 cellules. On divise notre surface par le nombre de cellule et on obtient 857 cellules de 234 cm² de surface et de 1 mm d'épaisseur. Soit une PAC de $234 * 85,7 = 20\ 053$ cm³. Entouré de son carter on peut considérer que notre pile fera environ 0,04 m³.

4.3.3. Recharge en station

La recharge en station constitue l'un des principaux sujets de l'intégration des FCEV dans le marché automobile. En effet la station de recharge est sûrement l'acteur principal de la sécurité de la PAC. Explicitons en détail les étapes de la recharge en s'attardant notamment sur les questions de sécurité qu'elles soulèvent.

Premièrement, lorsque le réservoir automobile est relié à la station, cette dernière envoie en premier lieu un pic de pression afin d'évaluer la réserve du réservoir, ou plutôt la pression à l'intérieur de ce dernier. Ensuite il est important de noter que le remplissage du réservoir se fait par pallier. C'est pourquoi une station de recharge possède plusieurs réservoirs de dihydrogène – les buffers - à différentes pressions. Lors de la recharge, le réservoir de la voiture est successivement relié aux réservoirs de la station dont la pression est de plus en plus importante. En effet, tant que la pression du réservoir automobile est inférieure à celle du buffer, le dihydrogène se déplace du buffer vers le réservoir afin d'équilibrer les pressions.

Cette procédure implique deux résultats. Tout d'abord elle est plus économe pour la station de recharge. En effet, la compression du dihydrogène dépense de l'énergie, ainsi utiliser des réservoirs à « faibles » pressions pour la première partie de la recharge permet d'économiser de l'électricité ainsi que de l'argent. Ensuite, il faut noter que le réservoir automobile est fait de fibre de carbone et de résine. Si ce dernier est chauffé à plus de 85°C, sa résine risque de se dénaturer et donc de laisser passer du dihydrogène à travers le réservoir. Réservoir qui ne sera donc plus imperméable, impliquant des risques pour les usagers. Remplir progressivement le réservoir automobile, sans saut important de pression, permet d'éviter un apport trop important d'énergie et donc de faire augmenter drastiquement sa température, ce qui écarte tout risque d'endommagement du réservoir.

Notons aussi que les petites stations de recharge qui ne possèdent qu'un réservoir sont équipées d'une vanne pilotée électriquement. Cette vanne est connectée à un ordinateur qui surveille la pression au moyen d'un capteur de pression – par exemple au moyen d'un asservissement de type PID (Proportionnel, Intégrale, Dérivée) – et qui ouvre plus ou moins la vanne pour respecter le graphe de montée en pression inscrit dans la réglementation. Le capteur se trouve sur le tuyau de remplissage au plus proche de la voiture et en aval de la vanne. Pour plus de précision, la vanne est présente dans chacune des stations au cas où la différence de pression entre deux buffers est trop importante.

Finalement, pour remplir entièrement le réservoir automobile, ce dernier doit être connecté à un buffer dont la pression est supérieure à celle de sa capacité, et ce même pour le dernier buffer de la station. Ainsi, un réservoir de 700 bars sera relié à un buffer de 800 bars en fin de chaîne. Ce procédé peut entraîner un souci de surpression dans le réservoir qui pourrait causer une explosion du réservoir automobile. Pour pallier ce problème, lors de la recharge, le réservoir automobile est relié à une soupape de décharge, qui est en fait un clapet anti-retour et qui s'ouvre au-delà des 700 bars. Grâce à cette installation, la pression du réservoir automobile ne peut dépasser les 700 bars. En conséquence les risques d'explosion du réservoir à cause d'une pression trop importante sont écartés.

En conclusion, tous les risques lors de la recharge sont écartés afin de rendre les FCEV accessibles au public.

5. PROPOSITION DE PLAN POUR L'AVENIR

5.1. Description du fonctionnement approfondi de la PAC choisie, la PEMFC

Après l'étude bibliographique des différentes PAC et de leurs utilisations, nous en avons sélectionné une afin d'approfondir nos connaissances sur son fonctionnement dans l'optique d'en proposer un plan de construction.

Ainsi, notre choix s'est porté sur la PEMFC puisqu'il s'agit de la PAC la plus utilisée, notamment dans le domaine automobile que nous avons précédemment étudié, que son fonctionnement correspond au principe inverse de l'électrolyse et qu'elle utilise de l'hydrogène, qui est au cœur de notre projet, pour fonctionner. Il s'agit également de la pile la plus pratique à utiliser dans le cadre scolaire puisqu'elle est compacte, possède une température de fonctionnement optimal plutôt basse et facilement atteignable, et qu'elle a un démarrage rapide et efficace.

Nous nous intéressons ici à la création d'une cellule unitaire, qui, lorsqu'un grand nombre d'entre elles sont branchées en série, forment un stack que l'on appelle une PAC. Détaillons la constitution d'une cellule.

Notons d'abord qu'une cellule est une feuille d'environ 0,8 mm d'épaisseur (pour les meilleures d'entre-elles). La cellule est entourée de deux plaques bipolaires métalliques (ou en graphite) qui contiennent le cœur de la cellule : l'assemblage MEA (membrane electrode assembly). (Voir [annexe 5](#), figure 7)

Premièrement, les plaques bipolaires sont appelées ainsi car elles sont en contact avec la borne plus d'une cellule et la borne moins d'une autre. Les cellules sont assemblées de manière à ce que la plaque bipolaire d'une cellule soit soudée à la plaque bipolaire de l'autre cellule, sur leur côté plat. Il est important de noter que les plaques bipolaires d'une même cellule ne se touchent pas et qu'elles font environ 200 μm d'épaisseur. Entre deux cellules, c'est-à-dire entre deux plaques bipolaires, circule le liquide de refroidissement. Cette disposition permet d'additionner les tensions générées par chacune des cellules, ce qui revient à mettre des piles en série.

Discutons maintenant de la MEA, qui se situe, rappelons-le, entre deux plaques bipolaires. Nous évoquerons d'abord les éléments qui la compose puis expliciterons leur rôle.

Au centre de la MEA se trouve une membrane de Nafion® recouverte sur ses deux côtés d'une encre composée de platine, de noir de carbone ainsi que de Nafion® et d'un liant qui fait office de colle. La membrane fait 12 μm d'épaisseur environ et l'encre fait de 8 à 15 μm d'épaisseur. De chaque côté de la membrane est collé un GDL (gaz diffusion layer). Il s'agit en fait d'un papier buvard de carbone, c'est-à-dire un tissé de carbone poreux. Ce dernier fait 100 μm d'épaisseur. Un subgasket, c'est-à-dire un cadre plastique, entoure la MEA.

Rappelons de nouveau que de chaque côté de la MEA – donc autour des GDL – sont maintenues deux plaques bipolaires en forme de tôle afin d'assurer une répartition uniforme des gaz sur les électrodes (voir dessin en [annexe 5](#), figure 8 et 9).

Lors de l'assemblage de la cellule, les composants sont comprimés à une pression de 1 MPa les uns contre les autres, afin de réduire au maximum la résistance de contact entre les matériaux. Cette pression est maintenue pendant toute la durée de vie de la pile grâce à un carter qui maintient le stack dans une certaine position donc à une certaine pression. Ce qui implique que tous les éléments d'une cellule présentent tous une très forte résistance à la compression afin qu'ils ne se déforment pas lors de l'assemblage. Pour plus de précision, un joint d'étanchéité est déposé de chaque côté du subgasket et se retrouvera écrasé entre la plaque bipolaire et le subgasket ; assurant ainsi un maintien des gaz dans la cellule.

Décrivons maintenant les fonctions de chaque élément en allant de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule.

Comme indiqué précédemment, les plaques bipolaires sont conductrices d'électricité. Cependant elles remplissent aussi d'autres fonctions. En effet elles sont imperméables aux deux gaz qui traversent notre pile – c'est-à-dire au H_2 et au O_2 mais aussi à l'azote si de l'air est utilisé à la place du O_2 .

Les GDL sont d'excellents conducteurs thermiques, afin d'évacuer au mieux la chaleur créée lors des réactions chimiques au sein de la pile. Les GDL sont aussi des conducteurs électriques de qualité moyenne. Ils sont évidemment poreux afin que les gaz puissent atteindre la membrane en les traversant. La dernière caractéristique du GDL, qui n'est pourtant pas des moindres, est que ce dernier est traité pour être hydrophobe du côté du catalyseur. Le plus souvent ce traitement se fait à l'aide d'un PTFE (polytétrafluoroéthylène).

Finalement, entre les GDL se situe la membrane. Décrivons-en premier lieu les qualités de l'encre qui la recouvre. Cette encre détient le plus de rôles parmi tous les composants d'une cellule. Elle contient non seulement le catalyseur mais sert aussi de conducteur électrique, de conducteur protonique et de conducteur thermique – pour les mêmes raisons que le GDL puisque rappelons-le, au cours de la réaction chimique les puissances électriques et thermiques dégagées sont quasiment équivalentes. Sans oublier qu'il s'agit d'une encre poreuse qui assure la conduction gazeuse. Enfin, puisque de l'eau est formée au cours de la réaction, il est important que l'encre soit aussi capable d'évacuer l'eau sans que cette dernière n'entraîne l'un des composants de l'encre.

Enfin la membrane, faite de Nafion®, conduit uniquement les protons H^+ , est imperméable aux gaz et isolante électrique. Le Nafion® est un fluoropolymère copolymère à base de tétrafluoroéthylène sulfonaté, donc un dérivé du PTFE. C'est le matériau le plus couramment utilisé comme membrane dans les PAC, cependant des recherches sont en cours quant à l'utilisation de Celazole® (polybenzimidazole) pour le remplacer.

Il est aussi important de noter que le subgasket fait office d'isolant électrique afin d'éviter un court-circuit qui se créerait en cas de contact entre deux plaques bipolaires d'une même cellule. De plus il permet également une séparation des deux gaz.

Le courant d'une PAC traverse chacune des cellules avant de passer dans un circuit électrique qui utilise ce courant. Ainsi les câbles électriques sont branchés aux extrémités de la PAC sur les dernières plaques métalliques de notre pile, précédemment appelée plaque bipolaire. Comme ces plaques ne sont en contact qu'avec une seule cellule – puisque qu'elles sont branchées de l'autre côté au fil électrique – elle sont appelées « plaque monopolaire ». Nous considérerons pour la suite de notre projet que nous ne travaillerons qu'avec une seule cellule. Décrivons en détail les réactions chimiques qui ont lieu au sein d'une cellule et qui permettent l'apparition d'un courant.

Au centre de la pile, la membrane en Nafion® conduit les protons H^+ tout en bloquant le passage des électrons e^- . De part et d'autre de cette membrane l'encre fait office d'électrodes : d'un côté elle joue le rôle de l'anode où a lieu, grâce au catalyseur, l'oxydation de H_2 (suivant

la réaction : $\text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$) et de l'autre celui de la cathode où les protons ayant traversé la membrane et les électrons ayant traversé le circuit électrique se réduisent avec de l' O_2 (grâce au catalyseur) pour former de l'eau ($2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) (Voir [annexe 5](#), figure 6). De cette manière, des électrons sont libérés à l'anode, traversent le GDL puis la plaque monopolaire pour enfin atteindre le fil électrique, traverser la partie électronique, arriver sur la deuxième plaque monopolaire (de l'autre côté de la cellule), traverser le GDL et enfin arriver sur la cathode pour former de l'eau.

Le dihydrogène est « soufflé » d'un côté de la cellule entre la plaque monopolaire et le GDL (côté anode), tandis que le dioxygène (ou l'air) est soufflé de l'autre côté de la cellule (côté cathode), toujours entre le deuxième GDL et la deuxième plaque monopolaire. Une sortie d'eau est aussi prévue du côté de la cathode.

La sortie d'eau est située en bas de la cathode et est contrôlée par une vanne électrique qui s'ouvre à intervalle régulier. La vanne se ferme dès que la pression au niveau de la cathode baisse drastiquement. En effet, lorsque l'eau est évacuée, la pression ne diminue pas puisque seule l'eau – plus lourde que le dioxygène – tombe à travers la vanne. Ensuite lorsque toute l'eau est évacuée, l' O_2 sort de la partie cathodique entraînant une chute importante de pression et donc une fermeture de la vanne. Cela permet d'éviter de perdre trop de O_2 et de pression dans notre pile.

L'eau évacuée est souvent réutilisée pour humidifier le dioxygène avant qu'il ne traverse la pile afin d'ensuite humidifier la membrane, qui ne marche que lorsqu'elle est humide. Ce genre de montage étant trop complexe nous nous contenterons de fixer un réservoir d'eau qui humidifiera le dioxygène entrant. Il est important de relever que cette pratique n'est pas universelle, les FCEV Toyota par exemple se contentent de maintenir l'eau dans la cellule par des procédés complexes qui évitent de mettre en place le montage cité précédemment.

Concernant la durabilité de notre pile, il faut savoir que la question de la dégradation d'une PAC constitue sûrement l'un des thèmes les plus abordés lors de la conception de cette dernière. On compte au total plus de 100 mécanismes de dégradation qu'on ne pourra évidemment pas aborder. Notons tout de même que l'ajout d'autres métaux tel que le ruthénium et l'iridium permette à la pile d'augmenter sa durabilité car ils empêchent les contaminants d'atteindre et de dégrader la membrane de Nafion®.

En outre, toujours dans un souci de durabilité, il est nécessaire de se pencher sur les soucis d'oxydation de la pile. En effet la pile est faite de matériaux oxydables et est traversée par du dioxygène, le risque d'oxydation est en conséquence non négligeable. Pour pallier ce souci, la solution est relativement simple ; il faut maintenir en permanence au sein de la pile une quantité de dihydrogène plus importante que de dioxygène. De cette manière aucun dioxygène résiduel ne restera dans la pile et donc ne pourra l'oxyder. Pour appliquer cette méthode il suffit de maîtriser le débit d'air (ou de dioxygène) entrant et le débit de dihydrogène. C'est-à-dire s'assurer lors du fonctionnement que la pile ne manque jamais de combustible, mais aussi de s'assurer, lors de l'arrêt de la pile, d'effectuer une vidange du O_2 puis du H_2 . En outre, comme indiqué précédemment il est important de préciser que l'hydrogène qui alimente la pile doit être pur à au moins 99,99 %, comme décrété par la norme ISO/TS 20100 de 2020 [34]

Nous avons donc cité toutes les exigences, méthode de construction, matériaux et contraintes à prendre en compte lors de la construction de notre PEMFC. Pour rappel, quatre schémas résumant le fonctionnement de cette pile et son assemblage sont disponible en [annexe 5](#). Penchons-nous maintenant sur un dimensionnement possible de cette dernière.

5.2. Modélisation et dimensionnement

Premièrement, pour notre montage, nous décidons de ne fabriquer qu'une seule cellule dans un souci de simplicité.

Avant toute chose, rappelons que le courant produit par la pile ne dépend pas de la quantité de H₂ amenée à la PAC mais de la quantité de courant que l'utilisateur souhaite tirer. Ainsi, le H₂ et le O₂ sont toujours en excès par rapport à la quantité de dihydrogène et de dioxygène qui est consommée.

Considérons que nous souhaitons alimenter une LED qui nécessite un courant de 2 ampères et 0,7 volt maximum.

On réitère la même opération que nous avons effectuée pour estimer la taille d'une PAC dans une voiture. On souhaite aussi faire marcher la pile de manière optimale, donc à son point de fonctionnement qui est à 0,5 ampère puisqu'il nous assure une même quantité de puissance thermique que de puissance électrique délivrée. En se référant à la courbe de polarisation des piles à combustible actuelles on détermine la tension que peut délivrer une cellule de 1 cm² au point de fonctionnement (Voir [annexe 4](#)). Ainsi à partir de la tension et de l'intensité, on obtient une puissance de $P = I * U = 0,5 * 0,7 = 0,35$ W par cm². Etant donné que nous souhaitons alimenter une LED qui fonctionnent à 2 ampères et 0,7 volt, la puissance souhaitée est de 1,4 W. Nous fabriquerons donc une cellule avec 4 cm² de surface active. Notre membrane de Nafion®, notre encre et notre GDL feront donc 4 cm².

Il faut maintenant s'assurer que les réactifs apportés dans la PAC ne limitent pas la puissance que notre pile pourra produire. Il faut donc que l'apport en dihydrogène et en dioxygène soit supérieur à la consommation que la pile en fait.

Sachant qu'un ampère correspond à $6,242 * 10^{18}$ électrons traversant le circuit par seconde, notre pile nécessite une production et consommation de $1,248 * 10^{10}$ électrons par seconde. Etant donné qu'une molécule de H₂ libère 2 e⁻ et qu'une molécule de O₂ consomme 2 e⁻ pour former H₂O. Il nous faut donc apporter au minimum $6,242 * 10^{18}$ molécules de H₂ par seconde, de même pour le O₂. Pour simplifier le problème, on se demandera à partir de quelle pression dans les réservoirs de O₂ et de H₂ le débit n'est plus assez important. De là nous pourrions déterminer à quel moment faudra-t-il changer les réservoirs. En calculant, on se rend vite compte que la pression minimum acceptable est bien inférieure à 30 bars. Or les réservoirs que nous utiliserons, à moins d'investir sérieusement dans des réservoirs de très haute qualité, nécessitent d'être remplis dès que leur pression est inférieure à 30 bars sous peine de détérioration. Ainsi le souci du débit est écarté.

Nous choisissons arbitrairement un réservoir de 200 bars pour le dihydrogène et un de 180 bars pour le dioxygène. Les réservoirs sont reliés - soit à la cathode soit à l'anode en fonction de leur contenu – via un tube de diamètre 1 ou 2 cm. Chaque tube est équipé d'une valve électrique qui autorise un maximum de 3 bars de pression dans la cellule puisqu'une différence de pression supérieure à un bar entre l'anode et la cathode la détériorait.

Toutes les questions de dimensionnement ont été résolues. Penchons-nous maintenant sur le montage : tout d'abord il faut recouvrir la membrane (12 µm d'épaisseur) de l'encre décrite précédemment, l'encre doit avoir une épaisseur de 8 µm côté H₂ et 15 µm côté O₂. Ensuite un GDL de 100 µm d'épaisseur doit être déposé de chaque côté de la membrane. On fixe le tout au subgasket de 8 cm² qui entoure l'assemblage que l'on vient de réaliser. On se saisit de deux plaques métalliques de 200 µm d'épaisseur et de 8 cm² surface ayant la même forme que le subgasket sur lesquelles on a déposé un joint – isolant électrique et étanche aux gaz – sur les bords. On presse le tout à une pression de 1 MPa et on fixe l'assemblage pendant que la pression est maintenue (par exemple grâce à un étai) à l'aide de 4 vis que l'on serre au 4 coins des plaques métalliques. Notons que les vis ne traversent pas la membrane mais uniquement les plaques monopolaires et le subgasket, sans oublier qu'elles sont isolantes électriques. En outre, toutes les épaisseurs définies ci-dessus proviennent des PAC actuelles.

Les réservoirs sont reliés à la cellule via un tuyau qui vient souffler les gaz respectifs entre la plaque métallique et le GDL. Le H₂ et le O₂ sont donc soufflés d'un côté et de l'autre de la membrane, parallèlement à cette dernière.

On soude chacune des extrémités d'un câble électrique à chacune des tôles. Le câble électrique traverse évidemment notre lampe sinon un court-circuit serait engendré.

On place le tout dans une boîte hermétique, ventilée (pour la refroidir) et équipée d'un détecteur de H_2 pour prévenir les fuites. Cette boîte, isolante électrique, permet de protéger la cellule mais aussi de protéger l'utilisateur de tout risque d'électrocution. On note aussi que l'air entrant est filtré et sec.

5.3. Les difficultés liées à la réalisation de ce projet à l'INSA

À la suite de cette étude, certaines difficultés évidentes, telles que la disponibilité des matériaux nécessaires et leur prix, apparaissent si l'on veut réaliser ce projet à l'INSA. Dans un premier temps, nous pouvons nous intéresser aux matériaux utilisés. Tout d'abord la membrane, qui est constituée de Nafion®. Comme calculé précédemment, il nous faudrait une membrane assez fine de 2 cm par 2 cm. Or cette membrane est très difficilement procurable pour un particulier et coûte assez cher. Ensuite, l'encre appliquée sur la membrane est constituée de platine, de noir de carbone ainsi que de Nafion®. Le noir de carbone coûte environ 10 € pour 100g et est plutôt facile à obtenir. Le platine est un des composants nous posant le plus de problème puisque son prix est très élevé (28€ par gramme). Comme dit plus tôt, le Nafion® est aussi un des composants difficile à obtenir. De plus, la consistance et la concentration en chaque constituant de cette encre reste à évaluer.

Ensuite, quant à la composition des GDL, nous avons besoin de feutre de carbone et de PTFE. Une plaque de feutre de carbone est procurable à une vingtaine d'euro sur internet, et il est nécessaire de traiter l'une des deux feuilles pour la rendre imperméable du côté de la cathode ou l'eau se forme, par une solution liquide de PTFE que nous pouvons trouver à une trentaine d'euros sur internet.

Enfin, les plaques bipolaires sont fabriquées dans un métal conducteur mais également imperméable à l'air. Nous pouvons choisir par exemple un bloc d'acier inoxydable, qui coûte environ 1€50 le kilo ; mais le fait qu'il s'agisse d'un mauvais conducteur thermique peut nous pousser à choisir l'or qui lui coûte 47€ le gramme (18K). Cependant, il faudrait ajouter à cela le prix de l'usinage nécessaire pour réaliser les rainures et les embouchures d'alimentation des gaz.

Il est également nécessaire de rappeler que notre pile utilise du H_2 et du O_2 pur. Cela rajoute donc une difficulté d'alimentation à notre pile.

Enfin, la dernière étape est l'assemblage des différents composants pour former la cellule. Normalement, cet assemblage se fait sous une pression de 10 bars. Cela risque d'être compliqué à atteindre à l'INSA, mais nous pouvons essayer de nous en approcher le plus possible pour s'assurer une étanchéité et une bonne cohésion entre les différents éléments. De plus, les éléments sont très fins, ce qui rends difficilement manipulable.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de notre projet était de réaliser une étude théorique de pile à combustible, mais également de nous familiariser avec les différentes méthodes de production et de stockage de l'hydrogène ainsi que leur utilisation principale dans les FCEV. Nous avons également présenté une ébauche de plan qui pourrait servir à la construction d'une PEMFC à l'avenir. Nous avons commencé par nous intéresser à l'hydrogène ainsi qu'à la manière avec laquelle il pourrait être produit de la façon la plus durable et la plus écologique possible. Puis nous nous sommes penchés sur les différentes piles à combustibles, leur avantages et inconvénients ainsi que leur utilisation dans le monde industriel d'aujourd'hui et de demain. Enfin, nous avons approfondi l'étude de la PEMFC en se penchant notamment sur les thématiques de matériaux et de dimensionnement de chaque pièce afin de réaliser une pile fonctionnelle.

Ce travail de groupe nous a offert l'opportunité de mettre en pratique nos connaissances scientifiques acquises tout au long de notre formation, tout en développant nos compétences de travail d'équipe. Nous avons ainsi pu partager nos idées, points de vue et approches pour résoudre les problèmes qui nous étaient présentés. Ce projet nous a confrontés pour la première fois à la recherche et au développement sur un sujet en autonomie totale. En unissant nos réflexions et recherches individuelles vers un objectif commun, nous avons également renforcé notre capacité à travailler en groupe, une compétence essentielle pour notre profil d'ingénieurs de demain. Par ailleurs, l'étude des piles à combustibles et de l'hydrogène, qui jouent un rôle grandissant, présente un réel intérêt quant à l'entretien de notre goût aux technologies de demain.

Notre projet étant le premier portant sur l'étude des piles à combustibles, les recherches bibliographiques ont été prioritaires et nous avons seulement présenté une idée de modèle à réaliser, en présentant ses désavantages et sans se soucier d'un quelconque budget. Nous espérons que ce projet sera repris, approfondi et amélioré ; et qu'il mènera peut-être un jour à la construction, par un groupe d'élèves ingénieurs INSA, d'une pile à combustible artisanale.

7. BIBLIOGRAPHIE

Partie "Focus sur l'hydrogène" :

→ *Production de l'hydrogène*

- [1] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene> (valide à la date du 21/03/2023)
- [2] https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/securite-hydrogene.pdf (valide à la date du 21/03/2023)
- [3] <https://www.nafion.com/fr/support/white-papers/membranes-for-fuel-cells-white-paper> (valide à la date du 25/04/2023)
- [4] <https://www.choisir.com/energie/articles/104440/lhydrogene-alternative-aux-energies-fossiles> (valide à la date du 16/05/2023)
- [5] http://energie.promes.cnrs.fr/IMG/pdf/H2_PAC.pdf (valide à la date du 16/05/2023)
- [6] <https://www.discoverthegreentech.com/hydrogene/utilisations/pile-a-combustible/membrane-echangeuse-de-protons-pemfc/> (valide à la date du 23/05/2023)

→ *Stockage de l'hydrogène*

- [7] https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/5/2022/08/Guide_20certification_20H2_20charte_20ADEME_20_28ID_202714844_29_2.pdf (valide à la date du 14/03/2023)
- [8] <https://www.discoverthegreentech.com/powerpaste-pate-stocker-hydrogene/> (valide à la date du 28/03/2023)
- [8'] <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/press-media/2021/february-2021/ifam-hydrogen-powered-drives-for-e-scooters.pdf>
- [9] <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene#:~:text=centime%20d'euro.,Sous%20forme%20liquide,%2D252%2C87%C2%B0C> (valide à la date du 28/03/2023)
- [10] <https://www.ecosources.org/stockage-hydrogene> (valide à la date du 28/03/2023)
- [11] http://tpe09.free.fr/partie3_2.php (valide à la date du 28/03/2023)
- [12] https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Fiche%204.2%20-%20Stockage%20hydrog%C3%A8ne%20comprim%C3%A9_rev%20aout%202019%20TA-PM.pdf (valide à la date du 11/04/2023)
- [13] <https://www.cea.fr/Documents/Les%20technologies%20de%20l%E2%80%99hydrog%C3%A8ne%20au%20CEA.pdf> (valide à la date du 23/05/2023)

Partie "Fonctionnement théorique d'une PAC" :

→ *Les différentes PAC :*

- [14] <https://h2sys.fr/2017/09/27/pile-a-combustible-pile-a-hydrogene-explications/> (valide à la date du 07/03/2023)

- [15] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lammoniac-un-vecteur-energetique-potentiel-pour-la-transition-de-demain-119293/amp/> (valide à la date du 14/03/2023)
- [16] http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2006_0095_RADULESCU.pdf (valide à la date du 06/06/2023)
- [17] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/chimie-des-milieus-complexes-42529210/les-membranes-pour-piles-a-combustible-pemfc-af6933/> (valide à la date du 06/06/2023)
- [18] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible#:~:text=Les%20types%20de%20piles%20%C3%A0,la%20pile%20%C3%A0%20oxyde%20solide (valide à la date du 23/05/2023)
- [19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A0_combustible_alcaline (valide à la date du 06/06/2023)
- [20] <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients/> (valide à la date du 13/06/2023)

→ *Le milieu industriel et automobile :*

- [21] <https://www.credit-agricole.com/magazine/reussir-la-transition-energetique/environnement/le-vehicule-a-hydrogene-ou-en-est-on> (valide à la date du 07/03/2023)
- [22] <https://erh2-bretagne.mystrikingly.com/blog/la-filiere-bus-electrique-pile-a-hydrogene> (valide à la date du 07/03/2023)
- [23] <https://www.youtube.com/watch?v=hNMRSUFuHPg> (valide à la date du 21/03/2023)
- [24] <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/kangoo-z-e-hydrogen-et-master-z-e-hydrogen/> (valide à la date du 21/03/2023)
- [25] <https://www.renault.fr/gamme-concept-cars/scenic-vision.html> (valide à la date du 28/03/2023)
- [26] <https://www.toyota.fr/gamme-electrifiee/hydrogene/fonctionnement-station-hydrogene#:~:text=Le%20fonctionnement%20interne,installer%2C%20r%C3%A9parer%20e%20faire%20%C3%A9voluer> (valide à la date du 28/03/2023)
- [27] <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01236621/document> (valide à la date du 11/04/2023)
- [28] <https://theses.hal.science/tel-00271090/document> (valide à la date du 18/04/2023)
- [29] <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-vehicule-a-hydrogene/> (valide à la date du 25/04/2023)

Partie "Proposition de plan pour l'avenir" :

- [30] <https://hal.science/hal-03453940/document> (valide à la date du 11/04/2023)
- [31] <https://hal.science/hal-03453940/document> (valide à la date du 11/04/2023)
- [32] <https://theses.hal.science/tel-00010710/document> (valide à la date du 02/05/2023)
- [33] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/20923/m%c3%a9moire%202022.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (valide à la date du 09/05/2023)

[34] <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/4cdda17b-2760-433e-86f7-632d2f966614/sist-ts-iso-ts-20100-2020> (valide à la date du 16/05/2023)

[35] https://www.cder.dz/vlib/cder_ft/cder_ft_00010_txt.pdf (valide à la date du 13/06/2023)

[36] [Formation professionnelle aux métiers du Pétrole et Gaz - lfp Training - lfp Training](#) (valide à la date du 13/06/2023)

[37] [03 Intro 344-345.qxd \(palais-decouverte.fr\)](#) (valide à la date du 13/06/2023)

- Sources des images :

[Image de couverture et figure 7] <https://www.bronkhorst.com/fr-fr/applications/energie-renouvelable-hydrogene/a118-humidification-des-gaz-de-piles-a-combustible/> (valide à la date du 13/06/2023)

[Figure 1] <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/chantiers-atlantique-livrent-plus-grand-navire-gnl-monde-3448.html> (valide à la date du 13/06/2023)

[Figure 2] <https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2020/04/9.4.1.pdf> (valide à la date du 13/06/2023)

[Figure 5] [Formation professionnelle aux métiers du Pétrole et Gaz - lfp Training - lfp Training](#) (valide à la date du 13/06/2023)

[Figure 6] <https://h2sys.fr/technologies/pile-a-combustible/> (valide à la date du 13/06/2023)

[Figure 8] https://www.researchgate.net/figure/2-vue-eclatee-et-assemblee-dune-pile-a-combustible-3_fig2_325675492 (valide à la date du 13/06/2023)

[Figure 9] https://www.cder.dz/vlib/cder_ft/cder_ft_00010_txt.pdf (valide à la date du 13/06/2023)

8. ANNEXES

8.1. Diagrammes de Gantt

Tâches // Dates	07/03	14/03	21/03	28/03	04/04	11/04	18/04	25/04	02/05	09/05	16/05	23/05	30/05	06/06
Recherche préliminaire + orientation du projet	2													
Utilisation de H2 pur ou mélangé / rendement (propriété du mélange H2-Ammoniac)			1	1										
Etude fonctionnement PaC + place dans le milieu industriel automobile + problème rencontré si mélangé à l'ammoniac lors du fonctionnement		1	1	1										
IS														
stockage du H2 (pression) + problème lors du fonctionnement + sécurité							2	2						
Proposition plan PaC à H2 et position sur réalisabilité du projet dans le futur									3	3	3			
Rédaction du rapport											3	3		
poster-soutenance													2	2

Figure 3 : Premier diagramme de Gantt

Tâches // Dates	07/03	14/03	21/03	28/03	04/04	11/04	18/04	25/04	02/05	09/05	16/05	23/05	30/05	06/06
Recherche préliminaire + orientation du projet ✓ production H2 et électrolyse ✓	1	1												
•Etude fonctionnement PaC ✓ •place dans le milieu industriel automobile ✓ •DIFFÉRENTE PAC •association de l'ammoniac dans les piles à combustibles ✓		2	2											
•stockage de l'H2 dans véhicule + station de recharge ✓ •Sécurité ✓			2	2										
IS														
•Dimensionnement de la pac et des réservoirs (rapport H2/O2) ✓ •durée de vie PaC ✓ •Rendement ✓ •station de recharge pression ✓ •épaisseur réservoir ✓							3	3						
•Proposition plan PaC à H2 ✓ •Position sur réalisabilité du projet dans le futur ✓ • contact et observation groupe P6 n°21 : 9h le mercredi									3	3				
Rédaction du rapport ~ Dimensionnement et modélisation PAC											3	3	3	
poster-soutenance													3	3

Figure 4 : Diagramme de Gantt à la date du 30/05/2023

8.2. Exemple d'un stockage chimique de l'hydrogène : la PowerPaste

La PowerPaste, développée par une équipe de recherche de l'Institut Fraunhofer à Dresde, a été dévoilé en 2021. Il s'agit d'un mélange entre de l'hydrure de magnésium, un ester et un sel métallique prenant la forme d'une pâte de couleur grise, dont la capacité de stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène est supérieure à celle des hydrocarbures, pour un volume et une masse équivalente.

Ce produit permet de stocker l'hydrogène sous forme chimique stable à température et à pression atmosphérique ambiante, pour être ensuite libéré à la demande avec de l'eau selon la réaction suivante : $\text{MgH}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{Mg(OH)}_2$

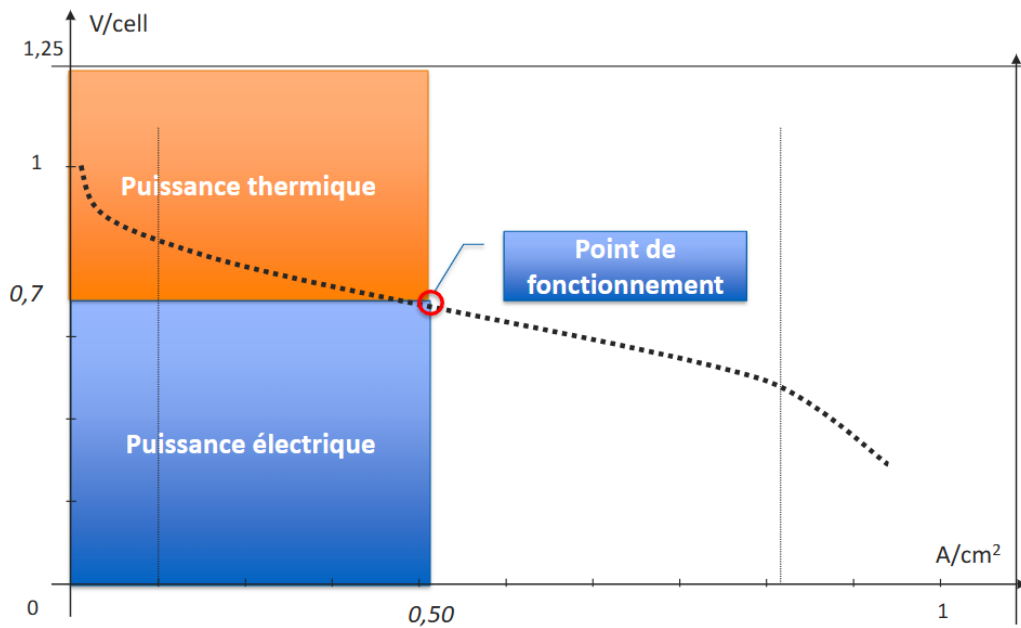
Concernant son utilisation, la pâte est contenue dans une capsule et est injectée dans un circuit conçu spécifiquement, dans lequel elle libère l'hydrogène gazeux au contact de l'eau, générant ainsi une source d'énergie pour alimenter la pile à combustible tandis que du résidu de Mg(OH)_2 reste au fond du réservoir. Ce résidu n'est pas un problème car l'hydrure de magnésium n'est pas toxique et que ses déchets sont faciles à gérer et à recycler. Un autre avantage est que la PowerPaste résiste à des températures très élevées et ne se décompose qu'à partir de 250 °C, supprimant les risques liés au stationnement du véhicule électrique en plein soleil.

Cette pâte aurait une densité par unité de masse de 10% c'est-à-dire qu'on peut stocker 1kg d'hydrogène dans 10kg de Powerpaste. La densité du système et de l'énergie rendrait la technologie intéressante pour les petits véhicules électrique (drones, vélos, ...). Cela comblerait une faiblesse de la mobilité hydrogène, qui ne semble actuellement pouvoir devenir viable que pour la mobilité lourde (camions, trains, bateaux ...). [\[8\]](#) et [\[8'\]](#)

8.3. Tableau résumant les caractéristique des principales PAC

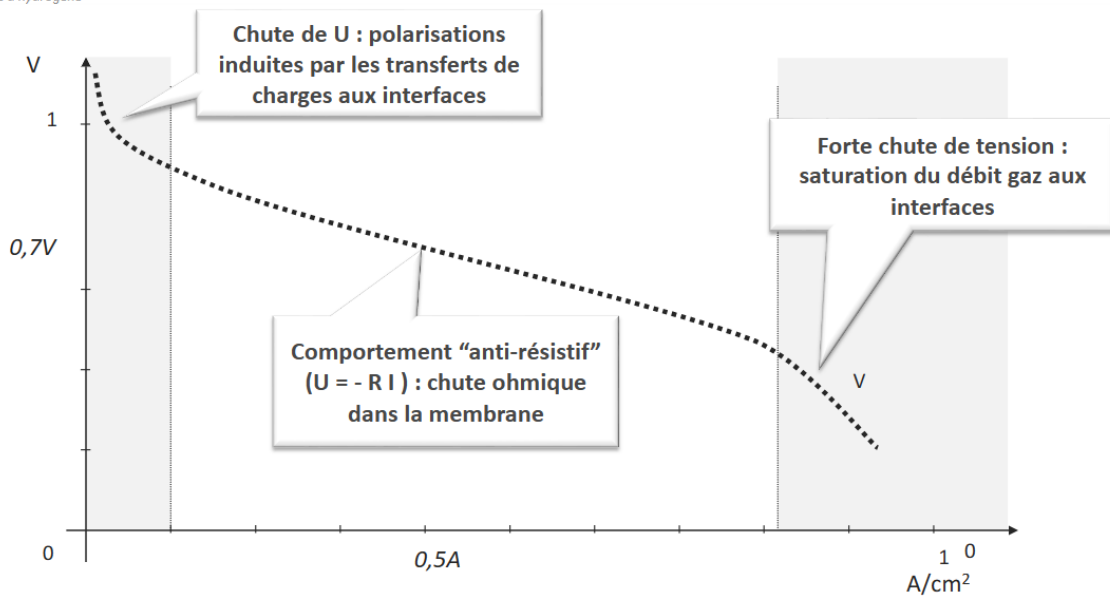
Type de PAC	Électrolyte	Température de Fonctionnement	Applications Principales	Avantages	Limitations
PEMFC	Membrane Polymère	50-90 °C	Véhicules, applications portables et stationnaires	Démarrage rapide, compacité, rendement	Sensibilité aux contaminants, besoin d'hydrogène pur
DMFC	Membrane Polymère	60-120 °C	Applications portables	Utilisation directe du méthanol, compacité	Faible rendement énergétique, sécurité
PAFC	Acide Phosphorique (H3PO4)	150-200 °C	Applications stationnaires, cogénération	Rendement élevé, tolérance aux contaminants	Lourd et volumineux, besoin d'hydrogène pur
AFC	Potasse Liquide (KOH)	60-90°C	Applications spatiales	Efficacité élevée, tolérance aux contaminants	Besoin d'hydrogène pur, fonctionnement à température élevée
SOFC	Oxydes Ioniques (YSZ)	500-1000 °C	Applications stationnaires, cogénération	Efficacité élevée, flexibilité des combustibles	Température de fonctionnement élevée, problèmes de durabilité des matériaux, poids

8.4. Courbe de polarisation et point de fonctionnement



IFP Training

PWT - Pile à hydrogène



IFP Training

PWT - Pile à hydrogène

Figure 5 : Courbe de polarisation et point de fonctionnement d'une PEMFC

8.5. Schéma résumant le fonctionnement et l'assemblage d'une PEMFC

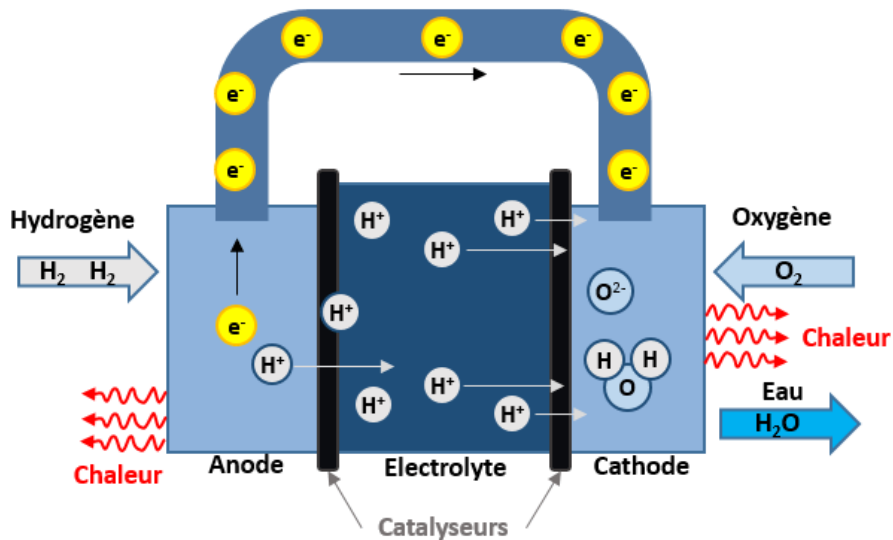


Figure 6 : Schéma du fonctionnement d'une PEMFC

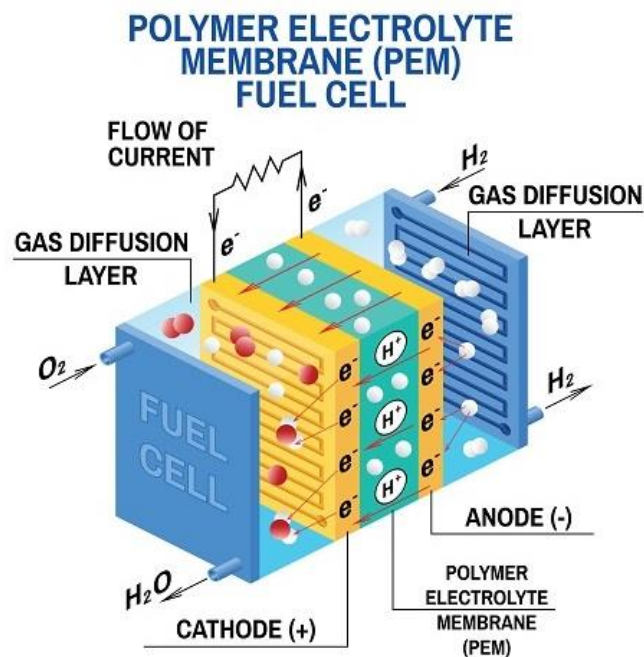


Figure 7 : Schéma de la composition d'une PEMFC

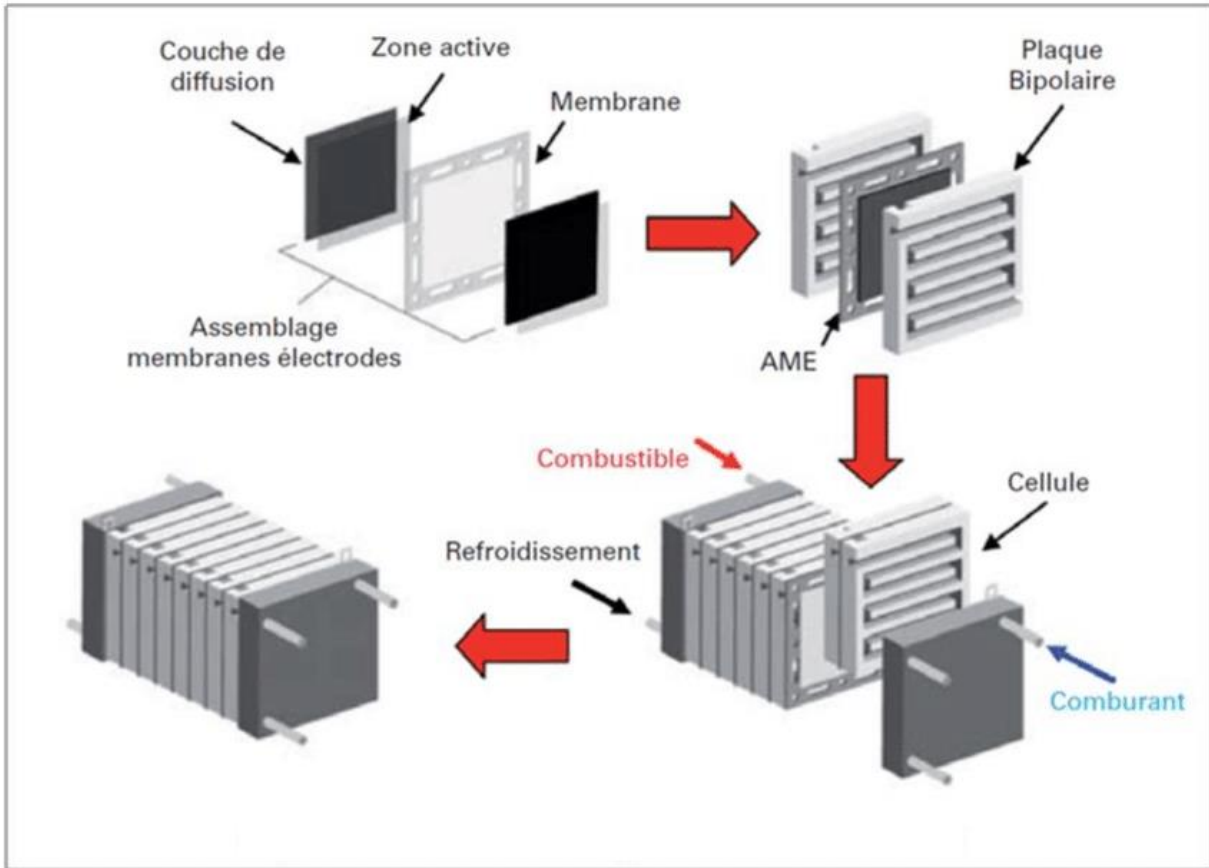


Figure 8 : Schéma de l'assemblage d'une PEMFC

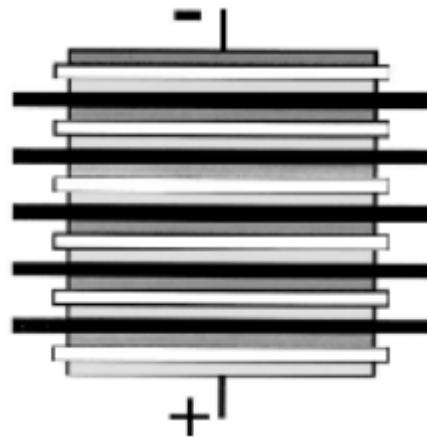
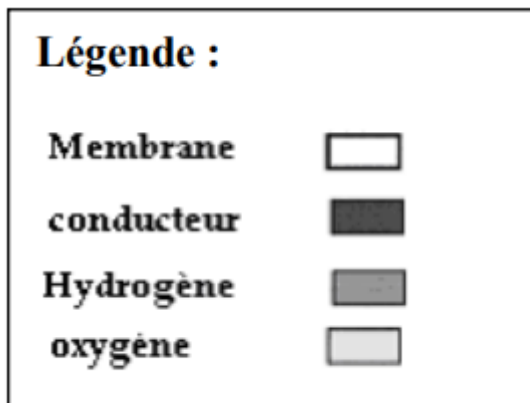


Figure 9 : schéma d'un stack de plusieurs cellules composant une PEMFC