

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Modélisation et simulation d'une pile à combustible de type PEMFC

Préparé par :

BELFEDDAL Abdelbasset

ZEGGAI Mohamed Amine

Soutenu publiquement le :18 / 06 / 2023, Devant le jury composé de :

| | | |
|----------------------------|--|--------------|
| M. BEY Mohamed | Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun) | Président |
| M. Belmiloud Mohamed Amine | Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun) | Examineur |
| Mme. ASRI Aicha | Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) | Examinatrice |
| M. BOUREGUIG Kada | Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) | Encadrant |

Année universitaire : 2022 - 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACE

Tout d'abord, nous remercions ALLAH tout-puissant pour les bénédictions qu'il nous a prodiguées tout au long de nos recherches et qui nous ont permis d'achever ce travail avec succès.

Nous dédions ce travail qui n'aurait jamais été possible sans le soutien inébranlable et illimité de nos chers parents qui ne cessent de nous donner ce qui est nécessaire pour que nous puissions réaliser ce qui a été accompli. Que Dieu vous protège et que le succès soit toujours à notre portée pour que nous puissions vous offrir le bonheur.

A M. Kada BOUREGUIG, cette dédicace est pour vous. Nous tenions à vous remercier pour votre soutien, votre expertise et votre encadrement tout au long de ce projet. Grâce à votre direction éclairée, vos conseils avisés et votre engagement sans failles, nous put mener à bien cette recherche avec succès.

A mon binôme de Master, Je suis fier de dire que nous avons parcouru ce chemin ensemble et je suis reconnaissant pour tout ce que tu as apporté à notre expérience de Master. Je te souhaite tout le succès que tu mérites dans tes projets futurs. Continue de briller, mon cher ami.

Je dédie également ce travail à : Mes frères et mes sœurs qui nous ont soutenus instant après instant sans arrêt. Tous mes amis et tous ceux qui ont cru en nous.

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH de nous avoir donné la force et le courage de persévérer jusqu'à l'aboutissement de ce projet de recherche.

Nous tenons à remercier les membres du jury pour leur présence, nous vous sommes infiniment reconnaissants pour votre lecture attentive de ce mémoire de fin d'études. Nous leur exprimons notre gratitude pour leur confiance, leur disponibilité et leurs réponses à nos sollicitations. C'est un privilège qu'ils nous ont accordé en faisant partie de notre jury.

Nous tenons également à remercier Monsieur Kada BOUREGUIG, notre maître de stage et tuteur, pour son accueil chaleureux, ses précieux conseils et son expertise professionnelle. Il nous a patiemment et dévotement accompagnés et guidés tout au long de ce parcours.

Nous sommes également reconnaissants à nos familles, frères et amis qui ont contribué à ce projet à distance. Leurs encouragements et leur confiance en nos capacités ont été essentiels à notre réussite.

Nous dédions cette thèse à nos parents, qui nous ont témoigné un amour et un soutien inconditionnels tout au long de notre parcours universitaire et professionnel.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| LISTE DES FIGURES | i |
| LISTE DES TABLEAUX | iv |
| NOMENCLATURE | v |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| I : Généralité sur les piles à combustibles | 4 |
| I.1 Introduction..... | 5 |
| I.2 Historique..... | 6 |
| I.3 Définition..... | 7 |
| I.4 Principe de fonctionnement..... | 9 |
| I.5 Composition d'une pile à combustible..... | 9 |
| I.6 Types des piles à combustibles..... | 11 |
| I.6.1 Trois à électrolytes acides..... | 11 |
| I.6.2 Trois à électrolytes basiques..... | 11 |
| I.7 Les réactions chimiques..... | 12 |
| I.8 Les applications de la pile à combustible..... | 14 |

| | |
|---|-----------|
| I.8.1 Les applications militaires et spatiales..... | 14 |
| I.8.2 Applications stationnaires..... | 14 |
| I.8.3 Les applications transport..... | 15 |
| I.8.4 Les applications portables..... | 15 |
| I.9 Pourquoi l'hydrogène comme combustible..... | 16 |
| I.10 Obtention de l'hydrogène..... | 17 |
| I.11 Avantages d'une voiture à pile à combustible à hydrogène..... | 17 |
| I.12 Les avantages et les inconvénients d'une pile à combustible..... | 18 |
| I.12.1 Avantages..... | 18 |
| I.12.2 Inconvénients..... | 19 |
| I.13 Conclusion..... | 19 |
| II Modélisation de la pile à combustible de type PEMFC..... | 21 |
| II.1 Introduction..... | 22 |
| II.2 Etude technique de pile à combustible PEMFC..... | 22 |
| II.3 Raisons du choix du pile à combustible de type PEM..... | 23 |
| II.4 Principe de fonctionnement d'une PEMFC..... | 23 |
| II.5 Les composants de la pile à combustible..... | 25 |
| II.6 Assemblage Membrane Electrode (AME)..... | 26 |
| II.6.1 Electrolyte..... | 26 |
| II.6.2 Les électrodes..... | 27 |
| II.6.3 Couche active (Catalyseur)..... | 27 |
| II.6.4 Couche de diffusion..... | 28 |

| | |
|---|-----------|
| II.6.5 Plaques bipolaires..... | 28 |
| II.7 Assemblage des AME..... | 29 |
| II.8 Systèmes auxiliaires..... | 30 |
| II.9 La voiture électrique à pile à combustible est-elle l'avenir de l'auto- mobile..... | 31 |
| II.10 20 ans pour rendre nos voitures actuelles obsolètes..... | 32 |
| II.11 Développement du modèle dynamique d'un stack PEMFC..... | 33 |
| II.11.1 Performance idéale d'une cellule PEMFC..... | 33 |
| II.11.1.1 Énergie libre de Gibbs..... | 33 |
| II.11.1.2 Équation de Nernst..... | 34 |
| II.11.1.3 Les débits molaires..... | 36 |
| II.11.1.4 Les pressions partielles..... | 36 |
| II.11.2 Performances réelles d'une cellule PEMFC..... | 40 |
| II.11.2.1 Les pertes d'activation..... | 40 |
| II.11.2.2 Pertes ohmiques..... | 40 |
| II.11.2.3 Les pertes de concentration..... | 41 |
| II.11.3 Expression de la tension de sortie de la pile à combustible..... | 41 |
| II.12 Conclusion..... | 42 |
| III Simulation du Modèle et résultats..... | 43 |
| III.1 Introduction..... | 44 |
| III.2 MATLAB Simulink..... | 44 |
| III.3 Bloc d'une PEMFC..... | 45 |
| III.4 Modèle physique de la pile à combustible..... | 46 |

| | |
|--|-----------|
| III.5 Modèle dynamique de la pile à combustible..... | 46 |
| III.6 Comparaison des résultats | 47 |
| III.7 Résultats De Simulation..... | 48 |
| III.8 Conclusion..... | 51 |
| Conclusion Générale..... | 52 |
| RÉFÉRENCES..... | 55 |
| RÉSUMÉ..... | 60 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| I.1 Une pile à combustible en laboratoires..... | 6 |
| I.2 Experience de Sir William Grove..... | 7 |
| I.3 Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide..... | 8 |
| I.4 Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique..... | 8 |
| I.5 Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible..... | 9 |
| I.6 Premier prototype de pile à combustible réalise au laboratoire. A gauche : les plaques bipolaires usinées en graphite. A droite : l'assemblage membranes électrodes (partie sombre) et le joint en silicone (partie claire). En bas : le prototype assemblé et en fonctionnement avec les entrées de gaz (tuyaux blancs) de chaque côté..... | 10 |
| I.7 Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique..... | 13 |
| I.8 Domaines d'application des piles à combustible..... | 14 |
| I.9 Pile à combustible CELLIA fabriqué par MTU | 15 |
| I.10 Le premier bus d'Europe à pile à combustible entre en service régulier à Madrid..... | 15 |
| I.11 Exemples des piles à combustible dans les applications portables..... | 16 |

| | |
|---|----|
| I.12 Le site pilote « HyBalance » d'Air Liquide à Hobro produit de l'hydrogène à partir de la technologie d'électrolyse, au Danemark..... | 17 |
| I.13 La recharge en hydrogène s'effectue grâce à des pompes capables d'injecter très rapidement l'hydrogène..... | 18 |
| II.1 Schéma de base pile à combustible électrolyte polymère solide..... | 23 |
| II.2 Modèle d'une pile à combustible..... | 24 |
| II.3 Schéma représente le fonctionnement d'une PEMFC..... | 25 |
| II.4 Les composants d'une PEMFC..... | 26 |
| II.5 La membrane de pile à combustible..... | 27 |
| II.6 Le cœur de pile à combustible..... | 28 |
| II.7 Plaque bipolaire..... | 29 |
| II.8 Assemblage en stack de mono-cellules de PEMFC..... | 30 |
| II.9 La pile à combustible..... | 31 |
| II.10 Vue demi-éclatée d'un pack de batteries sur une voiture électrique..... | 32 |
| II.11 Pile à combustible "PEMFC" Honda..... | 33 |
| II.12 Illustration..... | 38 |
| II.13 Circuit équivalent de la pile PEMFC..... | 41 |
| III.1 Entrées/Sorties d'une pile à combustible PEMFC..... | 45 |
| III.2 Modèle physique de la pile à combustible..... | 46 |
| III.3 Modèle dynamique de la pile à combustible..... | 47 |
| III.4 Validation..... | 48 |
| III.5 Caractéristiques courant-Tension du modèle PEMFC à différentes températures..... | 48 |

| | |
|--|----|
| III.6 Caractéristiques courant-puissance du modèle PEMFC à différentes températures..... | 49 |
| III.7 Caractéristiques courant-Tension du modèle PEMFC à différentes températures..... | 50 |
| III.8 Caractéristiques courant-puissance du modèle PEMFC à différentes température..... | 50 |
| III.9 Caractéristiques courant-Tension du modèle PEMFC à différentes températures..... | 51 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| I.1 Les types de pile à combustible..... | 11 |
| I.2 Les types de pile à combustible..... | 12 |
| III.1 Paramètre de simulation..... | 46 |

NOMENCLATURE

Symboles

| | | |
|------------|---|----------------------|
| W_{el} | Énergie libre de Gibbs | [J] |
| ΔG | La Variation de l'énergie libre de Gibbs | [J] |
| n | Nombre d'électrons participants à la réaction | |
| F | Constante de Faraday | [C/mol] |
| N | Nombre d'Avogadro | [mol ⁻¹] |
| E | Tension idéale dite aussi tension réversible | [V] |
| H | L'enthalpie | [J/mol] |
| S | L'entropie | [J/mol. K] |
| ΔH | La variation de l'enthalpie | [J/mol] |
| ΔS | La variation de l'entropie | [J/mol. K] |
| T | La température de fonctionnement de la pile | [K] |
| H_i | L'enthalpie du constituant | [J/mol] |
| S_i | L'entropie du constituant | [J/mol. K] |
| A | Les réactants | |

| | | |
|-----------------|---|---|
| B | Les réactants | |
| C | Le produit de la réaction | |
| ΔG^o | La variation de l'énergie libre de Gibbs à pression standard | [J] |
| R | Constante des gaz parfaits | [J/mol. K] |
| a | L'activité | |
| E^o | La tension idéale à pression standard | [V] |
| P_f | La pression de travail | [atm] |
| $q_{H_2}^{in}$ | Le débit d'hydrogène qui entrer dans le compartiment anodique | [Kmol/s] |
| $q_{O_2}^{in}$ | Le débit d'oxygène qui entrer dans le compartiment cathodique | [Kmol/s] |
| $q_{H_2}^r$ | Le débit d'hydrogène consommé ce qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et de l'électricité | [Kmol/s] |
| $q_{H_2}^{out}$ | Le débit d'hydrogène qui sort de la pile | [Kmol/s] |
| q_{H_2} | Le débit molaire de l'hydrogène | [mol/s] |
| K_r | Constante | [Kmol]/ [s.A] |
| P_{H_2} | La pression à l'intérieur de l'électrode | [atm] |
| M | Le mélange gazeux de masse molaire moyenne | [Kg/Kmol] |
| K d'orifice | La constante de la valve qui dépend en principal de la surface | $\left[\frac{\sqrt{Kmol.Kg}}{atm.s} \right]$ |
| P_u | La pression à l'intérieur du canal | [atm] |
| V_{act} | La perte d'activation | |
| I_{FC} | La densité de courant délivré par la pile à combustible | [A/cm ²] |

| | | |
|------------|--|------------|
| i_0 | La densité de courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode électrolyte | $[A/cm^2]$ |
| i_n | La densité de courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte | $[A/cm^2]$ |
| A | La pente de la droite de Tafel | |
| V_{ohm} | Perte ohmique | |
| R_m | La résistance totale de la pile à combustible | $[\Omega]$ |
| V_{conc} | La perte de concentration | |
| V_s | La tension de sortie d'un stack | $[V]$ |
| N_{cell} | Nombre des cellules dans le stack | |
| P_a | Pression globale du gaz à l'anode | $[atm]$ |
| P_c | Pression globale du gaz à la cathode | $[atm]$ |
| V_{an} | Le volume de l'anode | |
| V_{cath} | Le volume de la cathode | |

Symbole grec

| | |
|----------|-------------------------------|
| α | Coefficients stœchiométriques |
| β | Coefficients stœchiométriques |
| γ | Coefficients stœchiométrique |

Indices

| | |
|--------|--------------------|
| H_2 | Dihydrogène |
| O_2 | Dioxygène |
| H_2O | Dihydrogène oxyde |
| CO_2 | Dioxyde de carbone |

| | |
|-------------|-------------------------|
| e^- | Électron |
| Ion | Ionic |
| KOH | Hydroxyde de potassium |
| Li_2CO_3 | Carbonate de lithium |
| KCO_3 | Carbonate de potassium |
| $LiAlO_2$ | Lithium aluminium oxide |
| ZrO_2 | Dioxyde de zirconium |
| Y_2O_3 | Oxyde de yttrium |
| OH^- | Hydroxyde |
| H^+ | Hydrogène |
| C_3O^{2-} | Suboxyde de carbone |
| O^{2-} | Oxygène |
| CH_4 | Méthanol |
| SO_3H^+ | Acide sulfurique |

Abréviations

| | |
|-------|---|
| Redox | Réduction- Oxydation |
| PAC | Pile à combustible |
| PEMFC | Proton exchange membrane fuel cell. (Pile à membrane échangeuse de protons) |
| AFC | Alcaline fuel cell |
| DMFC | Direct méthanol fuel cell |
| PAFC | Phosphorique acid fuel cell |
| MCFC | Molten carbonate fuel cell |

| | |
|------|---|
| SOFC | Solid oxyde fuel cell |
| EME | Electrode-Membrane-Electrode |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| PNIR | Pôle national de recherche a implantation régionale |
| AME | Assemblage Membrane Electrode |
| MPCP | Membrane polymère conductrice de protons |



Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

Aujourd'hui, les ressources énergétiques telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont de plus en plus consommées. Le problème de l'énergie s'étend désormais à deux domaines. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles et l'autre aux problèmes de pollution tels que le réchauffement climatique. Face à la diminution des ressources énergétiques et à l'augmentation de la pollution énergétique, il est impératif de réduire la pollution mondiale et de rechercher des énergies alternatives ayant les mêmes propriétés que les hydrocarbures. L'hydrogène est une solution intéressante en tant que source d'énergie durable et renouvelable. L'hydrogène n'existant pas dans la nature, il peut être synthétisé à partir d'énergies renouvelables. Il peut être stocké dans différentes conditions. Il est également brillant et propre. Cependant, il ne peut pas être utilisé directement et l'énergie chimique doit être convertie en énergie électrique. Cette énergie est générée dans une pile à combustible. La pile à combustible est un générateur d'énergie électrique à partir de l'énergie chimique; il utilise la réaction électrochimique d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité. Depuis une centaine d'années, les chercheurs étudient les tas inflammables. Les avantages offerts par la technologie des tas d'hydrogène, tels que l'efficacité, la protection de l'environnement et la construction modulaire, ont suscité un intérêt constant pour leur développement. William Robert Grove a inventé le premier tas combustible en 1839.

Problématique

Les piles à combustible de type PEMFC sont des technologies prometteuses pour la production d'énergie propre et efficace. Cependant, leur efficacité énergétique, leur durabilité, leur stabilité et leur performance à haute température sont des enjeux majeurs qui doivent être adressés pour leur développement à grande échelle. D'autre part, L'amélioration de la stabilité et des performances des PEMFC à haute température peut être obtenue en identifiant et en utilisant les matériaux et les paramètres de fonctionnement appropriés. Ces deux approches peuvent contribuer de manière significative à la résolution des défis des PEMFC et à leur utilisation pratique dans des applications telles que les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie.

Objectif du mémoire

L'objectif du mémoire est sur les piles à combustible de type PEMFC peut avoir plusieurs objectifs en lien avec les problématiques présentées précédemment. Les objectifs peuvent inclure la synthèse et la caractérisation de différents matériaux de membranes et d'électrodes pour les PEMFC, l'étude de leur impact sur les performances électrochimiques et la durabilité des PEMFC, l'optimisation de la composition de la membrane et des électrodes pour maximiser l'efficacité énergétique et la durabilité des PEMFC, ainsi que la validation d'étude théorique en réalisant des tests de performance sur des piles à combustible complètes.

Structure du mémoire

La présente mémoire est organisée d'une introduction générale qui présente le phénomène pile à combustible, problématique et l'objectif du mémoire. Le premier chapitre présente une généralité sur les piles à combustible afin de préciser les notions structurelles du principal thème d'étude, à savoir un bref historique sur la découverte et l'évolution des piles à combustible, leur structure générale, leur principe de fonctionnement, les types et les différents domaines d'application.

Le deuxième chapitre focalise sur l'étude de pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC, nous avons évoqué l'étude complète sur la pile à

combustible de type PEM et en commençant par une étude technique complète, les raisons de choix pour ce type, Principe de fonctionnement et le développement du modèle dynamique d'un stack PEMFC.

Dans le dernier chapitre (Troisième chapitre), il contient la simulation de la pile à combustible PEM avec le programme MATLAB Simulink et aussi les résultats obtenus grâce à cette simulation. Nous terminons par une conclusion générale résumant le fruit de ce travail et les résultats de cette recherche.



CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ SUR LES PILES À COMBUSTIBLE



I.1 Introduction

La production d'électricité est avant tout un secteur industriel dont l'objectif est d'offrir à tous les consommateurs la possibilité d'un approvisionnement énergétique adapté à leurs besoins.

Les dispositifs appelés piles combustibles sont utilisés pour transformer directement l'énergie de réaction chimique libérée en énergie électrique.

Nous présentons dans ce chapitre les piles à combustible et leur fonctionnement (définition, principe de fonctionnement, les réactions chimiques...). Le principe d'une pile combustible est la création d'électricité, de chaleur et d'eau par la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène. Il existe aujourd'hui trois grandes industries dans lesquelles la PAC a été développée : portable, transport et le stationnaire. C'est dans ce dernier secteur que le potentiel de développement des PAC est le plus intéressant, car elles sont susceptibles d'avoir un impact sur un large éventail de publics dans les années à venir, des particuliers aux distributeurs d'énergie en passant par les entreprises.

Il existe plusieurs types de pile à combustibles, qui se distinguent par leur électrolyte. C'est en effet cet électrolyte qui détermine la température de fonctionnement de la pile à combustible et l'usage auquel il est destiné. Parmi les types de PAC en a fait une étude sur le PEMFC (protons exchange membrane fuel cell, pile à membrane échangeuse de protons).

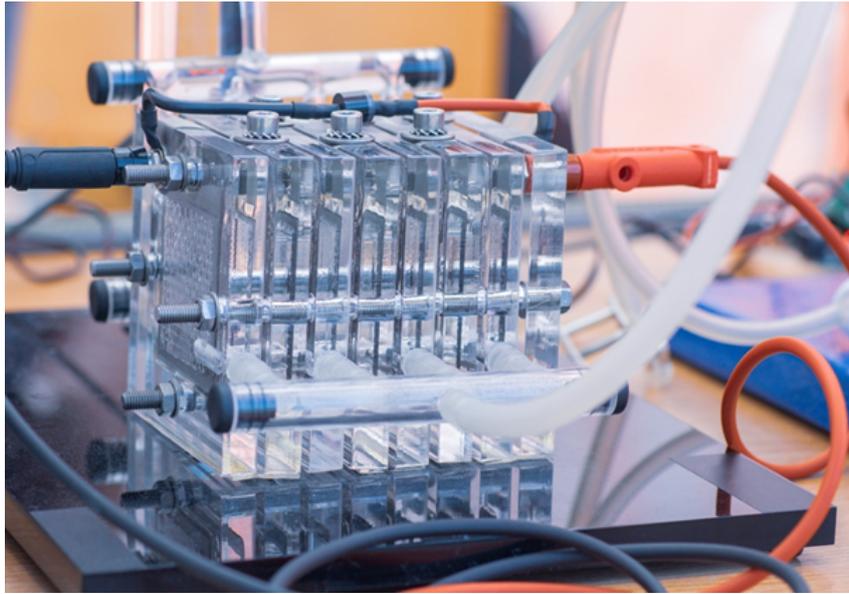


Figure I.1 – Une pile à combustible en laboratoires .[1]

I.2 Historique

Avant d'aborder cette technologie en profondeur, il est nécessaire de comprendre qu'en raison de leur nature électrochimique, les piles à combustible possèdent des caractéristiques à la fois chimiques et électriques.

En conséquence, leur développement est inextricablement lié à celui de l'électrochimie en tant que branche distincte de la chimie physique. Au début du 19e siècle, il a été reconnu qu'une "pile électrochimique" (aujourd'hui communément appelée "batterie") pouvait être fabriquée en plaçant deux métaux dissemblables dans une solution saline aqueuse.

Cette découverte a été faite par Alessandro Volta, professeur de physique expérimentale à l'université de Pavie, qui a construit une pile composée de disques alternés de cuivre (ou d'argent ou de laiton) et de zinc (ou d'étain) qui étaient séparés par des disques de carton (ou "toute autre matière spongieuse") trempés dans de la saumure. Lorsque le haut et le bas de la pile étaient reliés par un fil, l'ensemble délivrait, pour la première fois dans l'histoire, un flux d'électricité plus ou moins régulier.

Volta introduit les termes de "courant électrique" et de "force électromotrice", cette dernière désignant le phénomène physique qui fait circuler le courant. En temps

voulu, il transmet ses découvertes dans une lettre datée du 20 mars 1800 à Joseph Banks, alors président de la Royal Society. Connue sous le nom de "pile de Volta (ou Voltaïque)", il s'agit de la première source d'énergie "primaire" (ou non rechargeable), par opposition à une source d'énergie "secondaire" (ou rechargeable). Sir Humphry Davy, qui travaillait à la Royal Institution de Londres, a rapidement compris que la pile de Volta produisait de l'électricité par le biais de réactions chimiques aux interfaces métal-solution : l'hydrogène se dégage sur le disque de cuivre "positif" et le zinc se consume sur le disque "négatif". [2]

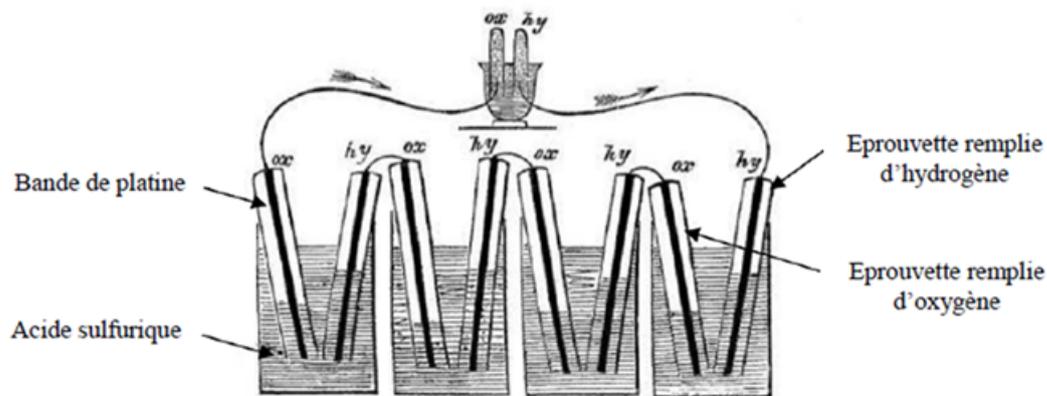


Figure I.2 – Expérience de Sir William Grove .[3]

I.3 Définition

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique.

Le combustible utilisé dans la plupart des piles à combustible est l'hydrogène.

Dans les piles à hydrogène, la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, est réalisée par une réaction chimique de type redox. L'hydrogène se combine avec l'oxygène pour former de l'eau selon la relation globale suivante :



Le principe de base de la technologie de la pile à combustible repose sur la

séparation de la demi réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène. Pour cela, la cellule de base d'une pile à combustible est constituée de deux électrodes (anode, cathode) séparées par un électrolyte.

Selon le type d'électrolyte acide ou basique (alcalin), la réaction chimique conduisant à la production d'électricité et de chaleur diffère.

Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) qui se déplacent de l'anode à la cathode (figure 1.3). L'eau est produite à la cathode. [4]

Par contre, dans un électrolyte basique (alcalin), ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode à l'anode (figure 1.4). L'eau est produite à l'anode, mais de l'eau est aussi nécessaire à la cathode pour créer les ions. [4]

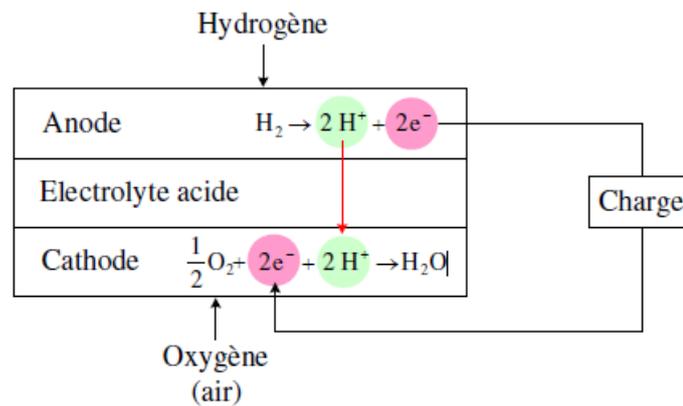


Figure I.3 – Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide .[4]

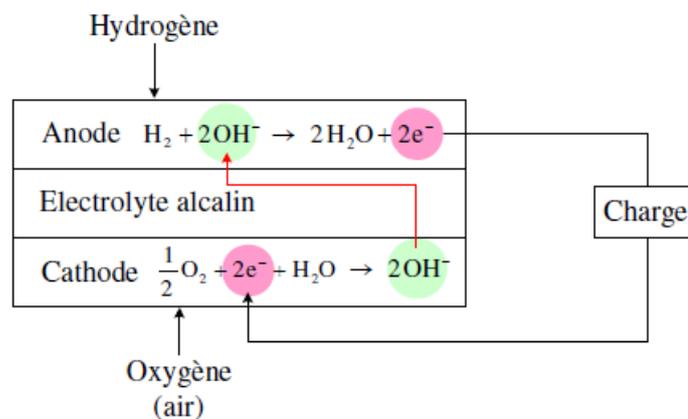


Figure I.4 – Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique .[4]

I.4 Principe de fonctionnement

La cellule de combustibles est constituée d'une chambre à combustible et d'oxydante séparé par un électrolyte. Une électrode est placée à chaque cote de celui-ci, les deux électrodes étant reliées à un circuit électriquement conducteur. Le combustible est oxydé à l'anode, libérant des électrons qui sont entrainés par les circuit externe à la cathode, ou l'oxygène est réduit. Soit des cations résultant d'oxygène ou des anions de combustible sont transportés à travers l'électrolyte de l'autre cote, la fermeture du circuit de transport de charges et de libération des produits de réaction électrochimique. [5]

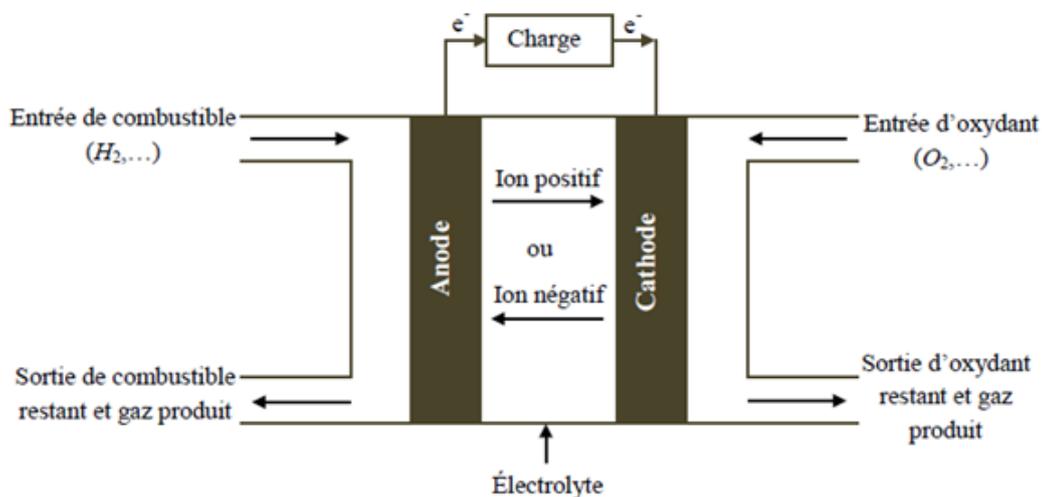


Figure I.5 – Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible .[3]

I.5 Composition d'une pile à combustible

L'architecture du premier prototype de pile est analogue à celle utilisée dans la conception des piles commerciales. Elle se compose de deux plaques bipolaires rectangulaires fabriquées en graphite et qui permettent la collecte du courant sur l'ensemble de la zone active. Des canaux (1 mm sur 1 mm) ont été usinés sur ces plaques pour offrir une meilleure répartition des gaz (Fig.I.6). Cette architecture permet de conserver les diffuseurs poreux en carbone qui permettent de maintenir une densité de courant uniforme sur l'ensemble du système. Il n'est pas possible de traiter la membrane afin d'éliminer ces éléments par complexation, car nous achetons directement l'assemblage membrane électrode, et il ne nous est pas techniquement

possible de réaliser cet assemblage. L'étanchéité du système est assurée par un joint en silicone entourant chaque cote de la surface active. La surface active totale de la pile est d'environ 6 cm^2 (rectangle de 3 cm par 2 cm). Le dispositif est présente sur la Fig. I.6 [6,7].

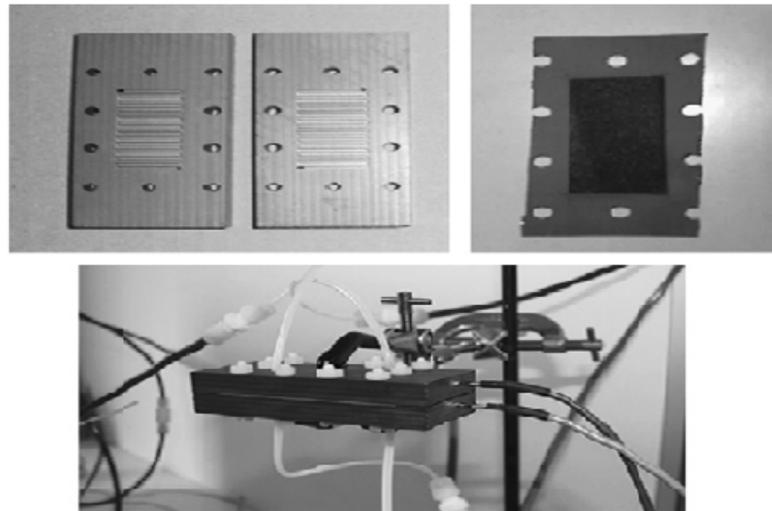


Figure I.6 – Premier prototype de pile à combustible réalisée au laboratoire. A gauche : les plaques bipolaires usinées en graphite. A droite : l'assemblage membranes électrodes (partie sombre) et le joint en silicone (partie claire). En bas : le prototype assemblé et en fonctionnement avec les entrées de gaz (tuyaux blancs) de chaque côté .[6,7]

I.6 Types des piles à combustibles

Il existe 6 types de PAC :

I.6.1 Trois à électrolytes acides

| Constants | Type de pile | PEMFC | DMFC | PAFC |
|-------------------------|--------------|------------------------|-----------|------------------------|
| Electrolyte | | MPCP | MPCP | Acide phosphorique |
| Ions dans l'électrolyte | | H^+ | H^+ | H^+ |
| Niveau de température | | 60-100 °C | 60-100 °C | 180-220 °C |
| Combustible | | H_2 (Pur ou reformé) | Méthanol | H_2 (Pur ou reformé) |
| Oxydants | | Air | Air | Air |

Table I.1 – Les types de pile à combustible .[8]

- Les PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température. (20-100°C). Celle-ci transmet sélectivement vers la cathode les ions H^+ formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode. [8]

- Les DMFC (Direct méthanol fuel cell). Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol (CH_3OH). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau son oxydation catalytique produit des ions H^+ et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les H^+ vers la cathode. [8]

- Les PAFC (Phosphorique acid fuel cell) utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C. [8]

I.6.2 Trois à électrolytes basiques

- Les AFC à potasse liquide (Alcaline fuel cell) utilisent l'ion OH libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode. [8]

- Les MCFC (Molten carbonate fuel cell) utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions CO_3^{2-} . [8]

- Les SOFC (Solid oxyde fuel cell) exploitent un électrolyte solide (zircone dopée aux terres rares) pour produire des ions O^{2-} . [8]

| Constants | Type de pile | AFC | MCFC | SOFC |
|-------------------------|--------------|--------------|--|------------------------|
| Electrolyte | | Solution KOH | Li_2CO_3 et KCO_3 , fondu dans $LiAlO_2$ | ZrO_2 et Y_2O_3 |
| Ions dans l'électrolyte | | OH^- | C_3O^{2-} | O^{2-} |
| Niveau de température | | 60-80 °C | 600-660 °C | 700-1000 °C |
| Combustible | | H_2 | H_2 (Pur ou reformé) | H_2 (Pur ou reformé) |
| Oxydants | | O_2 (Pur) | Air | Air |

Table I.2 – Les types de pile à combustible .[8]

I.7 Les réactions chimiques

La réaction globale d'une PAC de type PEMFC peut s'écrire de la manière suivante :

- A l'anode (pole négatif), l'oxydation de l'hydrogène produit des électrons et des protons qui vont migrer à travers la membrane :



- A la cathode (pole positif), des électrons sont prélevés du circuit électrique pour produire avec les protons H^+ la réduction de l'oxygène :



- D'où le bilan de la réaction (dont la réversibilité dépend des conditions thermodynamiques) :



Cette réaction est exothermique : à 25°C, l'enthalpie libre de la réaction est de -237 ou -229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse. Ceci correspond à des tensions théoriques de 1,23 et 1,18 V. Cette tension dépend aussi de la température. [9]

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène

(à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine : présente de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, n'est pas perméable aux gaz et maintient une teneur en eau élevée à haute température), en des points appelés « points triples », la figure I.7 illustre le principe de la réaction catalytique. [9]

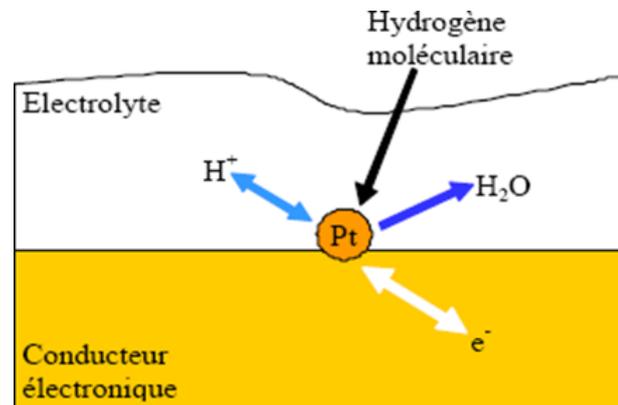


Figure I.7 – Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique. [9]

En ces points, nous trouvons, autour de la particule de catalyseur :

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H^+ .
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e^- .
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de la réaction. Nous pouvons ainsi apprécier la difficulté de réalisation de cette interface qui représente un point clé de la réalisation de l'ensemble Electrode-Membrane-Electrode, appelé souvent EME.

I.8 Les applications de la pile à combustible

Les piles à combustibles sont utilisées dans une large gamme de domaines qui seront présentés ci-dessous :



Figure I.8 – Domaines d'application des piles à combustible. [10]

I.8.1 Les applications militaires et spatiales

Les spécificités des piles peuvent être utilisées pour ces secteurs de pointe que sont le militaire et le spatial. La NASA a utilisé des piles à combustible de type AFC pour alimenter en électricité les circuits de navettes spatiales notamment au cours du programme GEMINI et des missions APPOLO. Il est maintenant question qu'ils choisissent les PEMFC dans des applications futures. L'armée allemande a aussi développé un sous-marin fonctionnant grâce à des PAC. [8]

I.8.2 Applications stationnaires

L'avantage des piles à combustible dans ce domaine est la production simultanée de l'électricité et de la chaleur, les types SOFC et MCFC sont mieux adaptées à la cogénération d'électricité et de chaleur. La pile à combustible commence à intéresser de nombreux industriels de ce secteur, en particulier en France, Japon, États-Unis, etc. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications :

- La production collective (200 kW à quelques MW)
- La production domestique ou individuelle (2 à 7 kW). [12]



Figure I.9 – Pile à combustible CELLIA fabriqué par MTU .[3]

I.8.3 Les applications transport

Parmi les applications des piles à combustible dans le domaine de l'automobile, on peut citer la PEMFC pour la propulsion du véhicule (20 à 50 kW) et les piles alcalines pour l'alimentation en électricité des appareils de bord (climatisation, appareils électroniques). [11]



Figure I.10 – Le premier bus d'Europe à pile à combustible entre en service régulier à Madrid .[3]

I.8.4 Les applications portables

Pour des applications portables, les piles à combustible sont en concurrence avec les batteries. On espère gagner en temps d'autonomie et pouvoir recharger plus vite des réserves d'énergie épuisées.

Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu

sensibles aux conditions extérieures, seulement deux types de piles sont susceptibles d'avoir des applications portables, les PEMFC et DMFC, qui sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement variable entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de gestion thermique et fonctionnent à température ambiante. [13]



a. Pile à combustible au méthanol

b. Chargeur de téléphone à pile à combustible (Toshiba)

Figure I.11 – Exemples des piles à combustible dans les applications portables. [3]

I.9 Pourquoi l'hydrogène comme combustible

Le dihydrogène est dans les conditions usuelles un gaz incolore et inodore. Le paramètre essentiel pour l'étude de ses propriétés physiques est la très faible masse de la molécule H_2 , la plus petite connue. Il en résulte une faible densité pour H_2 (solide, liquide ou gaz) et une très grande vitesse de translation des molécules à l'état gazeux. Le dihydrogène possède une bonne conductibilité calorifique, une grande facilité de diffusion et d'effusion (l'effusion concerne le passage à travers un petit trou percé d'une paroi mince). L'état de gaz presque parfait de H_2 est en relation avec les températures de fusion et de liquéfaction basses. Il est utilisé et transporté depuis longtemps. [14]

C'est un combustible à pouvoir énergétique élevé, non polluant, non toxique et sa combustion ne produit que de l'eau (éventuellement un peu d'oxydes d'azote si la combustion a lieu avec de l'air à haute température). Son énergie massique, délivrée lors de sa combustion avec le dioxygène, est élevée (120 MJ.kg⁻¹), comparée à celle de l'essence (45 MJ.kg⁻¹) ou du méthane (50MJ.kg⁻¹). Les deux difficultés qui limitent l'utilisation du dihydrogène sont liées à son coût de fabrication à partir de l'eau (électrolyse, photolyse, ...) et à son stockage (sa légèreté implique une densité

énergétique volumique peu favorable au stockage sous forme gazeux). [14]

I.10 Obtention de l'hydrogène

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz (H_2) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H_2O). Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH_4), le charbon ou le pétrole. La plupart de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui vient des carburants fossiles. Une optique de raréfaction des carburants fossiles, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Puisque le gaz d'hydrogène n'existe pas naturellement sur terre, il faut le produire [15]. Pour produire de l'hydrogène, plusieurs possibilités sont étudiées, certaines sont déjà arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement, parmi ces possibilités on trouve :

- À partir de carburants fossiles .
- À partir de l'électrolyse de l'eau .
- À partir du nucléaire.



Figure I.12 – Le site pilote « HyBalance » d'Air Liquide à Hobro produit de l'hydrogène à partir de la technologie d'électrolyse, au Danemark.

I.11 Avantages d'une voiture à pile à combustible à hydrogène

Les avantages d'une voiture à pile à combustible à hydrogène sont multiples.

Elle assure une conduite sans contrainte et conserve tous les bienfaits de la conduite électrique : accélération instantanée, silence de roulement, absence de vibration, l'accès aux zones à faible émission de certains centres-villes. Complémentaire à l'offre 100% électrique, la technologie à hydrogène présente l'avantage de combiner des temps de recharge en énergie réduits et une empreinte carbone neutre à l'échappement. De longs trajets peuvent ainsi être effectués à l'aide de pleins rapides d'hydrogène, en 3 à 5 minutes, et se présente comme une alternative attractive à la motorisation électrique pure. [16]



Figure I.13 – La recharge en hydrogène s'effectue grâce à des pompes capables d'injecter très rapidement l'hydrogène .[16]

I.12 Les avantages et les inconvénients d'une pile à combustible

I.12.1 Avantages

Les avantages, sont variés, les plus communs pour les différents types sont suivants : [17]

- Efficacité : les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée. Un autre indice pour cela est que les petits systèmes peuvent être tout aussi efficaces que les grands. Ceci est très important dans le cas des petits systèmes locaux de production d'énergie nécessaire à la production combinée de chaleur et systèmes d'alimentation.
- Simplicité : Les éléments d'une pile à combustible sont très simples, avec peu ou pas de pièces mobiles. Cela peut conduire à une grande fiabilité et à long

terme des systèmes durables.

- Faibles émissions : Le sous-produit de la réaction principale des piles à combustible, lorsque l'hydrogène est le combustible, est l'eau pure, ce qui signifie qu'une pile à combustible peut être essentiellement « zéro émission ». Ceci est leur principal avantage lorsqu'elles sont utilisées dans les véhicules, puisqu'il y a une exigence de réduction de véhicule émissions, et même de les éliminer dans les villes. Toutefois, il convient de noter que, Actuellement, les émissions de CO₂ sont presque toujours impliquées dans la production d'hydrogène ce qui est nécessaire en tant que combustible.
- Silence : Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement. Ceci est très important tant dans les applications portables que dans les productions combinées locales d'énergie et de chaleur.

I.12.2 Inconvénients

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement : [17]

- Coût trop élevé de production et de maintenance.
- Durée de vie trop faible.
- Gestion thermique délicate.
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène.

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que les applications des piles à combustible resteront encore pendant quelques années peu fréquentes car de nombreux problèmes restent à maîtriser, les plus importants étant la durée de vie, l'insensibilité aux conditions environnementales et le coût. Les systèmes pile à combustible devront également devenir moins complexes pour permettre une gestion économique de l'énergie.

Le fait que les piles combustibles existent depuis un certain temps et sont utilisées dans trois industries majeures - transport, production et portable - mais qu'elles n'aient pas encore atteint le stade de la commercialisation est dû au coût élevé de leur production.

Par exemple, la construction d'une pile combustible de type PEM utilise des matériaux toxiques comme la platine, le graphite et la membrane ionisée.

Les piles à combustible, plus généralement, la « filière hydrogène », est un moyen intéressant de valoriser l'énergie chimique contenue dans divers combustibles, avec un très bon rendement, sous la forme « noble » d'énergie électrique.

Enfin, si les piles à combustible devenaient un jour un produit de série pour les constructeurs automobiles (avec des puissances embarquées de quelques dizaines de kW) à des prix compatibles avec ce marché, la mise à disposition des particuliers de générateurs individuels pourrait concurrencer grandement la connexion aux grands réseaux nationaux.



CHAPITRE II

MODÉLISATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC



II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une modélisation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (une étude électrochimique des lois de la thermodynamique sera réalisée afin de comprendre l'origine des équations) et un système de traction électrique d'une pile à combustible PEMFC.

Dans une pile PEM, le combustible brûlé est l'hydrogène et le comburant l'oxygène, en général prélevé de l'air ambiant, le produit de la réaction chimique étant l'eau. L'hydrogène utilisé est soit, stocké dans des bouteilles de gaz comprimé ou dans des hydrures métalliques, soit produit par reformage à l'eau de différents combustibles : gaz naturel (CH_4), charbon, méthanol, propane. ...

II.2 Etude technique de pile à combustible PEMFC

La réaction principale dans la PEMFC est celle de l'oxygène avec l'hydrogène produisant avec l'électricité de la chaleur et de l'eau. Nous utilisons l'hydrogène comme combustible et l'oxygène comme oxydant. Les molécules d'hydrogènes sont introduites à l'anode, ses protons traversent la membrane (électrolyte) jusqu'à la cathode, alors que les électrons e^- sont conduits à travers le circuit électrique. Dans la cathode : l'oxygène, les protons et les électrons se combinent pour former de l'eau. Sa schématique de base est donnée dans la Figure II. 1

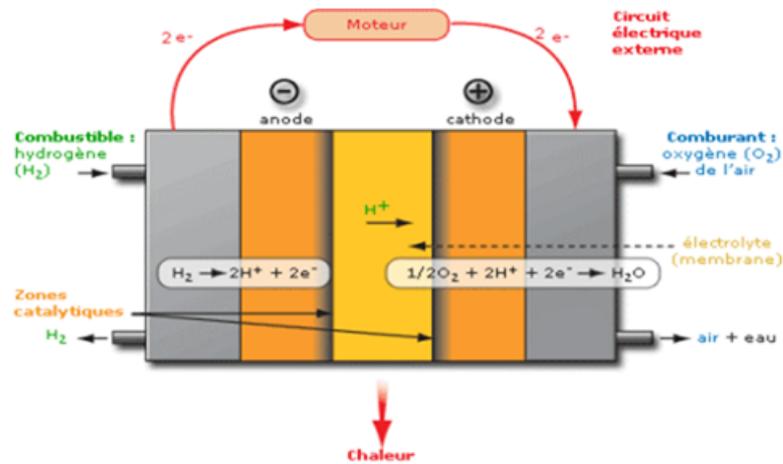


Figure II.1 – Schéma de base pile à combustible électrolyte polymère solide.

II.3 Raisons du choix du pile à combustible de type PEM

La PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est un choix populaire dans certaines applications en raison de plusieurs avantages. L'un des avantages les plus significatifs est son efficacité énergétique élevée, ce qui signifie qu'elle peut convertir une grande partie de l'énergie chimique du carburant en électricité, avec peu de pertes d'énergie sous forme de chaleur. De plus, la PEMFC produit de l'électricité en utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène, ce qui ne génère pas d'émissions polluantes directes. Elle fonctionne également silencieusement et sans vibration, ce qui la rend idéale pour les applications nécessitant un fonctionnement silencieux. En outre, la PEMFC est facile à utiliser et à entretenir, et peut être démarrée rapidement. Elle offre également une réponse rapide, ce qui signifie qu'elle peut produire de l'électricité dès que le carburant et l'oxygène sont introduits dans la pile. Enfin, la PEMFC est polyvalente et peut être utilisée dans une variété d'applications, notamment les véhicules électriques, les systèmes de secours d'énergie, les systèmes de cogénération et les applications stationnaires. Tous ces avantages font de la PEMFC un choix attrayant pour les applications énergétiques durables.

II.4 Principe de fonctionnement d'une PEMFC

La pile à combustible fonctionne sur le mécanisme de l'oxydoréduction. Elle comporte deux électrodes : une anode oxydante et une cathode réductrice, séparées d'un électrolyte central par des catalyseurs. Liquide ou solide, le matériau conducteur

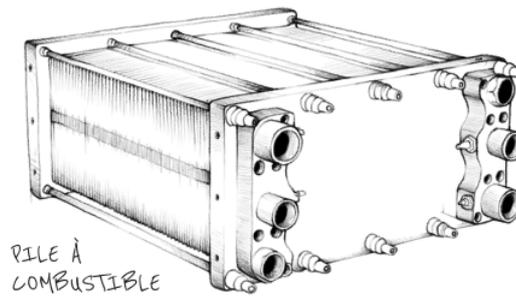
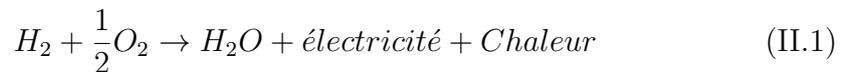


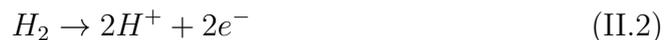
Figure II.2 – Modèle d'une pile à combustible .[18]

de l'électrolyte permet de maîtriser le passage des électrons.

Les piles PEMFC fonctionnent selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est utilisé comme carburant et l'oxygène (ou l'air) sert de comburant. Le principe de fonctionnement des piles consiste à récupérer l'énergie de combustion de l'hydrogène pour la convertir en énergie électrique. La réaction globale se produisant dans la pile peut s'écrire : [5]



Afin de récupérer l'énergie dégagée par la réaction, il est nécessaire de dissocier la réaction totale en deux demi-réactions, séparées spatialement par un électrolyte. L'électrolyte d'une pile PEMFC est une membrane polymère imperméable aux gaz, isolant les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode. Cet électrolyte permet le passage de protons sans être conducteur électronique, donc sans passage d'électrons. [5] Les électrodes (anode et cathode) sont les lieux des demi-réactions électrochimiques suivantes :



Ces demi-réactions sont catalysées, à l'aide de platine en général, pour augmenter les cinétiques de réactions, relativement lentes aux faibles températures de fonctionnement de la pile. A l'anode, l'hydrogène se dissocie en protons et en électrons.

Les protons traversent alors l'électrolyte pour se recombinaer à la cathode avec les molécules d'oxygène, et ainsi former de l'eau. Les électrons circulent dans un circuit externe pour boucler le circuit électrique. [5]

Le schéma de fonctionnement est donné sur la Figure II. 3

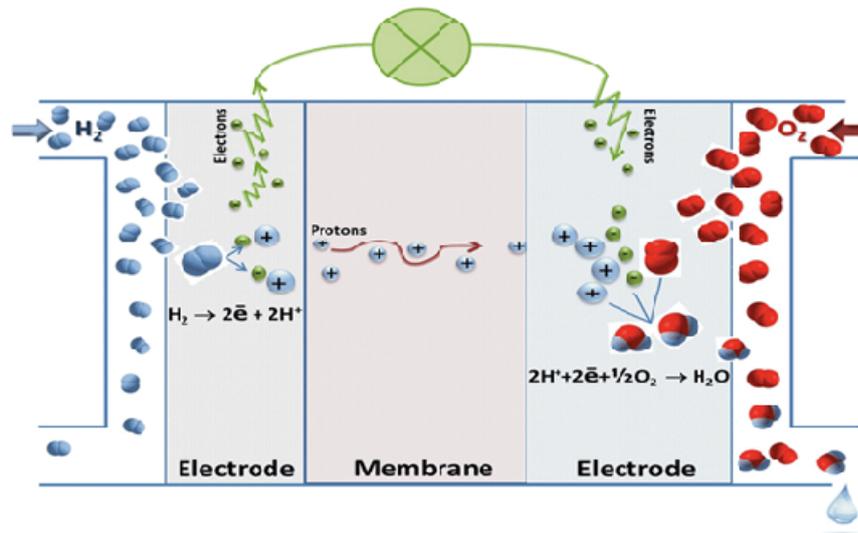


Figure II.3 – Schéma représente le fonctionnement d'une PEMFC .[19]

II.5 Les composants de la pile à combustible

Pile à combustible PEMFC est constitué d'un collecteur de courant (compris les canaux de gaz), la couche de diffusion de gaz, et la couche de catalyseur sur côtés anode et cathode ainsi qu'une membrane polymère conductrice d'ions. Réactifs pénètrent dans la cellule par des canaux de gaz, qui sont noyées dans les collecteurs de courant (plaque bipolaire). Les couches de diffusion de gaz sont utilisées pour distribuer uniformément les réactifs sur la surface des couches de catalyseur, ainsi que pour fournir une connexion électrique entre les couches de catalyseur et les collecteurs de courant. [20]

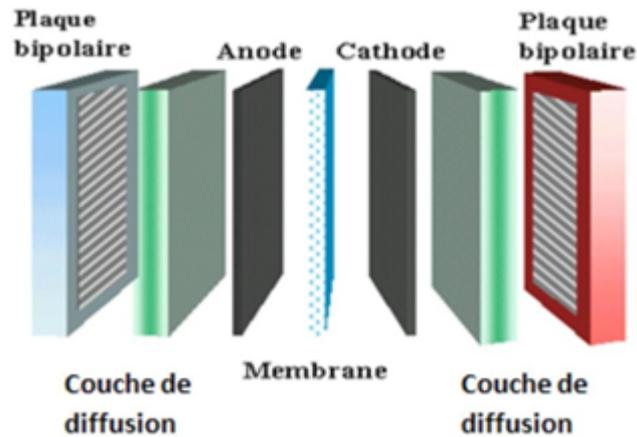


Figure II.4 – Les composants d'une PEMFC .[20]

II.6 Assemblage Membrane Electrode (AME)

II.6.1 Electrolyte

Un électrolyte est une substance qui permet la dissociation d'un élément en ions chargés négativement et positivement. Le développement de ce composant, membrane conductrice de protons, a été l'élément essentiel des piles PEMFC à partir des années quatre-vingt. Plusieurs propriétés sont demandées à ces polymères :

- Une conductivité protonique plus élevée que possible, afin de limiter les pertes associées à la chute de tension due à la résistance interne.
- Une étanchéité suffisante pour empêcher le mélange des réactifs. Les membranes répondant aujourd'hui à ces spécificités sont composées de macromolécules perfluorées contenant des fonctions acides SO_3H^+ dont la dissociation en présence d'eau permet la mobilité des protons. Leur température maximale d'utilisation est aux environs de $85^\circ C$. [20]

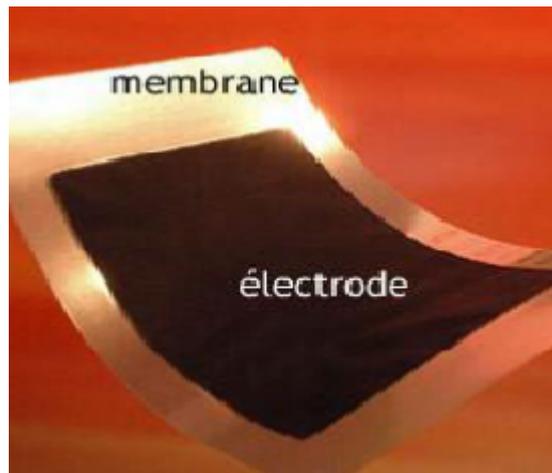


Figure II.5 – La membrane de pile à combustible .[10]

II.6.2 Les électrodes

Les électrodes doivent pouvoir assurer le transfert des protons depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites de réduction de l'oxygène via la membrane. De même, les électrons produits par l'anode doivent pouvoir être évacués puis redistribués à la cathode par le circuit extérieur. Ainsi, les électrodes doivent assurer une bonne conductivité ionique et électronique. Pour cela, elles sont constituées d'un mélange intime de carbone (Conducteur électronique), d'électrolyte (conducteur protonique) et de platine (catalyseur). [21], [22]

- L'anode : On réalise l'oxydation de l'hydrogène, selon la réaction précédent (pour une pile acide)
- La cathode : On réalise la réduction de l'oxygène, selon la réaction précédent

II.6.3 Couche active (Catalyseur)

La zone active est le siège des deux demi-réactions d'oxydoréduction. C'est la zone de couplage des phénomènes électrique, chimique et de transfert de masse. La condition nécessaire aux réactions est la coexistence au même point, du gaz réactif, des protons et des électrons. La zone active est donc constituée d'un milieu polyphasique, des pores pour permettre l'alimentation en gaz, de l'électrolyte pour assurer la continuité ionique, du carbone pour la conductivité électronique et du platine pour catalyser la réaction. [20]

II.6.4 Couche de diffusion

C'est une couche poreuse entre la couche de catalyseur et la plaque bipolaire, elle a plusieurs fonctions :

- Fournit un chemin pour les réactifs des canaux d'écoulement à la couche de catalyseur.
- Fournit un chemin pour l'eau produite de la couche de catalyseur aux canaux d'écoulement.
- Relie électriquement la couche de catalyseur à la plaque bipolaire, permettant aux électrons d'accomplir le circuit électrique.
- Sert également à transporter la chaleur produite par les réactions électrochimiques dans la couche de catalyseur à la plaque bipolaire, qui a des moyens pour l'évacuer.
- Fournit un appui mécanique au cœur de la pile (les deux couches de catalyseur et la membrane), et empêche-le de fléchir dans les canaux d'écoulement.[20]

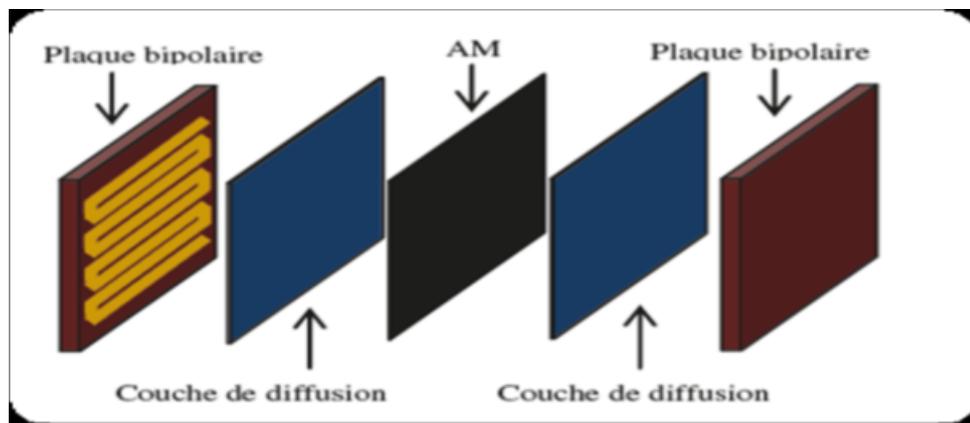


Figure II.6 – Le cœur de pile à combustible .[10]

II.6.5 Plaques bipolaires

La plaque bipolaire est une barrière étanche qui sépare les cellules d'un empilement, elle doit avoir une bonne conductivité électrique et thermique, inerte chimiquement dans ce milieu très acide et étanche. [20] Les plaques bipolaires ont plusieurs fonctions :

- Relient les cellules en série.

- Séparent les gaz des cellules adjacentes ; donc elles doivent être imperméables aux gaz.
- Les vitesses et les taux de cisaillement dépendent de x et de y ;
- Fournissent l'appui structural pour la pile ; donc elles doivent avoir une certaine Rigidité, et doivent être légères.
- Servent au refroidissement de la pile, donc elles doivent avoir une bonne conductivité thermique.
- Logent les canaux d'écoulement.

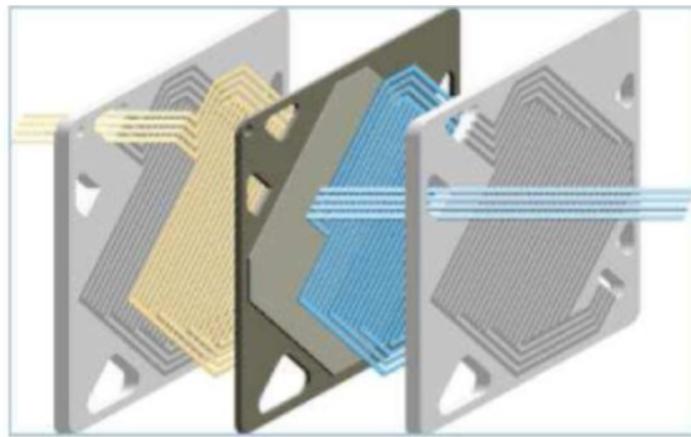


Figure II.7 – Plaque bipolaire .[10]

II.7 Assemblage des AME

L'assemblage des composants de la PAC donne lieu à une mono cellule de PAC qui contient donc une seule anode et une seule cathode. La tension opérationnelle d'une mono cellule est en générale inférieure à 1 V à courant nul. Quand on applique un courant, la tension de cellule est encore plus faible. [23]. Pour atteindre des valeurs de tension plus élevée, plusieurs cellules peuvent alors être connectées en série pour former ce qu'on appelle un « stack » dont le schéma est présenté sur la figure II.8. Le stack est donc un empilement de plusieurs cellules reliées électriquement en série et alimentées parallèlement en gaz [24]. Lorsque les cellules sont alimentées en parallèle, elles sont approvisionnées simultanément par la même entrée de gaz. Tandis que pour un montage en série, le gaz à la sortie de la première cellule est réinjecté à l'entrée de la seconde cellule et ainsi de suite jusqu'à la dernière cellule. Cette configuration permet une distribution de gaz homogène sur l'ensemble du

dispositif [25]. Par contre, cette disposition est utilisée pour le stack avec un nombre de cellules peu élevé afin d'éviter les chutes de pressions entre l'entrée et la sortie.

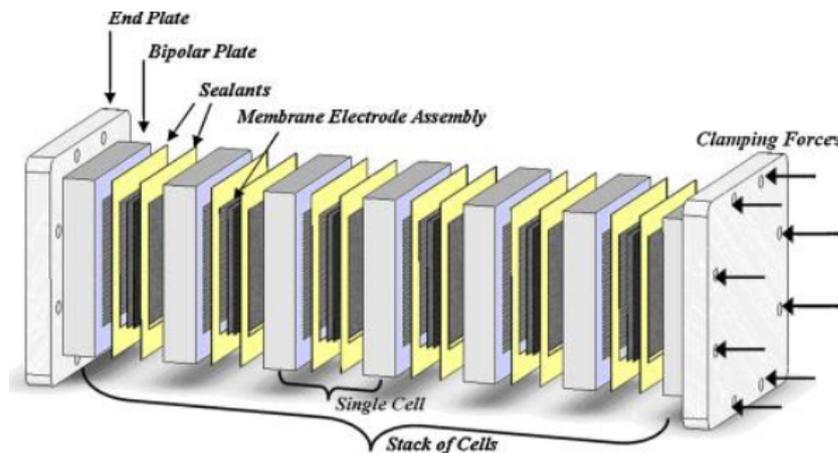


Figure II.8 – Assemblage en stack de mono-cellules de PEMFC .

II.8 Systèmes auxiliaires

Les systèmes auxiliaires (refroidissement, contrôle et régulation des flux de gaz et de la pression) assurent le bon fonctionnement de la pile à combustible. En effet, les variations de pression, d'humidité des gaz entrants, ou simplement de leurs débits ont une influence majeure sur les performances de la pile. Un système de recirculation de l'hydrogène non consommé du côté anodique peut être intéressant, pour des raisons de coût et de stockage de l'hydrogène (un des problèmes de la pile à combustible). Des humidificateurs sont souvent nécessaires pour humidifier les gaz en entrée, et diminuer en conséquence la résistance ohmique de la membrane. Enfin, dans la mesure où le monoxyde de carbone et le soufre sont des poisons pour les électrodes de la pile, un purificateur peut s'avérer nécessaire après reformage de l'hydrogène. [8]

Voilà donc à quoi les piles à combustibles ressemblent.

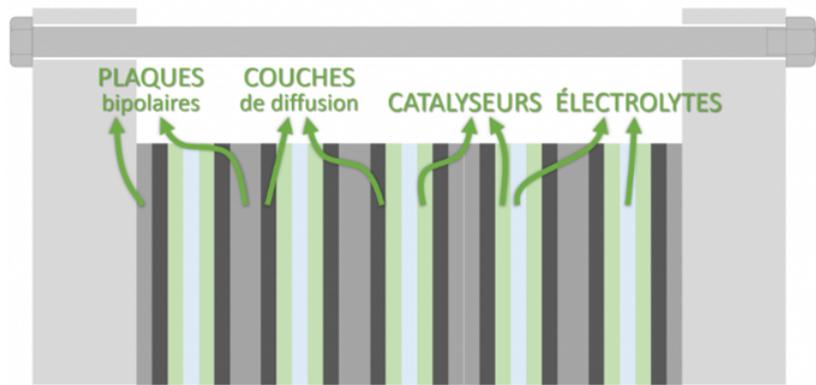


Figure II.9 – La pile à combustible [18].

II.9 La voiture électrique à pile à combustible est-elle l'avenir de l'automobile

La transition écologique favorise la voiture électrique, mais les performances techniques et environnementales de la génération actuelle sont compromises par ses batteries. D'ici à 2030, une technologie permettrait de concilier écologie, avantages de l'électrique et de la thermique : la pile à combustible. [26]

Les pertes énergétiques d'un moteur électrique sont quasi-nulles et permettent d'obtenir un rendement de 90 % (contre moins de 40 % pour un moteur thermique). Son couple maximal immédiat, son silence et l'absence d'émissions polluantes sont plébiscités. Le véhicule électrique n'aurait que des vertus si l'on occultait les contraintes techniques, économiques et écologiques imposées par son imposant pack de batteries. [26]

La nécessité de disposer d'infrastructures de recharge est aussi un inconvénient majeur. Le réseau électrique délivre une tension alternative quand les batteries fonctionnent en continu. Le processus de charge doit donc « redresser » la tension. Et selon que ce redresseur soit incorporé au véhicule ou bien à la borne, les pertes liées à l'échauffement par effet joule sont répercutées sur le propriétaire de l'un ou de l'autre. Au final, le rendement global chute pour s'établir à 50 %.[26]

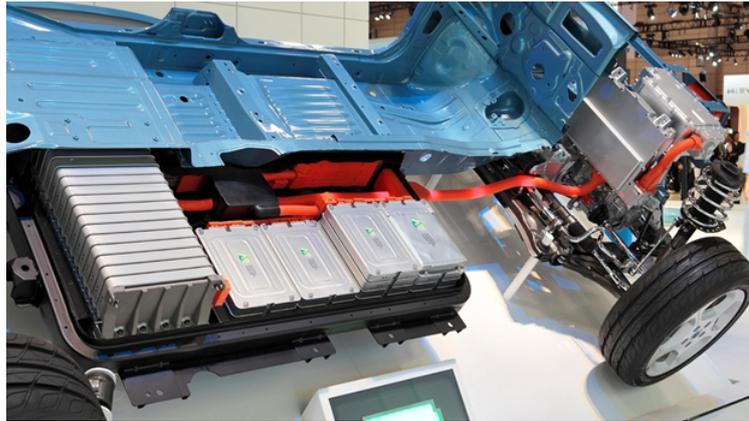


Figure II.10 – Vue demi-éclatée d'un pack de batteries sur une voiture électrique .[26]

II.10 20 ans pour rendre nos voitures actuelles obsolètes

situation logique au regard du réseau de stations-service encore inexistant et d'un prix de vente élevé comparable à une « Tesla » (environ 70 000 € en 2018). [26]

Cependant, tout cela devrait évoluer beaucoup plus favorablement d'ici 2030, avec d'une part la mise en place d'un réseau de distribution (bioéthanol, hydrogène) et d'autre part avec une baisse de prix notable liée à l'amélioration de l'offre de véhicules proposés aux clients. [26]

Ainsi, à l'horizon 2040, les PAC rendront obsolètes toutes les autres technologies de transport routier. Leurs améliorations successives réduiront les batteries embarquées à des dimensions minimales et à des usages très spécifiques. Seuls les modes de déplacement aux distances très courtes pourront encore éventuellement employer des packs de batteries traditionnelles de faible capacité. Pour tous les autres usages, la pile à combustible sera plus écologique et plus compétitive. [26]

L'ensemble du territoire sera alors équipé en stations autonomes de production de combustible « vert ». La tête dans les nuages de vapeur, les utilisateurs de véhicule électrique à pile à combustible y feront alors « le plein » pour 1000 kilomètres, en moins de 5 minutes. [26]

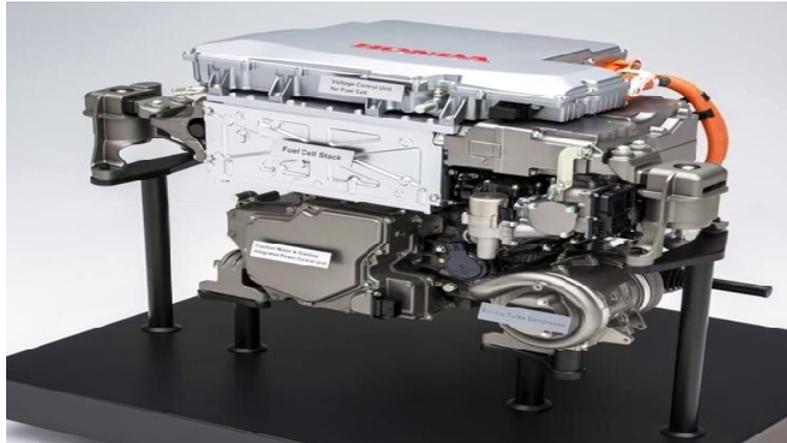


Figure II.11 – Pile à combustible "PEMFC" Honda .[26]

II.11 Développement du modèle dynamique d'un stack PEMFC

II.11.1 Performance idéale d'une cellule PEMFC

Dans une cellule PEM utilisant H_2 comme combustible, la réaction globale se déroule comme suit :



Cette réaction convertit l'énergie chimique contenue dans le gaz entrant dans la cellule en énergie électrique et thermique.

II.11.1.1 Énergie libre de Gibbs

$$W_{el} = \Delta G \quad (II.5)$$

Cette énergie et la tension idéale de la cellule sont liées par la relation :

$$\Delta G = -nFE \quad (II.6)$$

- n : Nombre d'électrons participants à la réaction, où $n = 2$ dans notre cas
- F : constante de Faraday, qui correspond à la charge d'une mole d'électrons :

$$F = |e^-| N = (1.602 \times 10^{-19}) (6.023 \times 10^{23}) \Leftrightarrow F = 96488 \text{ [C/mol]}$$

- N : Nombre d'Avogadro
- E : Tension idéale dite aussi tension réversible ($i = 0$)

Selon la deuxième loi de la thermodynamique, la distribution de l'énergie libre de Gibbs est donnée par :

$$G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- ΔH : La variation de l'enthalpie en [J/mol]
- ΔS : La variation de l'entropie en [J/mol. K]
- T : La température de fonctionnement de la pile en [K]

$$\Delta H = H_{H_2O} - H_{H_2} - \frac{1}{2}H_{O_2} \quad (\text{II.8})$$

- H_i : l'enthalpie du constituant (i) où $i = (H_2O, H_2 \text{ et } O_2)$

$$\Delta S = S_{H_2O} - S_{H_2} - \frac{1}{2}S_{O_2} \quad (\text{II.9})$$

- S_i : l'entropie du constituant (i) où $i = (H_2O, H_2, H_{O_2})$

II.11.1.2 Équation de Nernst

$$\alpha A + \beta B = \gamma C \quad (\text{II.10})$$

Avec :

A et B sont les réactants et C est le produit de la réaction , α, β et γ sont les coefficients stœchiométriques.

Selon la loi de Nernst, la variation de l'énergie libre de Gibbs est donnée par :

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left(\frac{a_A^\alpha a_B^\beta}{a_C^\gamma} \right) \quad (\text{II.11})$$

- ΔG^0 : La variation de l'énergie libre de Gibbs à pression standard ($1\text{bar} \approx 1\text{atm}$) qui dépend de la température
- R : Constante des gaz parfaits ($R=8.314$ [J/mol. K])
- T : La température de fonctionnement en [K]
- α : L'activité (sans unité)

À partir de l'équation (II.6) on peut écrire :

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (\text{II.12})$$

- E^0 : La tension idéale à pression standard $P_0 = 1$ qui varie en fonction de la température.

Substituant les équations (II.5) et (II.12) dans (II.11) on obtient :

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_A^\alpha a_B^\beta}{a_C^\gamma} \right) \quad (\text{II.13})$$

Dans ce cas, les réactifs sont des gaz considérés comme complets. Les activités sont : $a = \frac{p_{\text{partielle}}}{p_0}$.

Puisque c'est un rapport entre pressions, on prend l'unité de ces dernières en (*atm*), et on à $P_0 = 1$. Donc : $a_{H_2} = p_{H_2}, a_{O_2} = p_{O_2}$

p_{H_2} et p_{O_2} sont respectivement les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène à l'interface de la membrane. L'eau produite peut être gazeuse ou liquide. Cependant, les batteries PEM fonctionnent à des températures inférieures à 100 °C, considérons donc le cas d'un liquide avec une activité de l'eau égale à 1.

Les valeurs des coefficients stœchiométriques sont : $\alpha = 1, \beta = 1/2$ et $\gamma = 1$. L'équation (II.13) devient alors pour $n = 2$:

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (\text{II.14})$$

En désignant la pression de travail en (P_f), nous pouvons relier la pression partielle du gaz à cette pression comme suit :

$$p_{H_2} = \alpha P_f \quad p_{O_2} = \beta P_f \quad (\text{II.15})$$

Substituant ces deux dernières équations dans (II.14), et après simplification on obtient :

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln (\alpha \beta^{\frac{1}{2}}) + \frac{3RT}{4F} \ln (P_f) \quad (\text{II.16})$$

α et β sont les fractions molaires des gaz hydrogène et oxygène respectivement.

II.11.1.3 Les débits molaires

L'ensemble des débits molaires qu'on peut les définir sont :

- Le débit d'hydrogène qui entrer dans le compartiment anodique définie par $q_{H_2}^{in}$
- Le débit d'oxygène qui entrer dans le compartiment cathodique définie par $q_{O_2}^{in}$
- Le débit d'hydrogène consommé ce qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et de l'électricité définie par $q_{H_2}^r$
- Le débit d'hydrogène qui sort de la pile $q_{H_2}^{out}$

$$q_{H_2} = q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r - q_{H_2}^{out} \quad (\text{II.17})$$

II.11.1.4 Les pressions partielles

Calculer les pressions partielles d'hydrogène, d'oxygène et d'eau en fonction des débits molaires de gaz (entrée, sortie et consommation). Pour calculer les pressions partielles, nous avons considéré chaque gaz séparément et utilisé l'équation des gaz

parfaits dans chaque cas. On donne ici l'exemple d'hydrogène :

$$P_{H_2}V_{an} = n_{H_2}RT \quad (\text{II.18})$$

En isolant la pression et en appliquant la dérivée à l'expression précédente on obtient :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}}q_{H_2} \quad (\text{II.19})$$

Où :

q_{H_2} est la dérivée de η_{H_2} et représente le débit molaire de l'hydrogène [Kmol/s].

Sur la base des flux de gaz parfait, nous trouvons :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}}(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (\text{II.20})$$

Selon les relations électrochimiques, le débit d'hydrogène participant à la réaction peut être calculé à partir du courant circulant dans la "cheminée" i_{stack}^r

$$q_{H_2}^r = N_0 \frac{i_{stack}^r}{2F} = 2K_r i_{stack}^r \quad (\text{II.21})$$

Où :

$K_r = \frac{N_0}{4F}$ Est une constante définie afin de simplifier le modèle [(Kmol)/ (s.A)].

En revenant au calcul de la pression partielle d'hydrogène, il est possible d'écrire :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - 2K_r i_{stack}^r) \quad (\text{II.22})$$

On doit exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode $q_{H_2}^{out}$ en fonction de sa pression à l'intérieur de l'électrode P_{H_2}

Pour ce faire, on prend le cas général où l'orifice est considéré bouché et un

mélange gazeux de masse molaire moyenne M est fourni [Kg/Kmol] (figure II.12).

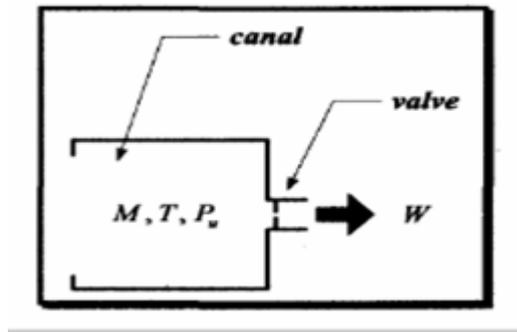


Figure II.12 – Illustration.[27]

Cet orifice (valve) présente la caractéristique suivante pour une certaine valeur de la température T :

$$\frac{W}{P_u} = K \sqrt{M} \quad (\text{II.23})$$

Où :

K est la constante de la valve qui dépend en principal de la surface d'orifice

$$\left[\frac{\sqrt{\text{Kmol.Kg}}}{\text{atm.s}} \right]$$

P_u est la pression à l'intérieur du canal (atm).

On peut donc, exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode $q_{H_2}^{out}$ en fonction de la pression à l'intérieur d'électrode P_{H_2} par la relation :

$$q_{H_2}^{out} = K_{H_2} P_{H_2} \quad (\text{II.24})$$

La relation (II.20) devient :

$$\frac{d}{dt} (P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} \left(q_{H_2}^{in} - K_{H_2} P_{H_2} - 2K_r i_{stack}^r \right) \quad (\text{II.25})$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) + \frac{RTK_{H_2}}{V_{an}}P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}}(q_{H_2}^{in} - 2K_r i_{stack}^r) \quad (\text{II.26})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (II.26) on obtient :

$$P_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{\left[1 + \frac{V_{an}}{RTK_{H_2}}S\right]}(q_{H_2}^{in} - 2K_r i_{stack}^r) \quad (\text{II.27})$$

En posant :

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RTK_{H_2}} \quad (\text{II.28})$$

Il vient :

$$P_{H_2} = \frac{\frac{1}{K_{H_2}}}{1 + \tau_{H_2}S}(q_{H_2}^{in} - 2K_r i_{stack}^r) \quad (\text{II.29})$$

Pour l'oxygène :

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{1 + \tau_{O_2}S}(q_{O_2}^{in} - 2K_r i_{stack}^r) \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$\tau_{O_2} = \frac{V_{cath}}{RTK_{O_2}} \quad (\text{II.31})$$

Pour la vapeur d'eau :

$$P_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{1 + \tau_{H_2O}S}2K_r i_{stack}^r \quad (\text{II.32})$$

II.11.2 Performances réelles d'une cellule PEMFC

II.11.2.1 Les pertes d'activation

Les pertes proviennent de l'initiation de réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour rompre et reformer les liaisons chimiques au niveau des électrodes. Lorsque ces pertes se produisent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'oxygène et de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Ceci indique que la perte d'activation est essentiellement due à la réaction cathodique. La réaction entre la perte d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel.

$$V_{act} = A \ln \left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0} \right) \quad (\text{II.33})$$

Où :

- I_{FC} : Le densité de courant délivré par la pile à combustible .
- i_0 : Le densité de courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode électrolyte
- i_n : Le densité de courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte .
- A : La pente de la droite de Tafel.

II.11.2.2 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que les plaques bipolaires offrent à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_m (I_{FC} + I_n) \quad (\text{II.34})$$

Où :

R_m est la résistance totale de la pile à combustible.

II.11.2.3 Les pertes de concentration

La consommation de gaz rend le mélange gazeux plus pauvre et abaisse la pression partielle du gaz. Cette perte de charge dépend du courant fourni et des caractéristiques du circuit de gaz.

$$V_{conc} = -B \ln \left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right) \quad (\text{II.35})$$

II.11.3 Expression de la tension de sortie de la pile à combustible

Après identification des différentes chutes de tension, la formule de la tension en charge aux bornes de la cellule est (Fig. II.13) :

$$V_{cell} = E - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc} \quad (\text{II.36})$$

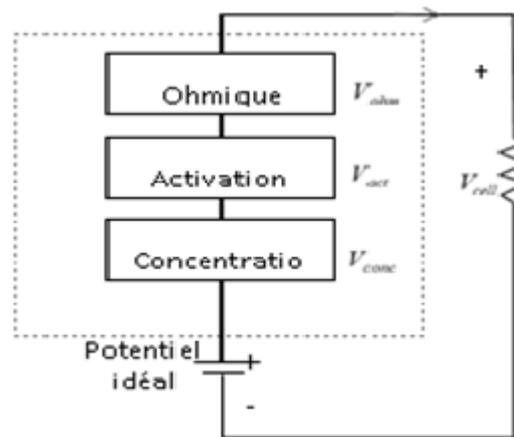


Figure II.13 – Circuit équivalent de la pile PEMFC .[27]

La tension de sortie d'un stack V_s de N_{cell} piles unitaires reliées en série et définie comme suite :

$$V_s = N_{cell} V_{cell} \quad (\text{II.37})$$

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé dans la première partie sur la pile à combustible de type PEMFC, nous avons commencé par une étude détaillée sur ce type et ces composants avec les domaines récents d'utilisation. Nous avons mentionné les raisons du choix du pile à combustible de type PEM.

La deuxième partie a discuté de la modélisation mathématique et le développement du modèle dynamique d'un stack PEMFC qui comprend deux parties, la performance idéale et réelle.



CHAPITRE III

SIMULATION DU MODÈLE ET RÉSULTATS



III.1 Introduction

Le développement de nouvelles sources d'énergie susceptibles d'apporter une solution énergétique d'avenir est aujourd'hui nécessaire pour répondre aux demandes d'énergie qui jouent un rôle stratégique dans toutes les activités humaines et tenir compte de la croissance de la demande énergétique. Ce sont les piles combustibles qui sont impliquées dans la production et la transformation de l'hydrogène, future source d'énergie. La modélisation de ces systèmes est cruciale pour leur développement car elle permet de mieux comprendre les phénomènes qui s'y déroulent. Il existe de nombreux types de modèles de piles combustibles, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications en fonction du phénomène étudié. Pour comprendre la conception et le fonctionnement des piles combustibles, les modèles mathématiques constituent un outil utile et essentiel. Ce chapitre a été rédigé dans cette optique. Il est consacré à la modélisation dynamique de la pile combustible de type PEM d'autre part, et il présente un exemple de simulation avec le programme MATLAB Simulink qui permet de déterminer les courbes de polarisation et de puissance d'une pile combustible ainsi que la variation des pertes d'activation avec la température et le courant de charge, permettant ainsi une compréhension approfondie des phénomènes fondamentaux en jeu.

III.2 MATLAB Simulink

MATLAB est un environnement de programmation et un langage de programmation de quatrième génération. Il est utilisé pour le calcul numérique et l'analyse sta-

tistique. MATLAB est construit autour du langage MATLAB. Une interface en ligne de commande permet d'exécuter des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte sous la forme d'un « script » ou d'une « fonction ». MATLAB est utilisé dans les domaines de l'ingénierie, des mathématiques, des sciences économiques et financières, de la physique, de la chimie et de la biologie.[28]

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Simulink est un environnement de schémas blocs pour l'approche Model-Based Design. Il supporte la simulation, la génération automatique de code et le test en continu de systèmes embarqués. Les logiciels de simulation permettent de simuler le comportement dynamique d'un système qui est représenté par un modèle mathématique. À chaque étape de la simulation du modèle, l'état de chaque partie du système est calculé à l'aide de solveurs basés sur le temps ou sur événement. [29]

III.3 Bloc d'une PEMFC

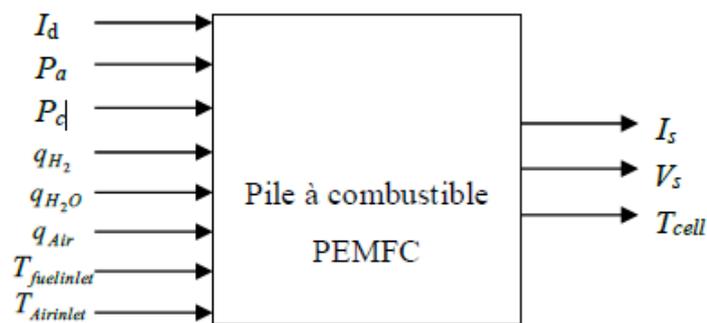


Figure III.1 – Entrées/Sorties d'une pile à combustible PEMFC.

La modélisation des piles à combustible joue un rôle très important dans leur développement, car elle facilite la compréhension des phénomènes qui se produisent à l'intérieur de la pile à combustible. Il existe donc de nombreux modèles de piles à combustible, chacun ayant généralement ses propres spécifications et applications en fonction du phénomène étudié.

| Paramètre | Valeur | Unité | Représentation |
|------------|--------|-------------|---------------------------------------|
| T | 333 | K | Température moyenne |
| R | 8.3143 | J/ (mol. K) | Constante universelle des gaz |
| N_{cell} | 48 | - | Nombre des cellules dans le « stack » |
| F | 96487 | C/mol | Constante de Faraday |
| P_a | 1.5 | atm | Pression globale du gaz à l'anode |
| P_c | 1 | atm | Pression globale du gaz à la cathode |
| E^0 | 1.23 | V | Tension standard |

Table III.1 – Paramètre de simulation.

III.4 Modèle physique de la pile à combustible

Une pile à combustible équivaut à une source d'énergie, et le point de fonctionnement (tension et courant) est réglé en fonction des besoins du consommateur. La quantité d'hydrogène consommée est proportionnelle à l'intensité du courant consommé par la charge.

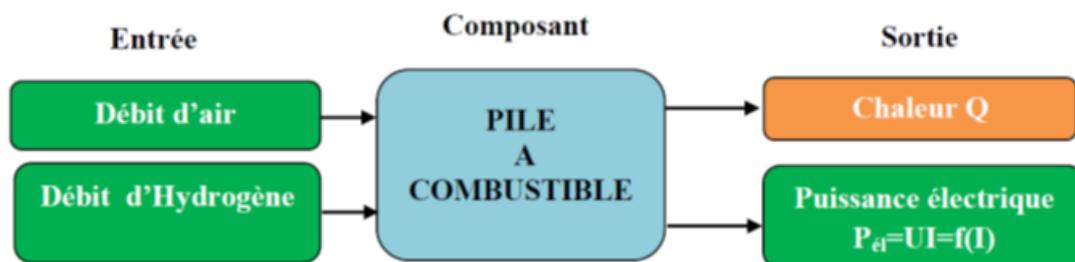


Figure III.2 – Modèle physique de la pile à combustible .[30]

III.5 Modèle dynamique de la pile à combustible

La pile à combustible objet de notre étude fonctionne à des températures variables, son schéma est représenté par un bloc Simulink en figure (III.3).

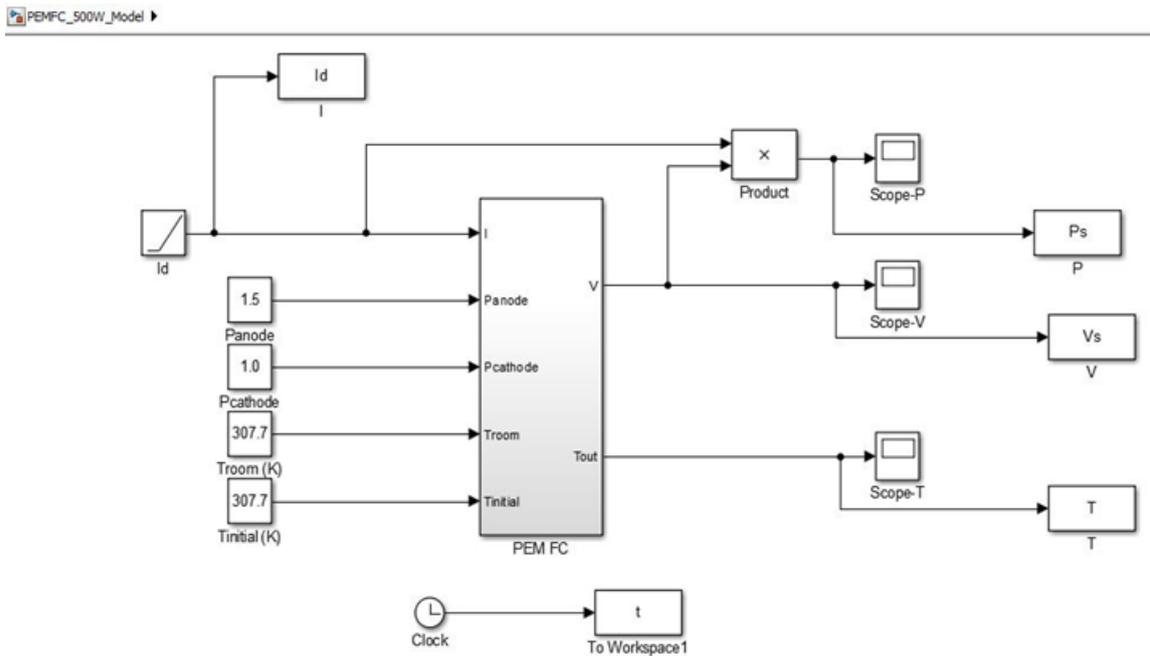


Figure III.3 – Modèle dynamique de la pile à combustible.

III.6 Comparaison des résultats

Dans cette partie, l'environnement MATLAB/Simulink est utilisé pour simuler le modèle dynamique d'une pile PEMFC de 500 W à configuration géométrique, basé sur des caractéristiques électrochimiques et thermodynamiques qui ont été présentés dans les sections précédentes. Les résultats numériques actuels ont été assez bien comparés aux résultats de la littérature existante à des fins de comparaison.. Cela est nécessaire pour confirmer et déterminer définitivement l'exactitude et la fiabilité des résultats attendus de l'étude actuelle.

La figure (III.4) compare la tension de sortie à celui de Jeferson M. Corrêa et al. [31], le courant de charge. Cette comparaison a été effectuée en utilisant un système qui fonctionne à une pression anodique de 1 atm et une pression cathodique de 0.2095 atm, de températures de 333 K et nombre de cellule de 32 cellules. Comme le montre la figure (III.4), le profil du courant de charge correspond bien à celui de Jeferson M. Corrêa et al.[31] sur la section médiane. Il convient de noter que la légère divergence apparente entre les deux peuvent être due à la différence entre les méthodes numériques.

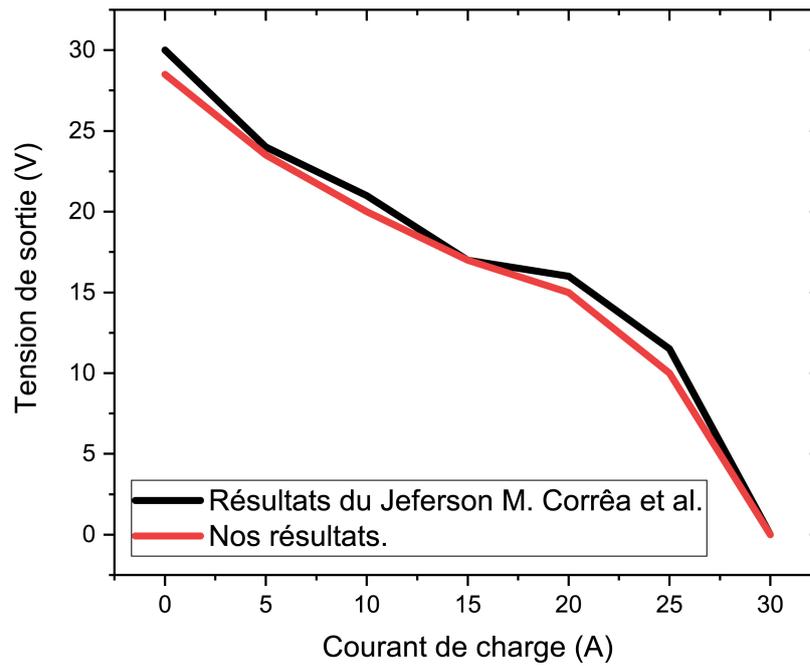


Figure III.4 – Comparaison des résultats..

III.7 Résultats De Simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats d'une simulation de pile PEMFC de 500 W (le modèle "stack" présenté dans la section précédente). La simulation est réalisée pour voir comment le système réagit aux changements du courant de charge, de la température et de la pression du gaz à l'anode et à la cathode.

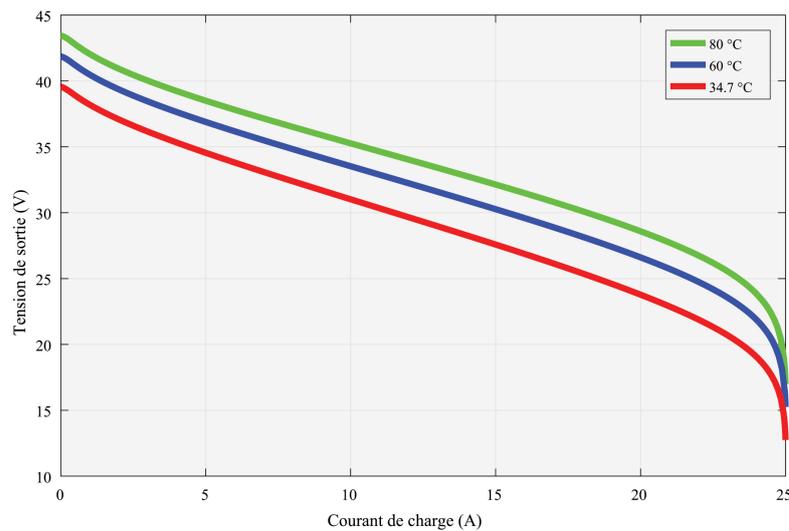


Figure III.5 – Caractéristiques Courant-Tension du modèle PEMFC à différentes températures.

Les courbes de la figure (III.5) représentent l'effet de la température sur la ca-

ractéristique courant-tension du modèle PEMFC. Dans les zones à faible courant, la tension de sortie est légèrement plus élevée à des températures plus basses, tandis que dans les zones à fort courant, la tension de sortie est légèrement plus faible. Lorsque la température augmente, la tension dans la zone de courant augmente également. Sur la figure (III.5) on a fait apparaître les différentes chutes de tension. On remarque que tant que l'on ne s'approche pas du courant limite (25 A), la chute de puissance la plus importante est celle due aux pertes d'activation.

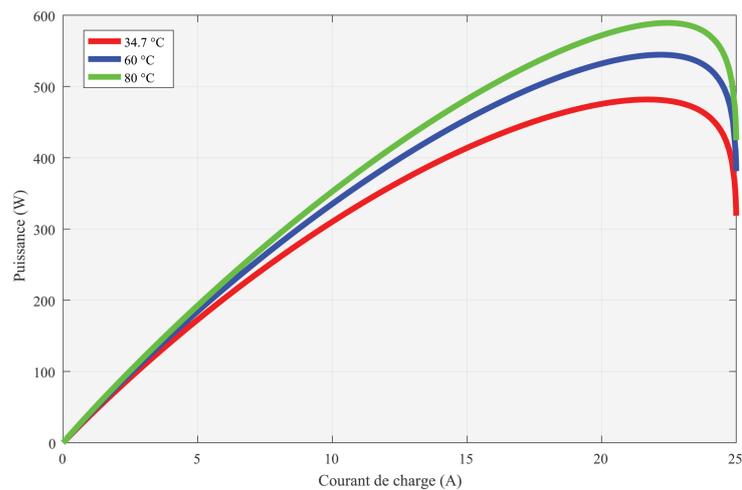


Figure III.6 – Caractéristiques Courant-Puissance du modèle PEMFC à différentes températures.

D'après les courbes de puissance de sortie à trois températures différentes présentées dans la figure (III.6), pour des courants de charge plus élevés, une puissance de sortie plus élevée peut être obtenue à des températures de fonctionnement plus élevées. A chaque température de fonctionnement, il existe un courant critique où la puissance de sortie du modèle atteint sa valeur maximale. Suivant ces considérations, l'augmentation du courant de charge réduit la puissance de sortie en raison d'importantes chutes ohmiques et de concentration.

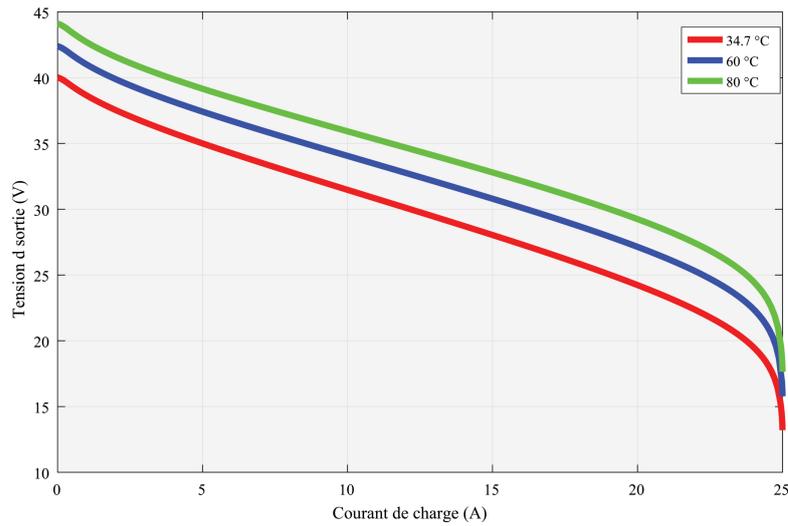


Figure III.7 – Caractéristiques Courant-Tension du modèle PEMFC à différentes températures.

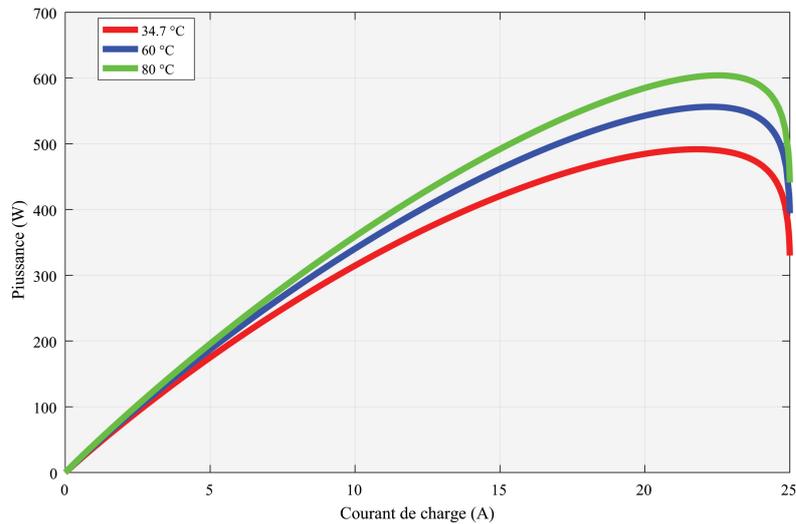


Figure III.8 – Caractéristiques Courant-Puissance du modèle PEMFC à différentes température

Les courbes de la figure (III.7) et (III.8) représentent l'effet de la température sur la caractéristique courant-tension et courant-puissance respectivement du modèle PEMFC avec une déférents pression (P_{α}) = 3atm Les courbs de tension sont les mêmes courbe de la pression précédents, c'est a dir le changement de pression n'effectue pas sur la tension au contraires de température quel a été le principal facteur de changement.

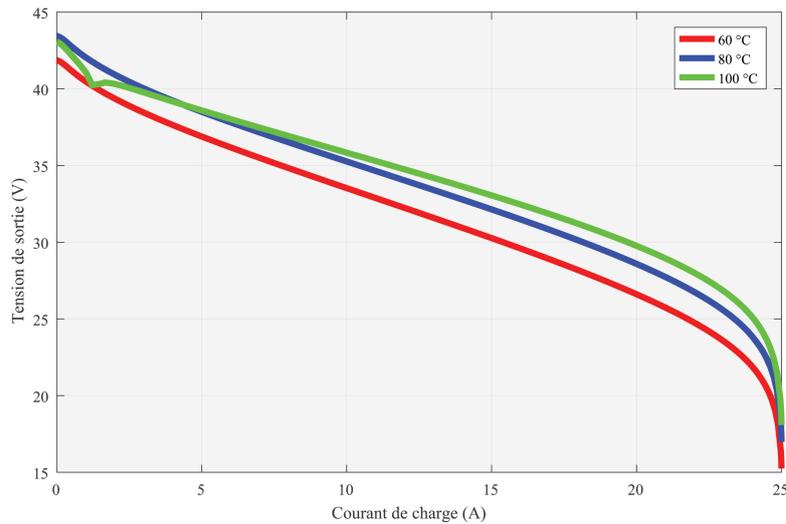


Figure III.9 – Caractéristiques Courant-Tension du modèle PEMFC à différentes températures.

La figure (III.9) représente les courbes de tension en fonction de courant avec les deux températures précédentes. ces courbe représente l'effet du température de 100 °C en remarque que il y a une anomaly de la tension dans une faible courant après l'augmentation de courant la courbe retour a l'état normal comme les autres courbes

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation d'une pile à combustible PEMFC est présentée après la validation du modèle de Jeferson M. Corrêa et al. Les résultats de simulation trouvés présentent les différentes réponses de la pile et l'influence de quelques paramètres comme la température, le courant de charge et les pressions sur le fonctionnement de cette pile.



Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail est d'étudier les nouvelles technologies énergétiques, avec des technologies 'propres' et 'efficaces' dans le domaine des véhicules électriques, parmi lesquelles on cite les piles à combustible. Notre projet parle de la modélisation de véhicules électriques alimentés par des piles à combustible. Dans le premier chapitre, nous avons parlé sur les généralités de pile à combustible en général. Commencent par le principe de fonctionnement et les compositions puis on a cité les types de PAC et les application (Domain d'application) en suit les avantages et les inconvénients de PAC. Dans le deuxième chapitre, nous avons détaillé notre modèle de PAC (PEMFC) commençant par l'étude technique de pile à combustible de type PEMFC puis le principe de fonctionnement. On a cité les composantes de PEMFC et chaque composante on la détaillée, ensuite on a identifié notre modèle de simulation (équation mathématique) commençant par les performances idéal d'une cellule PEMFC puis les performances réelles. Dans le dernier chapitre, nous avons modélisé le système utilisant MATLAB-SIMULINK et nous avons comparé nos résultats avec une validation d'un article publié dans le IEEE. Notre étude c'est d'avoir l'effet de la température et la pression sur la tension et la puissance.



Références

RÉFÉRENCES

[1] <https://nfp-energie.ch/en/projects/978/>. Consultez-le : 25/04/2023

[2] Fuel Cell Systems Explained, Third Edition. By Andrew L. Dicks, David A. J. Rand. April, 2018.

[3] Fayssal OUAGUENI, Modélisation et Commande des Piles à Combustible, département : Génie électrique, Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider – Biskra, 2021.

[4] Idris Sadli, Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance, l'institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.

[5] Maher A.R. Sadiq Al-Baghdadi, PEM fuel cell modeling. Département de génie mécanique. Université technologique internationale, 115 Dollis Hill Lane, London NW2 6HS ? 2007 Nova Science Publishers.

[6] B. MacMillan, A.R. Sharp, R.L. Armstrong, Polymer 40 (1999) 2471.

[7] B. MacMillan, A.R. Sharp, R.L. Armstrong, Polymer 40 (1999) 2481.

[8] Florent Breque, Modélisation du transport de masse dans une pile à combus-

tible Université de Québec à Trois-Rivières, Septembre 2008.

[9] J. LACHAIZE, Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction. Thèse de doctorat, l'Institut national POLYTECHNIQUE de Toulouse, 2004.

[10] ARAB Lydia et CHEBBI Zahra Etude et simulation d'une pile à combustible de Type PEM, département de génie mécanique, faculté des sciences et des sciences appliqués, université Akli Mohmand Oulhadj de Bouira, 2016.

[11] E. FRAPPÉ : Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.(2012)

[12] Y. ABDERRAHIM et R. BELBACHIR : Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC, thèse de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen.(2014)

[13] N. MEDDOUR : simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide, thèse de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla.(2010)

[14] J. C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and T.J. Harris, Performance Modelling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell I, Mechanistic Model Development, Journal of the Electrochemical Society, Vol. 142, N°8, 1995.

[15] C. J. Andrews and S. A. Weiner, and quot, Visions of hydrogen future and quot, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 2, n°. 2, pp. 26-34, 2004.

[16] <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/tout-savoir-sur-la-pile-a-combustible-a-hydrogene/> Consultez-le : 10/05/2023.

[17] BELKACEM BOUZIDA SIHEM, Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans une pile a combustible de type PEMFC, Laboratoire de physique énergétique appliquée. École doctorale des énergies renouvelables. Département de physique, université de Batna, le : 02/02/2011.

- [18] <https://construire-sa-moto-electrique.org/batterie/pile-combustible>. Pile à combustible : tout (vraiment tout) ce que vous devez savoir, Julien Vaïssette, Construire sa. Consultez-le : 10/05/2023.
- [19] <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients/> Consultez-le : 11/05/2023.
- [20] Tamrabet Monsaf, Influence des écoulements des gaz dans les canaux sur la consommation des réactifs dans une pile à combustible de type PEMFC. Mémoire Magistère en génie mécanique, université de Batna 07 Juillet 2010.
- [21] H. BEKKOUCHE : Etude numérique des phénomènes de transferts de chaleur et de masse dans une pile à combustible de type PEMFC, thèse de magistère, Université Constantine 1.(2014)
- [22] M. HAMOUR : Contribution A L'étude des Contraintes Thermodynamiques dans Les Piles A Combustible, thèse de doctorat, Université mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou. (2012)
- [23] K. Broka, P. Ekdunge, Oxygen and hydrogen permeation properties and water uptake of Nafion® 117 membrane and recast film for PEM fuel cell, J. Appl. Electrochem. 27 (1997) 117–123. doi :10.1023/A :1018469520562.265
- [24] M. Danilczuk, F.D. Corns, S. Schlick, visualizing chemical reactions and crossover processes in a fuel cell inserted in the esr resonator : Detection by spin trapping of oxygen radicals, nafion-derived fragments, and hydrogen and deuterium atoms, J. Phys. Chem.
- [25] R. Borup, J. Davey, H. Xu, A. Ofstad, F. Garzon, J. Marcinkoski, PEM Fuel Cell Durability : 2008 DOE annual progress report, 2008.
- [26] <https://www.caradisiac.com/ecologie-la-voiture-electrique-a-pile-a-combustible-est-elle-l-avenir-de-l-automobile-177755.htm>. Aurélien Voirin, Ecologie - La voiture électrique à pile à combustible est-elle l'avenir de l'automobile?. Site de Web. Consultez-le : 12/05/2023.
- [27] ZEROUAK Manal, HAROUDE Sabrine, BAHLOULI Imane, Modélisation

d'une voiture électrique à piles à combustible, departement de génie électrique, faculté de technologie, université Mohamed BOUDIAF - M'SILA,2022.

[28] <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>. Le langage du calcul technique - MathWorks. Consultez-le : 14/05/2023.

[29] <https://fr.mathworks.com/discovery/simulation-software.html>. Logiciels de simulation - MATLAB and amp, Simulink - MathWorks. Consultez-le : 14/05/2023.

[30] Université Mohamed Khider de Biskra Modélisation de la Pile à Combustible de type PEMFC (SALLEMINE Heythem / LACEFAR Madani).

[31] Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Jeferson M. Corrêa, Student Member, IEEE, Felix A. Farret, Vladimir A. Popov, and Marcelo G. Simões, Senior Member, IEEE, IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 20, NO. 1 MARCH 2005.

RÉSUMÉ

ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو إنشاء نموذج رياضي لتبسيط نمذجة الأنظمة الكهربائية لتطبيقات النقل وتطبيقات خلايا الوقود . هذا النوع من خلايا الوقود هو مصدر رئيسي للطاقة. يتم محاكاة نماذج مثل الطاقة PEMFC المحمولة من نوع Matlab / simulink والعاكسات والآلات غير المتزامنة في بيئة محاكاة

Abstract

The purpose of this study is to create a mathematical model to simplify the modeling of electric system for transport application and portable fuel cell application of the PEMFC type.

This type of fuel cell is an main energy source. Models such as energy, inverters and asynchronous machines are simulated in the Matlab / Simulink simulation environment

Résumé

Le but de cette étude est de créer un modèle mathématique pour simplifier la modélisation des systèmes électrique pour les application de transport et les application portable à pile à combustible de type PEMFC. Ce type de pile à combustible est comme source d'énergie principale. Des modèles tels que l'énergie, les onduleurs et les machines asynchrones sont simulés dans l'environnement de simulation Matlab/simulink.