



Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Electrique

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : **ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIEL**

Présenté par

BELKACEM IMED

BELBAHI ISAM

**Étude de l'efficacité de la pile à combustible « PEMFC »
dans la production de l'énergie électrique**

Soutenu le

devant le jury composé de :

Président : Mr H.Omari MAA Université de Mostaganem

Examineur : Mme S.Rezini MCA Université de Mostaganem

Rapporteur : Mme H.Neddar MCA Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Nous tenons à remercier Allah

Pour nous avoir donné la volonté et le courage et la santé pour arriver à terminer nos études et réaliser ce modeste travail.

*Nos vifs remerciements s'adressent, en premier lieu, à **Mme NEDDAR** qui a bien voulu nous encadrer. Elle nous a laissé*

libre de choisir les directions vers lesquelles notre travail s'est orienté et la manière de l'aborder ; elle a toujours su nous témoigner une grande confiance et elle nous a conseillé et encouragé aux moments décisifs.

*Nous exprimons notre sincère gratitude et nos remerciements au **Monsieur Président et les membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre sincère remerciement à **nos enseignants** pour la qualité De leurs enseignements et leurs conseils durant toutes les 05 années d'études*

Nous tenons ensuite à remercier tous ceux et toutes celles qui nous ont apporté l'aide de près et de loin.

Merci ...

Dédicace

Je dédie ce présent mémoire à

Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de cette modeste recherche à :

Mes chères parentes : Mon père et ma Mère, et qui ont tout sacrifié pour moi, et qui m'ont guidé durant les moments les plus pénible de ce long chemin.

Ma mère qui a été à mes coté et ma soutenu durant toute ma vie.

Mon père qui a sacrifié toute sa vie a fin de me voir devenir ce que jesus, merci mes parents.

Je ne saurais oublier *mes sœurs* ainsi que Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles .

A celui qui m'a encouragé tout au long de cette période

Je dédie également ce travail à tous *mes amis* et tous *mes camarades*.

A mon binôme « *BELBAHI ISAM* » à qui je souhaite beaucoup de bonheur et réussite dans sa vie.

IMED

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien indéfectible. Vous avez toujours cru en moi et m'avez donné la force de persévérer surtout mon père ABDELMALIK

À mes professeurs, pour leur guidance précieuse et leur partage de connaissances, qui ont été essentiels pour la réalisation de ce projet.

À mes amis, pour leurs encouragements constants et leur compagnie réconfortante pendant les moments difficiles.

Enfin, à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la concrétisation de ce projet. Votre aide et vos encouragements ont été inestimables.

Avec toute ma gratitude,

ISAM

Resumé :

étude de l'efficacité de la pile à combustible(PAC) dans la production de l'énergie électrique est un thème d'actualité. Parmi les différents types de piles à combustible existants, la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est particulièrement intéressante pour les domaines des transports, des applications portables et stationnaires. Cependant, la gestion de ces piles représente un défi complexe en raison des transferts simultanés de réactifs (hydrogène et oxygène), de l'eau produite par la réaction, et de la chaleur.

Pour mieux comprendre ces effets et phénomènes dans le système PAC, notre objectif a été de d'effectuer une modélisation sous Matlab/Simulink. Cette modélisation permet d'analyser et d'optimiser la gestion de la PAC en simulant ses dynamiques et interactions internes, ce qui est crucial pour améliorer ses performances et son efficacité dans diverses conditions d'utilisation.

Mots clés : Pile à combustible, simulation, hydrogène, oxygène, électricité , énergie.

Abstract :

Study of the efficiency of the fuel cell (PAC) in the production of electrical energy is a current theme. Among the different types of existing fuel cells, the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell) is particularly interesting for the fields of transport, portable and stationary applications. However, the management of these batteries represents a complex challenge due to the simultaneous transfers of reactants (hydrogen and oxygen), the water produced by the reaction, and the heat.

To better understand these effects and phenomena in the PAC system, our objective was to carry out modeling in Matlab/Simulink. This modeling makes it possible to analyze and optimize the management of the heat pump by simulating its internal dynamics and interactions, which is crucial to improve its performance and efficiency in various conditions of use.

Key words: Fuel cell, simulation, hydrogen, oxygen, electricity, energy.

ملخص:

دراسة كفاءة خلية الوقود (PAC) في إنتاج الطاقة الكهربائية هي موضوع حالي. من بين الأنواع المختلفة لخلايا الوقود الموجودة، تعد خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني (- PEMFC خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني) مثيرة للاهتمام بشكل خاص في مجالات النقل والتطبيقات المحمولة والثابتة. ومع ذلك، فإن إدارة هذه البطاريات تمثل تحديًا معقدًا بسبب عمليات النقل المتزامنة للمواد المتفاعلة (الهيدروجين والأكسجين)، والماء الناتج عن التفاعل، والحرارة.

لفهم هذه التأثيرات والظواهر بشكل أفضل في نظام PAC، كان هدفنا هو تنفيذ النمذجة في Matlab/Simulink. يتيح هذه النمذجة إمكانية تحليل وتحسين إدارة المضخة الحرارية من خلال محاكاة ديناميكياتها وتفاعلاتها الداخلية، وهو أمر بالغ الأهمية لتحسين أدائها وكفاءتها في مختلف ظروف الاستخدام.

الكلمات المفتاحية: خلية الوقود، المحاكاة، الهيدروجين، الأكسجين، الكهرباء، الطاقة.

Liste des figures:

Figure I.1: L'expérience de Sir William, inventeur historique de la pile à combustible... ..	7
Figure. (I.2) Vue éclatée d'une pile à combustible.....	9
Figure I.3: schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.....	11
Figure I.4: Schéma de principe des différents types de piles à combustibles.	12
Figure I.5 : Schéma de principe d'une PEMFC.	13
Figure I.6 : Schéma de principe d'une SOFC.....	14
Figure I.7 : Schéma de principe d'une MCFC.....	15
Figure I.8: Schéma de principe d'une pile AFC.....	16
Figure I.9 : Schéma de principe d'un PAFC	17
Figure I- 10:Domaines d'application des piles à combustible.....	18
Figure I.11 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	22
Figure I.12 : Quelques applications de pile à combustible, (a) La Hyundai ix35 FECV est le premier véhicule à pile à combustible produit en série, (b) Unité de Pile à combustible, (c) Pile à combustible au méthanol Ultracell.....	23
Figure I.13 : Les différents éléments de pile PEM.....	23
Figure I- 14 : la membrane de pile à combustible.....	24
Figure I.15: Catalyseur du coté anode.....	25
Figure I.16 : Couche de diffusion de gaz.....	26
Figure I- 17 : Plaque bipolaire.....	26
Figure I.18: Structure d'un empilement de cellule PEMFC [17].....	27
Fig. (II.1) Système synoptique de production de l'hydrogène solaire.....	33
Fig. (II.2) L'électrolyse de l'eau.....	37
Figure . II.3: Principe de l'électrolyse alcaline.....	38
Figure II.4: L'électrolyse PEM.....	39
Figure II.5: L'électrolyse SOFC.....	39

Figure II.6:Schéma de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse PEM.....	40
Figure III.1.shema synoptique d'alimentation de PAC type PEMFC.....	44
Figure III.2 Modèle statique circuit à électrodes non dissociées d'une cellule PEM.....	45
Figure III.3 Modèle statique circuit à électrodes dissociées d'une cellule PEM.....	46
Figure III.4: Modèle dynamique d'une PAC.....	47
Figure (III.5) Caractéristiques techniques de la PAC simulée	48
Figure III.6 Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimiqu.e.....	50
Figure III.7 : modèle à 7 paramètres.....	56
Figure(III.8) : Modèle a six paramètres.....	57
Figure(III.9) : modèle à 5 paramètres.....	58
Figure III.10:Modèle a 4 paramètres.....	59
Figure III.11 : modèle à 3 paramètres.....	60
Figure(III.12) : caractéristique et résultante d'un groupement en série d ns cellules identiques	61
Figure(III.13):caractéristique et résultante d'un groupement en série d ns cellules identiques.....	61
Figure III.14 : association des modules en parallèle.....	62
Figure III.15:caractéristique résultante d'un groupement parallèle de ns cellules identiques.....	62
Figure III.16 :association mixte des modules.....	63
Figure III.17 : caractéristique résultante d'un groupement mixte.....	63
Figure III .18 Schéma du convertisseur Buck.....	65
Figure III.19 : Circuit équivalent de convertisseur Buck : (a)K fermé,(b) K ouv.....	65
Figure III.20 : Schéma du convertisseur Boost.....	67
Figure III.21: Circuit équivalent de convertisseur Boost (a)K fermé,(b)K ouvert.....	67
Figure III.22 : Schéma du convertisseur Buck-Boost.....	68
Figure III.23 : Circuit équivalent de convertisseur Buck-Boost (a)Kfermé, (b)K ouvert.....	69

Figure III.24: Modèle du convertisseur Buck dans Sim Power System.....	70
Figure III.25 : Modèle du convertisseur Boost dans Sim Power System.....	71
Figure III.26 : Modèle du convertisseur Buck-Boost dans Sim Power System.....	71
Figure III.27: Schéma de le montage PAC-charge.....	75
Figure III.28: Paramètres du modèle pile à combustible PEM.....	75
Figure III.29: courbe de polarisation de la pile à combustible.....	76
Figure III.30: Fonctionnement à tension et courant nominaux.....	77
Figure III.31: Effet de PH2 sur la tension et sur le courant.....	78
Figure III.32: Effet de PO2 sur la tension et sur le courant.....	80
Figure III.33: Effet de la température sur la tension et sur le courant	81

Liste des abréviations

PAC :	Pile à combustible.
MCFC :	Pile à combustible à carbonate fondu.
SOFC :	Pile à combustible à oxyde solide.
AFC :	Pile à combustible alcaline.
PEMFC :	Pile à combustible à membrane d'échange de protons.
PAFC :	Pile à combustible à acide phosphorique.
Convertisseur DC-DC :	convertisseur courant continue – continue

Symboles :

<i>E_{th}</i>	Potentiel théorique fonction de la température et de la pression
η_{act}	Pertes par activation.
η_{conc}	Pertes par diffusion
η_{ohmc}	les pertes ohmiques
ΔG	La variation d'enthalpie libre ou encore appelée variation d'énergie libre de Gibbs
F :	constante de faraday
E :	force électromotrice (f.e.m.) de la pile
VF :	Tension de sortie de la pile à combustible.
ENL :	Pas de tension de charge de la pile à combustible.
VRA :	Chute de tension due à la perte d'activation.
VRC :	Chute de tension due à une perte de concentration.
VRO :	Chute de tension due à une perte ohmique.
p_{O_2}	Pression partielle d'hydrogène.
p_{H_2}	Pression partielle d'oxygène.
T :	température de cellule.
P_{node}	est la pression de hydrogène à l'anode est

Sommaire

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Etat de l'art sur les piles à combustible.....	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 DESCRIPTION GENERALE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.....	6
I.3 Historique générale de la pile à combustible.....	6
I.4. Eléments constituant une pile à combustible.....	7
I.4.1. Les électrodes.....	8
I.4.2. L'électrolyte.....	8
I.4.3. Les plaques bipolaires.....	9
I.5. Alimentation de la pile à combustible.....	10
I.5.1. Circuit d'alimentation en air.....	10
I.5.2. Circuit d'alimentation en hydrogène.....	11
I.6. Principe de fonctionnement.....	12
I.7. Différentes types de la pile à combustible.....	13
I.7.1. Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).....	14
I.7.1.1. Caractéristiques de pile PEMFC	14
I.7.2. Pile à combustible à oxyde solide (SOFC).....	15
I.7.2.1. Caractéristiques de pile SOFC.....	15
I.7.3. Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC).....	16
I.7.3.1 Caractéristiques de pile MCFC	17
I.7.4. Pile à combustible alcaline (AFC)	17
I.7.4.1 Caractéristiques de pile.....	18
I.7.5. Pile à acide phosphorique (PAFC)	19
I.8. Domaines d'application.....	20
I.8.1. les applications transports.....	20

I.8.2.les applications stationnaires.....	20
I.8.3. Les applications portables.....	21
I.8.4. Les applications militaires et spatiales.....	21
I.8.5. Utilisation la pile à combustible dans différent capteur	22
I.9. LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM	23
I.9.1 Principe de fonctionnement.....	24
I.9.2. Description de la cellule PEM.....	24
Chapitre II : concept de l'hydrogène.....	25
II.1. Introduction.....	26
II.1.1 Différents procédés de production d'hydrogène.....	27
II.2. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures.....	27
II.2.1. Produit de l'hydrogène à partir la vapeur formage.....	28
II.2.2. Produit de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle.....	30
II.2.3. Produit de l'hydrogène à partir la gazéification	31
II.2.4 Produit de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique).....	32
II.2.5 Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire.....	32
II.2.6 Technique de production de l'hydrogène solaire	33
II.3 STOCKAGE DE L'HYDROGENE	33
II.3.1 STOCKAGE SOUS PRESSION.....	33
II.3.2. STOCKAGE LIQUIDE.....	33
II.3.3. STOCKAGE SOUS FORME D'HYDRURES.....	34
II.4. Utilisation de l'hydrogène pour la production de l'énergie électrique.....	34
II.5 PRODUCTION DE L'HYDROGENE A PARTIR DE L'ELECTROLYSE.....	34
II.5.1 Les composants des électrolyseurs.....	35
II.5.2 Principe de fonctionnement l'électrolyse.....	35
II.5.3.Les Différentes Technologies D'électrolyseurs.....	36

Chapitre III : MODELISATION ETSIMULATION DE LA PILEA COMBUSTIBLE DU TYPEPEMFC.....	36
III.1 Introduction.....	37
III.2 Modèles statiques.....	38
III.2.1 Modèle à électrodes non dissociées.....	38
III.2.2 Modèle à électrodes dissociées.....	39
III .2.3.Modèle d'amphlett et al	45
III.3 MODELISATION.....	45
III.3.1 Débit d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée.....	45
III.3.2 La résistance interne.....	45
III.3.3Les pertes ohmique.....	46
III.3.4 Pertes d'activation.....	46
III.3.5 Résistance d'activation Ra.....	46
III.3.6 La constante de modélisation Kr.....	47
III.3.7 Pression d'hydrogène.....	47
III.3.8 Pression d'oxygène.....	47
III.3.9 Pression de l'eau.....	47
III.3.10 Potentiel thermodynamique.....	47
III.3.11 Tension d'une cellule de la PAC.....	47
III.3.12 Tension totale de la cellule PAC.....	48
III.3.13 Puissance d'une pile à combustible.....	48
III.3.14 Modèle de la dynamique de la PEM.....	48
III.4 Modélisation de l'électrolyseur.....	49
III.4.1 Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM.....	49
III.4.2. Modèle thermique.....	49
III.4.3 Modèle électrochimique.....	49

III.4.4	Modèle thermodynamique.....	50
III.4.5	Modèle de Tension.....	51
III.4.6	Modèle de stockage.....	52
III.4.7	Modèle d'anode.....	52
III.4.8	Modèle de cathode.....	53
III.4.9.	Modèle de membrane.....	53
III.5	Modélisation et caractérisation de panneau photovoltaïque.....	54
III.5.1	Les différentes modèles électriques d'une cellule photovoltaïque.....	55
III.5.2	Modèle a six paramètres (6P).....	56
III.5.3	Modèle a cinq paramètres (5P).....	56
III.5.4	Modèle a quatre paramètres (4P).....	58
III.5.4	Modèle a trois paramètres (3P)	59
III.6	Liaison des cellules photovoltaïque.....	60
III.6.1	Groupement en série.....	60
III.6.2	Groupement en parallèle.....	61
III.6.3	Groupement mixte (série-parallèle).....	62
III.7	Modélisation des convertisseurs DC-DC.....	63
III.7.1.	Modélisation dans l'espace d'état.....	64
III.7.2.	Convertisseur Buck.....	65
III.7.3.	Convertisseur Boost.....	65
III.7.4	Convertisseur Buck-Boost.....	66
III.8	Modélisation des circuits.....	67
III.9	Conclusion.....	69
III.10.	la simulation.....	78
III.10.1.	Introduction.....	79
III.10.2.	Logiciel Utilisés.....	79

III.10.2-1-Présentation du logiciel « MATLAB SIMMULINK ».....	79
III.10.3-L'objectif de simulation.....	80
III.10.3-1- Fonctionnement nominal.....	80
III.10.3.2. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance.....	82
III.10.4. Effet de la pression de l'hydrogène.....	83
III.10.5.Effet de la pression de l'air (oxygène).....	84
III.10.6. Effet de la température.....	86
III.10.7. Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	88

Introduction générale

Introduction générale :

En 2023, la consommation mondiale d'électricité était d'environ 26 700 térawattheures (TWh) la consommation d'électricité mondiale continue en 2024 de croître en raison de l'augmentation de l'usage des appareils électroniques et des systèmes de chauffage et de climatisation. Les efforts pour intégrer davantage de sources d'énergie renouvelable dans les réseaux électriques se multiplient pour répondre à cette demande croissante tout en réduisant les émissions de carbone.

Et dans la même année, la consommation mondiale d'hydrogène a atteint environ 90 millions de tonnes, principalement utilisée dans les industries chimiques et pétrolières. La demande continue de croître, avec un intérêt accru pour l'hydrogène vert comme solution pour la transition énergétique et la réduction des émissions de carbone.

Dans ce contexte, l'hydrogène apparaît comme un candidat prometteur, bien qu'il ne soit qu'un vecteur énergétique et non une ressource primaire. De plus, l'hydrogène pourrait répondre aux enjeux climatiques en facilitant une utilisation plus efficace des énergies renouvelables, qui sont par nature dispersées et intermittentes.

L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut être synthétisé à partir des énergies renouvelables. Outre sa fonction de vecteur énergétique, son caractère stockable est exploité pour pallier l'aspect aléatoire de ces modes de production et répondre aux exigences des consommateurs d'énergie.

Les piles à combustible sont souvent présentées comme l'énergie de demain, en parallèle avec l'hydrogène. Toutefois, cette technologie n'est pas nouvelle : son principe de fonctionnement a été découvert en 1839. Une pile à combustible utilise l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité sans pollution, les autres produits étant simplement de l'eau pure et de la chaleur.

Les scientifiques ont développé différents types de piles à combustible, caractérisés par la nature des gaz et de l'électrolyte utilisés, déterminant ainsi leurs caractéristiques de fonctionnement. Parmi toutes les familles existantes de piles à combustible, nous nous intéresserons uniquement aux piles à basse température à membranes polymères échangeuses

de protons (PEM), cette technologie semblant être la plus mûre et la plus proche du stade commercial.

Elles peuvent être utilisées dans plusieurs domaines comme le transport automobile (Train Coradia iLint est entré en service en Allemagne en 2018 les voitures hybrides électriques à hydrogène commercialisées depuis 2016 sont Toyota, Hyundai et Honda.) les application stationnaires (Énergie verte du Gyeonggi Novembre 11,2011.) et les applications portables (téléphones, ordinateurs portables).

Bien que les PAC de type PEM (pile à membrane échangeuse de protons) représentent de composantes majeures capables de provoquer l'évolution du domaine énergétique, il reste néanmoins de nombreux problèmes à résoudre avant d'envisager leur développement et leur commercialisation à grande échelle. Le caractère très fortement couplé des phénomènes physicochimiques se produisant dans le cœur de la pile (réactions électrochimiques, phénomènes hydrauliques, thermiques, mécaniques, électriques...) rend cette dernière très complexe et difficile à maîtriser. En particulier, la gestion d'eau dans la membrane est l'un des problèmes les plus délicats qui affectent les performances de la PAC. Dans ce contexte, la modélisation mathématique et la simulation se positionnent comme des outils précieux pour la compréhension, la prédiction et l'amélioration du comportement des systèmes PAC.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons effectué une recherche bibliographique approfondie sur le principe de fonctionnement des piles à combustible, les différents types de PAC et utilisation des PAC dans différents domaines. Notre choix s'est basé sur les piles à combustible de type PEMFC

Le deuxième chapitre sera consacré sur le concept de l'hydrogène où nous exposons les différents procédés de production et stockage d'hydrogène

Dans le troisième chapitre, nous abordons la modélisation et l'identification des modèles de piles à combustible connus. Nous effectuons également des simulations de la pile à combustible de type PEMFC en utilisant le modèle d'Amphlet disponible sous MatLab/Simulink. Ce chapitre vise à évaluer les différents modèles d'analyse utilisés pour les piles à combustible de type PEMFC.

Grâce à l'analogie entre les domaines électrique et dynamique, cette méthode constitue un outil simple, évolutif et efficace. Cette modélisation permet d'effectuer une simulation regroupant divers résultats afin d'obtenir l'efficacité et les performances de la pile à combustible PEMFC.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale

Chapitre I : Etat de l'art sur les piles à
combustible

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

I.1.Introduction :

Le paysage énergétique actuel, marqué par l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, le réchauffement climatique attribué en partie aux émissions de gaz à effet de serre et l'impératif de développement durable, favorise l'émergence de solutions énergétiques alternatives. Dans ce contexte, le développement de nouveaux convertisseurs d'énergie, plus efficaces et moins émetteurs de substances toxiques, comme la pile à combustible, connaît une accélération notable. Cependant, leur déploiement à grande échelle nécessite des garanties en termes de sécurité et de respect de l'environnement. Sur le marché, une multitude de technologies de piles à combustible sont disponibles, chacune présentant ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients. Dans le premier chapitre, nous proposons une introduction à la pile à combustible, en expliquant son principe de fonctionnement, en offrant un bref historique, et en détaillant les différents types ainsi que leurs applications, avantages et inconvénients.

I.2DESCRIPTION GENERALE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE :

Une pile à combustible constitue un générateur d'énergie électrique qui opère en convertissant directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. Ce système présente l'avantage d'être quasiment silencieux, car il ne comporte aucun composant mécanique en mouvement tel que des turbines ou des moteurs. De plus, elle génère du courant électrique de manière continue tant que la pile est alimentée en combustible (comme les hydrocarbures, les alcools, la biomasse, le gaz naturel ou l'hydrogène) et en comburant (l'oxygène de l'air). Cette caractéristique la distingue des batteries, des accumulateurs et d'autres types de piles où une quantité limitée d'énergie électrique est stockée sous forme chimique et qui nécessitent soit d'être rechargés lorsqu'ils sont vides (comme les batteries de véhicules), soit d'être remplacés (comme les piles de poste de radio)

I.3Historique générale de la pile à combustible

En 1839, William Grove a réalisé la première démonstration de la pile à combustible, une innovation majeure dans le domaine de l'énergie. Cette pile, qui fonctionne à base d'hydrogène et d'oxygène à basse température, comporte des électrodes en platine et utilise un électrolyte à

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

base d'acide sulfurique dilué. Les avancées dans ce domaine ont été significatives jusqu'aux années 1930, notamment grâce aux travaux de l'ingénieur britannique Francis T. Bacon à l'Université de Cambridge. Bacon a expérimenté avec des électrolytes à base de KOH en milieu aqueux, opérant à des températures allant de 80 à 200°C, et sous des pressions gazeuses variant de quelques atmosphères à 40 atmosphères, avec des électrodes poreuses en nickel et en oxyde de nickel.

En 1953, le premier prototype de pile à combustible générant une puissance significative a été réalisée. Les progrès dans ce domaine ont été fortement stimulés par le programme spatial américain de la NASA à la fin des années 1950, en particulier dans le cadre du programme GEMINI. Dans les années 1960, la technologie de la pile à combustible à électrolyte polymère solide (SPEFC) a été développée par General Electric, avec Pratt and Whitney (aujourd'hui United Technologies) jouant un rôle crucial. Ces piles alcalines de type Bacon ont été utilisées dans les missions lunaires Apollo et sont toujours utilisées dans la navette spatiale.

Parallèlement, en Allemagne, Justi et Winsel ont développé plusieurs types de piles alcalines kilowatt (AFC), notamment celles utilisant des électrodes au nickel de Raney offrant de vastes surfaces actives, connues sous le nom d'électrodes à double squelette (DSK).

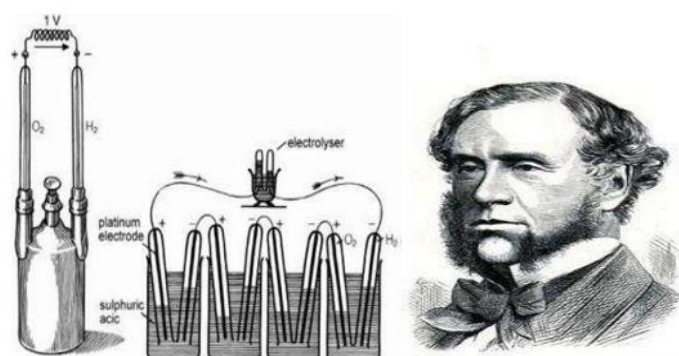


Figure I. 1: L'expérience de Sir William, inventeur historique de la pile à combustible

I .4. Eléments constituant une pile à combustible :

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui génère de l'électricité à partir de réactions chimiques entre un combustible et un oxydant. Les éléments constitutifs principaux d'une pile à combustible incluent :

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

les électrodes : généralement fabriquées à partir de matériaux tels que le platine, facilitent les réactions électrochimiques.

un électrolyte : peut être solide, liquide ou gazeux, permet le transport des ions nécessaires aux réactions électrochimiques

un catalyseur : accélère les réactions chimiques sans être consommé dans le processus. D'autres composants, tels que les collecteurs de gaz et les systèmes de régulation de la température, peuvent également être présents pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité de la pile à combustible

I.4.1. Les électrodes :

Les réactions électrochimiques se passent au niveau des électrodes : une oxydation à l'anode (où l'espèce chimique capte un ou plusieurs électrons) et une réduction à la cathode (où l'espèce chimique cède un ou plusieurs électrons).

Pour que l'hydrogène soit oxydé, il faut un catalyseur. Celui-ci qui permet alors de faciliter les échanges électroniques.

De même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques (l'étape lente) et est spécifique à la réaction et au niveau de la température de la pile.

Les deux réactions d'oxydoréductions se font dans la zone dite de « contact triple » où se trouvent les réactifs gazeux, les ions et les électrons. Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile.

I.4.2. L'électrolyte

Dans le contexte des piles à combustible, un électrolyte est un matériau conducteur d'ions chargés électriquement qui permet le transfert d'ions entre l'anode et la cathode de la pile.

Il est généralement utilisé pour séparer les deux électrodes tout en permettant le passage des ions nécessaires pour la réaction électrochimique.

En fonction du type de pile à combustible, différents électrolytes peuvent être utilisés, tels que les électrolytes acides, alcalins ou polymères échangeurs d'ions.

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

I.4.3. Les plaques bipolaires

Ces plaques sont collées aux supports de l'anode et de la cathode. Elles permettent de :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur
- Collecter le courant
- Gérer les flux

Généralement en graphite, ces plaques doivent conduire le courant, mais aussi permettre de diffuser des gaz jusqu'aux électrodes (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent résister aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique). Situées au cœur des piles à combustible, les plaques bipolaires assurent la conduction des électrons, ce qui permet l'alimentation en gaz et l'évacuation de l'eau formée.

Des canaux sont gravés dans ces plaques pour permettre le passage des réactifs.

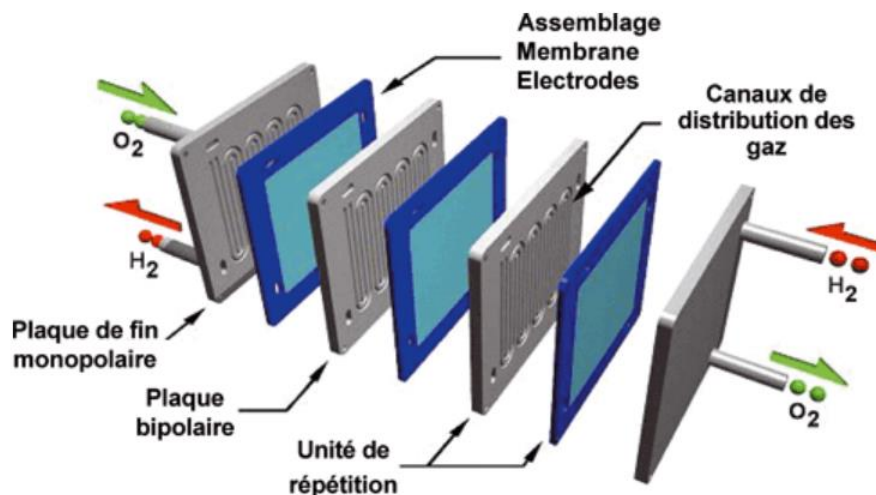


Figure. (I.2) Vue éclatée d'une pile à combustible.

Pour le bon fonctionnement de la pile, il est indispensable d'ajouter d'autres composants. Il s'agit des réservoirs pour l'hydrogène et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile et de l'onduleur pour transformer le courant continu en sortie de pile.[1].[2]

I .5.Alimentation de la pile à combustible:

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

I.5.1.Circuit d'alimentation en air :

L'oxygène alimentant la pile à combustible est généralement prélevé dans l'air ambiant afin d'éviter le stockage de l'oxygène. Cependant, l'air ne contient que 21% d'oxygène. Afin d'augmenter la concentration d'oxygène, il est parfois nécessaire (pour les puissances élevées) de comprimer l'air. Dans certains cas, l'énergie disponible dans les gaz de sortie (air appauvri en oxygène) de la pile peut être récupérée par une turbine. Pour les petites puissances, une soufflante peut suffire. L'utilisation d'un compresseur n'est pas sans conséquences sur le rendement global du système. Celui-ci est alimenté par la pile à combustible et lui prélève une puissance non négligeable qui peut représenter jusqu'à 25% de la puissance électrique délivrée par la pile. Le compresseur est donc un auxiliaire très important dans la pile et de nombreux verrous technologiques sont à lever dans ce domaine : il doit permettre l'alimentation en air, l'évacuation de l'eau produite sans assécher la membrane de la pile et assurer une bonne dynamique du système (c.-à-d., répondre en temps réel aux sollicitations du système). [3].

I.5.2.Circuit d'alimentation en hydrogène :

Pour une pile fonctionnant à l'hydrogène direct, un circuit simple assure l'approvisionnement en hydrogène.

Une régulation mécanique de pression par détendeur est utilisée dans ce cas pour amener l'hydrogène à une pression convenable (1 à 3 bars).

L'hydrogène non consommé peut être ensuite recyclé moyennant l'utilisation d'une pompe de recirculation ou d'un dispositif passif (Venturi) afin d'éviter un gaspillage du combustible.

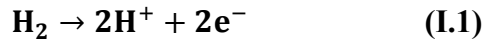
L'anode peut également fonctionner en régime fermé et dans ce cas une purge occasionnelle contrôlée par une valve doit être effectuée pour éviter l'accumulation de l'azote diffusé à travers la membrane électrolytique.

Dans ce cas le résidu d'hydrogène peut être consommé dans un petit brûleur catalytique. Eventuellement, l'hydrogène entrant dans le réacteur peut être humidifié avec de l'eau ionisée au moyen d'un système d'humidification à la membrane. [3]. [4].

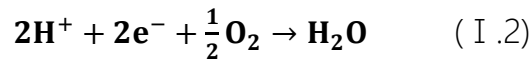
I.6.Principe de fonctionnement :

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

La pile à combustible est un générateur qui fonctionne grâce à l'oxydation de l'hydrogène sur une électrode et à la réduction de l'oxygène sur une autre électrode. Elle ne nécessite que de l'hydrogène et de l'oxygène pour fonctionner. Du côté de l'anode, l'hydrogène se décompose selon la demi-réaction correspondante, qui est (l'oxydation de l'hydrogène) :



Deux électrons sont libérés et circulent dans l'électrode en direction de la charge extérieure. Les ions hydrogène H^+ ou protons se déplacent vers la cathode à travers l'électrolyte. Les électrons parcourent ensuite le circuit extérieur pour atteindre la cathode. Du côté de la cathode, l'oxygène se décompose selon la demi-réaction de (réduction de l'oxygène) :



Pour un électrolyte non conducteur d'électrons, les demi-réactions se séparent. Les électrons produits par la décomposition de l'hydrogène circulent à travers le circuit externe, tandis que les ions H^+ (protons) peuvent traverser l'électrolyte. Le bilan global de la réaction qui se produit dans une pile à combustible est :



L'eau formée est un liquide dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atm, ou 273 K et 1013 hPa), comme illustré dans la Figure I.3 suivante : [5].

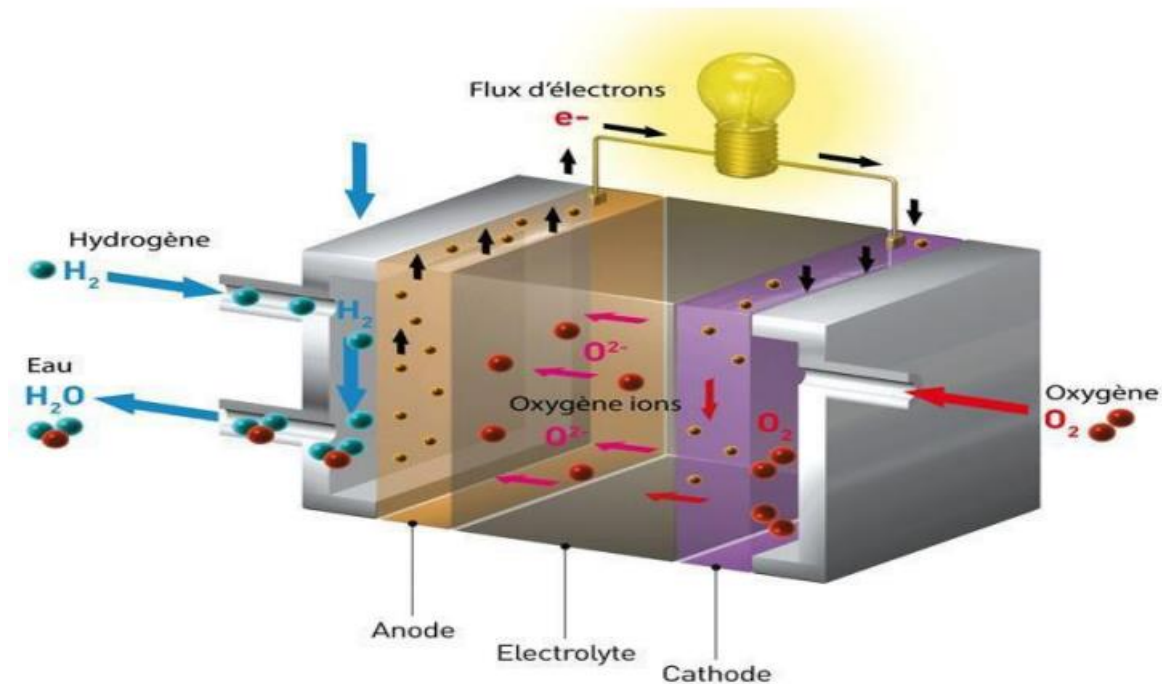


Figure I.3: schéma de fonctionnement d'une pile à combustible

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides. Certains fonctionnent à haute température tandis que d'autres fonctionnent à basse température, nécessitant souvent des catalyseurs en métal noble, généralement du platine, pour améliorer les réactions aux électrodes. En principe, le fonctionnement d'une pile à combustible implique l'utilisation d'un assortiment de carburants et d'oxydants. L'hydrogène est largement reconnu comme le carburant le plus efficace en raison de sa réactivité électrochimique élevée par rapport à d'autres carburants tels que les hydrocarbures ou les alcools. De même, l'oxygène est le meilleur oxydant en raison de sa réactivité élevée et de son abondance dans l'air.

I.7. Différents types de la pile à combustible :

Il existe plusieurs technologies de pile à combustible qui se distinguent par différents aspects. Voici quelques-unes des principales technologies de piles à combustible :

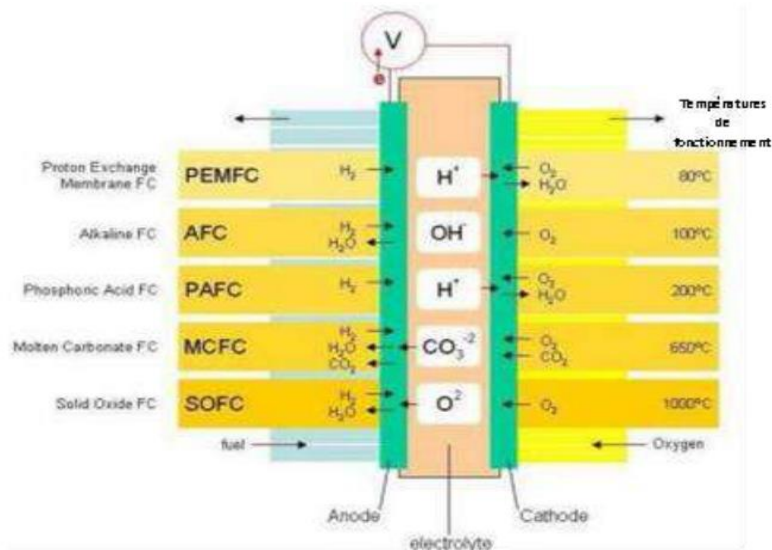


Figure I.4: Schéma de principe des différents types de piles à combustibles. [6].

I.7.1. Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :

Utilise une membrane polymère conductrice de protons comme électrolyte. Elles sont souvent utilisées dans les applications portables et les véhicules à pile à combustible en raison de leur réponse rapide et de leur faible température de fonctionnement.

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

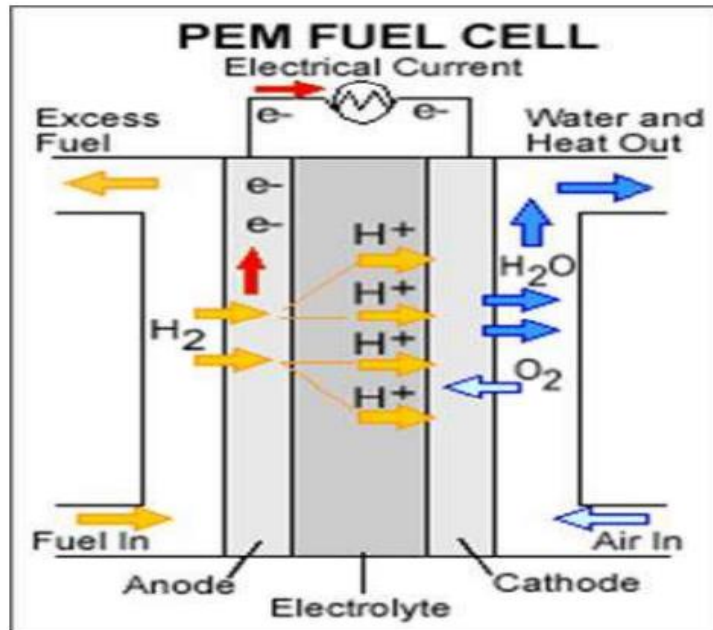


Figure I.5 : Schéma de principe d'une PEMFC. [6].

I . 7 . 1 . 1. Caractéristiques de pile PEMFC: Ci-dessous, nous avons synthétisé les différentes caractéristiques et performances des piles à membrane échangeuse de protons :

Modèle	PEMFC
Combustible (carburant)	H ₂ pur
comburant	O ₂
Electrolyte	Nafion
Electrode	Pt
Puissance	1 W-300KW
Rendement	32-40 %
Durée de vie	60 000- 90 000 heures

Tableau I.1: Caractéristiques de la pile PEMFC [6, 8 , 9]

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

I.7.2.Pile à combustible à oxyde solide (SOFC) :

Cette technologie utilise un électrolyte solide, généralement un matériau céramique, tel que l'oxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium. Elles fonctionnent à des températures élevées et peuvent convertir efficacement une grande variété de combustibles en électricité.

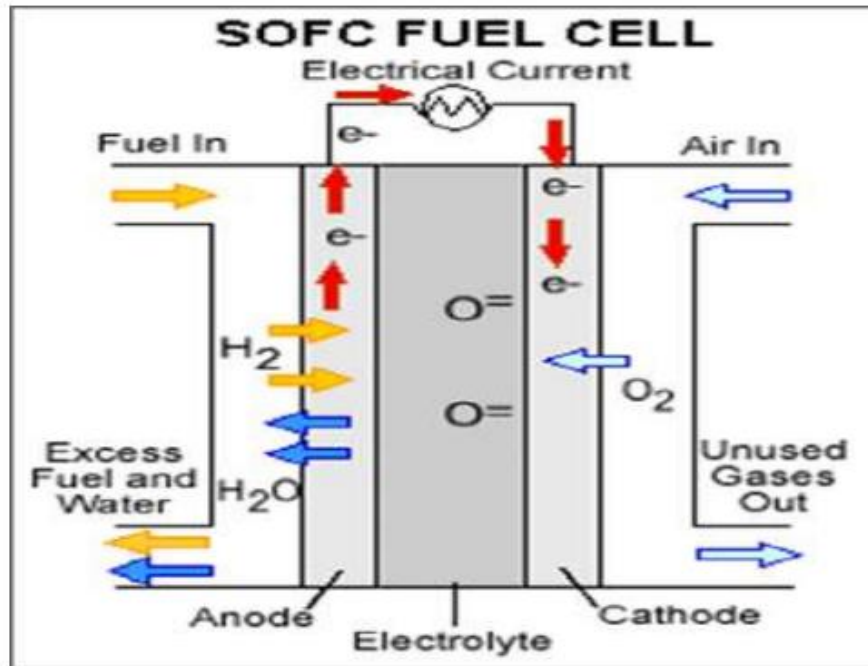


Figure I.6 : Schéma de principe d'une SOFC.[6]

I.7.2.1.Caractéristiques de pile SOFC

Les caractéristiques et les performances de la pile à combustible à oxyde solide sont résumées dans le tableau suivant :

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Modèle	SOFC
Combustible (carburant)	H ₂ Pur , CH ₄
comburant	O ₂
Electrolyte	Céramique en dioxy de zirconium
Electrode	Nickel, céramique
Température de fonctionnement	650- 1000 °c
Puissance	1 KW – 10MW
Réaction	Anode: H ₂ + O ⁻² → H ₂ O + 2 e ⁻ Cathode: 1/2 O ₂ + 2 e ⁻ → O ⁻²
Rendement	50-55%
Durée de vie	Supérieur à 90 000 heures

Tableau I.2: Caractéristiques de la pile SOFC [6, 8 , 9]

I.7.3.Pile à combustible à carbonate fondu (MCFC) :

Utilise un électrolyte liquide, généralement du carbonate de potassium ou de lithium fondu, qui fonctionne à des températures élevées. Elles sont adaptées à la cogénération et aux applications stationnaires.

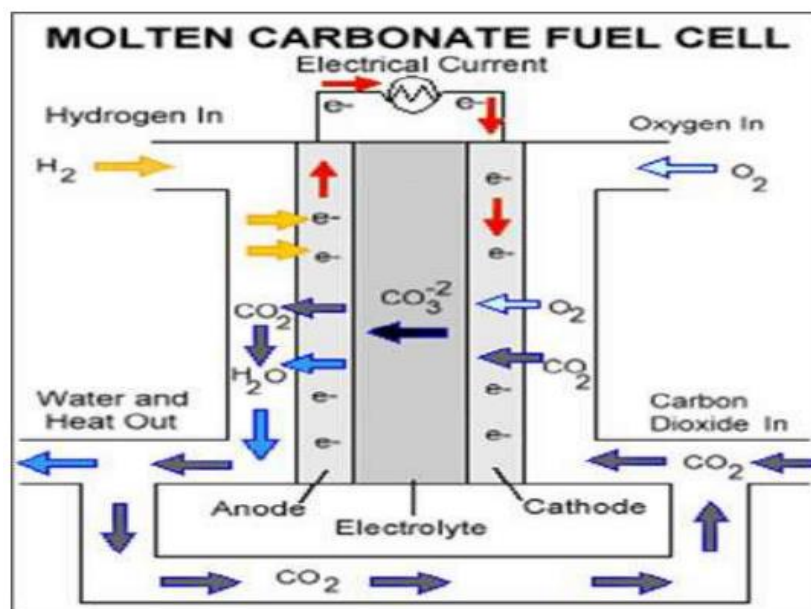


Figure I.7 : Schéma de principe d'une MCFC.[6]

I.7.3.1 Caractéristiques de pile MCFC :

Les caractéristiques et performances de la pile à combustible à carbonate fondu sont représentées dans le tableau suivant :

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Modèle	MCFC
Combustible (carburant)	H ₂ Pur, CH ₄ , biomasse
comburant	O ₂
Electrolyte	Sels fondus liquide, potassium
Electrode	Nickel
Température de fonctionnement	600-660°C
Puissance	50 Kw-10Mw
réaction	Anode $H_2 + (CO_3)^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$
	Cathode: $CO_2 + 2 e^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow (CO_3)^{-2}$
Rendement	50-60%
Durée de vie	20 000-30 000 heures

Tableau I.3: Caractéristiques de la pile MCFC. [6, 8 , 9]

I.7.4. Pile à combustible alcaline (AFC) :

Utilise une solution alcaline comme électrolyte, telle que l'hydroxyde de potassium ou de sodium. Elles ont été largement utilisées dans les missions spatiales en raison de leur fiabilité, mais elles sont moins courantes dans les applications commerciales en raison de leur température de fonctionnement relativement élevée

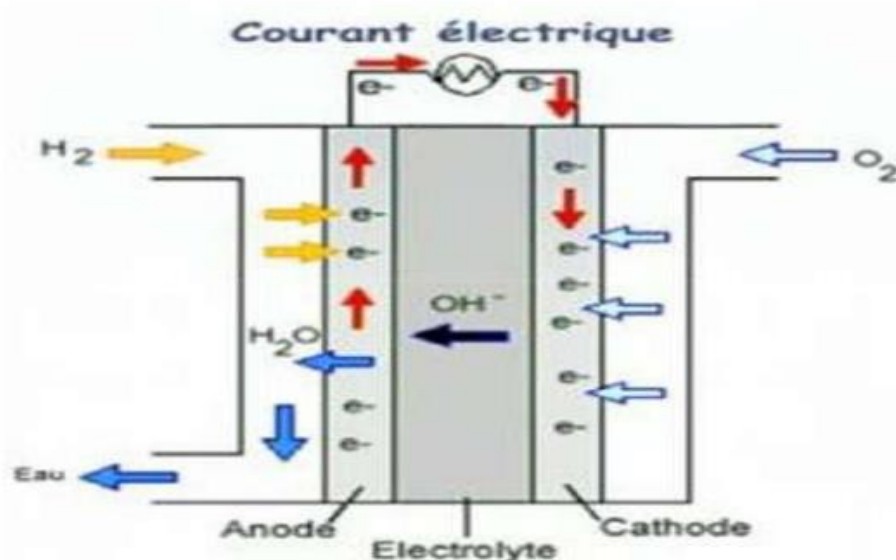


Figure I.8: Schéma de principe d'une pile AFC.[6]

I.7.4.1 Caractéristiques de pile :

Ce tableau représente les caractéristique et performances de pile à combustible alcaline :

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Modèle	AFC
Combustible (carburant)	H ₂ Pur
comburant	O ₂
Electrolyte	KOH
Electrode	Pt, Ag
Température de fonctionnement	25-260°C
Puissance	1w-10Kw
Réaction	Anode : $H_2 + 2 OH^- - Ni \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ Cathode: $\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + H_2O - Ag \rightarrow 2 OH^-$
Rendement	55-60%
Durée de vie	5000-8000 heures

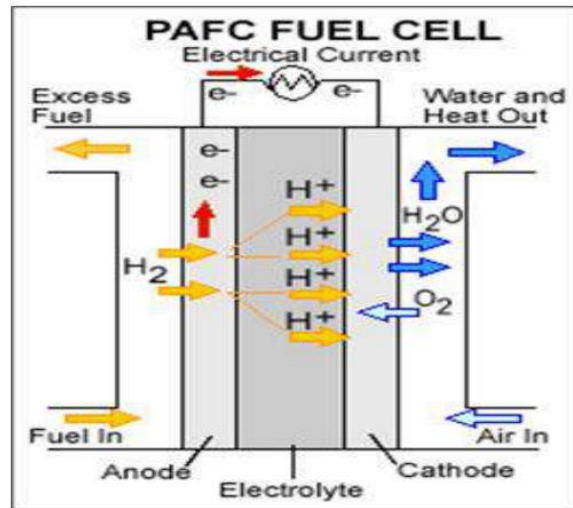
Tableau I.4: Caractéristiques d'une pile AFC [6, 8 , 9]

I.7 .5.Pile à acide phosphorique PAFC:

une pile à combustible à basse température fonctionnant entre 190 et 210 °C, utilise un électrolyte liquide. La présence d'une concentration élevée en acide améliore la conductivité de l'électrolyte tout en diminuant la corrosion des électrodes en carbone.[6]

La technologie de la pile à combustible à acide phosphorique est actuellement la plus avancée en matière de développement et de commercialisation. Elle est principalement utilisée dans des applications stationnaires, comme générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, d'une puissance variant entre 5 et 20 MW, ont été installées dans divers endroits à travers le monde afin de fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à des villages, des usines ou des hôpitaux.[10]

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles



10

Figure I.9 : Schéma de principe d'un PAFC [6]

Dans ce tableau, nous avons synthétisé les différentes caractéristiques et performances de la pile à combustible à acide phosphorique :

Modèle	PAFC
Combustible (carburant)	H ₂ Pur
comburant	O ₂
Electrolyte	H ₃ PO ₄ (Acide phosphorique concentré)
Electrode	Pt
Température de fonctionnement	150-210 °c
Puissance	1 w-300Kw
Réaction	Anode: H ₂ → 2 H ⁺ + 2 e ⁻ Cathode: $\frac{1}{2}$ O ₂ + 2 e ⁻ + 2 H ⁺ → H ₂ O
Rendement	36-45%
Durée de vie	30 000-60 000 heures

Tableau I.5: Caractéristiques de la pile PAFC [6, 8 , 9]

Pour plus d'explication, nous l'avons expliqué dans Le tableau I.6 :

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Température	Basse température				Haute température	
	60 – 90°C	90 – 120°C	50 – 250°C	160 – 220°C	600 – 700°C	800 – 1000°C
Electrolyte	Acide H ⁺	Acide H ⁺	Basique OH ⁻	Acide H ⁺	Basique CO ₃ ²⁻	Basique O ²⁻
	Polymère perfluoré (Solide)	Polymère (Solide)	Hydroxyde de Potassium (KOH) liquide	Acide phosphorique (Liquide)	Carbonate de lithium potassium fondu (Liquide)	Céramique solide
Catalyseur	platine	platine	Platine-Nickel	platine	Nickel et l'oxyde de Nickel	Cermet Nickel zircon
Combustible	Hydrogène pur ou reformé	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène (gaz naturel reformé)	Méthane Hydrogène ou gaz naturel	Hydrogène (gaz naturel)
Puissance	1 W à 250 KW	mW à 100 KW	10KW à 50 MW	100 KW à 200 MW	500 KW à 10 MW	1 KW à 10 MW
Rendement	30 – 50 %	20 – 30 %	40 – 60 %	36 – 45 %	50 – 60 %	50 – 70%
Application	Transport, portables, spatial	Mobile, transport	Spatial, transport	Transport, stationnaire	stationnaire	Stationnaire, transport

Tableau I .6 : Les différents types de pile à combustible

I.8. Domaines d'application :

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



Figure I- 10: Domaines d'application des piles à combustible

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

I.8.1.les applications transports :

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]

I.8.2.les 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, Etats-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]

I.8.3. 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]

I.8.4. 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

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

des PAC.[14]

I.8.5. Utilisation la pile à combustible dans différent capteur:

Ils y a plusieurs capteurs qu'utilise la pile à combustible comme une source d'énergie

quelque types :

Capteurs de terrains :

Plusieurs types de capteurs existent ; ils sont développés notamment dans du PNIR biofilms

(pôle national de recherche a implantation régionale).

Capteurs électrochimiques :

Le principe repose sur la mesure ampérométrique du flux de matière d'une espèce électro-active, l'oxygène dissous ou un indicateur électrochimique spécifique, au niveau de la surface de l'électrode. Le bio film en se développant sur la surface de l'électrode. Provoque la diminution du flux de matière.

Capteurs optiques :

Ils reposent sur plusieurs principes :

Spectroscopie infrarouge atténuée a réflexion totale.

Analyse de la diffusion multiple de la lumière par les agrégats qui permet de déterminer leur dimension fractale.

Capteurs biologiques :

Il s'agit d'utiliser les possibilités de la biologie moléculaire en immobilisant des anticorps et /ou des sondes nucléiques [15].

Les piles à combustible offrent plusieurs avantages significatifs, dépendant du type de pile considéré et de son application spécifique. Parmi les avantages les plus notables figurent un rendement énergétique élevé, dépassant souvent les 50 %, comparé aux moteurs à combustion interne. La conversion efficace de l'énergie en électricité, avec une émission réduite de chaleur et de vapeur d'eau, est particulièrement avantageuse pour les applications domestiques, permettant non seulement la production d'électricité mais également de l'eau chaude pour le chauffage, augmentant ainsi l'efficacité globale jusqu'à 80-90%. De plus, les

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

piles à combustible offrent une protection environnementale significative, réduisant les émissions de monoxyde de carbone de près de 99 % par rapport aux véhicules à essence, et elles sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion traditionnels. Leur capacité de modulabilité, leur fonctionnement silencieux et leur adaptabilité à différentes tailles renforcent leur attrait dans diverses applications.

Cependant, les inconvénients des piles à combustible sont souvent liés à leur stade de développement. Les coûts élevés de production et de maintenance, en raison notamment de l'utilisation de matériaux coûteux tels que le platine dans les électrodes, ainsi que le poids et le volume relativement importants des piles, posent des défis significatifs. De plus, la durée de vie des piles reste une question ouverte, avec des estimations variables selon les applications. Le manque d'infrastructures pour l'approvisionnement en carburant, comme l'hydrogène ou le méthane, constitue également un obstacle majeur, nécessitant le développement de systèmes de production, de transport et de distribution adaptés. Enfin, la commercialisation des piles à combustible nécessitera un investissement préalable dans ces infrastructures, ce qui pose des défis supplémentaires à leur adoption généralisée.

I.9. LA PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM :

Parmi toutes les familles existantes, la pile à combustible de type PEM suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs des piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables.

Nous ne nous intéresserons qu'à la pile à combustible de type PEM, parce que cette technologie semble effectivement être la plus proche de la commercialisation dans le domaine du transport. En comparaison avec d'autres types des piles à combustibles, la pile de PEM a plusieurs caractéristiques attractives comme :

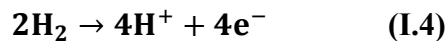
- Densité de puissance plus élevée ;
- Fort rendement de transformation d'énergie chimique en énergie électrique ;
- Basses températures, rapide et facile à démarrer ;
- Polymère solide ce qui réduit les soucis liés à la construction, au transport et à la fiabilité ;
- Plus compacte et légère : une meilleure densité de puissance volumique ;
- Modulaire donc facile à installer.[16]

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

I.9.1 Principe de fonctionnement :

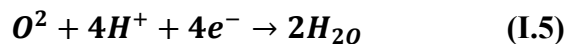
Une Pile à membrane échangeuse de protons PEMFC ou pile à combustible à électrolyte polymère PEFC est un convertisseur électrochimique transformant de l'énergie chimique d'un combustible, en énergie électrique à partir d'une réaction chimique oxydo-réduction (en présence de platine) à basse température (<100)

L'hydrogène est oxydé à l'anode pour donner des protons et des électrons selon la réaction d'oxydation suivante :



Les électrons sont prélevés du circuit électrique externe de la pile pour rejoindre la cathode alors que les protons sont migrés à travers la membrane, conducteur protonique imperméable aux électrons et isolant les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode où ils se combinent à l'oxygène et aux électrons pour production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon la réaction de réduction suivante :

À la cathode couple $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$ (l'électrode positive) :



La réaction globale

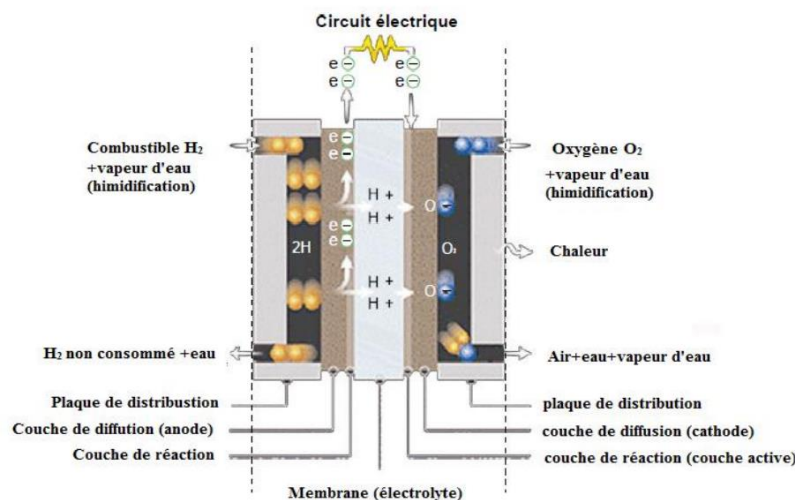


Figure I.11 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

La PAC de type PEM intéresse les industriels pour des applications stationnaires (centaines de KW) dont plusieurs prototypes sont actuellement en fonctionnement dans plusieurs pays du monde peuvent être au niveau de : l'une maison individuelle, d'un bâtiment. Les applications

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

pour le transport, tels que les automobiles, les autobus, les véhicules utilitaires, des scooters, des vélos et d'une communauté l'industrie du portables (jusqu'à 100kw) et transportables (de l'ordre de 100KW).



Figure I.12 : Quelques applications de pile à combustible, (a) La Hyundai ix35 FEFCV est le premier véhicule à pile à combustible produit en série, (b) Unité de Pile à combustible, (c) Pile à combustible au méthanol Ultracell.

I.9.2. Description de la cellule PEM :

La structure fondamentale d'une pile à combustible se compose d'une série d'électrodes poreuses empilées avec un électrolyte solide les séparant. De chaque côté de chaque électrode se trouvent deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires.

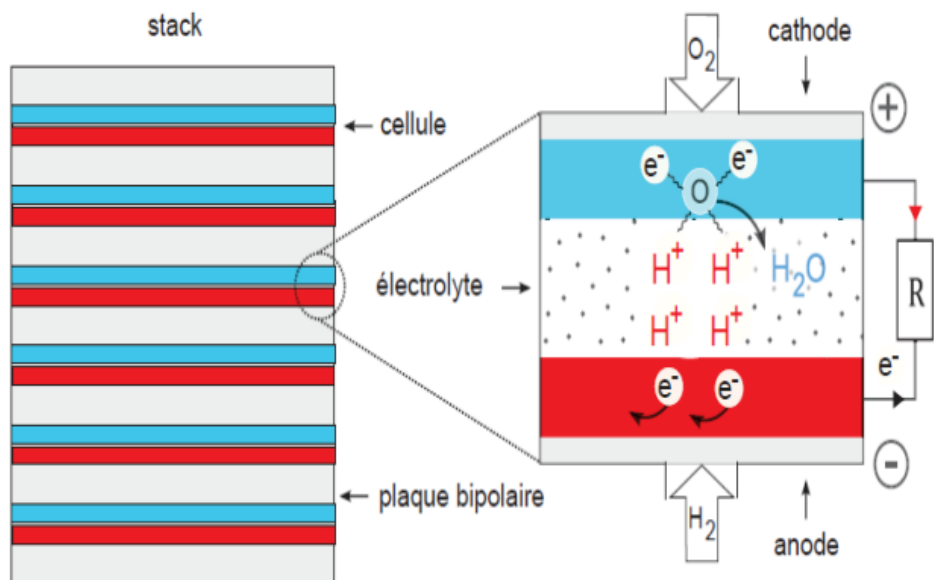


Figure I- 13 : Les différents éléments de pile PEM.

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Électrolyte :

Les membranes conductrices de protons sont au cœur des piles à combustible type PEMFC. Leur importance est évidente car ce sont leurs propriétés conductrices qui réguleront la recombinaison électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène, et d'où ses performances. Fonctionnement limité en chute ohmique à haute densité de courant, principalement lié à la membrane (la résistance de la membrane est liée au rapport de l'épaisseur à la conductivité protonique). En plus, ils doivent montrer de bonnes propriétés mécaniques et chimiques dans des conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz, maintenir une teneur en eau élevée à haute température puisque cela conditionne les propriétés de conduction.

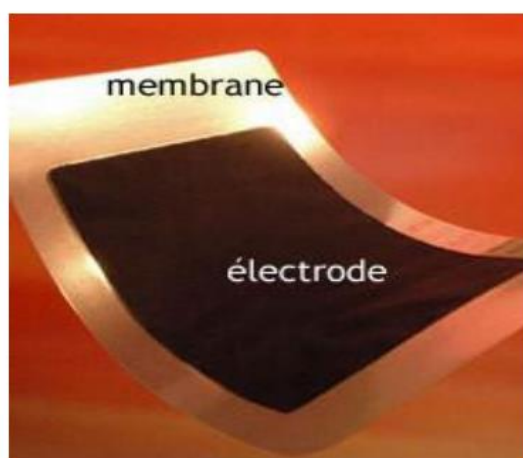


Figure I.14 : la membrane de pile à combustible

Les membranes ont des groupes acides dans leur structure polymère. Les échangeurs de protons (d'où leur nom Proton Exchange Membranes : PEM), généralement Terminer (SO_3^-H) ou $COOH$, permettent le transfert des protons de l'anode vers la cathode.[17]

Électrodes (anode/cathode) :

Les principales fonctions des électrodes sont :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques.

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Le catalyseur utilisé dans ce type de pile est du platine pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe). En effet, seul ce métal noble possède l'activité électro catalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène et peut, de plus, résister durablement à la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. La teneur en platine varie entre 0,01 et 1 mg/cm² d'électrode.

Ces électrodes sont réalisées par dépôt, sur un tissu de carbone conducteur ou sur un feutre, de très petites particules de platine (2 à 3 nanomètres supportées sur des poudres de carbone), de particules de PTFE et d'électrolyte polymère liquide. Elles peuvent être réalisées en plusieurs couches laminées.

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires.[17]

Catalyseur :

Les catalyseurs sont utilisés pour faciliter, accélérer et augmenter l'efficacité des réactions électrochimiques, mais ne sont pas consommés dans le procédé. Le catalyseur est déposé sur la surface de chaque électrode en contact avec l'électrolyte, ainsi qu'un liant, qui peut être hydrophobe pour faciliter le drainage de l'eau ou hydrophile pour augmenter le contact avec l'électrolyte. [18]

L'anode utilise un mélange platine/ruthénium et la cathode utilise du platine seul

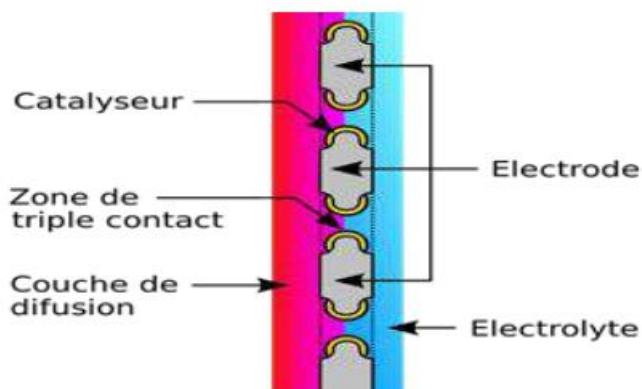


Figure I.15 : Catalyseur du côté anode.[18]

Couche de diffusion de gaz :

Il est fabriqué en fibre de carbone ou en non-tissé pressé, d'une épaisseur comprise entre 0,2 et 0,4 mm et d'une porosité élevée.

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

Ses fonctions sont :

- ♣ Assurer la transition des gaz vers le catalyseur et l'électrolyte.
- ♣ Fournir un soutien mécanique au groupement membrane-électrode/catalyseur.
- ♣ Garantir la circulation du courant produit vers les électrodes.
- ♣ Permettre l'évacuation de l'eau formée.
- ♣ Éliminer la chaleur résultant par les réactions.[18]

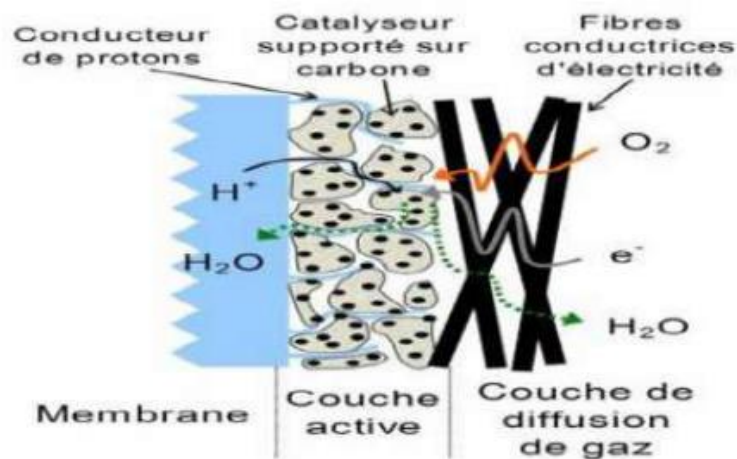


Figure I.16 : Couche de diffusion de gaz.[18]

Les plaques bipolaires :

Les plaques bipolaires sont en contact avec la surface des électrodes et permettent sur toute la surface de l'électrode :

- Collection d'électrons (du courant).
- Distribution et séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- L'évacuation des produits formés (l'eau à l'anode).

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

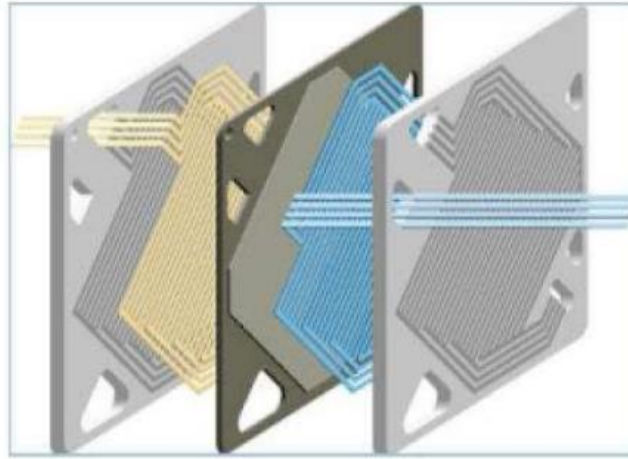


Figure I- 17 : Plaque bipolaire

Par conséquent, le matériau de la plaque bipolaire doit avoir une certaine conductivité Électricité suffisante (supérieure à 10 siemens/cm), étanchéité à l'air supérieure à Membrane échangeuse de protons et bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides Présent dans le noyau cellulaire (eau, acide, oxygène...).

La plaque la plus courante est en graphite avec des canaux de distribution Le gaz est obtenu par usinage. Ces plaques sont disponibles dans le marché, mais le prix très élevé, principalement en raison de l'étape de transformation, il n'est donc pas envisageable applications industrielles. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été développés:

- Plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques utiliser des charges (charbon, graphite, etc.) dispersées dans des matériaux thermoplastiques ou Thermodurcissable. Ces charges rendront les plaques bipolaires conductrices bonne résistance mécanique requise pour captation de courant et liants polymères assemblez différents éléments. Le principal avantage est le faible coût Les matériaux de base, en revanche, les canaux de distribution peuvent Obtenu directement par moulage du polymère chargé sur la cavité, sans nécessiter d'étapes d'usinage ultérieures.
- Plaques bipolaires à base de métaux et d'alliages, notamment d'acier Antirouille. Ils possèdent un ensemble de propriétés (résistance mécanique, étanchéité, Conductivité, formabilité et méthode d'assemblage production de masse), ce qui en fait des candidats de choix pour la conception et la production une plaque bipolaire compacte, légère et peu coûteuse. Leur densité est supérieure à Le graphite oblige à les utiliser sous forme de flocons, faciles à passer estampillage. A ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température Grâce

Chapitre I : état de l'art sur les piles à combustibles

à la circulation du fluide, il est possible de s'assurer précisément que le module est en fonctionnement refroidissement interne.[17]

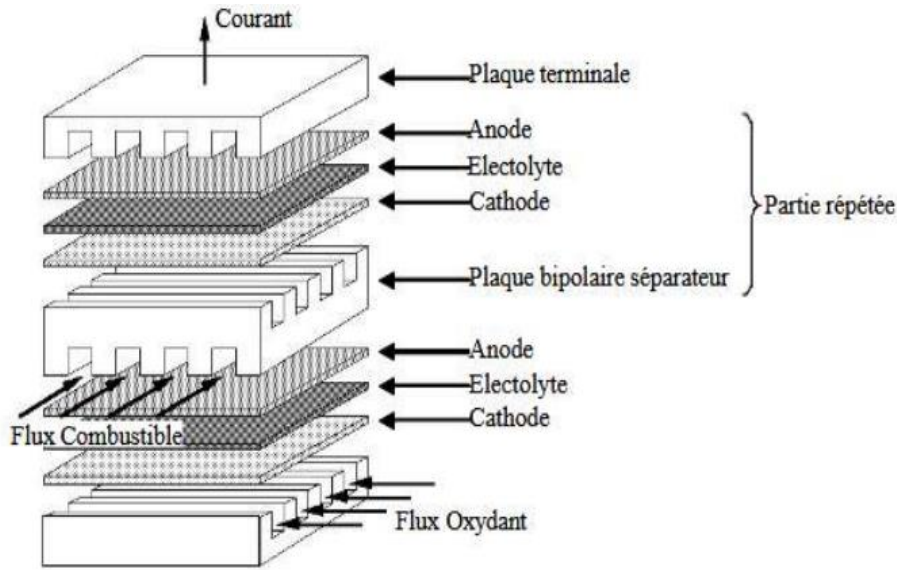


Figure I.18 : Structure d'un empilement de cellule PEMFC [17]

I.10 Conclusion :

La pile à combustible est une technologie fascinante qui repose sur l'utilisation de l'hydrogène comme combustible principal. En effet, dans une pile à combustible, l'hydrogène est combiné avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau comme seuls sous-produits. Cette réaction chimique, qui se déroule de manière silencieuse et sans émissions nocives, offre une alternative propre et efficace aux moteurs à combustion traditionnels. Ainsi, l'hydrogène joue un rôle essentiel dans le fonctionnement et l'avenir prometteur des piles à combustible, offrant une solution viable pour une énergie plus propre et durable .

Dans le chapitre suivant on va expliquerons le concept de l'hydrogène et ses propriétés .

Chapitre II : concept de l'hydrogène

Chapitre II : concept de l'hydrogène

Chapitre II : concept de l'hydrogène

II.1 .Introduction :

L'hydrogène est le Premier élément dans la table périodique. Dans la condition normale c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques, H₂. L'atome d'hydrogène, le symbole H, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Son nombre atomique est 1 et son poids atomique 1, 00797. Il y a trois isotopes d'hydrogène : le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99.98% de l'élément normal ; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2%, et tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature. Il peut aussi être artificiellement produit par diverses réactions nucléaires, nous découvrirons certaines propriétés de l'hydrogène. L'hydrogène se distingue par ses qualités remarquables :

il représente le combustible le plus énergétique par unité de masse, surpassant le gaz naturel dans ce domaine de 2,2 fois.

il est non toxique et non polluant, ce qui en fait un choix sécuritaire crucial pour les installations.

légère, combinée à une vitesse de diffusion quatre fois supérieure à celle du gaz naturel, contribue à renforcer la sûreté et la sécurité des installations,

limitant ainsi les risques de détonation dans un environnement ouvert.

Cependant, malgré ses avantages, l'hydrogène présente également des défauts notables. Tout d'abord, bien qu'il soit abondant sur Terre sous forme atomique, sa rareté sous forme moléculaire nécessite sa fabrication, ce qui pose des défis en termes de densité énergétique volumique, sept fois plus faible que celle du gaz naturel. De plus, son caractère inodore, incolore et la flamme invisible qu'il produit représentent des obstacles à sa détection naturelle, augmentant ainsi les risques potentiels.

II.1.1 Différents procédés de production d'hydrogène :

Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus abondant dans l'univers, il n'existe pas à l'état naturel sur Terre, mais se trouve généralement lié à d'autres atomes tels que le carbone, l'oxygène et l'azote. Pour l'exploiter, il est nécessaire de le produire en extrayant l'atome d'hydrogène des composés qui en contiennent, principalement l'eau, les espèces biologiques et les combustibles fossiles.

Chapitre II : concept de l'hydrogène

II.2. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures :

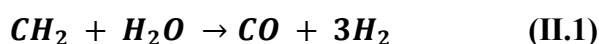
II.2.1. Produit de l'hydrogène à partir la vapeur formage :

La production actuelle d'hydrogène repose essentiellement sur le vapocraquage du gaz naturel ou vapeur formage.

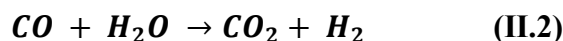
Aujourd'hui, c'est le cas de 95% de l'hydrogène produit. Le procédé le plus courant est le vapeur formage de Méthane :

On fait réagir le gaz naturel sur de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 900°C et à une pression de 20 à 30 bar, et à $\Delta H=206$ KJ/mol, en présence d'un catalyseur au nickel.

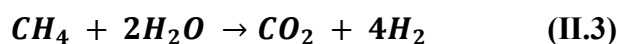
Après la réaction :



On obtient un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le processus continue par la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone CO_2 et hydrogène additionnel à une température de 200 à 400°C et à $\Delta H=-41$ KJ/mol, selon la réaction :



Au total, pour une molécule de CH_4 , on obtient par ce procédé quatre molécules d'hydrogène à $\Delta H=165$ KJ/mol, selon la réaction :



II.2.2. Produit de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle :

L'oxydation partielle d'hydrocarbures est la deuxième méthode utilisée pour produire de l'hydrogène, via la production de gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène).

Cette méthode s'applique aux résidus pétroliers lourds ainsi qu'au charbon. Elle met en œuvre des températures très élevées (1200 à 1500°C), des pressions importantes (de 20 à 90 bar ou plus), de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Ces conditions techniques difficiles et coûteuses se justifient par le prix de la matière première peu élevé.

II.2.3. Produit de l'hydrogène à partir la gazéification :

Chapitre II : concept de l'hydrogène

Dans le procédé de gazéification, du charbon de bois est brûlé dans un réacteur. À très haute température (entre 1200 et 1500°C), les gaz libérés se reforment pour donner du H_2 et du monoxyde de carbone (CO).

II.2.4 Produit de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique) :

Les algues seraient une autre possibilité pour produire de l'hydrogène. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène est combiné au CO_2 pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans l'atmosphère. On peut espérer que ce type de procédé pourra être techniquement au point d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans.[19]

II.2.5 Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire :

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO_2 est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- L'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire
- Des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale Nucléaire.

Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur : de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis.[20]

II.2.6 Technique de production de l'hydrogène solaire :

La production d'hydrogène à partir l'énergie solaire dépend d'électrolyse de l'eau. Ce qui se produit est le Décomposer les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène, en utilisant le courant électrique produit par un panneau photovoltaïque. L'hydrogène propre peut utiliser comme un carburant, ou pour produire de l'énergie électrique ou puis stocker.[21]

La production d'hydrogène par l'électrolyse connectée au panneau photovoltaïque s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement.

Chapitre II : concept de l'hydrogène

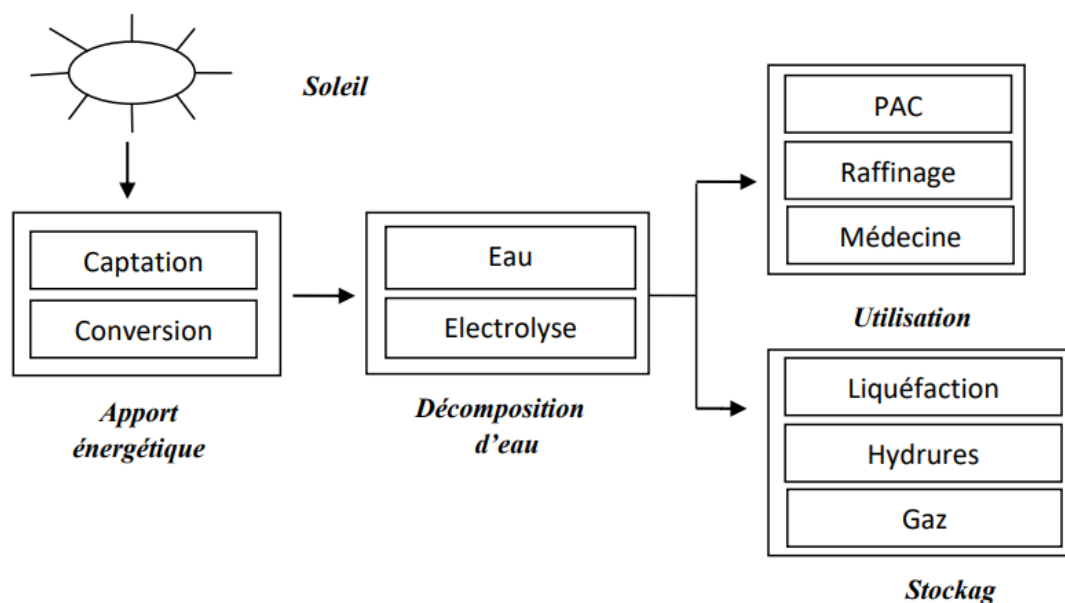


Fig. (II.1) Système synoptique de production de l'hydrogène solaire

II.3 STOCKAGE DE L'HYDROGENE :

Une fois produit, l'hydrogène, doit être stocké pour pouvoir ensuite être distribué. Le principal obstacle lié au stockage de l'hydrogène est lié au fait qu'il soit le plus léger élément du tableau périodique.

L'hydrogène est l'élément qui contient le plus d'énergie d'un point de vue massique, mais le moins d'un point de vue volumique ($89 \text{ g d'H}_2/\text{m}^3$ à 273 K). Il peut être stocké de trois manières différentes : gazeux, liquide ou solide.

Ces trois méthodes de stockage diffèrent par leurs densités volumiques et gravimétriques et aussi par leurs aspects sécuritaires et leurs coûts.[22]

II.3.1 STOCKAGE SOUS PRESSION :

Le stockage sous forme comprimée est le plus couramment utilisé actuellement. L'hydrogène est aujourd'hui stocké sous des pressions de 200 à 700 bars.

Toutefois la compression de l'hydrogène est consommatrice d'énergie ($\approx 10\%$ de l'énergie de combustion de l'hydrogène). L'hydrogène peut être stocké dans des petites bouteilles de 10 L et jusqu'à de grands réservoirs de 10 000 L. Les réservoirs doivent être conçus avec un métal résistant à la corrosion et aux contraintes mécaniques. A une température de 293 K , la densité de l'hydrogène à l'état gazeux, une pression et le volume occupé dans le tableau suivant :

Chapitre II : concept de l'hydrogène

Densité de l'hydrogène à l'état gazeux	Pression	Volume occupé
0,0827 kg/m ³	1 bar	12091 L
14,49 kg/m ³	200 bars	69 L
23,66 kg/m ³	350 bars	42 L
38,60 kg/m ³	700 bars	25,75 L

Tableau II-1 : la densité de l'hydrogène à l'état gazeux avec la pression et le volume occupé.

L'intérêt de stocker l'hydrogène sous pression réside dans le fait que l'on possède une grande maîtrise de la technologie et que le remplissage est très rapide. Dans le même temps, cette technique présente des inconvénients comme : la faible densité volumétrique et la nécessité de concevoir des réservoirs résistants aux chocs et adaptables aux véhicules pour les applications embarquées. Enfin la technologie de tous les auxiliaires (les vannes, les capteurs, les détendeurs,...) doit être adaptée à ces hautes pressions.

Notons toutefois que c'est ce mode de stockage qui est utilisé actuellement pour la plupart des démonstrations grand public.[22]

II.3.2. STOCKAGE LIQUIDE :

Pour stocker l'hydrogène à l'état liquide, on le refroidit jusqu'à 20 K (-253°C). La technologie est maîtrisée, notamment pour des applications spatiales ou de stockage stationnaire (hôpitaux, station-service). La capacité volumique est certes importante mais la très faible température reste le problème majeur de cette technologie. De plus, l'énergie de liquéfaction est élevée.

Cette technologie se prête plus au stockage stationnaire pour lequel de grands moyens d'isolation thermique peuvent être mis en œuvre. En revanche, dans le cas des applications mobiles où l'isolation thermique est limitée, le réchauffement du réservoir conduit à l'évaporation de l'hydrogène qui doit alors être libéré afin de limiter la pression interne dans le réservoir. L'utilisation d'un véhicule hybride (essence/hydrogène) permet alors d'aller faire le plein d'hydrogène pour un long trajet.[23]

II.3.3. STOCKAGE SOUS FORME D'HYDRURES :

Le stockage sous forme solide de l'hydrogène décrit généralement l'absorption ou l'adsorption de l'hydrogène par un matériau. Certains composés, plus connus sous le nom d'hydrures, sont capables de l'absorber de façon réversible. Il existe aussi des substances

Chapitre II : concept de l'hydrogène

carbonées susceptibles d'adsorber, donc de fixer en surface, l'hydrogène. Des sauts technologiques sont espérés dans ce domaine.

Le terme hydrure couvre une grande variété de matériaux qui peuvent être décrits comme des composés contenant des liaisons métal-hydrogène. Les hydrures peuvent être divisés en trois groupes, selon la nature de la liaison métal-hydrogène : ionique, covalente et métallique. Cette nature dépendra de la position de l'élément hôte dans la classification périodique. Les alcalins et les alcalino-terreux forment des hydrures à liaison ionique possédant des liaisons très électro-polaires qui contribuent à les rendre denses et très stables. Les métaux à droite du groupe VIII forment des hydrures à liaison covalente et donc peu électro polaires, peu stables et peu denses.

Des métaux tels que le magnésium peut former des hydrures avec deux types de liaison : covalente et ionique. Les métaux de transition forment des hydrures à liaison métallique. Ces hydrures ont fait l'objet de très nombreux travaux dans le cadre du stockage de l'hydrogène, car ce sont les seuls à être réversibles.

L'hydratation et la déshydratation de la plupart des métaux se font selon une réaction directe entre le métal et l'hydrogène [24] :



Le stockage sous forme d'hydrure présente deux avantages principaux: la sûreté puisque les pressions mises en œuvre peuvent être faibles (souvent inférieures à la pression atmosphérique) et la compacité puisque les hydrures métalliques possèdent des capacités volumiques d'absorption élevées. A titre d'exemple, 100 g de palladium (soit $8,3 \text{ m}^3$) permettent de stocker l'équivalent d'un réservoir contenant 7L d'hydrogène rempli à la pression atmosphérique.

L'inconvénient majeur de ce type de stockage est la faible capacité massique d'absorption pour la plupart des hydrures. Celle-ci est généralement comprise entre 0,5 et 2 % ce qui est loin des 6 % requis pour les applications automobiles. De plus, le coût des hydrures est trop élevé.

II.4 Utilisation de l'hydrogène pour la production de l'énergie électrique:

L'hydrogène, grâce à sa combustion très énergétique, possède une masse plus de deux fois supérieure à celle du gaz naturel, ce qui en fait un combustible de choix pour la production de chaleur et d'énergie mécanique sans générer d'autres résidus que de l'eau.

Chapitre II : concept de l'hydrogène

De plus, il peut être utilisé dans des réactions électrochimiques, telles que l'électrolyse de l'eau, pour se combiner à l'oxygène et produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau.

Cette caractéristique permet de stocker l'hydrogène aussi longtemps que nécessaire et de le convertir en électricité via une pile à combustible, que ce soit pour des applications stationnaires (comme dans l'habitat ou l'industrie) ou pour alimenter des véhicules électriques ou à moteur thermique.

Dans les deux cas, que ce soit par combustion directe ou par utilisation dans une pile à combustible, le seul rejet est de l'eau, ce qui répond pleinement au critère essentiel des énergies renouvelables : ne pas polluer ni émettre de gaz à effet de serre.

II.5 PRODUCTION DE L'HYDROGENE A PARTIR DE L'ELECTROLYSE :

La production d'hydrogène par la technique d'électrolyse est actuellement très intéressante, car elle utilise une source d'énergie non productrice de gaz à effet de serre et renouvelable (module photovoltaïque). De plus, elle reste la technique de base pour fournir aux applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté, notamment l'industrie des semi-conducteurs et de l'alimentaire.

II.5.1 Les composants des électrolyseurs :

Les électrolyseurs comportent plusieurs cellules ; de telles cellules peuvent être placées de différentes manières (en série ou en parallèle) du moment que la configuration interne (composants) ne varie pas d'une cellule à l'autre. Les principales composantes sont :

- Les électrodes : est composée généralement de l'anode et de La cathode est sont généralement composées a base du composants électrochimiques.
- L'électrolyte : une solution électrochimique ou bien un solide utilise normalement pour être un passage des différentes opérations de décompositions de l'eau.
- La membrane : des plusieurs matières sont généralement utilisés comme membrane.

Les premiers électrolyseurs diffèrent de ceux d'aujourd'hui dans la construction de la membrane ou bien dans les types des matières utilisées.[25]

II.5.2 Principe de fonctionnement l'électrolyse :

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique, qui crée un champ électrique orienté dans lequel les ions

Chapitre II : concept de l'hydrogène

se mettent en mouvement (les cations se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode). Cette tension dépend essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de la réaction, ce potentiel théorique de la décomposition est de 1,481 V à 298 K mais les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1,7 à 2,1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85%, [26]

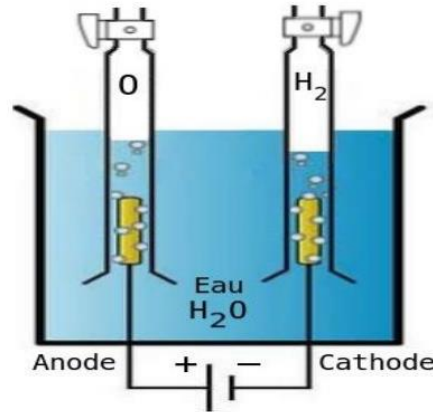
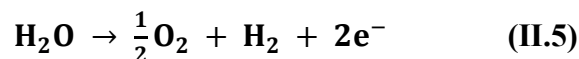


Fig. (II.2) L'électrolyse de l'eau

Quand la tension appliquée est suffisante des réactions se produisent aux interfaces électrolyte électrodes :

À l'anode : Oxydation avec émission d'électrons

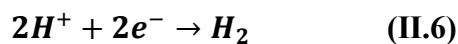
L'anode est l'électrode positive. Le processus qui s'y produit est l'oxydation : la molécule subit une perte en électrons. Chaque molécule se divise en oxygène (O_2) et produit un cation hydrogène (H^+) en libérant des électrons qui se déplacent dans le circuit vers la cathode.



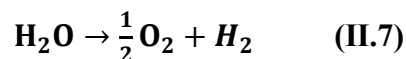
À la cathode : Réduction avec capture d'électrons

La cathode est l'électrode négative. Le processus qui s'y produit est la réduction : les protons, passent à travers la membrane, se recombinent avec les électrons pour donner l'hydrogène.

Réaction de la réduction à la cathode :



La réaction globale est :



II.5.3. Les Différentes Technologies D'électrolyseurs :

Chapitre II : concept de l'hydrogène

Il existe à ce jour trois types d'électrolyse dont la maturation va de la recherche en laboratoire à la commercialisation. Leur principale différence réside dans l'électrolyte utilisé.

-L'électrolyse alcaline :

L'électrolyse alcaline constitue la solution de production d'hydrogène la plus utilisée de nos jours, et propose un coût d'investissement faible en comparaison avec les autres technologies d'électrolyse, notamment grâce à la simplicité des matériaux. Bénéficiant déjà de rendements de 68 à 77%, l'électrolyse alcaline possède une marge d'amélioration limitée et une faible réactivité aux variations de puissance. Si ce dernier aspect est problématique pour un couplage avec des énergies intermittentes, il présente peu d'inconvénients pour la production d'hydrogène à partir de l'hydroélectricité. Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions Hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+) Le principe de ce type d'électrolyse est représenté sur la figure I .12 ci-dessus : [27]

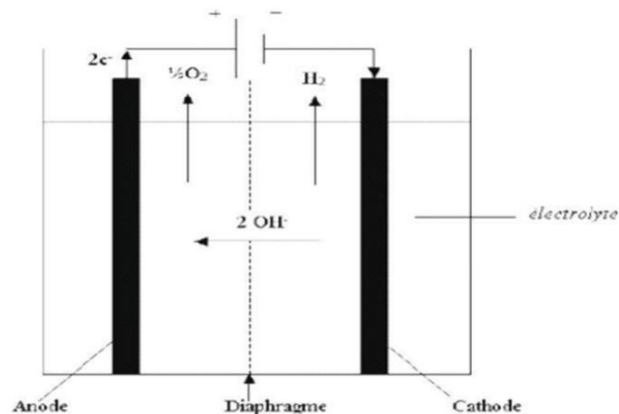
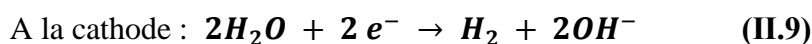
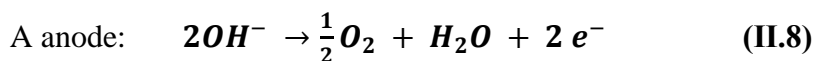


Figure . II.3: Principe de l'électrolyse alcaline.

Les réactions sur les électrodes sont les suivantes :



- Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane) :

L'électrolyse acide se distingue de la précédente par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons. Les avantages de cette technologie sont l'absence d'électrolyte liquide, la compacité, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion, des performances sensiblement supérieures.

Chapitre II : concept de l'hydrogène

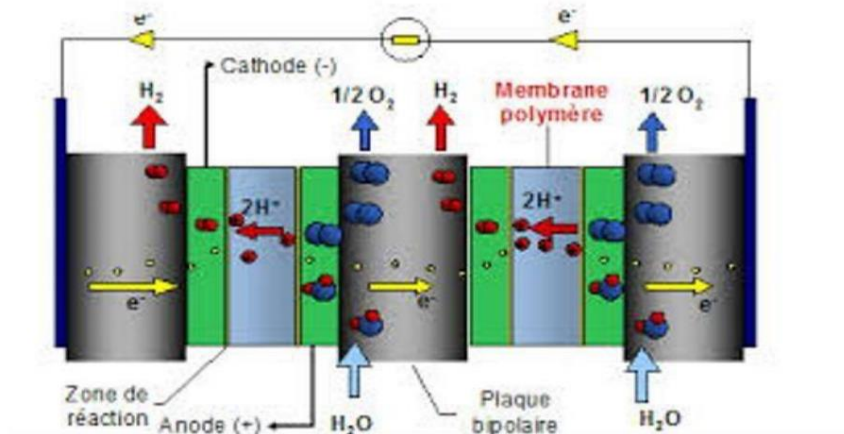


Figure II.4: L'électrolyse PEM

-L'électrolyse à haute température :

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer une conduction d'ions su peroxydes O^{2-} . L'augmentation de la température lors d'une réaction d'électrolyse permet un apport d'énergie supplémentaire sans que l'énergie nécessaire à la décomposition moléculaire augmente.

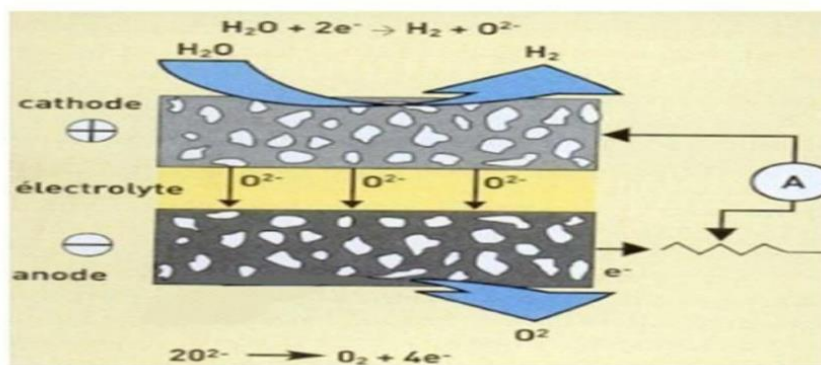


Figure II.5: L'électrolyse SOFC

Electrolyseur de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEM)

Il est le plus populaire et la plupart des électrolyseurs modernes sont construits selon ce concept. L'électrolyseur PEM est un dispositif électrochimique qui permet de transformer directement l'énergie électrique en énergie chimique hydrogène et oxygène en partant d'un passage électrochimique comme tous les autres électrolyseurs avec des différences dans le concept la

Chapitre II : concept de l'hydrogène

composition et le principe de fonctionnement. Leur électrolyte est une membrane solide permettant la conduction des ions. Donc ces électrolyseurs utilisent le concept bipolaire. Le platine est le catalyseur le plus utilisé pour ces électrolyseurs. Un catalyseur est appliqué de chaque côté de la membrane. Il est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène (faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène), et convertir l'énergie électrique en énergie chimique. L'électrolyse de l'eau en milieu acide a lieu au sein d'un système électrochimique : la cellule électrochimique. Les différents éléments constituant cette cellule sont présentés sur le Figure (I-15).

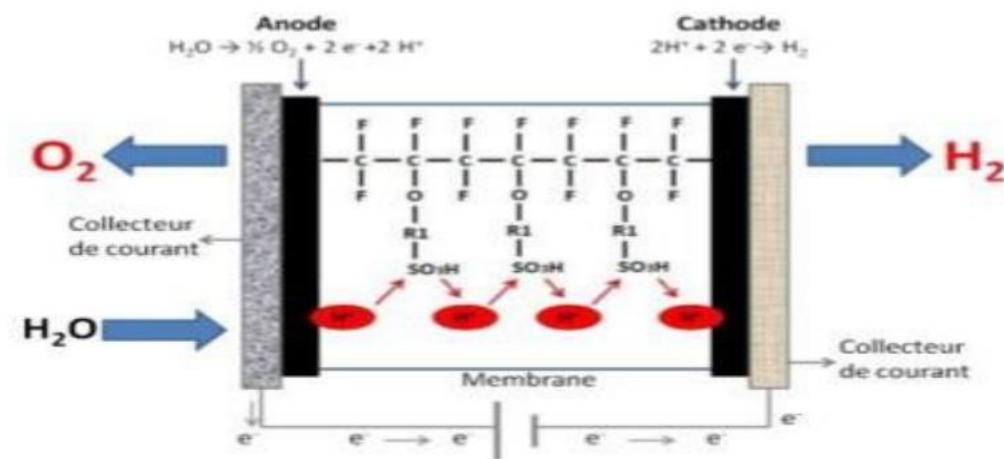


Figure II.6:Schéma de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse PEM.

Cette cellule est plus communément appelé cellule d'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) mais peut aussi être désignée par le terme de cellule SPE (Solid Polymère Electrolyte). La cellule est composée de deux électrodes (l'anode et la cathode), d'une membrane et de deux collecteurs de courant. Les différents éléments composant la cellule vont être détaillés après.

-L'électrolyte :

Dans l'électrolyseur de type PEM la membrane polymère permet aux ions H⁺ de passer du côté anode de la membrane au côté cathode ; elle sépare également les gaz hydrogène et oxygène. L'hydrogène est produit à l'anode et l'oxygène est produit à la cathode. Le polymère le plus souvent utilisé comme matériau constitutif de la membrane est le NafionTM de Du Pont. Un catalyseur de platine est appliqué de chaque côté de la membrane afin de faciliter la dissociation des molécules d'eau en hydrogène et oxygène.

-Le catalyseur :

Chapitre II : concept de l'hydrogène

Afin de convertir l'énergie électrique en énergie chimique, un catalyseur est nécessaire pour décomposer l'eau en oxygène et hydrogène. Le platine (Pt) est le catalyseur le plus commun pour cette réaction. Un catalyseur meilleur marché qui fonctionnerait aussi bien que le platine serait le bienvenu, cependant celui-ci reste à inventer. Si des catalyseurs moins efficaces sont utilisés sur la cathode, il se produira une plus grande perte de tension. L'efficacité énergétique de l'électrolyse de l'eau se situe entre 50 et 80 %, mais ces valeurs ne prennent en compte que le rendement lors de la conversion d'énergie électrique en énergie chimique.

-La membrane :

Est l'élément le plus nécessaire à toute l'opération d'électrolyse PEM car il est le moyen de la conduction protonique et des opérations électrochimique de l'électrolyseur. Actuellement, la membrane la plus utilisée est la membrane dite commercialisée et Fabriquée par Du Pont de Nemours.

.Applications de l'électrolyseur PEM

Les applications des électrolyseurs PEM sont principalement la génération d'hydrogène sur des sites de stockage alimentant des piles à combustible. Ces systèmes peuvent alors servir d'énergie de secours pour des stations de télécommunications, des sites isolés (projet Myrte en Corse, Areva), ou pour des stations-service hydrogène alimentant de petites flottes de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible (ISE, Freiburg, Allemagne). Certains acteurs tels que CETH2 (Paris, France) sont principalement axés sur la production d'hydrogène ultra pur pour des applications médicales ou de recherche en laboratoire.

Conclusion :

L'hydrogène, élément le plus léger et le plus abondant de l'univers, joue un rôle fondamental tant dans les processus cosmiques que terrestres. Composé d'un seul proton et d'un seul électron, il forme la base des réactions de fusion nucléaire au cœur des étoiles, générant ainsi l'énergie stellaire. Sur Terre, ses applications industrielles sont vastes, allant de la production d'ammoniac pour les engrais à son utilisation comme réactif dans divers processus chimiques. En outre, l'hydrogène se positionne comme une solution prometteuse pour un futur énergétique durable, grâce à sa capacité à générer de l'énergie propre via les piles à combustible. Cependant, malgré son potentiel, des défis subsistent en matière de production, stockage et distribution, nécessitant des innovations technologiques et des infrastructures adaptées pour maximiser son utilisation.

Chapitre III :

MODELISATION ET SIMULATION DE LA
PILE A COMBUSTIBLE DU TYPE PEMFC

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

III.1 Introduction :

Aujourd'hui, les piles à combustible à membrane échangeuse de protons suscitent un grand intérêt parmi les chercheurs en raison de leurs nombreux avantages. Tout d'abord, ces piles ont la capacité de générer une quantité significative d'électricité, d'eau et de chaleur. De plus, les réactifs utilisés dans ces piles sont le dioxygène présent naturellement dans l'atmosphère et le dihydrogène, bien que ce dernier nécessite une production spécifique. Ainsi, la production de dihydrogène représente un défi majeur pour la mise en œuvre généralisée des piles à combustible.

Ce chapitre vise à introduire la modélisation mathématique des piles à combustible (PAC) et à fournir une description détaillée du banc d'essai ainsi que de ses performances. Nous commencerons par présenter les composants du banc d'essai ainsi que leur fonctionnement de manière exhaustive.

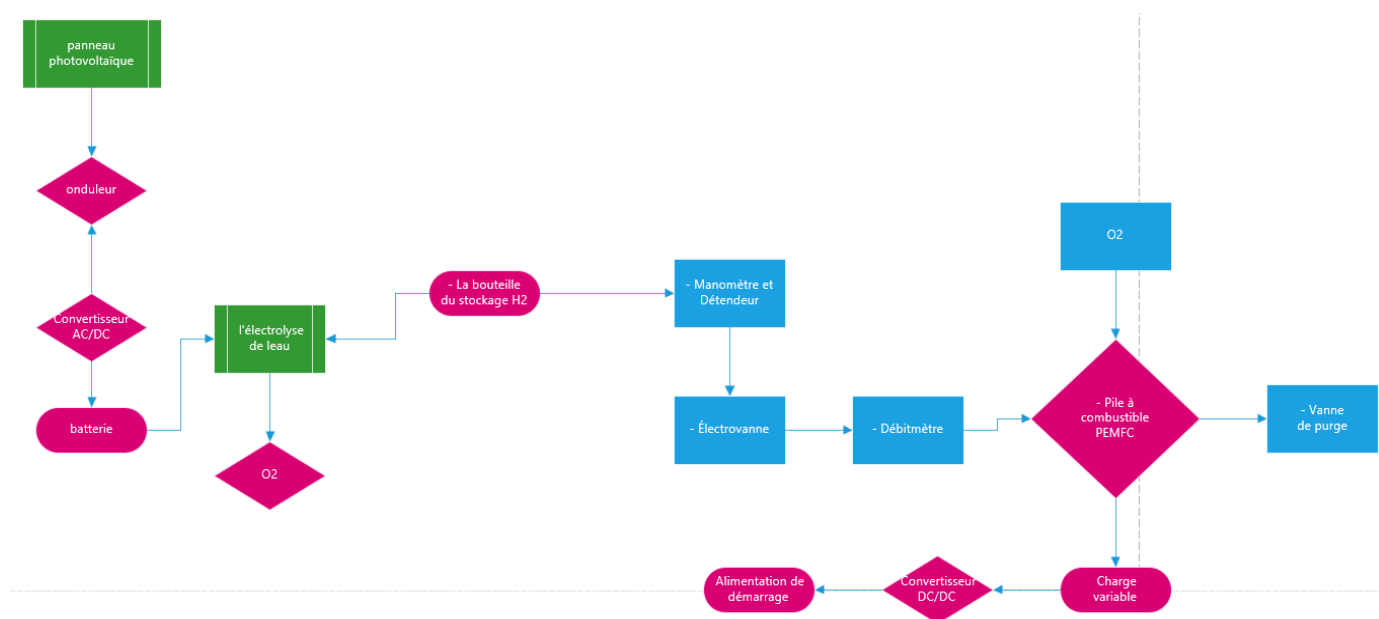


Figure III.1. schéma synoptique d'alimentation de PAC type PEMFC

Ensuite, nous tracerons les courbes caractéristiques (tension, courant et puissance) ainsi que les courbes d'influence. Enfin, nous aborderons les aspects liés aux rendements dans les piles à combustible et expliquerons les méthodes de calcul associées.

III.2 Modèles statiques

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Nous présenterons dans ce chapitre, les modèles statiques à électrodes non dissociées puis dissociées.[29] et modèle d'Amphlett et al

III.2.1 Modèle à électrodes non dissociées [29]

La tension d'une cellule PEM peut être donnée en statique par l'expression :

$$V_{cellule} = E_{théoriques} - \eta_{act} - R_{mem}I - \eta_{con} \quad (III.1)$$

Avec :

- $E_{théoriques}$: Potentiel théorique fonction de la température et de la pression,

- η_{act} : Pertes par activation,

- η_{con} : Pertes par diffusion,

- $R_{mem}I$: Pertes ohmiques principalement dues à la membrane.

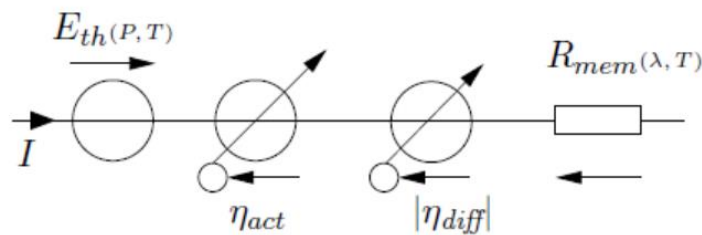


Figure III.1 Modèle statique circuit à électrodes non dissociées d'une cellule PEM.[29]

III.2.2 Modèle à électrodes dissociées :[29]

En dissociant les électrodes, la tension cellule peut s'exprimer par :

$$V_{cellule} = E_{théoriques_c} - E_{théoriques_A} - \eta_{act_c} - \eta_{act_A} - R_{mem}I - \eta_{con} \quad (III.2)$$

$E_{théoriques_c}$ Et $E_{théoriques_A}$: potentiels théoriques respectivement à la cathode et à l'anode, fonction de la température et de la pression

• η_{act_c} et η_{act_A} : Pertes par activation,

• η_{con} : Pertes par diffusion,

• $R_{mem}I$: Pertes ohmiques principalement dues à la membrane. Les pertes par diffusion et les pertes ohmiques dépendent des mêmes expressions que dans le modèle à électrodes non dissociées.

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

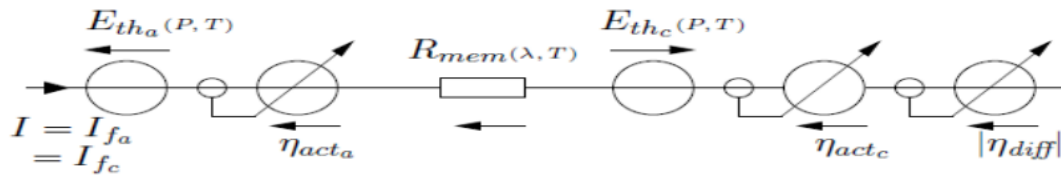


Figure III.2 Modèle statique circuit à électrodes dissociées d'une cellule PEM

III.2.3. Modèle d'Amphlett et al :

Le modèle doit permettre de tester différentes configurations ou choix des paramètres. Le modèle de stack de PàC retenu est celui présenté par (J.C.Amphlett et al .), ce modèle électrochimique semi-empirique simple et complet, peut être utilisé pour décrire le comportement dynamique d'un stack de PàC. Il permet de prendre en compte différents paramètres dont leurs définitions sont essentielles pour un bon résultat, la régulation des performances du stack en fonction de l'intensité de courant, et par conséquent décrire un comportement proche de la réalité. Le modèle présenté par Amphlett et al , qui est largement cité dans la littérature, est basé sur les équations de Nernst et de Tafel .[38] les paramètres physiques du système pris en compte sont :

Les pressions effectives de l'oxygène et de l'hydrogène ;

- la température au bord ;
- la concentration de l'oxygène ;
- la concentration de l'hydrogène.

. Le potentiel thermodynamique est défini par une équation de Nernst sous forme développée comme

$$E_{ners} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times [\ln(P_{H_2}) + 1/2 \ln(P_{O_2})]$$

Ou :

Quand le courant passe, une déviation du potentiel thermodynamique est due à des travaux d'électricité effectués par la cellule., l'expression de la tension d'une cellule unique est

$$V = E_{nerst} - \eta_{act} \times \eta_{ohm} \times \eta_{con}$$

III.3 MODELISATION

III.3.1 Débit d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Les débits d'entrée de l'hydrogène (\dot{m}_{H_2}), de l'oxygène (\dot{m}_{O_2}) et (\dot{m}_{H_2O}) sont donnés par l'équation suivante :

$$\dot{m}_{j,in} = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F \cdot U} \quad (III.3)$$

I : Courant électrique (A).

J : Représente l'élément (H_2O, O_2, H_2)

U : taux d'utilisation

F : constante de faraday.

N_0 : Nombre de cellules en série

III.3.2 La résistance interne[30]

L'équation de la résistance interne est donnée par

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 * 10^{-5} \cdot T + 8 * 10^{-5} \cdot I \quad (III.4)$$

III.3.3 Les pertes ohmique η_{ohmic}

La pile présente des pertes ohmiques, aussi bien dans l'électrolyte que dans les électrodes. Ces phénomènes sont généralement modélisés dans les approches par circuits électriques par des résistances constantes et linéaires Elles sont données par l'équation suivante. [31]

$$\eta_{ohmic} = I \cdot R_{int} \quad (III.5)$$

III.3.4 Pertes d'activation η_{act}

Les phénomènes d'activation engendrent des pertes. Dans la littérature, la modélisation des phénomènes d'activation par circuits électriques se fait généralement en utilisant la loi de Tael, dans laquelle ces pertes sont modélisées soit par une résistance non linéaire, soit par une diode.[31]

$$\eta_{act} = B * \text{Log}(C * I) \quad (III.6)$$

B : constante d'activation de tension

C : facteur d'échelle. m/s

I : Courant électrique (A).

III.3.5 Résistance d'activation R_a [30]

$$R_a = - \frac{\eta_{act}}{I} \quad (III.7)$$

III.3.6 La constante de modélisation K_r

C'est une constante utilisée durant les calculs pour simplifier l'écriture des équations, elle est

donnée par [30]: $K_r = \frac{N_0}{4 * F}$ (III.8)

III.3.7 Pression d'hydrogène P_{H_2}

La Pression d'hydrogène et d'oxygène consommée dans une pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, du courant et de la taille des électrodes et peut être déterminée selon les équations suivantes [32]:

$$pP_{H_2} = 0.5 \left(\frac{P_{H_2}}{e^{\frac{1.653 * XI}{T_K^{1.334}}}} \right) - P_{H_2O} \quad (III.9)$$

III.3.8 Pression d'oxygène P_{O_2}

La Pression d'oxygène consommé dans une pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, du courant et de la taille des électrodes et peut être déterminée par les équations suivantes [32]:

$$pP_{O_2} = \frac{P_{air}}{e^{\frac{4.192 * XI}{T_K^{1.334}}}} - P_{H_2O} \quad (III.10)$$

III.3.9 Pression de l'eau P_{H_2O}

Le calcul de la pression de l'eau se fait de la même manière que l'oxygène et l'hydrogène, la pression de l'eau est donnée par l'équation suivante [32]:

$$\text{Log}P_{H_2O} = -2.1794 + 0.02953 * Tc - 9.1837 * 10^{-5} * Tc^2 + 1.4454 * 10^{-7} * Tc^3 \quad (III.11)$$

III.3.10 Potentiel thermodynamique :

La potentielle thermodynamique est définie en fonction de la température T exprimée en Kelvin, et des pressions partielles P_{H_2} et P_{O_2} par l'équation empirique de Nernst comme suit [25] : Dans une réaction électrochimique, le travail peut être considéré comme l'énergie électrique délivrée par la réaction. Le travail électrochimique[32] :

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

$$Enerst = -GF \frac{liq}{2 * F} - \frac{RT}{2 * F} * \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (III.12)$$

F : est la constante de Faraday (96485 C/mol).

R : constante des gaz parfaits. (8,314J/K/mol).

P : Pression en atmosphérique.

T : température de fonctionnement du composant (K)

III.3.11 Tension d'une cellule de la PAC

La tension de sortie de la cellule est déterminée par la combinaison de l'effet thermodynamique, transport de masse, la cinétique et la résistance ohmique, elle est donnée comme suit [30]:

$$V_{cellule} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (III.13)$$

$V_{cellule}$: Tension d'une cellule (Volt)

η_{act} : Polarisation d'activation de l'anode et de la cathode (Volt)

η_{ohmic} :Polarisation ohmique de l'anode et de la cathode (Volt)

III.3.12 Tension totale de la cellule PAC

La pile à combustible est composée de plusieurs cellules placées en série formant un assemblage[28].

$$V_{stack} = N_0 * V_{cellule} \quad (III.14)$$

N_0 : Nombre de cellules en série dans l'assemblage

$V_{cellule}$: Tension d'une cellule.

III.3.13 Puissance d'une pile à combustible

La puissance de la pile à combustible est le produit de la tension et le courant de cette dernière, elle est donnée par l'équation suivante [28]:

$$P_{puissance} = V_{stack} * I \quad (III.15)$$

V_{stack} : Est la tension de l'assemblage,

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

I : Est le courant de la pile

III.3.14 Modèle de la dynamique de la PEM

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) :

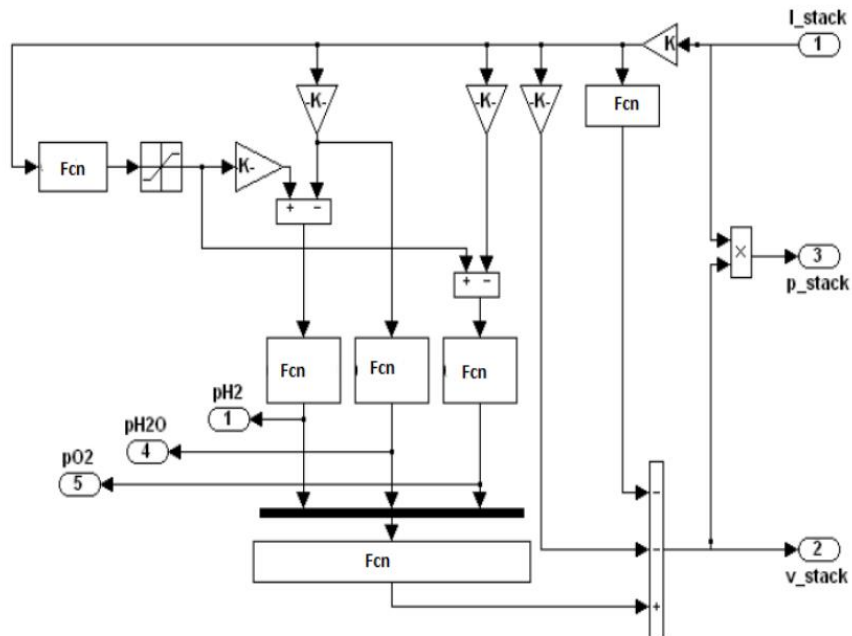


Figure III.3 : Modèle dynamique d'une PAC.[30]

Bloc d'une PEMFC

Les données et les caractéristiques d'une pile à combustible considérées dans notre simulation sont illustrées Figure (III.4):

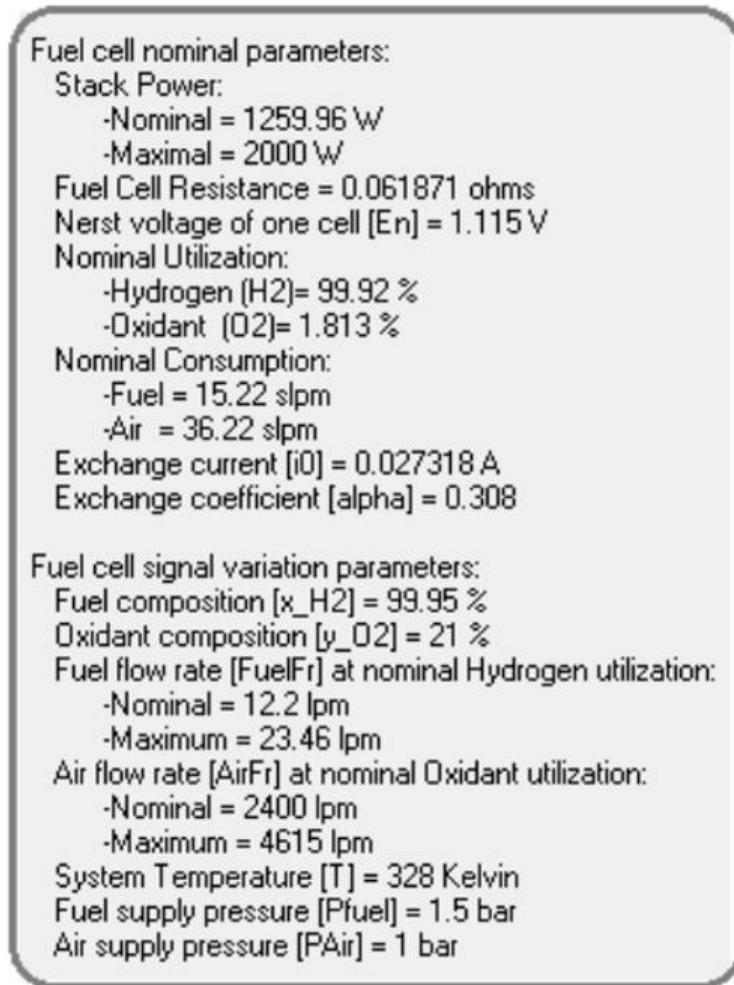


Figure (III.4) Caractéristiques techniques de la PAC simulée [28].

III.4 Modélisation de l'électrolyseur :

L'électrolyse de l'eau est un processus fondamental dans la production d'hydrogène, une source d'énergie propre et prometteuse. Dans ce chapitre, nous explorons en détail la modélisation de ce processus complexe. L'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau offre un potentiel considérable pour répondre aux défis de la transition énergétique en fournissant une alternative propre et renouvelable aux combustibles fossiles. Cependant, la conception efficace et la gestion optimale des systèmes d'électrolyse nécessitent une compréhension approfondie des phénomènes physico-chimiques en jeu. Nous examinerons donc les principes théoriques de l'électrolyse de l'eau, les mécanismes de réaction aux électrodes, les transferts de masse et de charge, ainsi que les paramètres clés influençant l'efficacité du processus. En outre, nous présenterons les différentes approches de modélisation utilisées pour simuler et optimiser les performances des cellules d'électrolyse. Cette analyse approfondie vise à fournir des

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

perspectives précieuses pour le développement de technologies d'électrolyse de l'eau plus efficaces et économiquement viables, contribuant ainsi à accélérer la transition vers une économie hydrogène durable.

III.4.1 Les Modèles utilisé pour l'électrolyseur PEM

Un électrolyseur est défini comme un appareil qui sépare l'eau ($2H_2O$) en hydrogène ($2H_2$) et oxygène (O_2). L'électrolyse de l'eau peut être classée processus inverse de l'hydrogène qui est introduit dans une pile à combustible. En termes de réaction électrochimique se produisant dans la pile à combustible pour générer de l'électricité DC, elle convertit DC énergie électrique en énergie chimique stockée dans hydrogène.

Il y a plusieurs modèles pour mettre en fonctionnements l'électrolyse de l'eau :

III.4.2. Modèle thermique

La plupart des modèles proposés sont adaptés pour l'électrolyse PEM. Modèle se base sur le bilan énergétique total d'un électrolyseur et qui s'exprime par l'équation :

$$C_t * \frac{dT}{dt} dt = Q_{th} - Q_{loss} - Q_{ea} \quad (III.16)$$

Avec Q_{th} : Puissance thermique dégagée par la réaction, (W)

$$Q_{th} = N_s * (U_{cell} - U_{th}) * I \quad (III.17)$$

Q_{Loss} : Flux échangé avec l'extérieur, (W)

$$Q_{loss} = \frac{1}{R_t} * (T - T_a) \quad (III.18)$$

Q_{eau} : Flux échangé avec l'eau d'alimentation, (W)

$$Q_{eau} = h_e * (T - T_{eau}) \quad (III.19)$$

Où T (J.K-1) : Température de l'électrolyseur

T_a (°C) : Température ambiante

T_{eau} (°C) : Température de l'eau

N_s (°C) : Nombre des cellules

U_{cello} (V) : Tension d'une cellule

U_{th} (V): Tension thermo-neutre d'une cellule

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

I : Intensité (A)

R_t : Résistance thermique

h_e : Coefficient d'échange.

Calcul de la température avec le modèle thermique statique :

$$T = T_{ini} + (\Delta t)/Ct * (Q_{th} - Q_{loss} - Q_{eau}) \quad (III.20)$$

T_{ini} : Température initiale (K), Ct : Capacité thermique de l'appareil,

Δt: Intervalle de temps (s).

Les trois paramètres mentionnés ci-après doivent être déterminé expérimentalement. Il s'agit de la capacité thermique de l'appareil, de la résistance thermique et du coefficient d'échange.[33]

III.4.3 Modèle électrochimique :

La tension de cellule d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes :

$$U_c = U_{rev} + \eta_a - \eta_c + U_{RSP} \quad (III.21)$$

Où :

η_a: Surtension anodique (V),

n_c:Surtension cathodique (V).

R_{SPE} : Résistance globale (c m2Ω).

Le schéma électrique équivalent de l'électrolyseur utilisé pour le modèle Electrochimique se représente sous la forme suivante Figure (III.5):

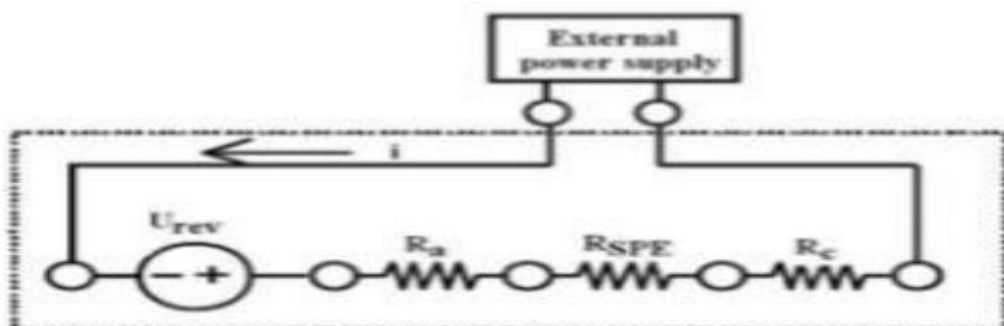
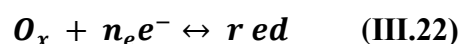


Figure III.5 Schéma électrique équivalent de l'électrolyseur le modèle électrochimique.

La densité de courant traversant une électrode se superpose au courant dû à la réaction :



Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Que l'on peut calculer par la relation de relation de Butler-Vollmer. Alors, on aura L'intensité en fonction de la surtension et l'intensité à l'anode :

$$I = 10 * [\exp\left(\frac{aveF\eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1-aa)veF\eta}{RT}\right)] \quad (III.23)$$

Où : I_0 Intensité aux électrodes (A), I : Intensité (A).

α : Coefficient de transfert de charge 0,5.

v_e : Coefficient stœchiométrique à l'anode e $v = 2$ et à la cathode e $v = - 2$

η : Surtension (V).

Alors les surtensions à l'anode et à la cathode s'expriment :

Anode :

$$\eta_a = \frac{RT}{F} F \sinh^{-1} \frac{I}{210a} \quad (III.24)$$

Cathode :

$$\eta_c = \frac{RT}{F} F \sinh^{-1} \frac{I}{210c} \quad (III.25)$$

Suivant la loi de Tafel, la tension de cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par:

$$E = a + b * \log(I) + c * I \quad (III.26)$$

Les Trois (3) paramètres sont à déterminer On peut déterminer les paramètres a, b et c pour une cellule d'électrolyseur définie (géométrie, membrane, écoulement, matériaux, température, pression) par une régression linéaire portant sur la variable I. Les 3 paramètres a, b et c sont déterminés à partir de résultats expérimentaux et un sous-programme que nous avons développé. Ces paramètres dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène P_{O_2} . Dans notre cas, le prototype fonctionne à pression atmosphérique que l'on ne peut pas faire varier. Les paramètres ne sont donc déterminés qu'en fonction de la température.[33]

III.4.4Modèle thermodynamique

Pour quantifier clairement les interactions dynamiques, l'électrolyseur PEM est considéré comme ayant quatre auxiliaires: anode, cathode, membrane et accessoire de tension.

Chaque auxiliaire la dynamique et l'interaction entre eux sont envisagées. La tension auxiliaire calcule la tension appliquée à l'électrolyseur niveau en utilisant l'équation de Nernst, la polarisation ohmique et polarisation d'activation. Calculs auxiliaires de la membrane teneur

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

en eau, traînée électroosmotique, diffusion d'eau et conductivité de la membrane. L'anode auxiliaire dynamiquement calcule les débits d'oxygène et d'eau et partiels pressions. De même, les pressions partielles d'hydrogène et d'eau et leurs flux sont obtenus dans le sous-système cathodique.

L'accessoire de stockage montre la dynamique de stockage dès l'hydrogène dans une bouteille en tenant compte de l'hydrogène initial niveau et compressibilité de l'hydrogène.

III.4.5 Modèle de Tension

Les électrolyseurs fonctionnent en mode courant ou en tension mode. Lorsqu'ils fonctionnent en mode tension, la tension est appliquée à l'électrolyseur et en fonction des conditions de fonctionnement l'électrolyseur tire le courant de la source et après quelques cycles transitoires, il a sa valeur de régime permanent. Ce le mode convient lorsque la source photovoltaïque est utilisée pour un électrolyseur. Cependant, la plupart des produits disponibles dans le commerce les électrolyseurs fonctionnent en mode courant et sous une tension de un électrolyseur est donné comme [34] :

$$V_{el} = E + V_{act} + V_{ohm} \quad (III.27)$$

Où E est la tension en circuit ouvert, V_{act} est la polarisation d'activation, V_{ohm} est la polarisation ohmique. La tension de circuit ouvert, E, est définie comme l'équation de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{R*T}{2*F} * \left[\left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \right] \quad (III.28)$$

Où E_0 est le potentiel standard, R est le gaz universel constante, T est la température de la cellule et a_{H_2O} est l'activité de l'eau entre l'anode et l'électrolyte pour plus de simplicité, on suppose ici pour être 1. La tension standard E_0 est :

$$E_0 = \Delta G / (2 * F) \quad (III.29)$$

Où ΔG est l'énergie libre de formation de Gibbs.

La polarisation d'activation est obtenue par :

$$V_{act} = \frac{R*T}{2*a*F} * \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (III.30)$$

a est le coefficient de transfert de charge, i est la densité de courant et i_0 est la densité de courant d'échange.

La polarisation ohmique est calculée par :

$$V_{ohm} = i * R_{ohm} \quad (III.31)$$

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Où la résistance de membrane R_{ohm} , est :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (III.32)$$

σ_m est la conductivité de la membrane qui est calculé à partir de la teneur en eau de la membrane t_m , la température de l'électrolyseur T_{el} , comme suit :

$$\sigma_m = (0.00154 * Y_m - 0.00326) * \exp(1268 * (\frac{1}{303} - \frac{1}{T})) \quad (III.33)$$

III.4.6 Modèle de stockage

Le H_2 produit par l'électrolyseur est stocké dans une bouteille. Constant débit H_2 remplit la bouteille jusqu'à ce que sa pression atteigne la pression cathodique de l'électrolyseur. La dynamique de stockage est obtenue comme suit [35] :

$$P_b - P_{hi} = \frac{z * N_{H_2} * R * T}{M_{H_2} * V_b} \quad (III.34)$$

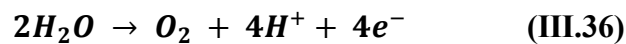
P_b est la pression du réservoir qui est mesurée en (Pascal), P_{bi} est la pression initiale du réservoir de stockage en (Pascal), R est la constante de gaz universelle (J / kmol · K), T est la température de fonctionnement (K), V_b est le volume du réservoir (m³), Z est le facteur de compressibilité en fonction de la pression :

$$Z = \frac{P * V_m}{R * T} \quad (III.35)$$

Où, P et V_m sont la pression et le volume molaire respectivement

III.4.7 Modèle d'anode :

Le craquage à l'eau et la réaction de dégagement d'oxygène ont lieu dans le compartiment anodique. La réaction demi-cellule est donnée comme :



L'oxygène évolue sous forme de gaz, les ions hydrogène se déplacent vers la cathode à travers la membrane, tandis que les électrons sont entraînés par l'alimentation électrique du circuit extérieur. Le débit total d'oxygène est égal à l'oxygène généré soustrait du débit d'oxygène de sortie, l'entrée d'oxygène est supposée égale à zéro. De l'eau est fournie en continu au compartiment anodique, tandis qu'une petite quantité d'eau est entraînée vers la cathode par les ions hydrogène (traînée électroosmotique $\dot{N}_{H_2O_{eod}}$ et diffusion $\dot{N}_{H_2O_{diff}}$). Le mécanisme de transport de l'eau est décrit en détail plus loin dans la Section membrane. [34]

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Le taux de génération d'oxygène et le taux de consommation d'eau peuvent être écrits comme suit :

$$N_{-O_2} \rightarrow N_{O_{2ai}} - N_{-O_{2ao}} + N_{-O_{2g}} \quad (III.37)$$

$$N_{H_2O_{an}} \rightarrow N_{H_2O_{ai}} - N_{H_2O_{ao}} - N_{H_2O_{eod}} - N_{H_2O_{diff}}$$

Les vitesses molaires des espèces peuvent être calculées à partir du rapport des pressions partielles à la pression anodique :

$$y_{O_2} = P_{O_2} \div P_{an} \quad (III.38)$$

La quantité d'oxygène générée dans l'anode peut être calculée en temps réel à partir de l'équation de Faraday :

$$N_{-O_{2g}} = (n * I) \div (4 * F)$$

$$N_{O_{2ao}} = y_{O_2} * N_{ao} \quad (III.39)$$

$$N_{H_2O_{ao}} = (1 - y_{O_2}) * N_{ao}$$

$$N_{ao} = N_{O_{2ao}} + N_{H_2O_{ao}}$$

Où le débit total de sortie de l'anode \dot{N}_{ao} , est obtenu par :

$$N_{ao} = K_{ao} * (P_{an} - P_{an0}) \quad (III.40)$$

La pression totale de l'anode est la somme des pressions partielles de l'oxygène et de l'eau, qui sont dérivées de la loi des gaz parfaits :

$$P_{O_2} = (N_{O_2} * R_u * T_{el}) \div V_{an}$$

$$P_{H_2O_{an}} = (N_{H_2O_{an}} * R_u * T_{el}) \div V_{an} \quad (III.41)$$

$$P_{an} = P_{O_2} + P_{H_2O_{an}}$$

La pression de saturation doit être définie pour les calculs d'humidité relative dans le module de membrane. Cependant, cela ne dépend que de la température [36] :

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24 * T - 10.554 * T^2 + 0.16636 * T^3 \quad (III.42)$$

A est l'activité de la vapeur d'eau et est calculée comme suit :

$$a = P_{cat}/P$$

III.4.8 Modèle de cathode :

La cathode est le compartiment dans lequel le gaz hydrogène évolue. La réaction à lieu dans la cathode est donnée comme [34]:



Les ions hydrogène se combinent entre eux et les électrons, qui proviennent de l'alimentation électrique, génèrent de l'hydrogène gazeux. L'hydrogène gazeux produit s'accumule dans la cathode, si la pression de travail est réglée à une valeur supérieure à la pression atmosphérique. L'hydrogène est évacué vers le réservoir de stockage lorsque la pression souhaitée est atteinte. La quantité du débit d'hydrogène est égale à l'hydrogène généré soustrait par la quantité d'hydrogène prélevée à la sortie. L'hydrogène et l'eau dans la cathode peuvent être calculés comme suit:

$$N_{H_2} \rightarrow N_{O_{2ai}} - N_{O_{2ao}} + N_{O_{2g}} \quad (III.44)$$

$$N_{H_2O_{an}} \rightarrow N_{H_2O_{ai}} - N_{H_2O_{ao}} - N_{H_2O_{eod}} - N_{H_2O_{diff}}$$

Le taux molaire de l'hydrogène peut être calculé comme suit:

$$Y_{H_2} = P_{H_2} \div P_{cat} \quad (III.45)$$

La quantité d'hydrogène généré par la réaction chimique peut être calculée en temps réel à partir de l'équation de Faraday:

$$P_{H_2} = (N_{H_2} * R_U * T_{el}) \div V_{cat} \quad (III.46)$$

$$N_{H_2co} = y_{H_2} * N_{co}$$

$$N_{H_2O_{co}} = (1 - y_{H_2}) * N_{co}$$

$$N_{co} = N_{O_{2co}} + N_{H_2O_{co}}$$

Où l'écoulement du sous-système cathodique \dot{N}_{co} , est :

$$N_{co} = k_{co} * (P_c - P_{co}) \quad (III.47)$$

Les pressions partielles de l'hydrogène et de l'eau peuvent être calculées à partir de la loi des gaz parfaits et la pression cathodique est égale à la somme des pressions partielles de l'hydrogène et de l'eau:

$$PH_2 = (NH_2 * R_u * T_{el}) \div V_{cat} \quad (III.48)$$

$$PH_2O_{cat} = (NH_2O_{cat} * R_U * T_{el}) \div V_{cat}$$

$$P_{cat} = P_{o_2} + P_{H_2O_{cat}}$$

La pression de saturation doit être définie pour les calculs d'humidité relative dans le module de membrane. Cependant, cela ne dépend que de la température[36] :

$$P_{sat} = -2846.4 + 411.24 * T - 10.554 * T^2 + 0.16636 * T^3 \quad (III.49)$$

A est l'activité de la vapeur d'eau et est calculée comme suit:

$$a = P_{act}/P \quad (III.50)$$

III.4.9. Modèle de membrane

La membrane est considérée là où les ions hydrogène et l'eau peuvent être transportés dans le module. Deux événements essentiels liés à l'eau sont disponibles dans le module membrane. Ce sont la diffusion et la traînée électroosmotique de l'eau. L'acotie et suette ont rapporté que $3.5e^4$ molécules d'eau sont transportées avec chaque proton vers la cathode, tandis que les ions hydrogène traversent la membrane. a proposé un modèle pour le transport de l'eau à travers la membrane [34]:

$$N_{H_2O_{eod}} = \frac{nd * i * A * M_{H_2O}}{F} \quad (III.51)$$

$$nd = 0.016 * T - 2.8955$$

Un autre problème avec la membrane est l'absorption d'eau, qui joue un rôle vital pour la mobilité ionique. L'absorption d'eau de la membrane (y) est définie:

$$y = 0.043 + 17.81 * a - 39.85 * a^2 + 36 * a^3 \quad 0 < a < 1 \quad (III.52)$$

$$y = 14 + 1.4 * (a - 1) \quad 1 < a < 3$$

$$ym = \frac{(y_{cat} + y_{an})}{2}$$

Un autre mécanisme important dans la membrane est le transport de l'eau par diffusion.

$N_{H_2O_{diff}}$ est la diffusion de l'eau en moles peut être exprimée comme:

$$N_{H_2O_{diff}} = D_w * \left(\frac{C_{wc} - C_{wa}}{t_{me}} \right) * A * M_{H_2O} \quad (III.53)$$

Le coefficient de diffusion de l'eau peut être calculé comme suit:

$$D_w = D_y * \exp \left[2416 * \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (III.54)$$

$$D_y = 10^{-10} \quad Y_m < 2$$

$$D_y = 10^{-10} [1 + 2 * (y_m - 2)] \quad 2 \leq y_m \leq 4.5$$

$$D_y = 1.25 * 10^{-10} \quad Y_m \geq 4$$

La concentration en eau C_w est définie par :

$$C_{wa} = \frac{\delta_{me.dry}}{M_{me.dry}} y_{an} \quad (III.55)$$

$$C_{wc} = \frac{\delta_{me.dry}}{M_{me.dry}} y_{cat} \quad (III.56)$$

La densité de l'eau dans cette équation est calculée comme suit:

$$M_{me.dry} = \frac{0.14395}{0.0112 + 1 + \left(1 - \left(\frac{T}{649.727} \right) \right) 0.0510} \quad (III.57)$$

La quantité totale d'eau transportée de l'anode à la cathode est la somme du transport par traînée électroosmotique et diffusion:

$$\dot{N}_{H_2O_m} = N_{H_2O_{diff}} + \dot{N}_{H_2O_{eo}} \quad (III.58)$$

III.5 Modélisation et caractérisation de panneau photovoltaïque :

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque

III.5.1 Les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque :

Parmi ces modèles on peut citer les suivants :

Modèle à sept paramètres (7p) :

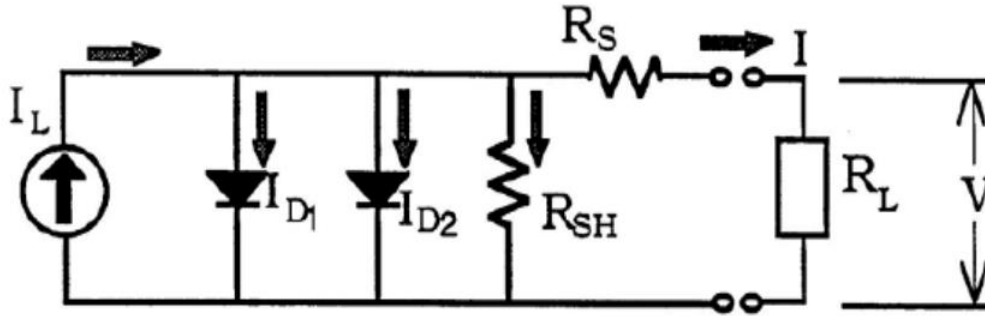


Figure III.6 : modèle à 7 paramètres

Les paramètres de ce circuit sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant inverse de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant inverse de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A_1 \times (\text{NCS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A_2 \times (\text{NCS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

A_1 et A_2 : sont les facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2.

NCS = Nombre des cellules en série.

R_S = la résistance série.

R_{SH} = la résistance shunt.

L'équation $I(V)$ caractéristique de ce circuit est :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (III.59)$$

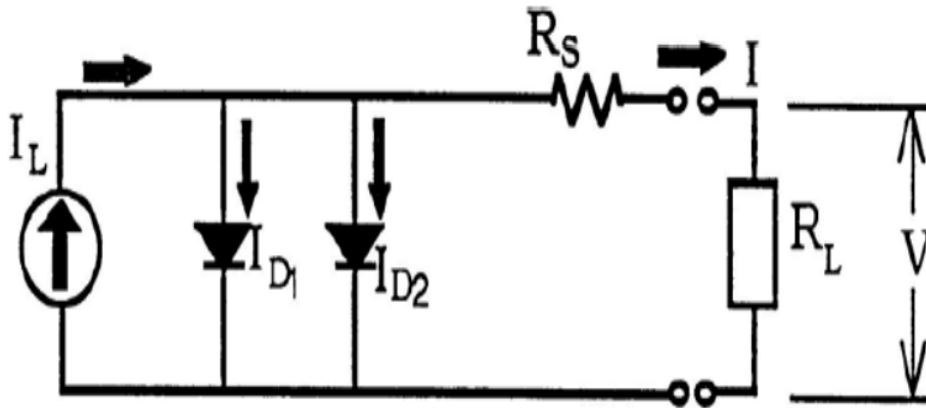
$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_1 k T_c} \times (v + IR_S) \right) - 1 \right) \quad (III.60)$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_2 k T_c} \times (V + IR_S) \right) - 1 \right) \quad (III.61)$$

Substituer (III.60) et (III.61) dans (III.59) donne :

$$I = \left(I_L - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{\gamma_1 k T_c} \right) - 1 \right) \right) \quad (III.62)$$

III.5.2 Modèle a six paramètres (6P):



Figure(III.7) : Modèle a six paramètres

Les six paramètres de ce circuit sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A_1 \times (\text{NCS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A_2 \times (\text{NCS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

NCS = Nombre des cellules en série.

R_s = la résistance série.

Les relations courant-tension pour ce circuit sont les suivant:

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{III.63})$$

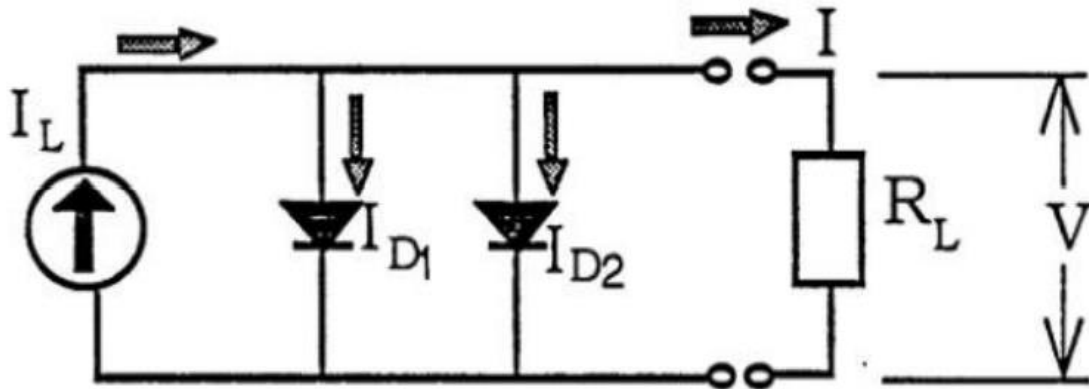
$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_1 K T_c} \times (V + I R_s) \right) - 1 \right) \quad (\text{III.64})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_2 K T_c} \times (V + I R_s) \right) - 1 \right) \quad (\text{III.65})$$

remplaçant (III.64) et (III.65) dans (III.63) nous obtenons :

$$I = \left(I_L - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(v+IR_S)}{\gamma_1 K T C} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V+IR_S)}{\gamma_2 K T C} \right) - 1 \right) \right) \quad (\text{III.66})$$

III.5.3 Modèle a cinq paramètres (5P) :



Figure(III.8) : modèle à 5 paramètres

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit de modèle à six paramètres représenté sur la figure. Cette simplification se traduit à supposer que la résistance série est négligeable. Avec une résistance série nulle, le circuit équivalent sera

représentée comme suit (la figure).

Les cinq paramètres de ce modèle sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A_1 \times (\text{NCS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A_2 \times (\text{NCS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

NCS = Nombre des cellules en série.

L'équation générale de ce modèle est :

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{III.67})$$

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_1 K T C}\right) - 1 \right) \quad (\text{III.68})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_2 K T C}\right) - 1 \right) \quad (\text{III.69})$$

Remplaçant (III.67) et (III.68) dans (III.69) nous obtenons :

$$I = \left(I_L - I_{01} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_1 K T C}\right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma_2 K T C}\right) - 1 \right) \right) \quad (\text{III.70})$$

III.5.4 Modèle a quatre paramètres (4P):

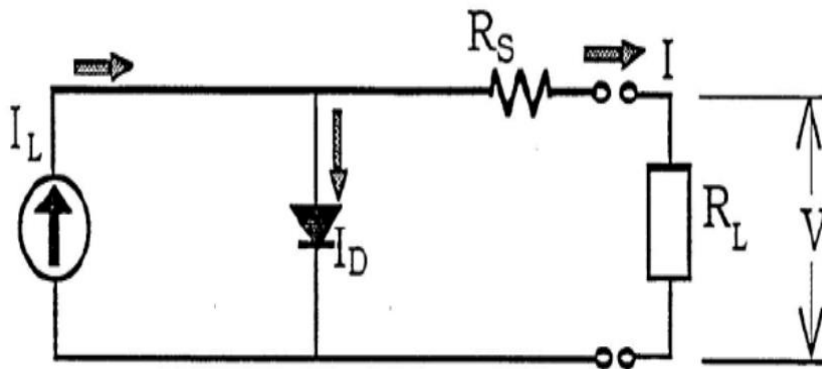


Figure III.9 :Modèle a 4 paramètres.

Les quatre paramètres de ce modèle sont :

I_L = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

γ = facteur de qualité

R_s =la résistance séries

Les différentes équations décrivant ce modèle seront détaillées par la suite.

III.5.4 Modèle a trois paramètres (3P) :

Si on suppose que la résistance série est nulle (comme pour le circuit à cinq

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

paramètres) le circuit à 4 paramètres se réduit à un circuit à trois paramètres représenté par la figure . Ce circuit équivalent est considéré comme idéal.

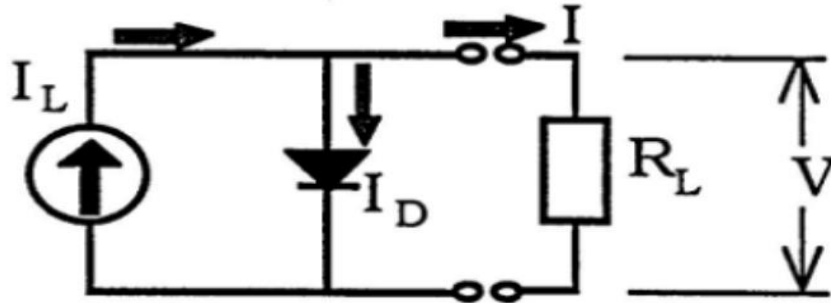


Figure III.10 : modèle à 3 paramètres

Les trois paramètres de ce circuit sont :

I_L = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

γ = facteur de qualité

Les relations courant-tension de ce circuit sont :

$$I = I_L - I_D \quad (\text{III.71})$$

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma K T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{III.72})$$

Si on remplace (III.72) dans (III.71)on obtient :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{\gamma K T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{III.73})$$

III.6 Liaison des cellules photovoltaïque :

III.6.1 Groupement en série :

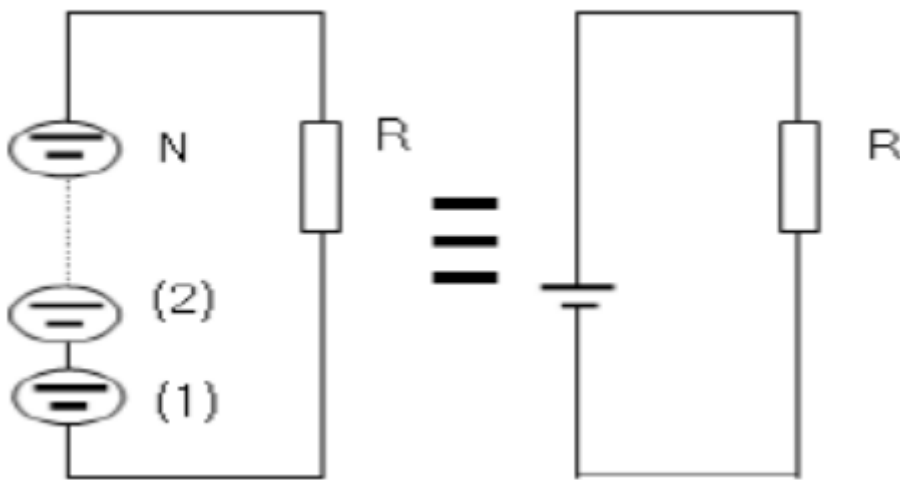
Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Dans un groupement en série figure (III.11) les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure (III.12) montre la caractéristique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'associant en série (indice s) de n_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

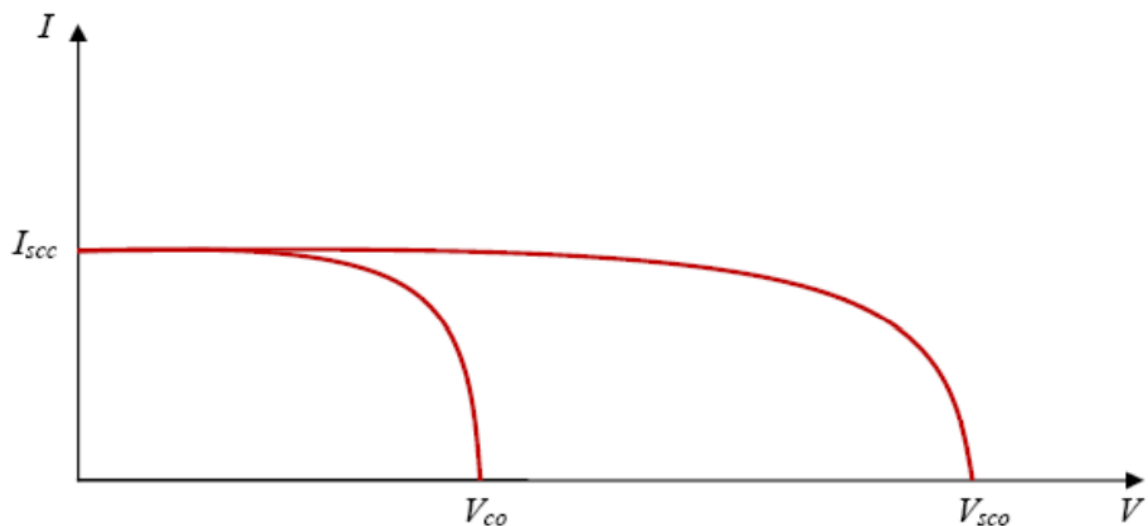
Avec :

$I_{scc}=I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco}=n_s V_{co}$: la tension de circuit ouvert



Figure(III.11)



Figure(III.12):caractéristique et résultante d'un groupement en série d n_s cellules identiques

III.6.2 Groupement en parallèle :

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure ((III.13)), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure ((III.14)) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert

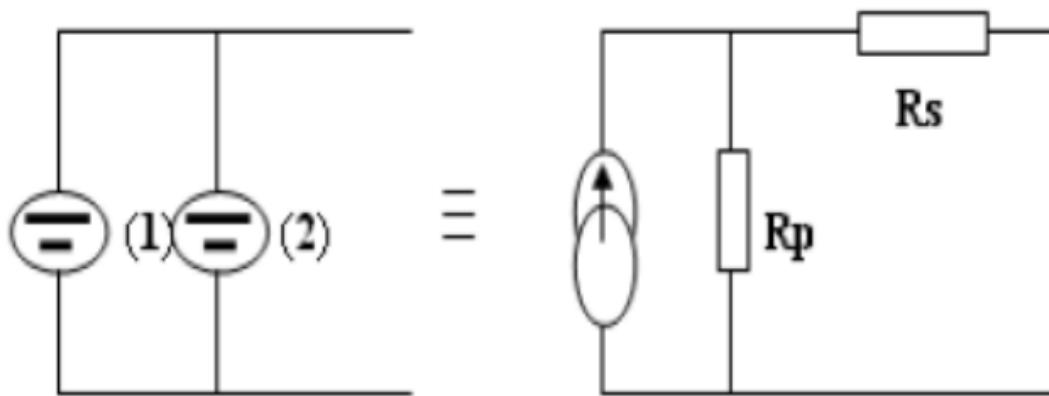


Figure III.13 : association des modules en parallèle

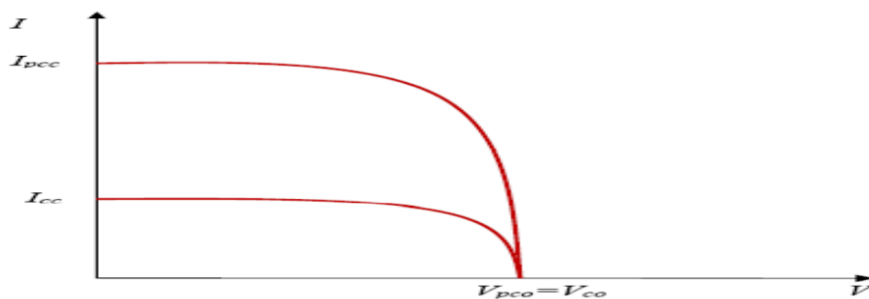


Figure III.14: caractéristique résultante d'un groupement parallèle de n_s cellules identiques

III.6.3 Groupement mixte (série-parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (III.15). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure (III.16), n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$I_{gcc} = n_p \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n_s \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

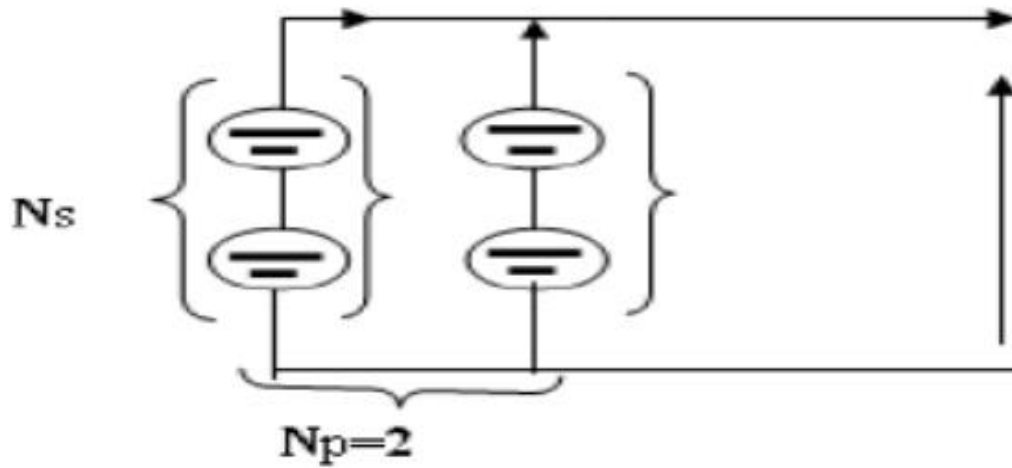
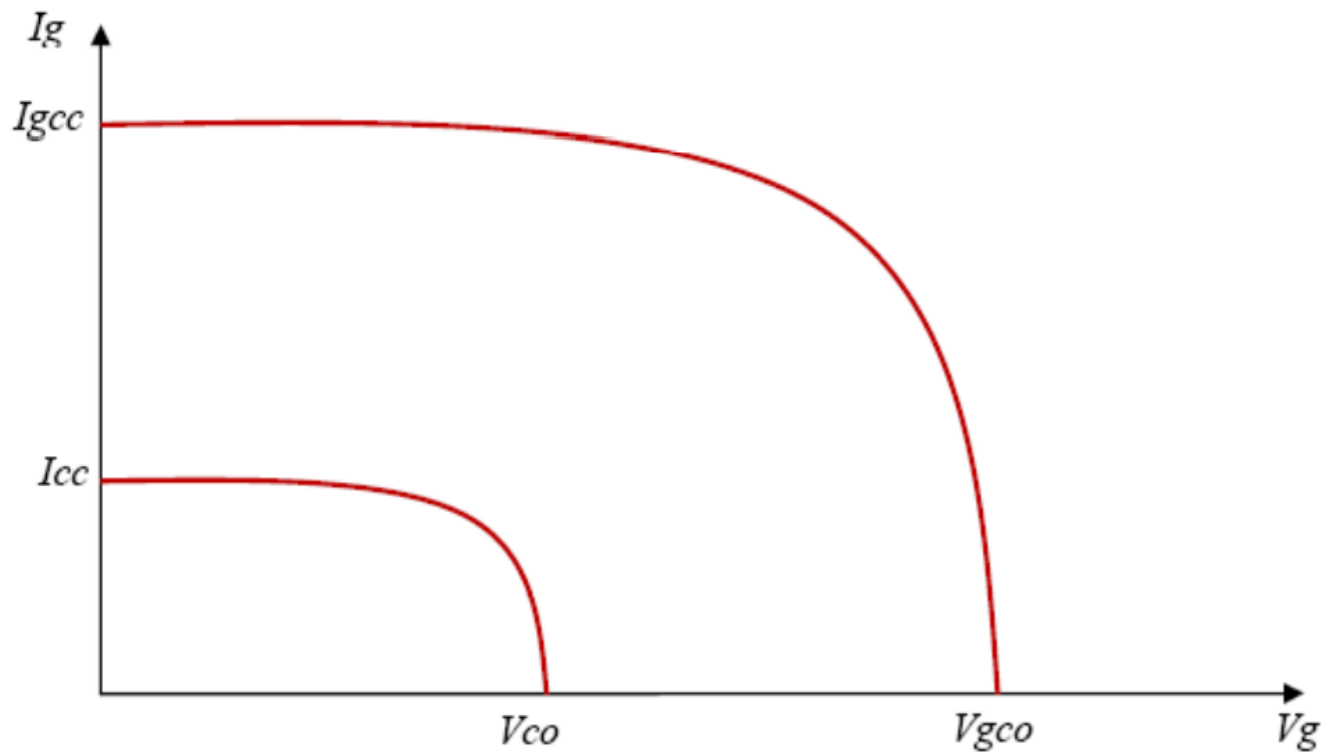


Figure (III.15) :association mixte des modules



Figure(III.16) : caractéristique résultante d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

III.7 Modélisation des convertisseurs DC-DC :

Cette section décrit les modèles des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost en mode de conduction continue.

III.7.1. Modélisation dans l'espace d'état :

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Pour obtenir une équation dynamique appropriée pour le convertisseur Buck, nous distinguons deux phases des commutateurs : l'état ON et l'état OFF. Le circuit électrique implique deux éléments de stockage d'énergie : un condensateur C et une inductance L. La modélisation de ce processus nécessite le calcul des matrices d'espace d'états A, B, C et D, dont les dérivations sont expliquées dans la section suivante :

$$\dot{X} = A.X + B.U \quad (\text{III.74})$$

$$Y = C.X + D.U \quad (\text{III.75})$$

III.7.2. Convertisseur Buck :

Le circuit du convertisseur Buck est présenté par la figure ci-dessous :

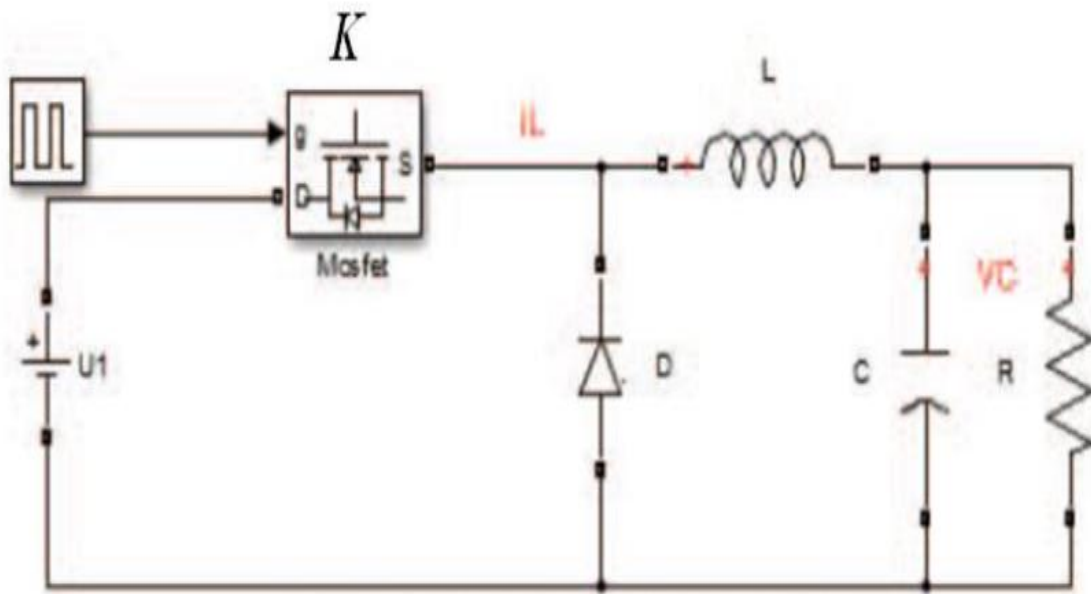


Figure III .17 Schéma du convertisseur Buck

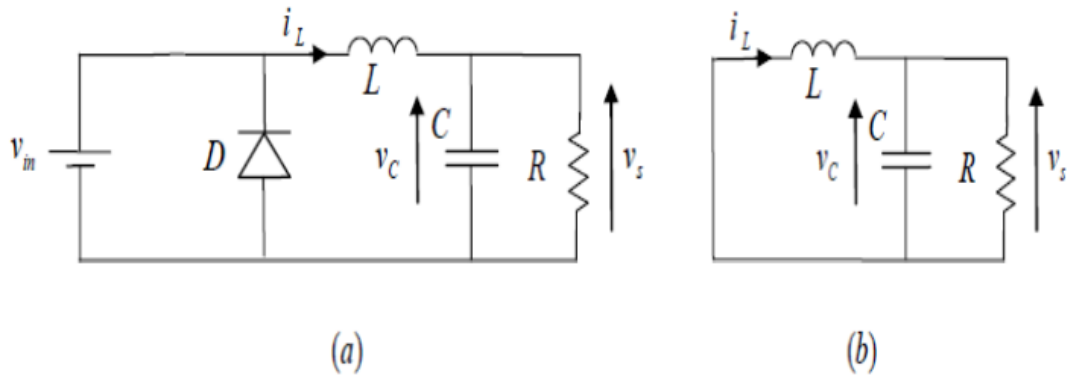


Figure III.18 : Circuit équivalent de convertisseur Buck : (a)K fermé,(b) K ouvert

L'interrupteur K c'est le transistor MOSFET.

Sur l'intervalle : $t_0 \leq t \leq t_0 + dT$, K est fermé et D est bloquée on obtient :

$$V_{in} - L \frac{di_L}{dt} - V_c = 0 \quad (III.76)$$

$$\frac{v_c}{R} - C \frac{dv_c}{dt} - i_L = 0 \quad (III.77)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (III.78)$$

$$Y = [0 \quad 1] \times \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \quad (III.79)$$

Sur l'intervalle : $t_0 + dT \leq t \leq t_0 + T$

K est ouvert et D est passant on obtient :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (III.80)$$

$$V_c + L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (III.81)$$

$$i_L - \frac{v_c}{R} - C \frac{dv_c}{dt} = 0 \quad (III.82)$$

$$Y = [0 \quad 1] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.83})$$

En appliquant le calcul de la moyenne aux équations (III.80), (III.81), (III.82) et (III.83), le modèle d'espace d'état est obtenu comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.84})$$

$$Y = [0 \quad 1] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.85})$$

III.7.3. Convertisseur Boost :

Le circuit du convertisseur Boost est représenté par la Figure III.19

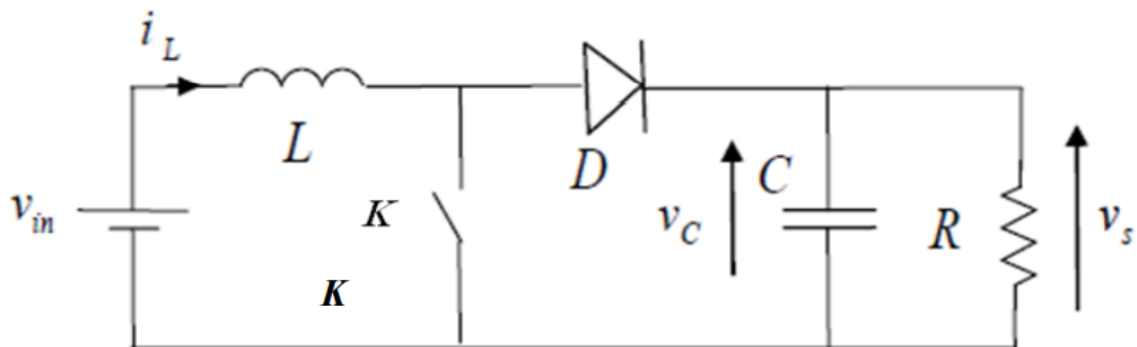


Figure III.19 : Schéma du convertisseur Boost

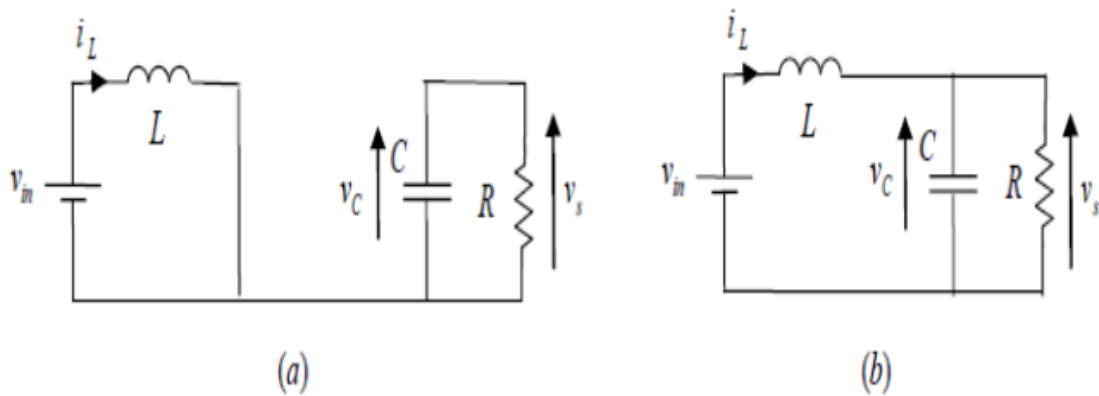


Figure III.20: Circuit équivalent de convertisseur Boost (a)K fermé,(b)K ouvert

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Sur l'intervalle : $t_0 \leq t \leq t_0 + dT$, K est fermé et D est bloquée on obtient :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.86})$$

$$V_{in} - L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (\text{III.87})$$

$$\frac{V_C}{R} - C \frac{dV_C}{dt} = 0 \quad (\text{III.88})$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.89})$$

Sur l'intervalle : $t_0 + dT \leq t \leq t_0 + T$, K est ouvert et D est passant on obtient :

$$V_{in} - V_C - L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (\text{III.90})$$

$$i_L - \frac{V_C}{R} - C \frac{dV_C}{dt} = 0 \quad (\text{III.91})$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.92})$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.93})$$

En utilisant le calcul de la moyenne aux équations (III.90) (III.91), (III.92) et (III.93), le modèle d'espace d'état est obtenu comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{1}{L} \\ \frac{(1-d)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.94})$$

$$Y = [\mathbf{0} \quad \mathbf{1}] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.95})$$

III.7.4 Convertisseur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck -Boost peut être représenté par la Figure III.21.

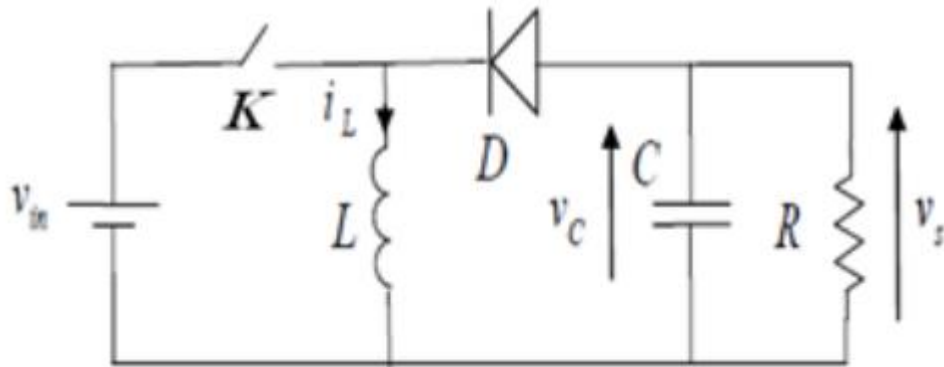


Figure III.21 : Schéma du convertisseur Buck-Boost

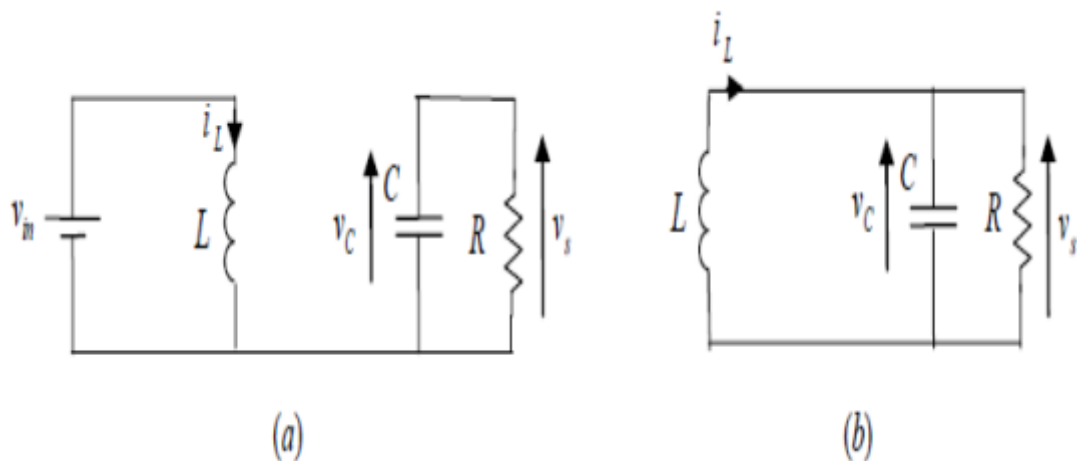


Figure III.22 : Circuit équivalent de convertisseur Buck-Boost (a)Kfermé, (b)K ouvert

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Sur l'intervalle : $t_0 \leq t \leq t_0 + dT$, K est fermé et D est bloquée on obtient :

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III.96})$$

$$-\frac{V_c}{R} = C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{III.97})$$

$$\text{Avec } V_s = V_c$$

$$\text{Donc : } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (\text{III.98})$$

$$\text{Et } \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{RC} \quad (\text{III.99})$$

L'espace d'état du Buck-Boost dans le mode active ON :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.100})$$

$$Y = [\mathbf{0} \quad \mathbf{1}] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.101})$$

Sur l'intervalle : $t_0 + dT \leq t \leq t_0 + T$, K est ouvert et D est passant on obtient :

$$V_c = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III.102})$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = -i_L - \frac{V_c}{R} \quad (\text{III.103})$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.104})$$

$$Y = [\mathbf{0} \quad \mathbf{1}] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.105})$$

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

En appliquant le calcul de la moyenne aux équations (III.102), (III.103), (III.104) et (III.105), le modèle d'espace d'état est obtenu comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \frac{(1-d)}{L} \\ -\frac{(1-d)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \times V_{in} \quad (\text{III.106})$$

$$Y = [\mathbf{0} \quad \mathbf{1}] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.107})$$

III.8 Modélisation des circuits :

Cette approche permet de modéliser les convertisseurs de manière plus intuitive, en dérivant directement le circuit du schéma réel, sans nécessiter une connaissance approfondie des équations mathématiques sous-jacentes. Les modèles sont construits en utilisant les blocs fournis par Sim Power System[37], ce qui simplifie grandement le processus de modélisation. En effet, les schémas sont montrés comme suit :

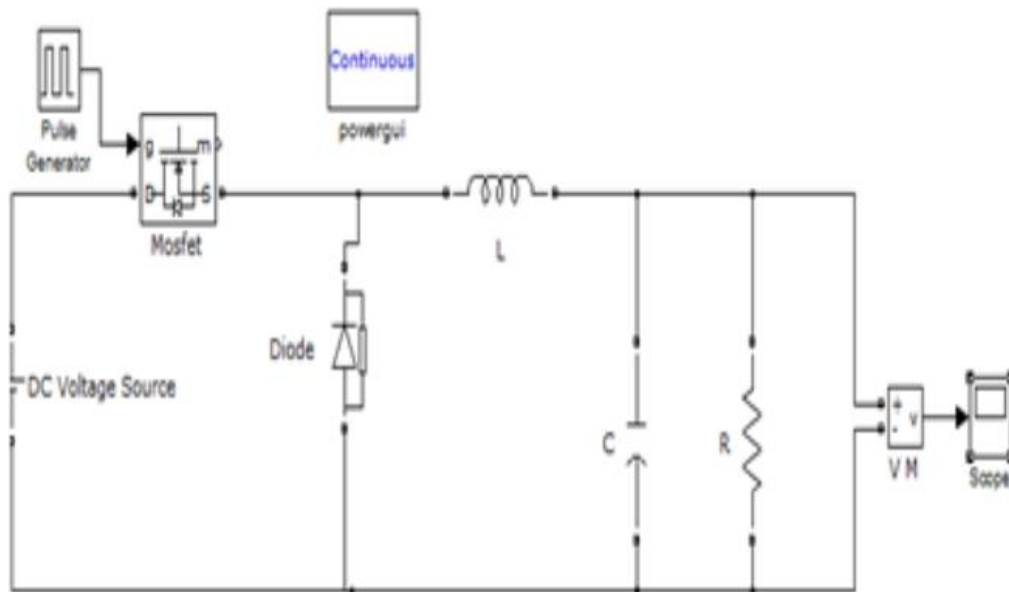


Figure III.23: Modèle du convertisseur Buck dans Sim Power System

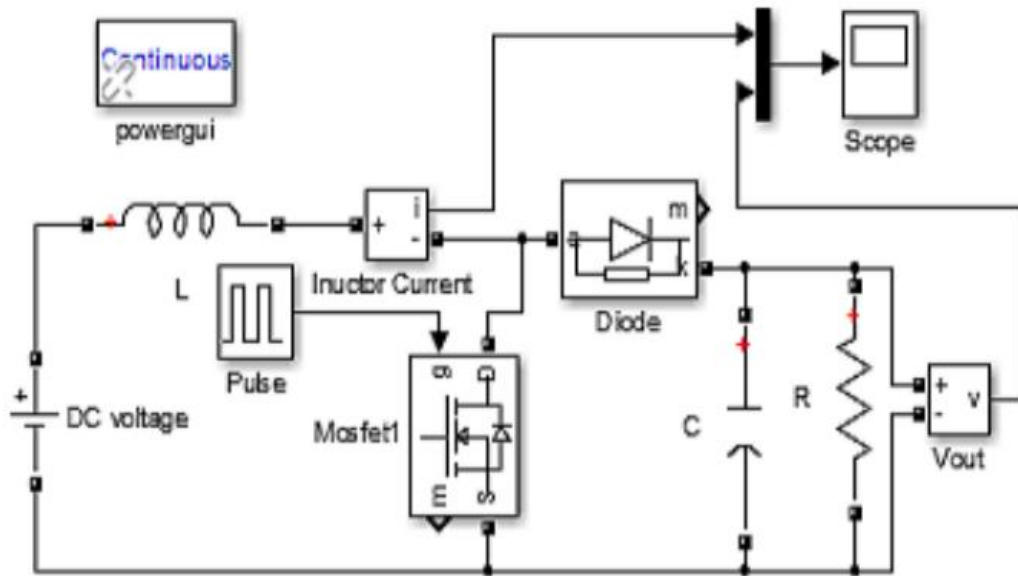


Figure III.24 : Modèle du convertisseur Boost dans Sim Power System

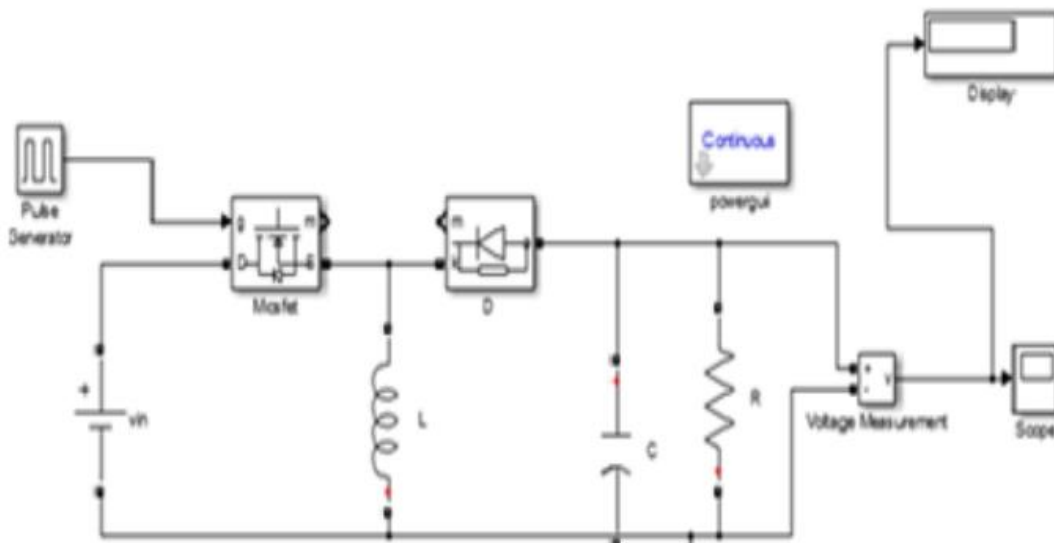


Figure III.25 : Modèle du convertisseur Buck-Boost dans Sim Power System

III.9 Conclusion :

Dans ce travail, nous avons développé et présenté des modèles mathématiques et électriques pour divers composants clés des systèmes énergétiques modernes, à savoir l'électrolyse, les piles à combustible de type PEM, les convertisseurs DC-DC et les panneaux photovoltaïques.

La modélisation des piles à combustible PEM, nous avons exploré les principes fondamentaux de leur fonctionnement en nous appuyant sur la tension réversible de Nernst et en analysant les

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

différentes chutes de tension. Cette modélisation est essentielle pour optimiser l'efficacité énergétique et la durabilité des piles à combustible, qui jouent un rôle crucial dans la production d'énergie propre.

Pour l'électrolyse nous a permis de comprendre les réactions chimiques impliquées et les paramètres influençant l'efficacité du processus de production d'hydrogène. En particulier, nous avons détaillé les équations régissant les phénomènes électrochimiques et leur impact sur les performances de l'électrolyseur

Le convertisseur DC-DC a été modélisé pour comprendre comment il régule et convertit l'énergie électrique de manière efficace. Ce composant est indispensable pour interfacer les différentes sources d'énergie, telles que les piles à combustible et les panneaux photovoltaïques, avec les systèmes de stockage et de consommation d'énergie.

Enfin, la modélisation des panneaux photovoltaïques a permis d'analyser leur performance en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques des matériaux. Cette analyse est fondamentale pour maximiser la production d'énergie solaire et intégrer efficacement cette source renouvelable dans les réseaux énergétiques.

Ces modèles interconnectés fournissent une compréhension approfondie et holistique des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables. La simulation sous MATLAB/SIMULINK, , permettra de valider ces modèles et d'optimiser les performances globales du système, contribuant ainsi à la transition vers des solutions énergétiques durables et efficaces.

III.10.la simulation

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

III.10.1.Introduction

La modélisation des piles à combustible est un domaine crucial dans la recherche et le développement de systèmes énergétiques durables.

Une pile à combustible convertit l'énergie chimique d'un combustible, généralement l'hydrogène, en électricité par le biais d'une réaction électrochimique. Ce processus propre et efficace présente un potentiel énorme pour une variété d'applications, allant des véhicules électriques aux systèmes de production d'énergie stationnaires. La simulation joue un rôle essentiel dans la modélisation des piles à combustible, car elle permet de prédire le comportement de ces dispositifs sous différentes conditions sans nécessiter des tests physiques coûteux et longs.

En utilisant des logiciels de simulation avancés, les chercheurs peuvent analyser des paramètres tels que la distribution de la température, la gestion de l'eau, la performance électrique, et les mécanismes de dégradation.

Ces simulations permettent de développer et d'optimiser les matériaux et les conceptions des piles à combustible, en identifiant les contraintes potentielles et en proposant des solutions pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes. Ainsi, la modélisation et la simulation des piles à combustible sont étroitement liées, constituant ensemble un outil puissant pour la recherche, le développement et la mise en œuvre de technologies énergétiques innovantes et écologiques .

III.10.2.Logiciel Utilisés :

III.10.2-1-Présentation du logiciel « MATLAB SIMMULINK » :

SIMMULINK est un environnement de diagramme fonctionnel destiné à la simulation multi domaine et à l'approche de conception par modélisation Model-Based Design.

Il prend en charge la conception et la simulation au niveau système, la génération automatique de code, ainsi que le test et la vérification en continu des systèmes embarqués.

SIMMULINK propose un éditeur graphique, un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques.

Il est intégré à MATLAB, ce qui vous permet d'incorporer les algorithmes MATLAB dans les modèles et d'exporter le résultat des simulations vers MATLAB pour compléter les analyses

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Simulink[®] est un environnement de conception par schéma-bloc destiné à la simulation et à l'approche Model-Based Design appliquée aux systèmes multi-domaines. Il supporte le design au niveau système, la simulation, la génération automatique de code, ainsi que le test et la vérification continus des systèmes embarqués. Simulink offre un éditeur graphique, des bibliothèques de blocs personnalisables et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB[®], ce qui vous permet d'incorporer des algorithmes MATLAB dans des modèles et d'exporter les résultats de simulation vers MATLAB pour une analyse plus approfondie.

III.10.3-L'objectif de simulation

L'objectif de notre simulation des piles à combustible est pour d'évaluer leurs efficacité dans la production d'énergie électrique et d'améliorer leurs performances dans différentes conditions de fonctionnement.

Cette simulation permet de modéliser le comportement électrochimique et thermique des piles à combustible, d'identifier les facteurs affectant leur efficacité énergétique et de prédire leur durée de vie.

En reproduisant virtuellement les conditions de fonctionnement réelles, différentes configurations et stratégies d'utilisation peuvent être testées sans les coûts et les risques élevés associés aux tests physiques. Ainsi, la simulation permet d'améliorer la conception des piles à combustible, d'augmenter leur efficacité énergétique et de réduire les émissions polluantes, contribuant ainsi à une production d'énergie plus durable et plus respectueuse de l'environnement.

III.10.3-1- Fonctionnement nominal

Le modèle que nous utilisons est une pile PEMFC composée de 42 cellules, avec une puissance nominale de 1,26 kW. Le point de fonctionnement nominal est défini par les paramètres suivants : $T_n = 55^\circ\text{C}$, $V_n = 24,23\text{ V}$, $I_n = 52\text{ A}$, $p_{\text{H}_2} = 1,5\text{ bar}$, $p_{\text{O}_2} = 1\text{ bar}$. Pour atteindre ce point de fonctionnement nominal, nous avons utilisé une charge résistive pure de $R = 0,4650\ \Omega$ (**figure III.26**). Les résultats obtenus pour le point nominal (tension et courant) sont illustrés dans la (**figure III.29**)

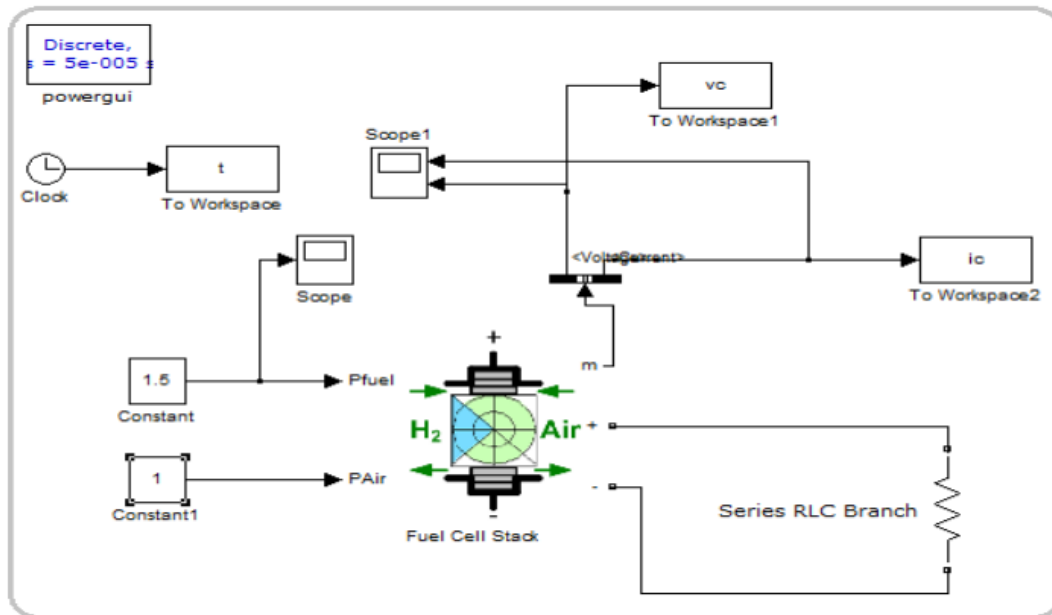


Figure III.26: Schéma de le montage PAC-charge

Fuel cell nominal parameters:

Stack Power:

-Nominal = 1259.96 W

-Maximal = 2000 W

Fuel Cell Resistance = 0.061871 ohms

Nerst voltage of one cell [En] = 1.115 V

Nominal Utilization:

-Hydrogen (H2)= 99.92 %

-Oxidant (O2)= 1.813 %

Nominal Consumption:

-Fuel = 15.22 slpm

-Air = 36.22 slpm

Exchange current [i0] = 0.027318 A

Exchange coefficient [alpha] = 0.308

Fuel cell signal variation parameters:

Fuel composition [x_H2] = 99.95 %

Oxidant composition [y_O2] = 21 %

Fuel flow rate [FuelFr] at nominal Hydrogen utilization:

-Nominal = 12.2 lpm

-Maximum = 23.46 lpm

Air flow rate [AirFr] at nominal Oxidant utilization:

-Nominal = 2400 lpm

-Maximum = 4615 lpm

System Temperature [T] = 328 Kelvin

Fuel supply pressure [Pfuel] = 1.5 bar

Air supply pressure [PAir] = 1 bar

Figure III.27: Paramètres du modèle pile à combustible PEM

III.10.3.2. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

Les différentes mesures de la tension de la pile à combustible pour une variation de courant ont permis de calculer la puissance de celle-ci. Les résultats obtenus sont représentés dans la (figure III.28)

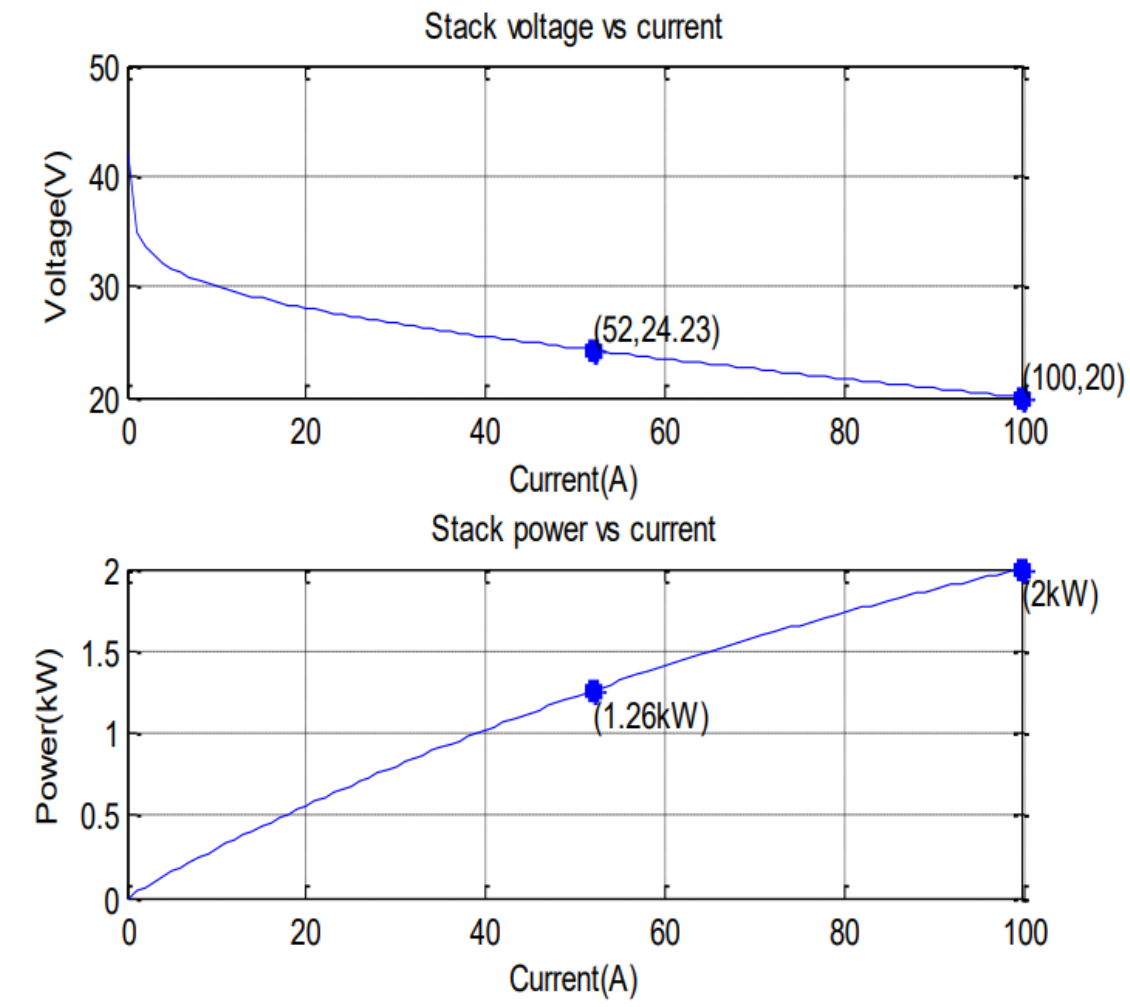


Figure III.28: courbe de polarisation de la pile à combustible

➤ Interprétation des courbes séparément

Pour ce qui est de la première courbe, l'augmentation de la densité de courant entraîne une chute de tension accrue, due à l'augmentation des pertes chimiques internes inhérentes aux caractéristiques inverses de la pile à combustible.

Pour la deuxième courbe, la puissance P croît de manière linéaire jusqu'à atteindre un maximum. On observe que l'augmentation de la densité de courant améliore la densité de

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

puissance de la pile à combustible, ce qui se traduit par une augmentation de sa puissance de sortie jusqu'à atteindre la valeur maximale.

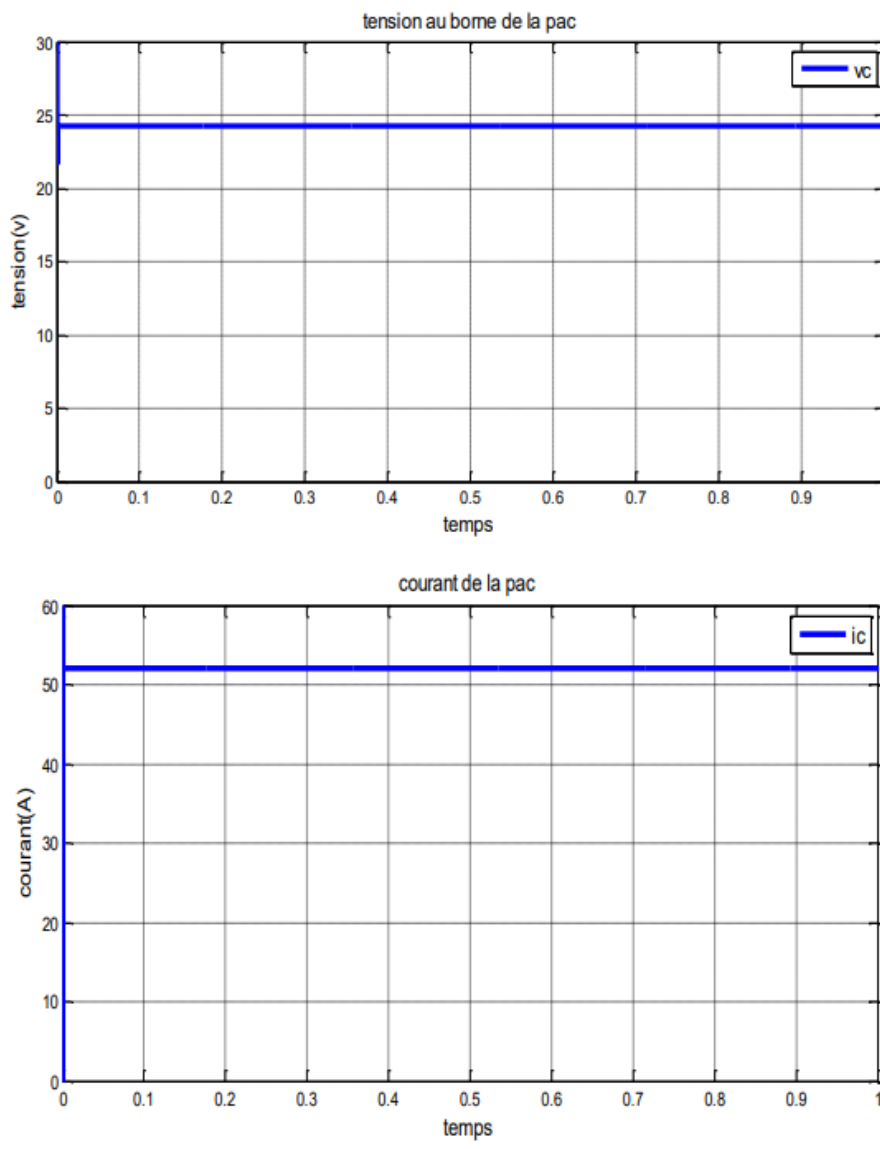


Figure III.29: Fonctionnement à tension et courant nominaux

III.10.4. Effet de la pression de l'hydrogène

Les valeurs de tension et de courant obtenues sont présentées dans la (figure IV.6), illustrant l'effet de la pression du fuel (hydrogène) tout en maintenant la charge constante (nominale). Nous avons comparé le régime statique pour différentes valeurs de la pression P_{H_2} (0,5, 1,5, et 3 bars). Les courbes montrent que les valeurs de tension et de courant augmentent avec l'augmentation de la pression d'hydrogène, atteignant leur maximum à $P_{H_2} = 3$ bars (courbe en rouge), et diminuent à $P_{H_2} = 0,5$ bars (courbe en vert).

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Il est également notable que les augmentations de courant et de tension ne sont pas linéaires par rapport à l'augmentation de la pression. En effet, l'augmentation de la pression de 0,5 à 1,5 bars provoque des augmentations de courant et de tension plus importantes que celles observées lors de l'augmentation de la pression de 1,5 à 3 bars (**figure III.30**).

➤ Interprétation

L'augmentation de la pression d'hydrogène entraîne une augmentation du courant et de la tension, et par conséquent, une augmentation de la puissance. Cela est normal en raison de la forte consommation de fuel. L'électricité est produite par les deux électrons libérés par la molécule d'hydrogène. À l'anode, l'oxydation du combustible libère des électrons, qui sont contraints par l'électrolyte chargé en ions de passer par un circuit externe.

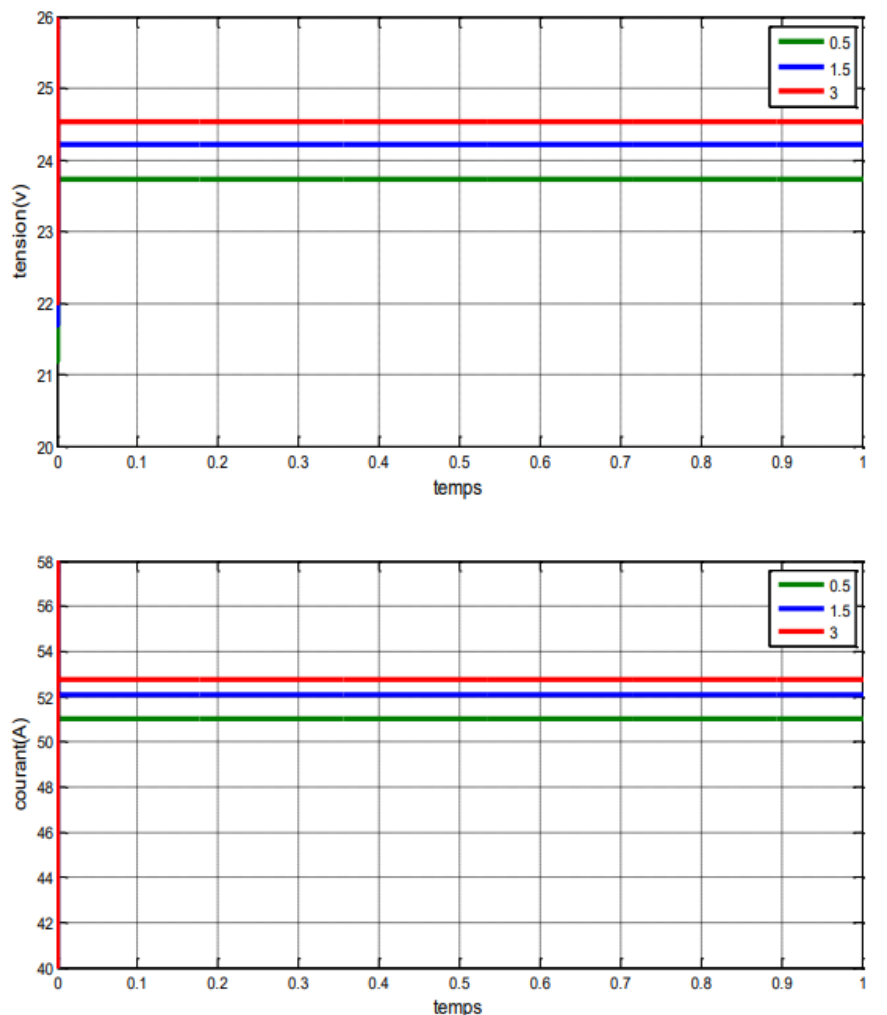


Figure III.30: Effet de PH₂ sur la tension et sur le courant

III.10.5.Effet de la pression de l'air (oxygène)

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

Pour étudier l'effet de la pression de l'air (oxygène), les mêmes résultats de courant et de tension sont présentés dans la (figure IV.7) pour différentes valeurs de la pression p_{O_2} (0,2, 1 et 3 bars). Plus la valeur de p_{O_2} augmente, plus la tension et le courant augmentent, ce qui se traduit par une augmentation de la puissance. Nous observons également que les augmentations du courant et de la tension ne sont pas linéaires avec l'augmentation de la pression. En particulier, l'augmentation de p_{O_2} entre 0,2 et 1 bar provoque des augmentations du courant et de la tension plus importantes que celles obtenues lors de l'augmentation de la pression entre 1 et 3 bars (figure III.31).

➤ Interprétation

L'augmentation de la tension de la pile peut s'expliquer par l'augmentation du nombre d'électrons transférés lors de la réaction chimique, qui est favorisée par l'augmentation de la pression.

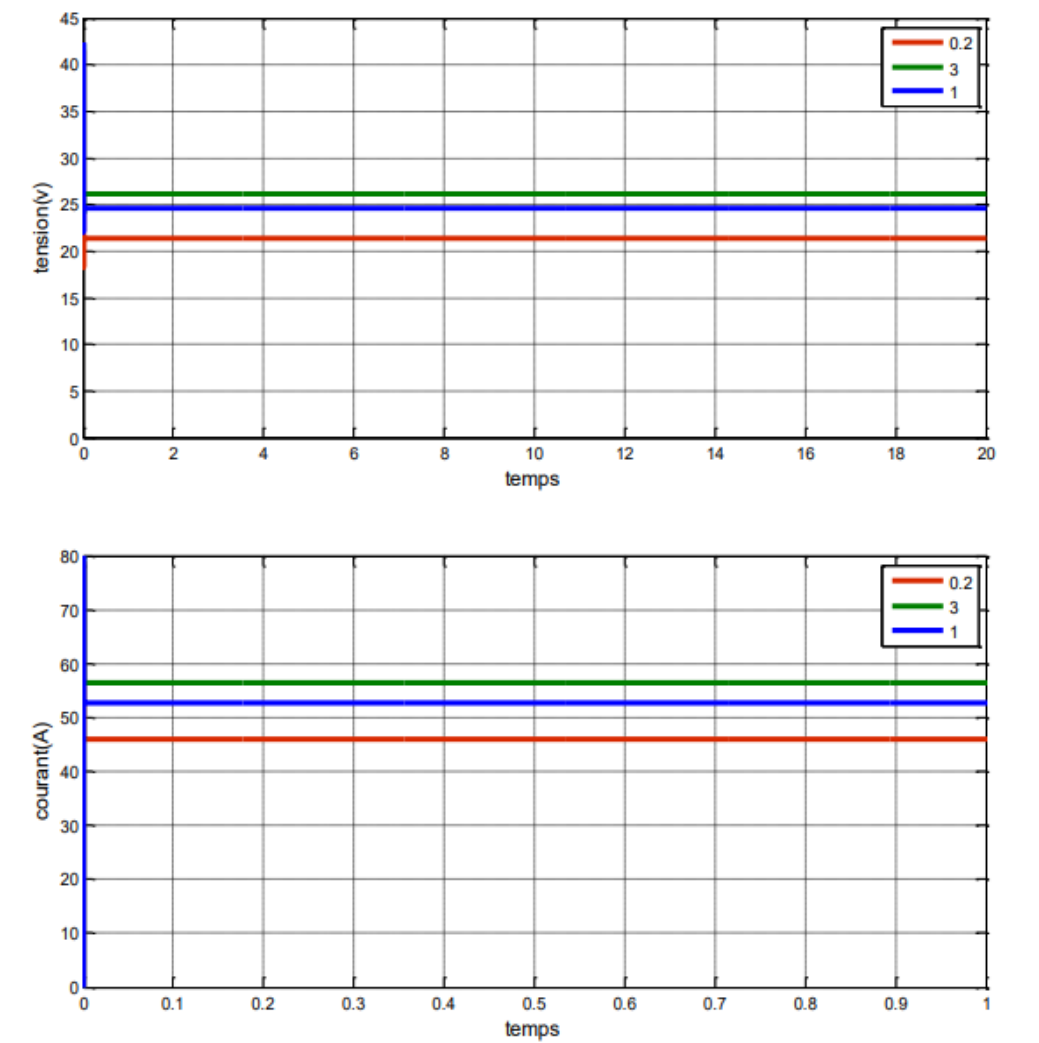


Figure III.31: Effet de PO_2 sur la tension et sur le courant

III.10.6.Effet de la température

L'effet de la variation de la température sur la tension et le courant est également analysé. On observe que l'augmentation de la température a un impact significatif : elle augmente positivement la tension et le courant de la pile (**figure III.32**).

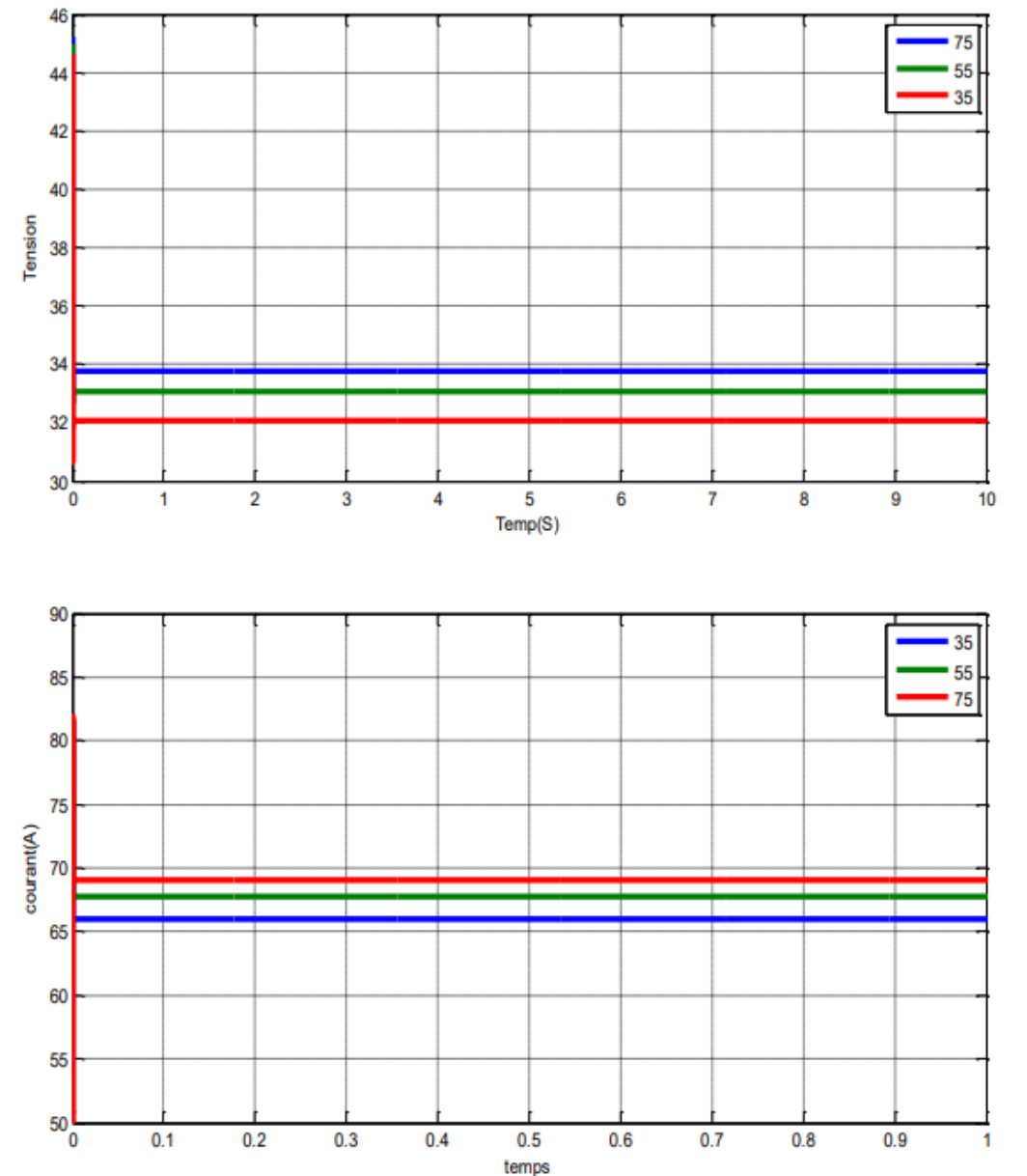


Figure III.32: Effet de la température sur la tension et sur le courant

➤Interprétation

À haute température, la cinétique des réactions chimiques s'accélère et l'évacuation de l'eau produite

Chapitre III : modélisation et la simulation de la pile à combustible du type PEMFC

sous forme de vapeur est facilitée. En revanche, à basse température, la membrane électrolytique est bien humidifiée

III.10.7.Conclusion :

En conclusion, notre simulation se révèle que les piles à combustible être une technologie prometteuse pour la production d'énergie électrique en raison de leur efficacité énergétique élevée et de leur faible impact environnemental. Contrairement aux méthodes de production d'énergie traditionnelles, les piles à combustible offrent un rendement supérieur en convertissant directement l'énergie chimique en énergie électrique avec des pertes minimales. De plus, elles émettent peu ou pas de gaz à effet de serre, ce qui les rend particulièrement attractives dans le contexte actuel de transition vers des sources d'énergie plus propres. Grâce aux avancées technologiques et aux simulations de performance, il est possible d'optimiser encore davantage leur efficacité et leur durabilité, faisant des piles à combustible une solution viable et durable pour répondre aux besoins énergétiques futurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Même si la technologie des piles à combustible (PAC) est apparue au dix-huitième siècle, mais ses avantages technico-économiques ne se sont révélés qu'au début des années soixante-dix. La diversité et la modularité des technologies PAC leur permettent d'être utilisées dans de nombreux domaines. Cette technologie, très avancée, suscite un grand intérêt car elle ne produit aucune pollution.

Dans notre projet de fin d'étude, nous nous sommes concentrés sur la pile à membrane échangeuse de protons (PEM) en raison de ses caractéristiques avantageuses. Cette étude s'inscrit dans une démarche de développement de systèmes écologiques pour la production d'électricité. Une revue de la littérature a montré que les PAC peuvent être utilisées dans divers domaines tels que l'alimentation des téléphones portables, l'automobile, le transport en général, l'alimentation électrique des satellites, l'aérospatial, l'aéronautique, et la production électrique stationnaire.

La recherche bibliographique nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les PAC et l'hydrogène.

Contrairement aux batteries, qui cessent de produire de l'électricité une fois le réactif chimique consommé, les PAC utilisent des réactifs renouvelables, produisant de l'énergie électrique tant qu'elles sont alimentées en gaz réactif.

Nous nous sommes intéressés spécifiquement à la pile à combustible à membrane échangeuse de protons.

Nous avons développé et discuté les modèles mathématiques de la pile de type PEMFC. Enfin, nous avons réalisé une étude par simulation basée sur le modèle d'Amphlett disponible sous Matlab/Simulink. Cette simulation a montré que les paramètres température et pression ont une influence positive. Une température élevée améliore les cinétiques électrochimiques des réactions aux électrodes, réduisant ainsi les pertes d'activation et augmentant la tension et le courant de la pile à combustible. Nous avons aussi montré qu'une variation de la charge entraîne une variation non linéaire de la tension de la PAC. En régime dynamique, nous avons observé des pics de courant et de tension, connus pour être préjudiciables aux PAC. Il est donc nécessaire d'utiliser une source électrique secondaire plus rapide que la PAC pour gérer ces variations dynamiques et éviter les brusques changements de courant et de tension qui peuvent réduire leur durée de vie.

Conclusion générale

Les perspectives issues de ces travaux ouvrent plusieurs axes de recherche :

- Une étude comparative des différents types de PAC est nécessaire.
- Optimisation de l'efficacité de la PAC pour la gestion de l'énergie électrique
- Production de l'hydrogène solaire pour alimenter la PAC
- L'étude d'autres systèmes hybrides est également possible.

Finalement, bien que la production d'énergie électrique par PAC soit une technique propre, elle nécessite la maîtrise de plusieurs facteurs pour une utilisation réussie. Cette « technique verte mérite d'être largement étudiée »

Références Bibliographiques

REFERENCES

- [1] SAISSET, Rémi. « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2004.
- [2] FRIEDE, Klaus Wolfgang. « Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM ». Thèse de doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. 2003.
- [3].T.AZIB(2010): Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible, thèse de doctorat, Université Paris-Sud Xi.
- [4]. I.SADLI (2006) : Modélisation Par Impédance D'une Pile A Combustible PEM Pour Utilisation En Electronique De Puissance, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de lorraine.
- [5] Modélisation D'une Pile A Combustible De Type PEM Mémoire Présenté Pour L'obtention Du Diplôme De Master Académique Par: YUCEFI Abdelhak .TELEMÇANI Belkacem
- [6] S. Pique, "Stationary fuel cell: international and national regulatory and standard context, potential risks. Study report," 2017.
- [7] R. Momirlan et T. Veziroglu, "Recent directions of world hydrogen production", Ren. Sust. EnergyRev. 3 (1999) 219. DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE Soutenu le 03 OCTOBRE 2008
- [8] J.-F. Fauvarque, "Les piles à combustible et leurs applications," in Annales De Chimie Science Des Matériaux, 2001, vol. 26, no. 4, pp. 1-8: Elsevier.
- [9] S. Busquet, "Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible: réalisation d'un banc d'essai et modélisation," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [10] K. W. Friede, "Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM," Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2003.
- [11] . E.FRAPPÉ (2012) : Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30Kw, thèse de doctorat, Université Paris-Sud.

Références Bibliographies

- [12]. Y.ABDERRAHIM et R.BELBACHIR (2014) : 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.
- [13] .N.MEDDOUR (2010) : 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.
- [14] .F.BREQUE(2008) : modélisation du transport de masse dans une pile à combustible de type pem et étude de l'humidification interne de la pile, thèse de doctorat, l'Université du Québec A Trois-Rivières. [11].A.BRANGER ,M.RICHER et S.ROUSTEL (2007) :Livres de Microbiochimie et alimentation , Editeur scientifique, Dijon : Éducagri éd., impr. 2007, cop. 2007
- [15].A.BRANGER ,M.RICHER et S.ROUSTEL (2007) :Livres de Microbiochimie et alimentation , Editeur scientifique, Dijon : Éducagri éd., impr. 2007, cop. 2007.
- [16] . P.THOUNTHONG(2005) : conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [17] 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 doctorat ,2004.
- [18] A. Z KOUACHE, L. RAHOUMA "Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques", Mémoire de Master 2, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, 2020.
- [19] DE DIANOUS, Valérie, SYLVAIN, PIQUE, et WEINBERGER, « Etude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène» RAPPORT D'ETUDE 15/03/2016
- [20] J. K. Dahl, K. J. Buechler, A. W. Weimer, A. Lewandowski, C. Bingham, «Solarthermal dissociation of methane in a fluid-wall aerosol flow reactor» International Journal of Hydrogen Energy, 29 (2004) 725-736.
- [21] R. Momirlan et T. Veziroglu, «Recent directions of world hydrogen production», Ren. Sust. Energy Rev. 3 (1999) 219, Doctorat de l'université de Toulouse Soutenu le 03 Octobre 2008.

Références Bibliographies

- [22] Liwu Huang, Élaboration, caractérisation et propriétés de stockage d'hydrogène électrochimique des alliages $Mg_2 Ni_{1-x} Mn_x$ ($x = 0, 0.125, 0.25, 0.375$) et $Mg_{2-x} Al_x Ni$ ($x = 0, 0.25$) +5 wt.% MWCNTs préparés par mécanosynthèse, thèse de doctorat, université de technologie de Belfort-Montbéliard, 26 janvier 2012.
- [23] Germain Gondor, Pour le stockage de l'hydrogène : analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir, thèse de doctorat, université de Franche Comté, 16 octobre 2008.
- [24] Le stockage embarqué de l'hydrogène, ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2006 - Partie D.
- [25] O.RALLIERES. "Modélisation et caractérisation de pile à combustible et électrolyseur PEM". Thèse de doctorat, Université de Toulouse - France, 14 Novembre 2011 le doctorat, École des Mines de Paris - France , 21 Décembre 2006
- [26] :Mounir SAHLI, 2010 « Etude de la production d'hydrogène par l'électrolyse et pile à combustion », Mémoire de Magister, Université de Mensouri de Constantine.
- [27] : <https://www.encyclopedie-energie.org>
- [28] UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM Présenté pour obtenir le diplôme de master ARAB Lydia CHEBBI Zahra Soutenu le : 09/06/2016
- [29] Etude et modélisation d'une pile à combustible Soutenu le : 09/05/2016 AZZI Halim
- [30] Université Mohamed Khider de Biskra Modélisation de la Pile à Combustible de type PEMFC (SALLEMINE Heythem / LACEFAR Madani)
- [31] Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie Mr / DENNI Taqiy eddine et Mr / DJAOUI Adel
- [32] PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB® Colleen Spiegel
- [33] TIJANIij. Alhassan Salami, "Nur Afiqah Binti Kamarudin, Fatin Athirah Binti Mazlan ", Investigation of the effect of charge transfer coefficient (CTC) on the operating voltage of polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzer, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor, Malaysia
- [34] T.Yigit, Selamet OF, "Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of highpressure PEM electrolyzer system", International Journal of Hydrogen T.Yigit, Selamet

Références Bibliographies

OF, "Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of highpressure PEM electrolyzer system", International Journal of Hydrogen

[35] WANG, C. 2006. "Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems." Ph.D. thesis, the Montana State University.

[36] W.Abtew, A.Melesse, Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations;Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013.

[37] SPIROV Dimitar, LAZAROV Vladimir, ROYE Danial,ZARKOV Zahari,MASOURI,MANSOURI Omar.«Modelisation des Convertisseurs statiques DC-DC

[38]. A. SAADI 2014, « Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC », thèse de doctorat, université de Biskra, décembre