



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche Scientifique**  
**Université Ahmed Draïa**  
**Faculté Science et de la Technologie**  
**Département Sciences et de la Technologies**

**MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION**  
**DU DIPLOME DE MASTER**

**SPÉCIALITÉ : ÉLECTROTECHNIQUE**  
**OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE**

*Thème :*

**Etude et simulation d'un système énergétique à pile à  
combustible PEMFC**

**Présenté par :**

**-HADJAJI SALHA**  
**- MOUGAY MUSTAFA**

**Devant le jury composé de :**

<b>Président : Mr. BERBAOUI Ibrahim</b>	<b>MAB</b>	<b>Univ- Adrar</b>
<b>Encadreur : Mr. LARIBI SLIMANE</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ- Adrar</b>
<b>Examineur : Mr. GUENFOUD.M</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ- Adrar</b>

**Année Universitaire 2020/2021**



## Résumé

### ملخص

في مواجهة تحديات الطاقة والبيئة، يمكن للهيدروجين أن يجلب الكثير من الأمل. لذلك، تم إنجاز الكثير من العمل على خلايا الوقود في مختلف مجالات الفيزياء، وتعد خلايا الوقود حلقة وصل مهمة في سلسلة تطوير الهيدروجين. في مجال إلكترونيات الطاقة، تم إجراء العديد من الدراسات حول تنفيذ الإنتاج اللامركزي أو المحولات الثابتة المخصصة. ومع ذلك، فقد ركز القليل من العمل على التفاعل بين خلية الوقود والمحول.

يركز هذا العمل على دراسة ومحاكاة خلية وقود من نوع PEM، والهدف منها، من ناحية، هو النمذجة الديناميكية لخلية وقود من نوع PEM (غشاء تبادل البروتون)، ومن ناحية أخرى، معرفة التأثير من الاختلافات في ظروف التشغيل على أداء بطارية PEMFC عند توصيلها بمحول دفعة.

تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أنه باستخدام تقنية MPPT (P&O)، يمكن لنظام طاقة خلية الوقود توفير طاقة ثابتة للحمل في ظل ظروف تشغيل مختلفة.

### Résumé :

Face aux enjeux énergétiques et environnementaux, l'hydrogène peut apporter beaucoup d'espoir. Par conséquent, de nombreux travaux ont été réalisés sur les piles à combustible dans divers domaines de la physique, et les piles à combustible sont un maillon important de la chaîne de développement de l'hydrogène. Dans le domaine de l'électronique de puissance, de nombreuses études ont été menées sur la mise en œuvre de productions décentralisées ou de convertisseurs statiques dédiés. Cependant, peu de travaux se sont concentrés sur l'interaction entre la pile à combustible et le convertisseur.

Le présent travail porte sur l'étude et simulation d'une Pile à Combustible de type PEM, dont l'objectif est, d'une part la modélisation dynamique d'une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), et d'autre part, savoir l'effet des variations des conditions d'opérateurs sur les performances de la pile PEMFC lorsqu'il est connecté avec un convertisseur boost. Les résultats des simulations obtenues montrent qu'à l'aide la technique MPPT (P&O), le système énergétique à pile à combustible peut fournir une puissance constante à la charge dans différentes conditions de fonctionnement

### Abstract:

Faced with energy and environmental challenges, hydrogen can bring a lot of hope. Therefore, much work has been done on fuel cells in various fields of physics, and fuel cells are an important link in the hydrogen development chain. In the field of power electronics, many studies have been carried out on the implementation of decentralized production or

## Résumé

---

dedicated static converters. However, little work has focused on the interaction between the fuel cell and the converter.

This work focuses on the study and simulation of a PEM type fuel cell, the objective of which is, on the one hand, the dynamic modeling of a PEM (Proton Exchange Membrane) type fuel cell, and On the other hand, know the effect of variations in operating conditions on the performance of the PEMFC battery when it is connected with a boost converter.

The simulation results obtained show that using the MPPT (P&O) technique, the fuel cell energy system can deliver constant power to the load under different operating conditions.

# *Remerciement*

Nous tenons à remercier tout d'abord le Dieu tout puissant qui nous a aidés à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier Monsieur **LARIBI SLIMANE** qui a dirigé et suivi ce travail, merci pour votre aide, votre intelligence et votre patience et soutien ; soyez assuré de nos respects et nos reconnaissances.

Toutes les personnes qui de près ou de loin nous ont aidés à finaliser ce travail.

A nos chers parents.

A tous nos amis.

**SALHA**



## Dédicaces

Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses  
bénédictions et la grâce de la réussite.

A ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle  
m'a mise au monde ;

A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a  
aidé à affronter les difficultés ;

A mes chères sœurs et mes chers frères.

A toute ma famille.

A tous mes amis

**HADJAJI SALHA**

**Table des matières**

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Table des matières.....	I
Liste des Figures.....	III
Liste du tableau .....	V
Nomenclature .....	VI
Introduction générale.....	VIII
<b><i>Chapitre I</i></b> <b><i>Etat de l'art pile à combustible</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
I.1 Introduction .....	2
I.2 Historique .....	2
I.3 Principe de fonctionnement .....	6
I.4 Différents type des piles .....	8
I.5 Piles à membrane électrolyte polymérique PEMFC.....	9
I.6 Constitution d'une pile à combustible (PEMFC) .....	11
I.6.1 Composants d'une pile PEMFC.....	11
I.6.1.1 L'électrolyte .....	11
I.6.1.2 Les électrodes.....	12
I.6.1.3 Les catalyseurs.....	12
I.6.1.4 Les plaques bipolaires .....	13
I.7 Système à pile à combustible.....	14
I.7.1 Configuration système.....	14
I.7.2 Humidificateur .....	15
I.7.3 Reformeur .....	16
I.7.4 Circuit d'alimentation en air.....	17
I.7.5 Circuit de refroidissement .....	17
I.7.6 Circuit électrique.....	18
I.8 Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles.....	18
I.12 Conclusion.....	18
<b><i>Chapitre II</i></b> <b><i>Modélisation de la pile à combustible</i></b> .....	<b><i>19</i></b>
II.1 Introduction.....	20
II.2 Approches et critères de modélisation des piles PEMFC.....	20

II.3 Modélisation statique de la PEMFC.....	21
II.3.1 Modèle de tension.....	21
II.3.2 Caractéristique tension/densité de courant d'une cellule.....	24
II.3.3 Dimensionnement du stack Pile à Combustible.....	26
II.4 Calcul des pressions partielles.....	27
II.4.1 Les hypothèse du modèle de calcule des pressions partielles.....	27
II.4.2 Calcul de la pression partielle d'hydrogène.....	28
II.5 Modélisation et commande d'un système énergétique à pile à combustible.....	30
II.5.1 Modélisation du système.....	30
II.5.1.1 Modélisation des convertisseurs.....	30
II.6.conclision .....	34
<b>Chapitre III    <i>Résultats de la simulation du système à pile combustible</i> .....</b>	<b>35</b>
III.1 Introduction.....	36
III.2 Résultats de la simulation du système à pile à combustible.....	36
III.2.1 Caractéristique statique de la pile PEMFC.....	37
III.2.2Caractéristiqu dynamique de la pile PEMFC .....	38
III.2.2.1 L'effet de l'humidité relative sur les performances de pile PEMFC.....	41
III.2.2.2 L'effet de la température sur les performances de pile PEMFC.....	43
III.3 Implémentation de la pile à combustible dans un système énergétique.....	44
III.3.1 l'effet de variation du débit molaire $Q_{H_2}$ sur les performances électriques.....	46
III.4.Conclusion .....	47
Conclusion générale.....	48
Bibliographie.....	49

Liste des figures

*Chapitre I*

Fig I.1 : Expérience de Sir W. Grove en 1839 [5].....3

Fig I.2 : Source de puissance à pile à combustible du type alcalin réalisée par UTC pour l'orbiteur de navette de la NASA .....4

Fig I.3 : Piles à combustible de UTC à Central Park New York [13].....5

Fig I.4 : Autobus à pile à combustible [14].....6

Fig I.5: Composition d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible [7].....6

Fig I.6: Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique [16].....7

Fig I.7: Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC [17].....10

Fig I.8 : Structure d'un empilement de cellule d'une PAC [7].....10

Fig I.9.: Structure chimique d'une membrane de type Nafion 117 [17].....11

Fig I.10: Plaque bipolaire en tôle métallique. Sa surface active atteint 66 cm<sup>2</sup>. [7].....14

Fig I.11: Schematic diagram of a fuel cell system integrated with a fuel processor [21].....14

Fig I.12 : Différents constituants d'un système pile à combustible.....15

*Chapitre II*

Fig II.1.:caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEM.....22

Fig II.2 : Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) [47].....24

Fig II.3 : Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule).....24

Fig II.4 : Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par cellule).....25

Fig II.5 : Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par 582 cellule).....25

Fig II.6 : Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par 582cellule)..26

Fig II.7: Illustration d'un orifice [Mog04].....29

Fig II.8: Modèle dynamique des pressions partielles de la pile à combustible PEMFC.....30

FigII.9: convertisseur DC/DC(hacheur BOOST).....31

Fig II.10: Le fonctionnement de l'algorithme PO.....33

Fig II.11. Organigramme de la méthode PO.....34

*Chapitre III*

Fig III.1 : Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) .....37

Fig III.2:Variation de la tension de la pile en fonction de courant et de la pression PH<sub>2</sub>.....37

Fig III.3 : Variation de la tension de PAC en fonction de courant et de la température.....38

Fig III.4 : Variation de la puissance de PAC en fonction de courant et de la température....38

Fig III.5 : Modèle dynamique de la pile à combustible PEMFC« simulink matlab ».....39

Fig III.6 : Variation de la tension un seule cellule d'une pile à combustible en fonction du temps.....	39
Fig III.7: Variation du courant $I_{stack}$ et en fonction de temps.....	40
Fig III.8: Variation de la tension $V_{cell}$ de stacks d'une pile à combustible en fonction du temps.....	40
Fig III.9: Variation de la puissance d'une pile à combustible en fonction du temps.....	40
Fig III.10 : Variation de l'humidité relative fonction du temps.....	41
Fig III. 11: Variation de la tension de PEMFC en fonction du temps.....	42
Fig III. 12: Variation de la puissance de PEMFC en fonction du temps.....	42
Fig III.13: Variation de Température en fonction du temps.....	43
Fig III.14 : Variation de la tension de PEMFC en fonction du temps.....	44
Fig III.15: Variation de la puissance de PEMFC en fonction du temps.....	44
Fig III.16: Structure globale de l'implémentation de la pile PEMFC dans un système énergétique sous « simulink matlab ».....	45
Fig III.17 : Variation du débit molaire $q_{H2}$ en fonction de temps.....	46
Fig III.18: Variation de la tension de convertisseur DC /DC (Boost) .....	46
Fig III.19: Variation du courant de convertisseur (boost) .....	46
Fig III.20 : Variation de la puissance de la charge.....	47

**Liste de tableau**

Tableau. I.1 : Différents types de pile à combustible [17][18].....8  
TabII.1 :Tableau de vérité de l’algorithme « perturbation & observation .....9  
Tableau III.1 : Paramètres du modèle [41], [43], [48], [49].....36

## Notation

- PAC : Pile à combustible
- PEMFC : Pile à membrane polymère échangeuses de protons
- ANN : artificiel neural network
- ANFIS: adaptive neural fuzzy inference system
- $F$  : Constante de faraday (96500 C).
- $n$  : Nombre d'électrons échangés dans les réactions électrochimique.
- $EO$  : fem de la pile à l'équilibre (c'est-à-dire à intensité de courant nulle) (V)
- $\Delta S$  est le changement d'entropie ( $J/mol$ )
- $R$  : Constante universelle du gaz(8,314 J/K.mol)
- $p_{H_2}$  Pressions partielle d hydrogène (atm)
- $p_{H_2}$  Pressions partielle de l'oxygène (atm).
- $T$  : Température de fonctionnement de la pile ( $K$ )
- $T_{ref}$ : Température de référence( $K$ )
- $V_{act}$ : Polarisation d'activation ( $V$ ).
- $V_{ohm}$  : Polarisation ohmique( $V$ ).
- $V_{canc}$  : Polarisation de concentration ( $V$ ).
- $E_{nerst}$  : Tension de Nerst ( $V$ )
- $I_{stack}$  : est le courant de fonction de la pile ( $A$ ).
- $\xi_i$  : Coefficients paramétriques de la pile.
- $C_{O_2}$  : Concentration de l'oxygène
- $R_m$ : Résistance équivalente de la membrane:
- $\rho_M$  : Résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron.
- $A$  : est la surface active de la pile en ( $cm^2$ ).
- $l$  est la largeur de la membrane en ( $cm$ ).
- $J_{max}$  : Densité du courant limite ( $A/cm^2$ ).
- $P_{pil}$  : Puissance électrique brute du stack (W)
- $N$  : Nombre de cellules de l'empilement
- $V_{cell}$  : Tension par cellule (V)
- $J$  : Densité de courant ( $A/cm^2$ )
- $V_{an}$  : Volume de l'anode( $cm^3$ ).

- $n_{H_2}$  : Nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode
- $B$  : Constante empirique électrochimie
- $\tau_{H_2}, \tau_{O_2}$  Constants de temps de l'hydrogène et de l'oxygène ( $s$ )
- $K_{H_2}, K_{O_2}$  : Constants molaire du modèle de l'hydrogène et d'oxygène ( $Kmol/atm.s$ ).
- $K_r$  : Constante définie afin de simplifier le modèle ( $Kmol/s.A$ ).
- $K$ : est la constante de la valve
- $q_{H_2}$  : débit molaire de l'hydrogène entrant ( $Kmol/s$ )
- $q_{O_2}$  : débit molaire d'oxygène entrant ( $Kmol/s$ ).
- $\tau_1, \tau_2$  Constants des temps du réformer ( $s$ )
- $U$  : Facteur de l'utilisation
- MPPT: Maximum Power Point Tracking
- (P&O) : Perturbation-Observation
- (INC) : Incrémentation
- (FL) : l'approche Floue
- MOSFET : Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor
- IGBT : insulated-gate bipolar transistor
- PPM : Point de Puissance Maximale
- DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

### Introduction générale

La question de l'énergie comprend actuellement deux questions. L'un est lié au risque d'épuisement des ressources fossiles et de fission, et l'autre est lié à l'environnement. Les ressources utilisées aujourd'hui sont en réalité des réserves limitées, dont les combustibles fossiles (hydrocarbures, charbon, etc.) et les combustibles de fission (uranium). [1]

L'utilisation de ces sources d'énergie a également des effets secondaires indésirables : les hydrocarbures émettent des gaz à effet de serre, et l'énergie nucléaire produit des déchets difficiles à traiter. Face à la réduction des ressources énergétiques, il est devenu crucial de trouver des alternatives énergétiques ayant les mêmes caractéristiques que les hydrocarbures en termes de stockage et de transport. [1]

Dans ce cas, l'hydrogène s'est avéré être un candidat très important, même s'il n'est qu'un vecteur énergétique plutôt qu'une ressource majeure. De plus, l'hydrogène peut répondre aux défis climatiques en rationalisant l'utilisation d'énergies renouvelables naturellement dispersées et incertaines.

L'hydrogène qui n'existe pas dans la nature peut en effet être synthétisé à partir de sources d'énergie renouvelables. En plus de sa fonction de vecteur énergétique, sa capacité de stockage a également été mise à profit : d'une part, il permet de surmonter l'incertitude de ces modes de production, et d'autre part, il peut répondre aux exigences des consommateurs d'énergie. [1]

La pile à combustible s'impose alors naturellement comme le chaînon manquant en transformant l'énergie chimique en énergie électrique pouvant être manipulée avec des rendements élevés. La pile à combustible met en effet en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour donner de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. [1]

Parmi toutes les familles existantes de piles à combustible, nous intéresserons qu'aux piles à basses températures à membranes polymères échangeuses de protons (PEM), cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial.

Le présent travail porte sur l'étude et Simulation d'une Pile à Combustible de type PEM, dont l'objectif est, d'une part la modélisation dynamique d'une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), et d'autre part, l'étude de l'effet de différents paramètres (l'air, le débit de l'hydrogène, ainsi la température) sur les caractéristiques d'une pile à échangeuse de proton, il est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les piles à combustibles, les différents types existants, ainsi leur classification.

-Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation dynamique d'un système pile à combustible liée au convertisseur DC/DC (boost) commandée avec MPPT (P&O) a fin de poursuivre la variation de différent conditions de fonctionnement à savoir : l'air, le débit de l'hydrogène, ainsi la température

- La troisième chapitre Résultats de simulation.

**CHAPITRE I**  
**ETAT DE L'ART PILE A**  
**COMBUSTIBLE**

## **I.1 Introduction**

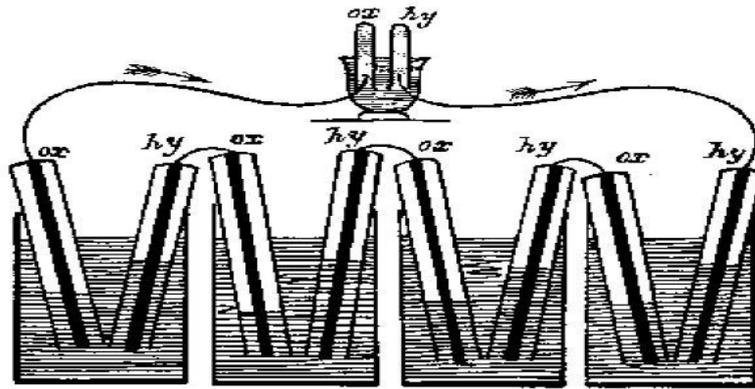
Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio) [2].

Les piles à combustibles font valoir des arguments forts qui pourraient permettre à cette technologie de s'imposer dans les applications de production d'énergie. Dans un marché en constant changement (ouverture à la concurrence) et face à une demande croissante en électricité, les piles à combustibles représentent des sources de production d'énergie très intéressantes. Tout d'abord les piles à combustibles sont très efficaces dans la conversion du combustible en électricité. D'autre part elles ne dégagent que de l'eau et de la chaleur qui peut être valorisée pour chauffer les maisons et commerces. De plus, les piles à combustibles sont silencieuses. Finalement la pile à combustibles se révèle intéressante pour les besoins simultanés en électricité et en chaleur. Mais on peut aussi envisager des demandes uniquement en électricité ou en chaleur ou distinguer selon que les besoins dominants seront en électricité ou en chaleur. Les deux étant produits par une pile (dans un ratio dépendant du type de pile).

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue un état de l'art sur les piles à combustibles, leur classification, mode de fonctionnement, ainsi que leur application, sans oublier les avantages et les inconvénients de ces dernières.[3]

## **I -2- Historique**

L'effet physico-chimique à l'origine des piles à combustible a été découvert en 1838 par le professeur Christian Friedrich Schönbein qui a observé un courant électrique dû à la Combinaison d'hydrogène et d'oxygène. La première pile à combustible fut présentée par William GROVE en 1839 sous l'expérience suivante : une cellule hydrogène-oxygène (figure I-1) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte acide (acide sulfurique) [4].



**Fig I.1 :** Expérience de Sir W. Grove en 1839 [5]

Dès 1855, de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, furent mis au point. Les résultats furent modestes, et en 1939 le bilan du premier siècle de recherches était plutôt pessimiste malgré les potentialités indéniables de la filière.

Cependant, cette technique resta ensuite plus ou moins dans l'oubli tandis que se développaient les machines thermiques, les accumulateurs et les piles électriques.

Pourtant des chercheurs continuèrent de s'intéresser à cette technologie:

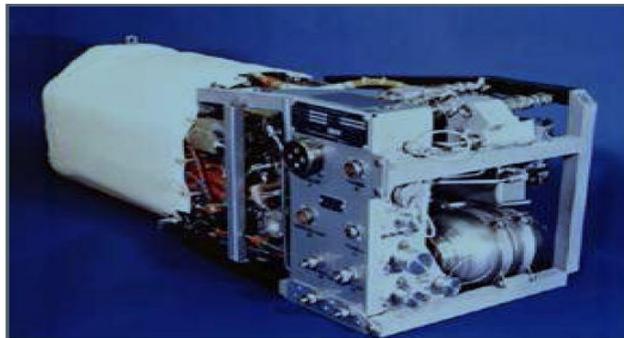
- ✚ En 1889, L. Mond et C. Langer introduisent les catalyseurs (platine) et perfectionnent l'électrolyte [6],
- ✚ En 1921, E. Baur découvrant l'importance de la cinétique, construit une cellule Fonctionnant à haute température (1000°C) [7],
- ✚ Au début du siècle, l'électrolyte est amélioré: introduction de nouveaux matériaux ; carbonates fondus, oxydes solides, acide phosphorique qui sera la base des différents types de piles d'aujourd'hui.

Après 1945, 3 groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprirent les études sur les principaux types de générateurs, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt. Les premières applications "commerciales " des piles à combustible furent les programmes spatiaux du début des années 60, GEMINI, APPOLLO, Spacelab... [8] pour lesquels furent développées des piles à membranes (General Electric) et des piles alcalines sous pression (Pratt and Wittney).

Depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grandes entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics, dans le cadre de programmes nationaux ou multi nationaux de diversification énergétique ou de protection de l'environnement.

A partir de 1998 l'offre commerciale est tous les jours plus importante et même si certaines filières semblent dans l'état actuel de nos connaissances, proches de la maturité économique, d'autres, ont encore des problèmes technologiques à résoudre pour devenir compétitives, fiables et sûres.

De nos jours, la source électrique utilisée dans la navette spatiale de la NASA est une pile à combustible (figure I.2) , conçue et mise au point par la compagnie United Technologies (UTC). Dans la navette, la totalité de la puissance électrique est produite par un ensemble de 3 piles à combustible capables de fournir une puissance continue de 12 kW et 16 kW pour de courtes périodes. Il n'y a pas de piles secondaires et une pile à combustible seule est suffisante pour assurer la sûreté de fonctionnement nécessaire lors du retour du module.



**Fig I.2 :** Source de puissance à pile à combustible du type alcalin réalisée par UTC pour l'orbiteur de navette de la NASA .[7].

M. W. Ellis et al. [9] et J. H. Hirschenhofer [10] ont décrit ces systèmes de génération de puissance par pile à combustible et ont montré qu'ils étaient utilisables dans de plus en plus d'applications. Pour les systèmes portables, une pile à combustible couplée à un réservoir de carburant peut offrir une densité de stockage d'énergie plus élevée et plus commode que les batteries conventionnelles. Pour les applications dans les transports, les piles à combustible offrent un meilleur rendement que les moteurs thermiques conventionnels couplés à des générateurs électriques. Pour les applications stationnaires de forte puissance, les piles à combustibles peuvent être utilisées pour compléter le réseau électrique existant sans émettre, localement, de gaz polluants. De plus, les systèmes de pile à combustible peuvent être connectés directement à un bâtiment pour fournir la puissance électrique et thermique avec des efficacités de cogénération pouvant atteindre 80%.

John T. S. Irvine [11] a décrit l'utilisation des piles à combustible comme futur moyen de production d'énergie. Dans le long terme, elles seront des éléments essentiels dans une économie où l'hydrogène serait un vecteur énergétique. Dans le court terme, elles promettent

des améliorations du rendement de conversion de carburants plus conventionnels et d'importantes réductions d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Différents travaux ont illustré la possibilité d'utiliser la pile à combustible dans des systèmes de génération de puissance distribuée. Par exemple, Y. Kishinevsky *et al.* [12] rapporte l'utilisation stationnaire d'une pile à combustible installée dans la ville de New York (figure I.3).

Depuis les années 1990, les Etats-Unis ont installé 12 piles à combustible de la compagnie UTC sur 8 sites, permettant de fournir une puissance électrique de 2,4 MW. Neuf des douze piles à combustible sont alimentées par des carburants de type biogaz. La plupart de ces unités fournissent de l'électricité et de la chaleur utilisable pour des habitations, sans émission locale de polluant.



**Fig I.3 :** Piles à combustible de UTC à Central Park New York [13].

Dans d'autres travaux, K. Chandler *et al.* [14] ont présenté des résultats expérimentaux obtenus sur un autobus à pile à combustible financé par le département américain de l'énergie « DOE » (figure 1.4). Cet autobus est un système hybride combinant une pile à combustible et des batteries classiques. La source de puissance principale est une pile à combustible de type PEM de la compagnie UTC (60 kW, 160- 250 V), la source auxiliaire est constituée de 48 batteries 12 V de la compagnie Panasonic. Cet autobus a une autonomie de 320 km avec une capacité de stockage de carburant de 25 kg d'hydrogène à 248 bars.



Fig I.4 : Autobus à pile à combustible [14].

### I.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est basé surtout sur l'électrolyte. L'énergie est produite quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air. Cette réaction chimique est une oxydoréduction. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur [14]. La figure I.5 ci-dessous représente l'ensemble des étapes afin d'obtenir un courant électrique.

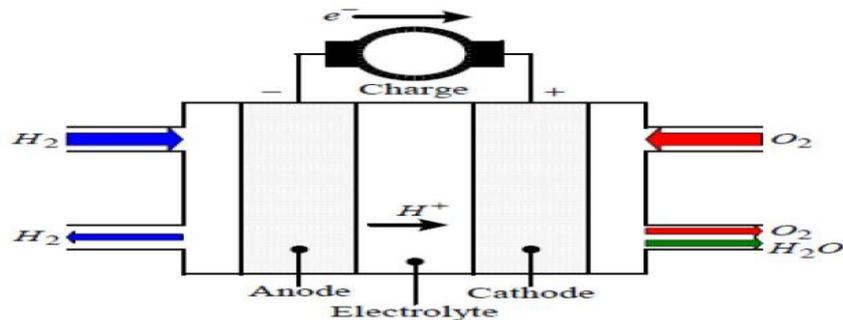


Fig I.5 : Composition d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible [7]

Les électrodes (anode et cathode) sont exposées à un flux de gaz qui fournit aux électrodes l'apport en carburant et en oxydant, soit respectivement l'hydrogène et l'oxygène. Les électrodes doivent être perméables à ces gaz et possèdent une structure Poreuse. La structure et la composition des électrodes peuvent être complexes et requièrent donc d'être optimisées pour des applications pratiques. Pour sa part, L'électrolyte doit posséder une perméabilité aussi faible que possible aux gaz. Donc au niveau d'anode, on a l'oxydation de l'hydrogène selon:



Il s'agit d'une réaction catalysée. L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons qui circulent dans le circuit électrique reliant l'anode à la cathode.

Au niveau de la cathode, on assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène selon:



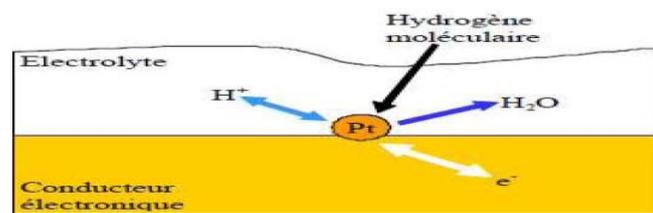
Le bilan donne donc:



Cette réaction crée une différence de potentiel entre les électrodes de l'ordre d'un Volt. Du fait, les constructeurs assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série afin d'obtenir une tension suffisamment élevée pour la traiter, d'un point de vue électrique, avec un rendement satisfaisant.

En outre la réaction exothermique nous donne l'eau au niveau de la cathode comme elle peut nous le donner au niveau de l'anode si un électrolyte conducteur d'anions est utilisé à la place, ce qui est le cas dans les piles à haute température.

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine) à des points appelés « points triples » (figure I.6) [16] :



**Fig I.6:** Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique [16]

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

- ✚ Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons  $H^+$ .
- ✚ Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons  $e^-$ .
- ✚ Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.
- ✚ Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée dans le cas de la cathode.
- ✚ Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.

- ✚ Nous pouvons ainsi apprécier la difficulté de réalisation de cette interface qui représente un point clé de la réalisation de l'ensemble Electrode-Membrane-Electrode appelé souvent EME.

#### I.4 Différents type des piles

Les piles à combustible sont généralement six types. Ils sont classifiés selon la nature d'électrolyte utilisé et leur température de fonctionnement. On distingue ainsi, les piles à basse température (<200°C) et les piles à haute température (650-1000°C). Ces types sont [15][17] :

- ✚ Les piles alcalines (AFC Alkaline Fuel Cell) ;
- ✚ Les piles à membranes polymères échangeuses de protons (PEMFC Proton Exchange Membranes Fuel Cell) ;
- ✚ Les piles au Méthanol direct (DMFC Direct Methanol Fuel Cell);
- ✚ Les piles à acide phosphorique (PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell);
- ✚ Les piles à carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell) ;
- ✚ Les piles à oxydes solides (SOFC Solid Oxide Fuel Cell) .

Le tableau ci-dessous (Tableau I.1) résume les différents types des piles à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques [17])

Types de pile à combustible	Ion	T°(°C)	Applications Typiques
Pile à combustible alcaline AFC (Alkaline Fuel Cell)	OH <sup>-</sup>	500 200	Apollo, Navette
Pile à combustible à membrane PEMFC spatiale (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	H <sup>+</sup>	30 100	Véhicule, Stationnaire
Piles à combustible au méthanol direct DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	H <sup>+</sup>	20 90	Portable
Pile à combustible à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	H <sup>+</sup>	220	Stationnaire
Pile à combustible à carbonate fondu MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	650	Stationnaire
Pile à combustible à oxyde solide SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	O <sup>-2</sup>	500 1000	Cogénération Production Centralisée

**Tab. I.1** : Différents types de pile à combustible [17] [18].

Notre étude portant sur l'application stationnaire (résidentielle), la pile de type PEMFC se montre comme le choix le plus adéquat. Sachant que la pile DMFC présente l'inconvénient de faible rendement et le fait de ne fonctionner qu'au méthanol ce qui la place dans une catégorie à part. Quant à la pile de type AFC, elle souffre de l'incompatibilité avec le  $CO_2$ , ce qui limite son application que dans le domaine spatial ou sous-marin. Pour les piles fonctionnant à haute température (SOFC, MCFC), la dégradation des matériaux est assez élevée et par suite la durée de vie reste un défi énorme, ajouté à cela la nécessité d'un temps de démarrage relativement long (une dizaine de minutes pour une pile SOFC démarrant à froid) mais n'empêche pas son utilisation dans la production énergie électrique. En comparant ces piles avec la pile PEMFC, cette dernière présente l'avantage de posséder une membrane solide (pas de fuites dues aux vibrations) et surtout une densité massique de puissance plus élevée la rendant assez compacte et économique. Actuellement, les études se concentrent sur ce type de pile afin de surmonter les défis techniques et économiques permettant sa commercialisation. C'est donc une pile de type PEMFC que nous allons aborder dans la suite de notre étude.

### **I.5 Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)**

La pile à combustible de type PEM est actuellement la plus prometteuse pour les applications automobiles et stationnaires dont elle a été utilisée dans la majorité des prototypes construits. Dans cette thèse, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible [17].

Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de types Nafion (fabriquées par la société Dupont de Nemours) permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour une généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ  $80^\circ C$  de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane.

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons ( $H^+$ ). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux laboratoires sont à la recherche des catalyseurs plus robustes et moins chers et d'électrolytes polymériques échangeur d'ions plus efficaces et également moins coûteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone.

La tension aux bornes d'une cellule à pile à combustible est très basse de caractère naturel. Les constructeurs assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série afin d'obtenir une

tension suffisamment élevée pour la traiter, d'un point de vue électrique, avec un rendement satisfaisant.

La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la figure 1.7. Se déplaçant dans la direction de  $x$ , les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane [19].

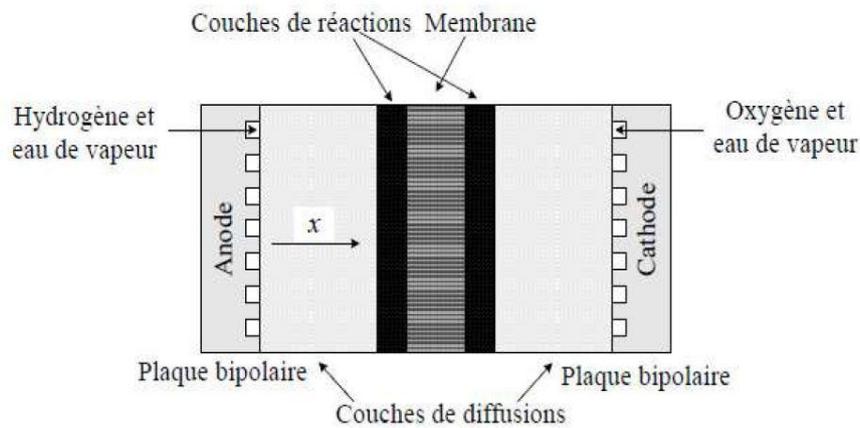


Fig I.7: Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC [19].

**I.6 Constitution d'une pile à combustible (PEMFC)**

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membran eélectrode (EME) (figure I.8)[7].

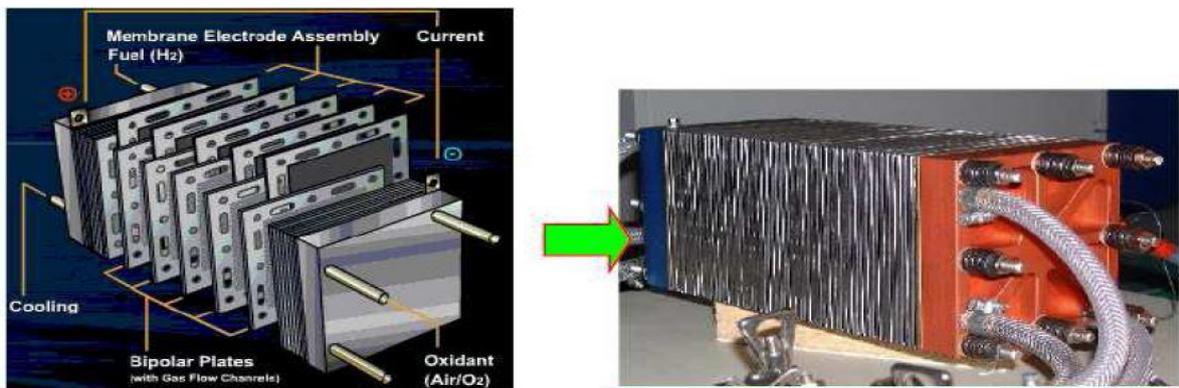


Fig I.8 : Structure d'un empilement de cellule d'une PAC [7]

### I.6.1 Composants d'une pile PEMFC

Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes.

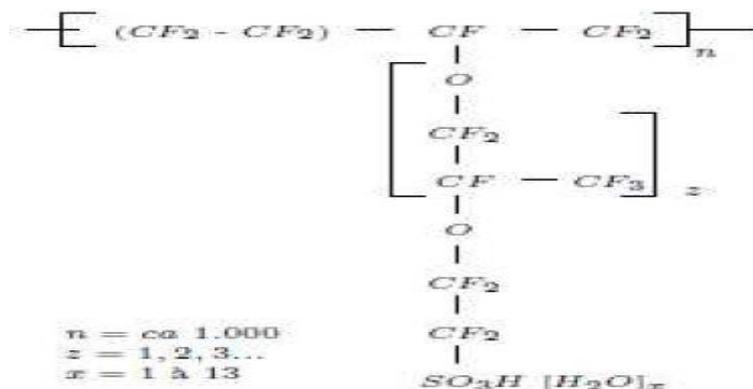
#### I.6.1.1 L'électrolyte

C'est l'élément principal de la pile à combustible. Il permet aux espèces ioniques (et pas les électrons) de transiter de l'anode vers la cathode. Ces électrolytes déterminent la température de fonctionnement de la pile.

Les caractéristiques de chaque type de pile sont leur conductivité ionique, leur étanchéité aux gaz, leur stabilité face aux réactifs chimiques et leurs propriétés mécaniques. A cela s'ajoutent d'autres contraintes selon le type de pile; le niveau de la température, les composants des gaz, les espèces ioniques passant à travers l'électrolyte ainsi que les conditions de pression. Pour la PEMFC l'électrolyte se présente sous la forme solide d'une membrane ayant une épaisseur typique d'une centaine de micromètres (100µm). Cette membrane doit posséder les propriétés suivantes :

- ✚ Une bonne conductrice ionique, plus précisément protonique (H<sup>+</sup>) pour une PEM.
- ✚ Un bon isolant électronique.
- ✚ Imperméable pour l'hydrogène et l'oxygène.
- ✚ Une bonne tenue mécanique face aux contraintes thermiques, de pression et d'hydratation.

Elles possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement de terminaison -SO<sub>3</sub>H ou COOH, permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode [20].



**Fig I.9:** Structure chimique d'une membrane de type Nafion 117 [17]

### I.6.1.2 Les électrodes

Les électrodes sont généralement composées de deux couches : une couche catalytique siège des réactions d'oxydoréduction et une couche de diffusion des gaz.

La couche catalytique est composée de nanoparticules de platine dispersées sur du charbon actif [21], dont la face en contact avec l'électrolyte polymère conducteur de protons est enduite du polymère hydrophobe polytétrafluoroéthylène (PTFE) ce qui permet d'éliminer l'eau du catalyseur.

La couche de diffusion est constituée de feutre de carbone ce qui autorise de véhiculer les gaz vers le catalyseur et d'évacuer l'eau produite ainsi que de libérer les gaz en excès vers la plaque bipolaire. C'est un bon conducteur électrique qui doit aussi assurer le transfert des électrons vers la plaque bipolaire et donc vers le circuit électrique externe.

Les électrodes ont une triple fonction:

- ✚ 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.

### I.6.1.3 Les catalyseurs

Le catalyseur est un métal utilisé pour catalyser (accélérer) la réaction électrochimique au niveau des électrodes en résistant durablement à la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. Pour cela, le métal le plus utilisé est du platine (métal noble) pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe).

#### -Les catalyseurs du côté anode

Pour les piles de basse et de moyenne température, on utilise des métaux précieux: platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine: celui-ci est réparti sous forme de particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe.

Ces électrodes sont très sensibles au CO (elles ne supportent pas plus de 100 ppm) et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage: on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance.

De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher (80F/g) ou la diminution de la quantité nécessaire: alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), terres rares... Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO.

#### **- Les catalyseurs du côté cathode**

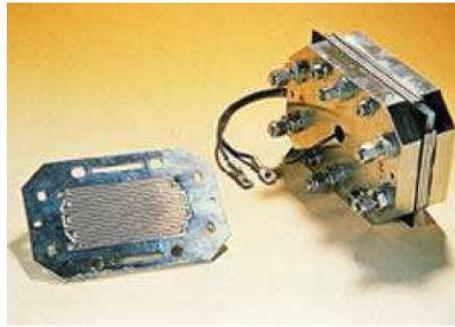
Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

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.

#### **I.6.4 Les plaques bipolaires**

Les plaques bipolaires jouent le rôle de conducteur électronique entre l'anode productrice d'électrons et la cathode consommatrice d'électrons de la cellule voisine. Elles permettent ainsi la distribution homogène des gaz sur les électrodes et la séparation de gaz entre l'anode et la cathode [22]. Les matériaux de ces plaques bipolaires doivent donc répondre à un cahier des charges très rigoureux. Rigidité et légèreté, résistance aux phénomènes d'oxydation et de réduction à température élevée (90 °C), imperméabilité aux gaz, résistance aux vibrations sont des propriétés requises et recherchées [23].

Elles sont généralement en graphite [24] ; sa faible densité, sa bonne résistance chimique et sa bonne conductivité électrique/thermique sont ses principaux atouts [25]. Les plaques bipolaires supportent des canaux d'alimentation en gaz situés sur les deux côtés car elles sont constituées d'une entrée et d'une sortie entre lesquelles circule le gaz. En plus de leur propriété de conduction électrique, elles doivent être imperméables aux gaz et inertes chimiquement afin de résister à l'agressivité du milieu. Enfin, ces plaques doivent être fabriquées à un coût raisonnable.

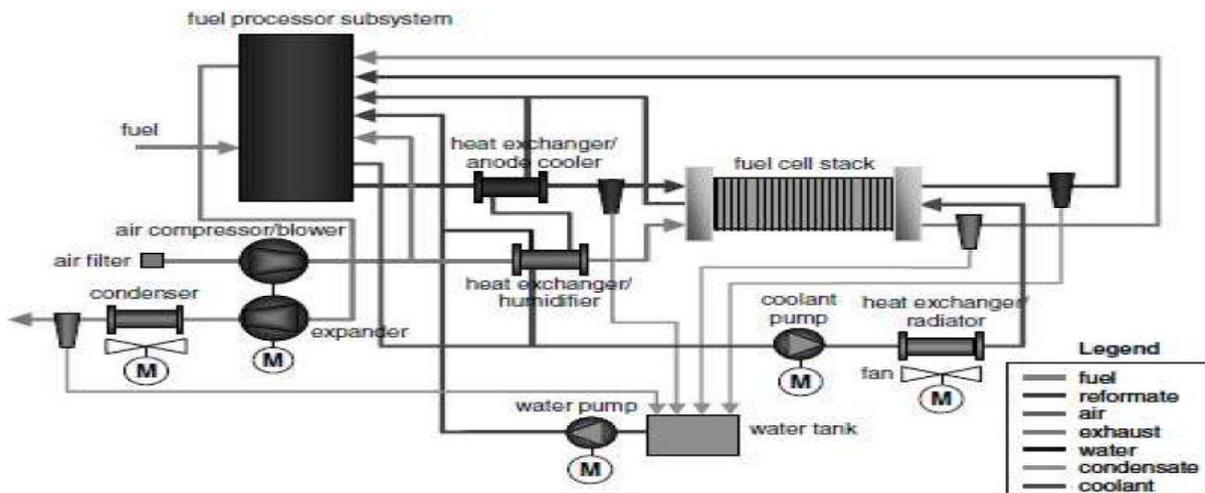


**Fig I.10:** Plaque bipolaire en tôle métallique. Sa surface active atteint 66 cm<sup>2</sup>. [7]

**I.7 Système à pile à combustible**

La pile à combustible a besoin d'un ensemble de conditions pour produire de l'énergie électrique /Boettner et al. 2002/ : elle doit être alimentée en hydrogène et en air, la membrane doit être en permanence humidifiée, et la chaleur produite doit être évacuée. Les composants auxiliaires ont pour rôle d'assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. L'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires est appelé système pile à combustible. Les systèmes de piles à combustibles sont généralement conçus spécifiquement pour une application en particulier. Il existe donc de nombreuses architectures possibles

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle.



**Fig I.12:** Schematic diagram of a fuel cell system integrated with a fuel processor [21]

**I.7.1 Configuration système**

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la figure I.13. Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose de six sous-

systèmes fondamentaux : le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite.

La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet, elle constitue un élément fondamental de la réalisation des systèmes pile à combustible performants[22].

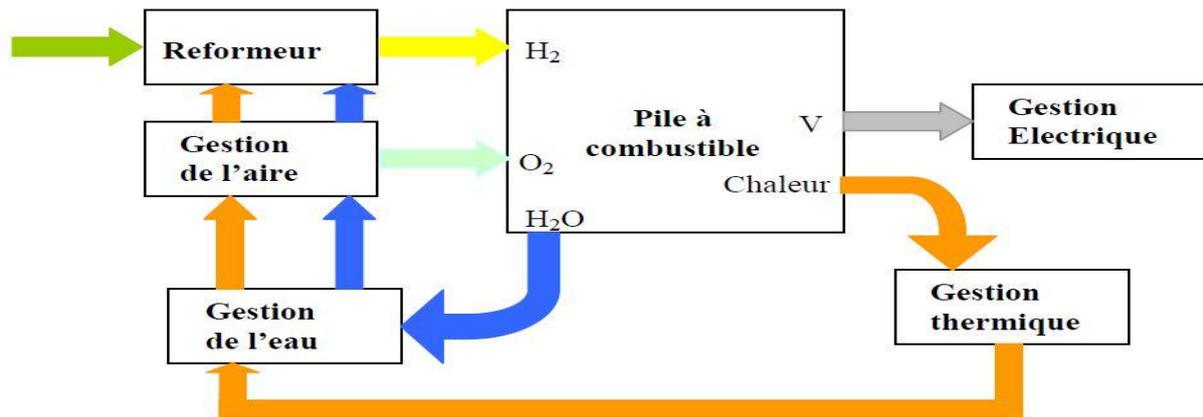


Fig I.13 : Différents constituants d'un système pile à combustible

### I.7.2 Humidificateur

Les performances d'une pile à combustible de type PEM dépendent entre autres de la température des cellules, de la pression des gaz d'entrée (air et hydrogéné) et de l'humidité spécifique. Celle-ci est importante pour assurer une bonne conductivité ionique des membranes en assurant l'hydratation des AME. Les pertes de potentiel s'en trouvent ainsi réduites [26]. Notons que la quantité de vapeur d'eau maximale transportée par le gaz, d'entrée est d'autant plus grande que la température est élevée. En outre, l'augmentation de la température améliore la conductivité des membranes [27] et accroît la diffusion de l'oxygène et de l'hydrogène [28], ce qui se traduit par une augmentation des cinétiques de réactions. Cependant, pour la plupart des membranes polymères actuelles, la température est limitée par la résistance mécanique du matériau et se situe autour de 80 °C .

Dans un système pile à combustible, l'humidificateur est le module permettant d'une part, de minimiser l'écart de température entre les gaz entrants et les cellules ; et d'autre part, de maintenir le taux d'humidité de ces gaz proche de la saturation. L'humidité des gaz d'entrée de l'anode et de la cathode a un effet significatif, mais l'impact de l'humidification de l'hydrogène sur les performances de la pile est comparativement plus faible que celui de l'humidification de l'air [28]. Cela explique pourquoi les humidificateurs d'hydrogène sont rarement présents dans les systèmes pile. De plus, l'eau se trouve principalement dans le flux

d'air sortant puisque elle est produite à la cathode. Par conséquent, un humidificateur gaz-gaz est bien plus efficace sur le flux d'air que sur le flux d'hydrogène. Nous pourrions envisager d'utiliser l'air humide sortant de la pile pour humidifier l'hydrogène entrant, mais cela Poserait des problèmes de sécurité si l'étanchéité au gaz des membranes n'était plus assurée. Le coût substantiel des modules d'humidification est également un argument décisif pour la restriction de l'humidification au flux d'air : en 2005 le prix d'un humidificateur à membranes était estimé à 400 \$ [29]. Dans notre cas, la ligne d'entrée d'hydrogène du Mbabane n'est pas humidifiée, nous nous intéressons donc uniquement au flux d'air.

Le circuit d'humidification sert à la récupération de l'eau produite par la pile afin d'humidifier les gaz en entrée. Il comporte [31] :

- Trois séparateurs pour récupérer l'eau liquide
- Un réservoir
- Une pompe ou un autre dispositif assurant la circulation
- Un évapo-condenseur à parois

### **I.7.3 Reformeur**

La plupart des piles à combustible utilisent l'hydrogène comme carburant et que la plupart des sources d'énergie primaires sont des hydrocarbures, un dispositif de production de carburant est parfois nécessaire pour convertir le carburant initial en hydrogène. La complexité du procédé de reformage dépend du type de système pile à combustible et de la composition du carburant d'origine. Pour les systèmes fonctionnant à basse température la pile est alimentée directement par hydrogène. Il est produit au niveau du "système pile" par reformage. On distingue alors:

- Le reformage interne pour les MCFC et SOFC qui aura lieu dans la pile elle-même,
- Le reformage externe pour les PEMFC, PAFC où il se produit dans un système séparé:

Dans ce dernier cas, le principal auxiliaire est le reformeur qui permet à partir d'un composé hydrocarboné (méthane, méthanol, éthanol, essence ...) d'air et/ou d'eau de produire un gaz riche en hydrogène. D'autres organes sont nécessaires: dans le cas du reformage externe, le combustible initial doit être purifié (présence de soufre) et la teneur en CO du gaz arrivant à la pile doit être extrêmement faible (surtout dans le cas des PEMFC qui sont très sensibles au CO). Il faut aussi gérer les flux de chaleur dans le système [17].

Il existe en effet trois techniques de reformage selon le mélange à l'entrée:

- Le vaporeformage: le carburant réagit avec l'eau,

- L'oxydation partielle: le carburant réagit avec l'air,
- Le reformage autotherme: le carburant réagit avec l'eau et l'air.

Le circuit d'hydrogène commence à la sortie du reformer, puis passe par :

- ✚ Une régulation de pression par détendeur
- ✚ La pile (compartiment anodique).
- ✚ Une re-circulation éventuelle d'hydrogène pour éviter la stratification de l'azote susceptible de traverser la membrane.
- ✚ Une vanne de débit.

#### I.7.4 Circuit d'alimentation en air

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant qui est typiquement de l'air. Il est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un Ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air [31].

Le circuit d'air comporte séquentiellement, de l'entrée vers la sortie :

- Un filtre
- Un compresseur (vitesse commandée)
- Un évapo-condenseur à membrane (flux d'entrée)
- La pile à combustible (compartiment cathodique)
- Un séparateur air/eau liquide
- Un évapo-condenseur à membrane (flux de sortie)
- Une régulation de pression (vanne commandée)

#### I.7.5 Circuit de refroidissement

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement.

Le circuit de refroidissement est fermé, il est hydrauliquement indépendant des autres circuits.

Il comporte [31] :

- Une pompe avec un dispositif de régulation de débit
- Un radiateur
- La pile à combustible (les plaques)
- Un by-pass en parallèle de la pile (vanne commandée)
- Un by-pass en parallèle du radiateur (vanne commandée)

### I.7.6 Circuit électrique

Dans les limites du groupe électrogène, ce circuit comporte le branchement des Auxiliaires (pompes, ventilateurs, compresseur, hacheur élévateur, onduleur..) sur la pile.

### I.8 Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles

#### o Les avantages :

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- De faibles émissions sonores
- Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
- Elles sont de construction modulaire,
- Diverses températures de fonctionnement (PEMFC)
- Pas de parties rotatives [3].

#### o Les inconvénients

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler :

- Le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module.
- Le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi [4].

### I.9 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM .On a abordés l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de Fonctionnement, l'architecture des systèmes, leur application, la caractéristique statique d'une pile PEM et son rendement.

Enfin, On a aussi présenté les différentes parties constitution d'une pile à combustible, leurs avantages et inconvénients.

**CHAPITRE II :**  
**MODELISATION DE LA PILE A**  
**COMBUSTIBLE**

## **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation statique, combustible PEMFC. Ce type de pile retient notre attention pour trois raisons essentielles :

- 1) Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une Tech pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur ambiante.
- 2) Elle est, ensuite, insensible à la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air, contrairement à la filière alcaline.
- 3) Enfin elle est de technologie supérieures aux piles à électrolyte liquide (pas de pièces mobiles au sein du convertisseur) ainsi qu'une industrialisation plus aisée : ceci permet d'envisager un coup prospectif compatible marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières [20] [40].

C'est pour toutes ces raisons que nous avons choisi d'étudier l'utilisation d'une pile PEMFC dans notre application.

Dans une pile à membrane é comburant et l'oxygène, en général prélevé de l'air ambiant, le produit de la réaction chimique étant l'eau. L'hydrogène utilisé est soit, stocké dans des bouteilles de gaz comprimé ou dans des métalliques, soit produit par reformage à l'eau de différents charbon, méthanol, propane....

## **II.2 Approches et critères de modélisation des piles PEMFC**

La modélisation des piles PEM prend une part très importante dans leur développement, car elle facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de pile PEM, qui ont généralement chacun ces propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés [13], [17], [41-42],[43],[44].

Il apparaît préalablement essentiel de définir les objectifs pour la future utilisation du modèle. Ce qui conduit à établir des critères d'utilisation du modèle :

rapidité, précision, souplesse, interface graphique, implémentation dans un logiciel. A partir de ces critères d'utilisation, il est possible de déterminer des critères de conception du modèle (approche théorique ou semi-empirique, modèle dynamique ou statique, mono, bi ou tridimensionnel, niveau de détails...).

Dans le cadre de cette étude, notre choix porte essentiellement sur la modélisation d'un système énergétique à pile à combustible destiné à une application résidentielle. Ce qui nous pousse de calculer l'évolution de la tension et de la puissance par des approches théoriques et semi empiriques issues des travaux présentés par Amphlett [41-42], [43].

### II.3 Modélisation statique de la PEMFC

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction:



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinent avec les ions oxygène pour former de l'eau selon la réaction:



#### II.3.1 Modèle de tension

Il existe un grand nombre de modèles quasi statiques pour décrire la réaction chimique présente dans une cellule de pile à combustible. Dans le cadre de cette étude, le modèle d'évolution de la tension choisi est issu des travaux présentés par Amphlett. [45]

Ce modèle est décrit en utilisant la combinaison des lois élémentaires et des modèles empiriques.

Dans le développement des modèles élémentaires, les transports de matière sont pris en compte via les équations de Maxwell. Les potentiels d'équilibre thermodynamique sont définis en utilisant l'équation de Nernst. Les surtensions d'activation sont calculées par les équations de Tafel.[45] La résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck. [45] En utilisant la loi d'Ohm, nous pouvons exprimer la tension de cellule par :

$$V_{\text{Cell}} = E_{\text{nerst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (\text{II.4})$$

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la Polarisation d'activation ( $V_{\text{act}}$ ), la polarisation ohmique ( $V_{\text{ohm}}$ ) et de la polarisation de Concentration ( $V_{\text{conc}}$ ). Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal  $E_{\text{nerst}}$ , une chute de la tension: [46]

$$V_{\text{Cell}} = E_{\text{nerst}} - \text{pertes}. \quad (\text{II.5})$$

$E_{\text{nerst}}$  Dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en utilisant l'équation de Nernst.

$$E_{\text{nerst}} = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{\text{ref}}) + \frac{RT}{2F} [\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2})] \quad (\text{II.6})$$

Où:

$\Delta G$ : Est changement d'énergie libre (J/k.mol).

F: est la constante de faraday (96,487 C/K mol).

$\Delta S$ : est le changement d'entropie (J/k.mol).

R: est la constante universelle du gaz (8,3 14 J/K.mol).

$P_{H_2}$  ,  $P_{O_2}$  : Sont respectivement les pressions partielles de hydrogène et l'oxygène (atm).

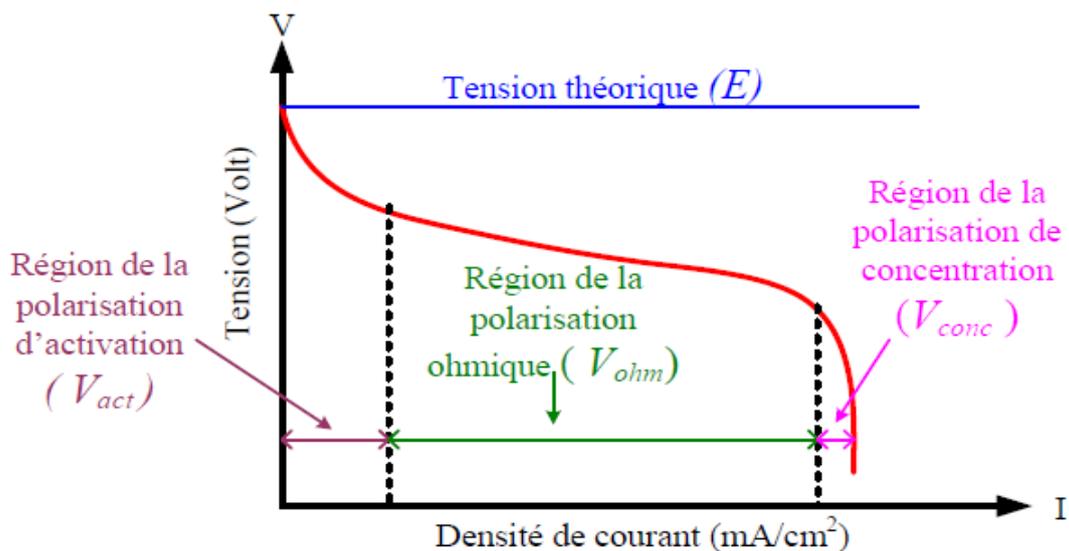
T: indique la température de fonctionnement de la pile (K)

$T_{ref}$ : est la température de référence (K)

En utilisant les valeurs standards de la température et de la pression. L'équation peut être simplifiée comme suit :

$$E_{nerst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (II.7)$$

On peut distinguer sur la courbe caractéristique de la pile PEMFC, trois domaines différents, qu'on appelle également courbe de polarisation :



**Fig. II.1:** caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEM[45]

Il faut noter que la température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant: avec l'augmentation du courant les pressions d'hydrogène et de l'oxygène diminuent, bien que la température augmente.

- **Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics) :**

La polarisation d'activation est donnée par la relation de Tafel: [45]

$$V_{act} = - [\zeta_1 + \zeta_2 \cdot T + \zeta_3 \cdot T \cdot \ln([c_{O_2}]) + \zeta_4 \ln(I_{stack})] \quad (II.8)$$

Avec:

$I_{stack}$  Est le courant de fonction de la pile, les  $\xi$  représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile. [45]

$[C_{O_2}]$  Est la concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode donnée

par la relation : 
$$[C_{O_2}] = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{\left(\frac{-498}{T}\right)}} \quad (II.9)$$

• **Polarisation ohmique :**

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant la Membrane et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique.

La membrane et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, on peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante:

$$V_{ohm} = I_{stack} \cdot (R_m + R_c) \quad (II.10)$$

Avec  $R_m$  est la résistance équivalente de la membrane pour le flux d'ions, elle est calculée

Par la relation :

$$R_m = \frac{\rho_M l}{A} \quad (II.11)$$

Où  $\rho_M$  est la résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron,  $A$  est la surface active de la pile en ( $cm^2$ ), et  $l$  est la largeur de la membrane en ( $cm$ ).  $I_{stack}$  Est le courant de fonction de la pile.

Dans ce travail on a considéré que la membrane est en Nafion. [14],[45]

$$\rho = \frac{181,6 \cdot [1 + 0,03 \left(\frac{I_{stack}}{A}\right) + 0,062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \cdot \left(\frac{I_{stack}}{A}\right) \cdot \left(\frac{I_{stack}}{A}\right)^{2,5}]}{\left[\Psi - 0,643 - 3 \left(\frac{I_{stack}}{A}\right)\right] \exp\left[4,18 \frac{T-303}{T}\right]} \quad (II.12)$$

Avec :

$\Psi$  : Fraction de l'aire ouverte d'une plaque perforée

• **Polarisation de concentration (Mass Transport):**

La polarisation de concentration est donnée par la relation suivante:

$$V_{can} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (II.13)$$

Avec:

$J$ : la densité de courant ( $A/cm^2$ )

$J_{max}$  : La densité de courant maximale ( $A/cm^2$ )

$B$  : Désigne la constante électrochimie (V) et donné par la relation suivant. [45]

$$B = \frac{RT}{nF} \quad (II.14)$$

Avec :

$R$  : est la constante universelle des gaz ( $8.314J/K \cdot mol$ )

T : est la température (K)

n : Nombre des cellules élémentaires de la pile

F : Le constant de Faraday (96.487C/K.mol)

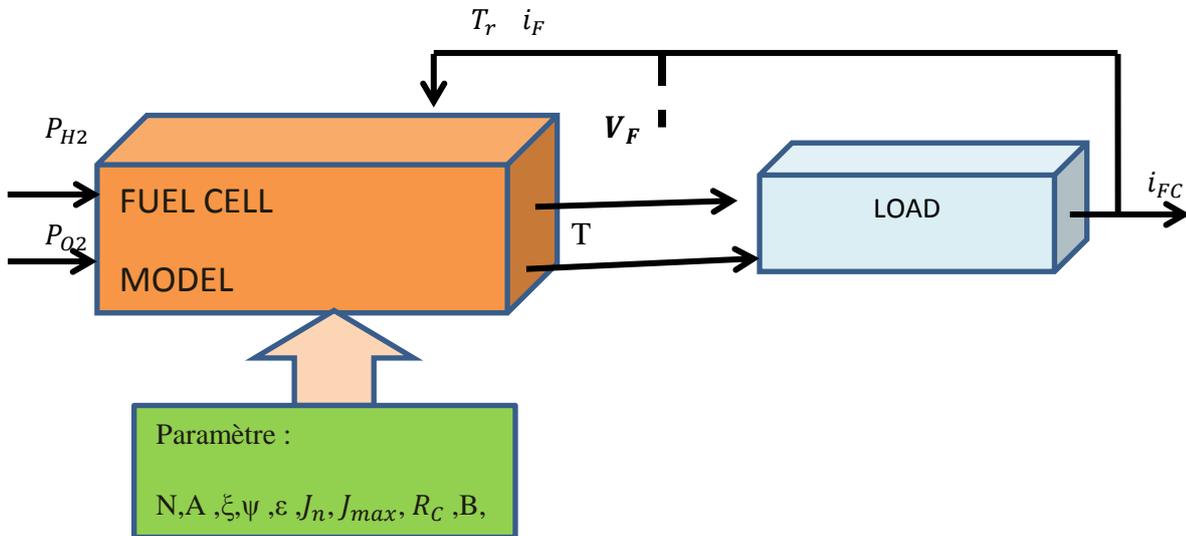


Fig II.2 : Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) [47]

### II.3.2 Caractéristique tension/densité de courant d'une cellule

Cette loi de tension eq (3.4) nous a permis de décrire la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule de pile à combustible PEMFC figure (II.3).

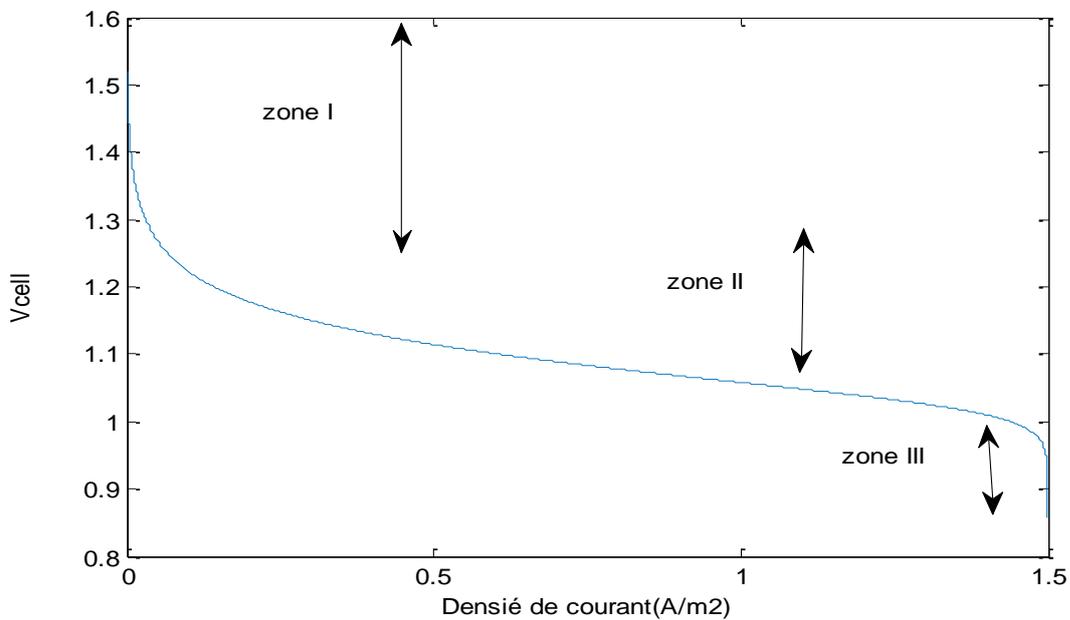
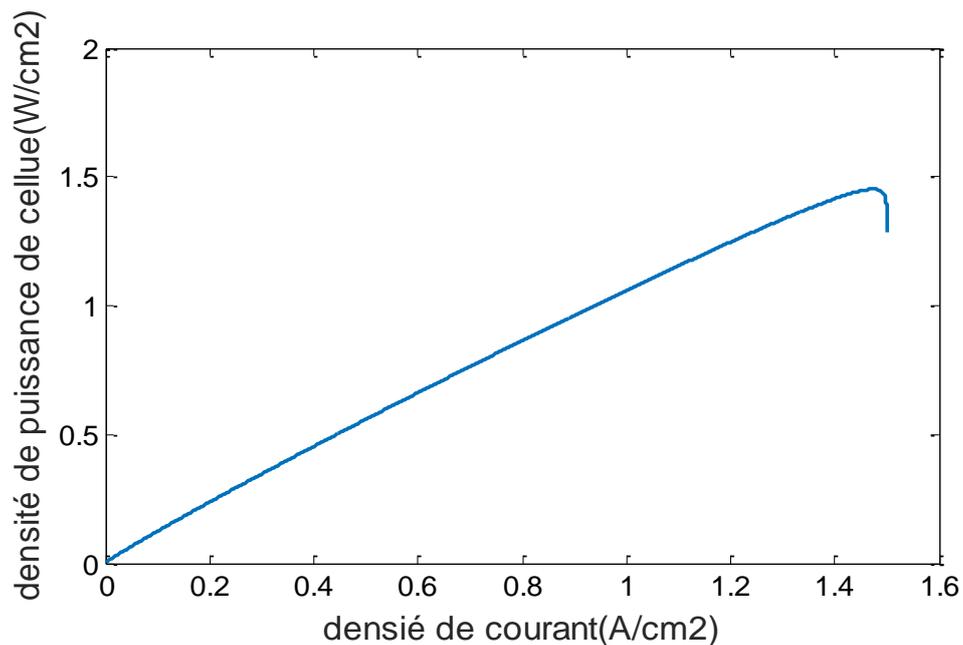


Fig II.3 : Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule)

Nos résultats montrent que cette caractéristique peut être décomposée en trois phénomènes prépondérants en fonction de la valeur de la densité de courant.

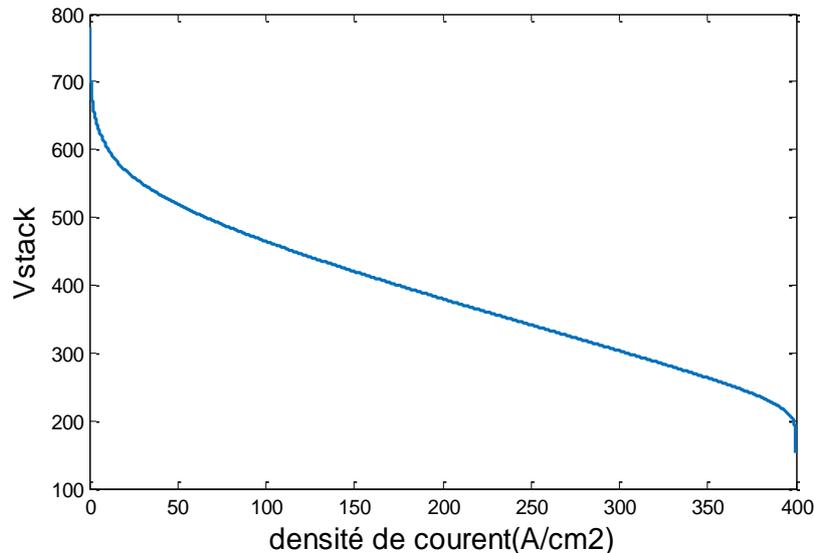
- ✚ La première zone représente la surtension d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.
- ✚ La deuxième zone caractérise le comportement ohmique de la cellule, c'est la zone la plus utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et elle est valable sur une forte plage de variation de la densité de courant.
- ✚ La troisième zone liée à la polarisation de concentration.

La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension. Elle permet de décrire la courbe caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule)



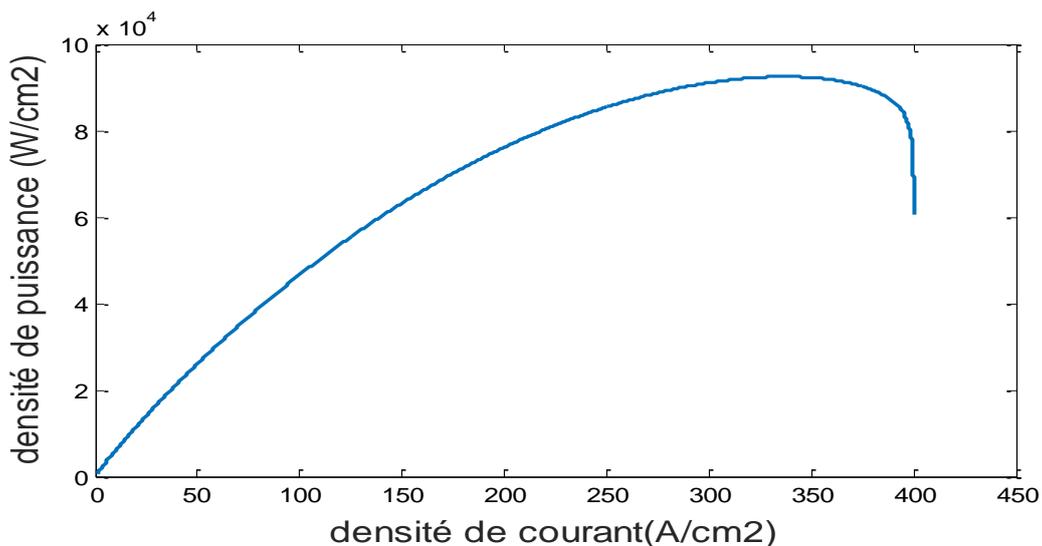
**Fig II.4 :** Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par cellule)

On remarque sur la courbe que la puissance est plus liée au courant qu'à la tension, lorsque nous additionnons le nombre de cellules dans la pile à combustible, nous dessinons les deux courbes (Fig II.5 et Fig II.6)



**Fig II.5 :** Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par 582 cellule)

On note que la densité de courant n'affecte pas le comportement de la cellule, car elle est directement proportionnelle à la tension



**Fig II.6 :** Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par 582cellules)

D'après la figure, nous remarquons que la densité d'énergie élevée a traversé l'augmentation du nombre de cellules, et par conséquent la densité de courant sera augment.

### II.3.3 Dimensionnement du stack Pile à Combustible

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack PAC. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir.

#### -Détermination du nombre de cellules.

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante :

$$P_{pile} = N V_{cell}.J.A \dots \quad (II.15)$$

$P_{pile}$  : Puissance électrique brute du stack (W)

$N$  : Nombre de cellules de l'empilement

$V_{FC}$  : Tension par cellule (V)

$J$  : Densité de courant (A/cm<sup>2</sup>)

$A$  : Surface active des cellules (cm<sup>2</sup>).

$V_{cell}$  et  $J$  sont liés par la caractéristique tension/courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée.

Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires.

Il est intéressant d'avoir la tension  $U_{stack} = N \cdot V_{cell}$  la plus élevée et donc le courant

$I_{stack} = J \cdot A$  le plus faible possible, car cela limite les pertes joule dans la cellule.

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

- ✚ D'augmenter le nombre de cellules jusqu'à la limite technologique actuelle.
- ✚ D'augmenter la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. Ce choix va en outre dans le sens d'un bon rendement de pile.

Comme le montre la Figure II.4 il est intéressant d'avoir des densités de puissance élevées (pour réduire l'encombrement et le coût/kW de la pile). Cela passe par une faible surface de cellule, donc des densités de courant élevées. Cette contrainte s'oppose à l'objectif d'avoir une tension par cellule élevée. Une trop forte densité de courant conduit de plus, à un rendement faible et donc à une puissance thermique à évacuer élevée, ce qui posera des problèmes pour le système. Une limite raisonnable pour la densité de courant est de 0.6 A/cm<sup>2</sup> ce qui correspond à une tension de  $V_{cell} = 1.1$  V (Figure II.3), mais il s'agit d'une valeur arbitraire qu'il faudrait valider par une étude technico-économique [31].

Dans notre application, la pile est connectée à un système de production d'énergie électrique pour une résidence dont la tension est de 640V. Ce qui donne un nombre de cellules de :

$$N = \frac{U}{V_{cell}} = \frac{640}{1.1} = 582 \quad (\text{II.16})$$

#### -Détermination de la surface des cellules

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U} \quad (\text{II.17})$$

$$A = \frac{I_{max}}{J} \quad (\text{II.18})$$

Dans notre application on considère que la puissance utile maximale est de 90kW.

$I_{pac\_max}$  : Courant maximal correspondant à  $P_{utile\_max}$ .

Donc :

$$I_{max} = \frac{90000}{640} = 145 \text{ par mesure de sécurité on considère que } I_{max} = 160 \quad (\text{II.19})$$

Ce qui donnera une surface de  $A = 266 \text{ cm}^2$

## II.4 Calcul des pressions partielles

### II.4.1 Les hypothèses du modèle de calcul des pressions partielles

Quelques suppositions ont été faites à la construction du modèle :

- ✚ les gaz sont idéaux
- ✚ les canaux qui transportent les gaz le long d'électrodes ont un volume fixe mais leur longueur est petite. Cela nous permet de considérer une seule valeur de la pression à l'intérieur d'un canal ;
- ✚ La sortie d'un canal se fait via un seul orifice. Le rapport entre les pressions à l'intérieur et à l'extérieur du canal est assez grand pour pouvoir considérer l'orifice comme étouffé ;
- ✚ la température est stable tout le temps.

### II.4.2 Calcul de la pression partielle d'hydrogène

Pour calculer les pressions partielles, chaque gaz individuel a été considéré séparément et l'équation des gaz idéaux a été appliquée pour chacun. On donne ici l'exemple d'hydrogène [51]

$$P_{H_2} \cdot V_{an} = n_{H_2} \cdot RT \quad (\text{II.20})$$

Où

$V_{an}$  est le volume de l'anode.

$n_{H_2}$  est le nombre d'atome d'hydrogène dans le canal de l'anode.

$R$  est la constante universelle des gaz [l.atm/Kmol.K].

$T$  est la température absolue (K).

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

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (\text{II.21})$$

Où  $q_{H_2}$  est la dérivé de  $n_{H_2}$  et représente le débit molaire de l'hydrogène [Kmol/s]. Il y a trois contributions pertinentes au débit molaire de l'hydrogène :

- Le débit injecté à l'entrée de la pile  $q_{H_2}^{in}$
- Le débit de combustible qui participe à la réaction chimique  $q_{H_2}^r$ .
- Le débit du combustible qui sort de la pile  $q_{H_2}^{out}$

$$q_{H_2} = q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r \quad (\text{II.22})$$

Ainsi :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (II.23)$$

Selon les relations de l'électrochimie, le débit de l'hydrogène qui participe à la réaction peut être calculé en fonction du courant traversant le 'stack' :  $I_{dtack}$

$$q_{H_2}^r = \frac{N O I_{dtack}}{2.F} = 2. K_r . I_{dtack} \quad (II.24)$$

Où:  $K_r$  est une constante définie afin de simplifier le modèle [Kmol/s.A].

En revenant au calcul de la pression partielle d'hydrogène, il est possible d'écrire [50]

$$\frac{d}{dt} (P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - 2. K_r . I_{stack}) \quad (II.25)$$

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

Pour cela, on prend le cas général d'un orifice, considéré étouffé, alimenté avec une mixture de gaz ayant la masse molaire moyenne  $M$  [Kg/Kmol] (figure II.7).

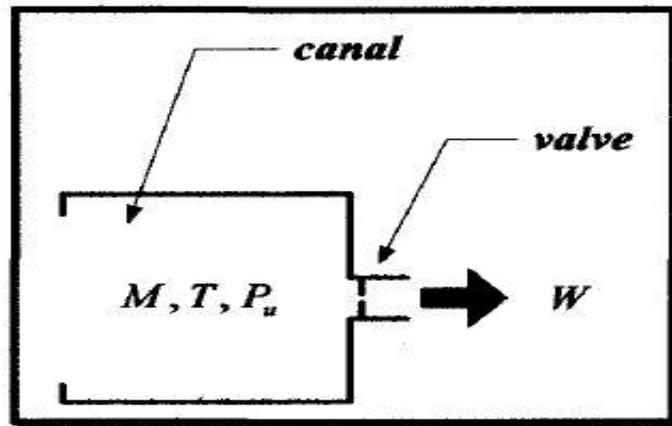


Fig. II.7: Illustration d'un orifice [4]

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

$$\frac{W}{P_u} = K \sqrt{M} \quad (II.26)$$

- $W$  est le débit de masse [Kg/s].

- $K$  ; la constante de la valve qui dépend principalement de la surface -d'orifice [ $\frac{\sqrt{Kmol.kg}}{atm.s}$ ]

- $P_u$  est la pression à l'intérieur du canal [atm].

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

$$q_{H_2}^{out} = K_{H_2} . P_{H_2} \quad (II.27)$$

La relation 3.25 devient

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - K_{H_2} \cdot P_{H_2} - 2 \cdot K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.28)$$

Ce qui donne :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) + \frac{RT \cdot K_{H_2}}{V_{an}} P_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.29)$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation 3.29 on obtient:

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + (V_{an}/RT \cdot K_{H_2})s} (q_{H_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.30)$$

En posant :

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RT \cdot K_{H_2}} \text{ il vient :} \quad (II.31)$$

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.32)$$

Une opération similaire est faite pour l'oxygène, on a obtenu:

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2}s} (q_{O_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot I_{stack}) \quad (II.33)$$

$$\tau_{O_2} = \frac{V_{an}}{RT \cdot K_{O_2}} \quad (II.34)$$

La figure II.8 représente le modèle dynamique de calcul des pressions partielles de la pile à combustible (PEMFC)

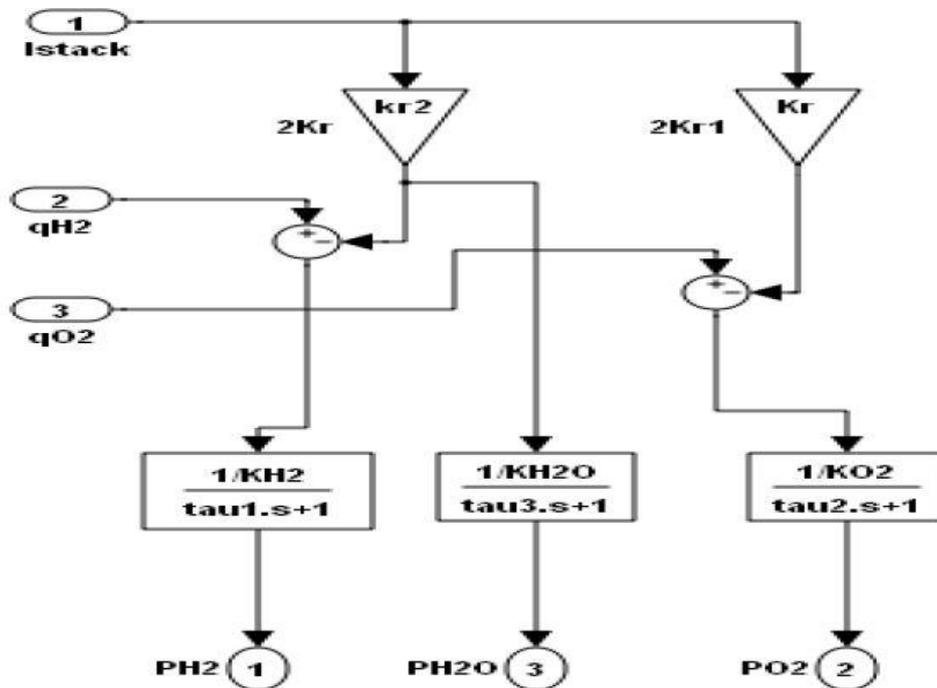


Fig II.8 : Modèle dynamique des pressions partielles de la pile à combustible PEMFC.

## II.5 Modélisation et commande d'un système énergétique à pile à combustible

### II.5.1 Modélisation du système

#### II.5.1.1 Modélisation des convertisseurs

Comme il est montré au paravent dans le chapitre 1, la pile à combustible est équipée d'un convertisseur DC/DC et d'un convertisseur DC/AC pour transformer le signal de sortie en alternatif.

Les convertisseurs statiques DC/DC, sont des systèmes destinés à convertir la valeur moyenne d'une tension continue d'un niveau à un autre en variant le rapport cyclique de conduction. De cette variation de la tension, s'en suit une variation du courant dans le même rapport en gardant la puissance transmise relativement constante en négligeant les pertes joules dans les composants.

D'une manière générale, ces convertisseurs sont construits à base de bobines, de condensateurs dont les inductances et les capacités sont soigneusement dimensionnées afin de Minimiser les ondulations du courant et de la tension. Les commutations sont assurées par des composants de l'électronique de puissance tels les diodes, IGBTs et MOSFETs.[12].

Ces convertisseurs sont largement utilisés dans les systèmes nécessitant une tension continue variable et régulée. Cependant plusieurs types de convertisseurs existent ; En fonction de la charge et de la source, ils peuvent êtres survolteurs dans le cas d'une alimentation à partir d'un panneau photovoltaïque ou d'une pile à combustible, ou dévolteur si la charge utilise une tension inférieure ou égale à celui de la source comme le cas des alimentations pour les actionneurs électriques [10], [11]. Nôtre présente étude portera sur un convertisseur boost .

### ➤ MODELISATION DU CONVERTISSEUR BOOST

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne.

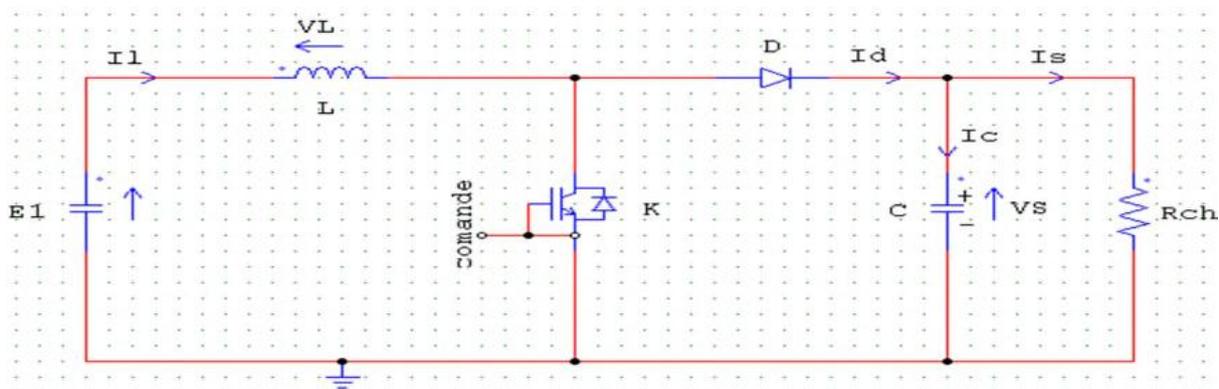


Fig II.9: Convertisseur DC/DC (hacheur BOOST).

### ➤ La commande MPPT

C'est un montage électronique au niveau du régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie fournir par un séries des celles à pile à combustible dans le but d'obtenir la puissance maximale quelle que soit la variation des conditions d'opérateires. Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique D automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du stacks a pile à combustible, ainsi quels que soient les conditions d'opérateires  $PH_2$  et  $PO_2$ , Température, Humidité relative la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

#### • Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques. Quelques méthodes pour cet algorithme :

- ✓ Méthode de perturbation et observation (PO).
- ✓ Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- ✓ Méthode de logique floue (FL).
- ✓ Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL). [52].

#### • La technique Perturbation & Observation (PO)

L'algorithme PO consiste à modifier le point de fonctionnement du module PV ou PAC, en augmentant ou diminuant le facteur de marche d'un convertisseur continu-continu, et mesurer la puissance de sortie avant et après la perturbation. Si la puissance augmente, l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon, le système est perturbé dans la direction opposée. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [54]. La  $\Delta p$  précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (A, B, C et D)

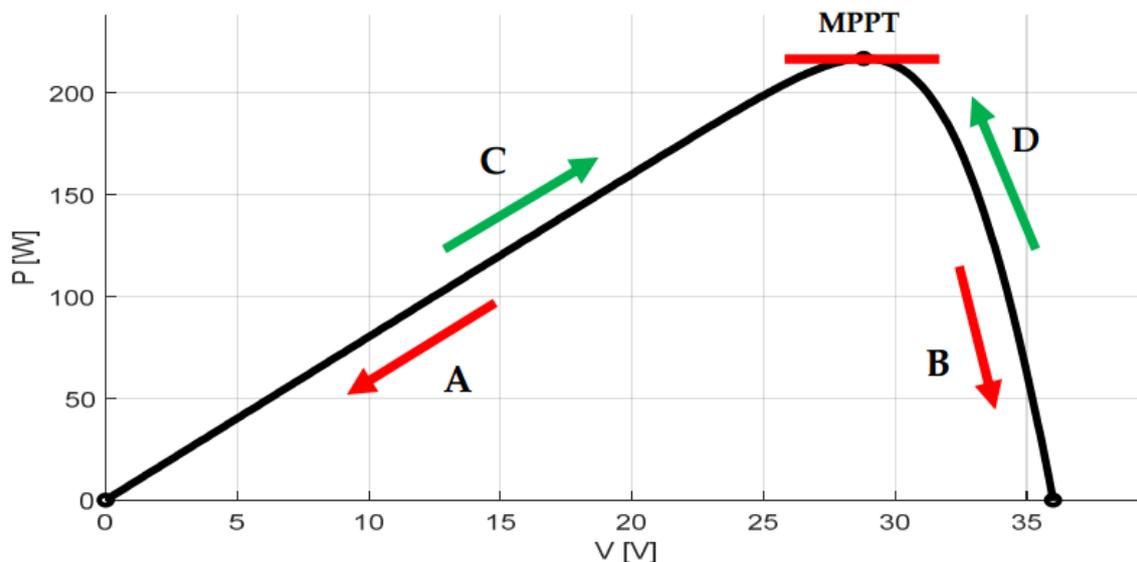
Cas A :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V < 0$

Cas B :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V > 0$

Cas C :  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V < 0$

Cas D:  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V > 0$

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PAC. Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que la tension du module PAC diminue [54]



**Fig II .10:** Le fonctionnement de l’algorithme PO[54].

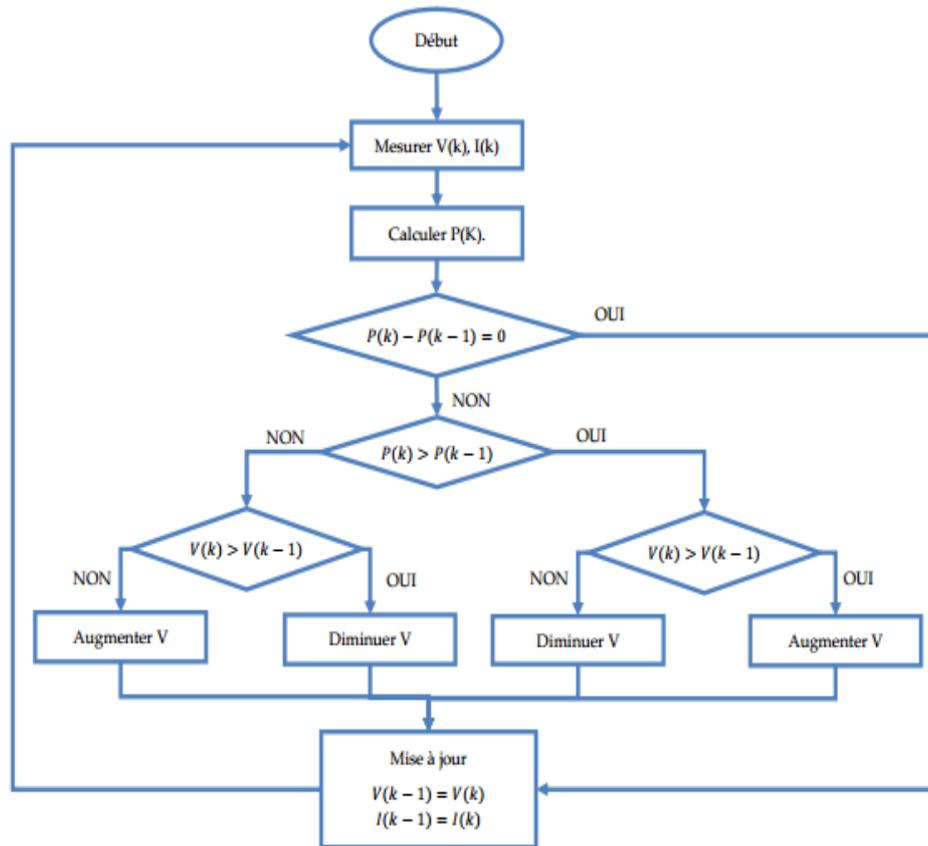
L’organigramme mis en œuvre pour le contrôleur PO est présenté par la Figure suivante :

$$V(k) = v(k-1) + \Delta V \left( \frac{dp}{dv} \mid V = V_{n-1} \right)$$

Perturbation de la puissance	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative(-)	Négative (-)	Positive (+)

**Tableau II.1.**Tableau de vérité de l’algorithme « perturbation & observation »[54]

L’organigramme mis en œuvre pour le contrôleur PO est présenté par la Figure suivante :



**Fig II.12:** Organigramme de la méthode PO[54]

## II.6 : CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle dynamique d'une pile à combustible de type PEM, en passant en revue les différentes équations mathématiques permettant une bonne compréhension des phénomènes qui se déroulent dans la pile à combustible.

Le modèle statique de la pile à combustible proposé dans ce chapitre nous a permis de décrire: la caractéristique tension/densité du courant d'une cellule PEMFC et la caractéristique densité de puissance/densité de courant (par cellule). Ce qui nous a permis de dimensionner la pile à combustible destinée à une application résidentielle.

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement, à l'étude de la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'une pile combustible PEMFC, pour une bonne exploitation, quelles soient les conditions (température et pression, débit de  $H_2$  et  $O_2$ ). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation Observation (P&O)

**CHAPITRE III**

**RESULTATS DE LA SIMULATION**

**DU SYSTEME PILE**

**A' COMBUSTIBLE**

### III.1.Introduction

Pour intégrer une pile à combustible PEM dans un système complexe, il est important de maîtriser son comportement électrique en régime stationnaire et en régime dynamique. Dans ce chapitre, nous commençons par la simulation de la pile à combustible sous l'effet de condition d'opérateurs tels que ( $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$ , température, humidité relative) pour avoir l'impact sur les performances électrique de pile à combustible.

Nous complétons ce chapitre par l'implémentation du modèle dynamique de la pile à combustible dans un système énergétique sous logiciel Matlab/Simulink avec la variation de débits molaire  $Q_{H_2}$  pour objectif de maintenir les performances électriques (tension, puissance) de la pile à combustible PEM stable en utilisant d'un commande MPPT applique au convertisseur DC/DC.

### III.2. Résultats de la simulation du système à pile à combustible

Les résultats de la simulation obtenue sont réalisés sous l'environnement du logiciel Matlab/Simulink avec les paramètres physiques donnés dans le Tableau III.1.

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
F	9684600 C/Kmol	N	582
R	8314.47J/Kmol.K	$K_r$	$0.996 \cdot 10^{-6}$ Kmol/(s.A)
$K_{H_2}$	$4.22 \cdot 10^{-5}$ Kmol/(s.A)	$K_{H_2}$	$2.11 \cdot 10^{-5}$ Kmol/(s.atm)
$\tau_{H_2}$	3.37 (s)	$\tau_{O_2}$	6.74 (s)
$\tau_{H_2O}$	18.418(s)	$K_{H_2O}$	$1/7.716 \cdot 10^{-6}$ Kmol/(s.atm)
U	0.8	r-OH	1.168
$\zeta_1$	-0.948	$\xi_2$	$0.00286 + 0.0002 \cdot \ln A + (4.3 \cdot 105) \ln CH_2$
$\xi_3$	$7.6 \cdot 10^{-5}$	$\xi_4$	$-1.93 \cdot 10^{-4}$
$\Psi$	23	Q methaner	$0.5 \cdot 10^{-4}$ mol/s
L	178 $\mu$ m	J max	1500 mA/cm <sup>2</sup>
Jn	1.2 mA/cm <sup>2</sup>	B	0.016 V
RC	0.0003 $\Omega$	T	343K

**Tableau III.1** : Paramètres du modèle [41], [43], [48], [49]

III.2.1 Caractéristique statique de la pile PEMFC

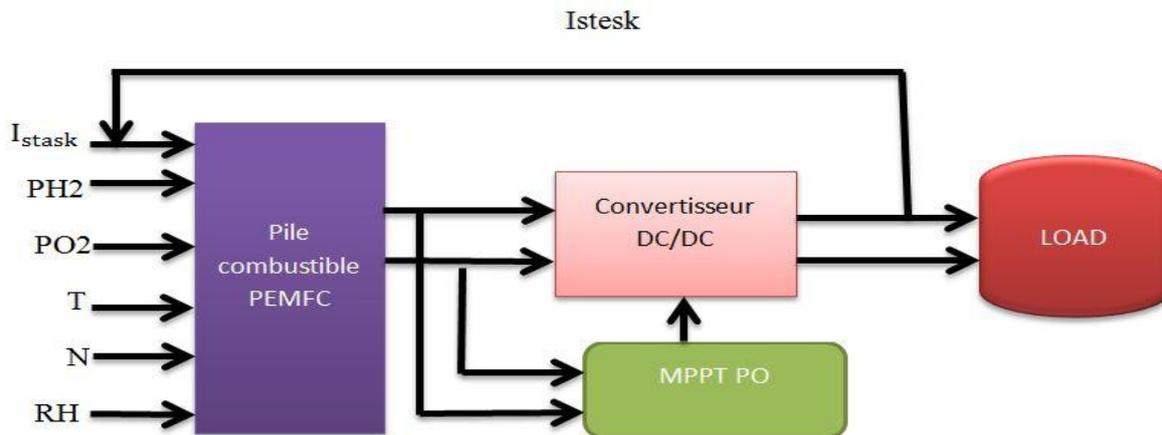


Fig. III.1 : Modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC)

• Caractéristique Tension/ Courant et Pression d'hydrogène

Le résultat relatif à cette caractéristique est présenté dans la figure (III.2). On remarque que la tension diminue de 650 V jusqu' à 0 V pour une variation du courant de 0 A à 80 A. Cette dernière valeur du courant représente le courant limite de PAC.

On constate également sur cette figure l'influence de la pression (d'hydrogène) sur la Tension. Pour des pressions faibles inférieures à 0.5 (atm) la tension augmente rapidement En fonction de la pression d'hydrogène. Contrairement pour des pressions supérieures à cette valeur la caractéristique tension/pression est saturée.

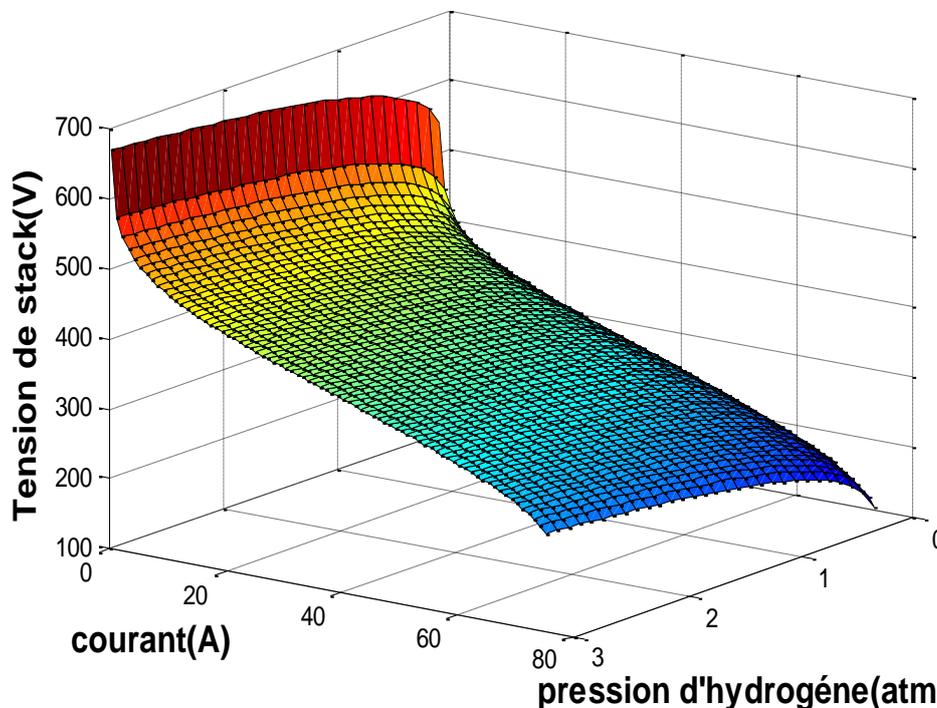
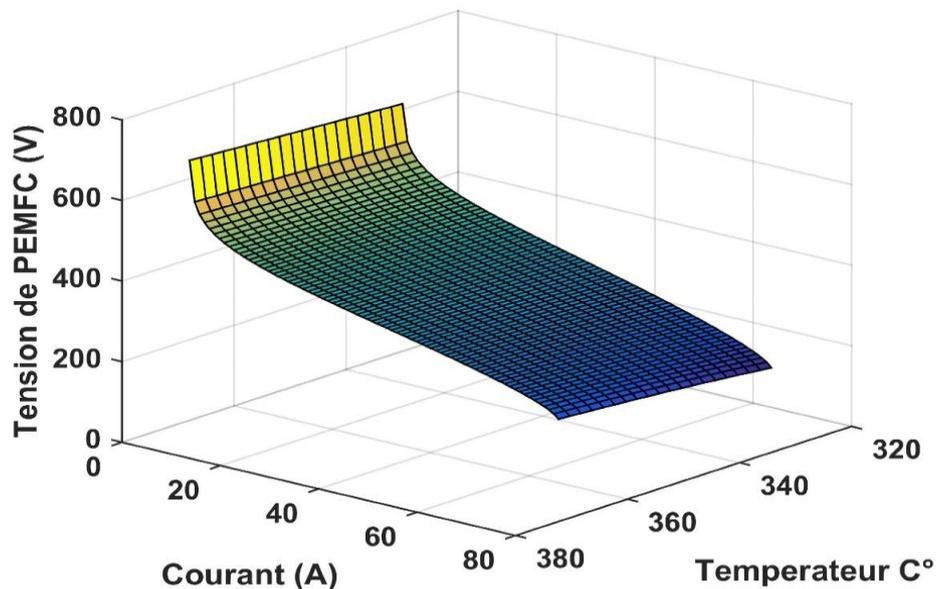


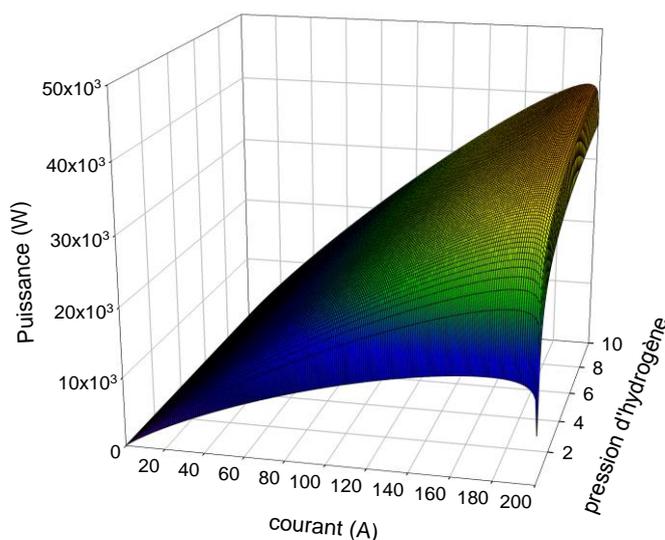
Fig. III.2 : Variation de la tension de la pile en fonction de courant et de la pression PH<sub>2</sub>

- **Caractéristique Tension/Densité de courant et Température de fonctionnement**

On a représenté la variation de la tension de la pile en fonction simultanément du courant et de la température. On remarque que la tension augmente en fonction de la température figure (III.3)



**Fig. III.3 :** Variation de la tension de PAC en fonction de courant et de la température  
 La figure (III.4) montre la variation de la puissance de la pile en fonction du courant et de la pression d'hydrogène. Cette figure montre que la puissance augmente de façon logarithmique en fonction du courant jusqu' à la puissance maximale (25 KW pour une pression d'hydrogène de 2(atm), puis elle diminue rapidement pour des courant supérieur à 200 A (courant maximal) .



**Fig. III.4 :** Variation de la puissance de PAC en fonction de courant et de la température



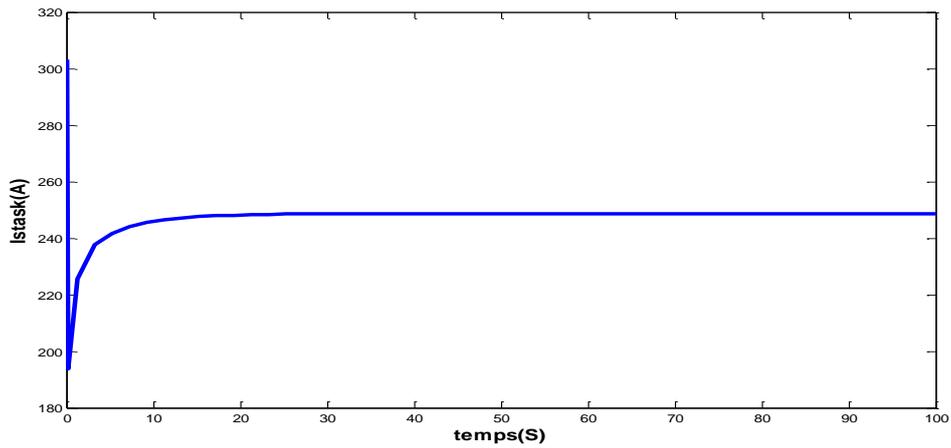


Fig. III.7 : Variation du courant  $I_{stack}$  en fonction du temps

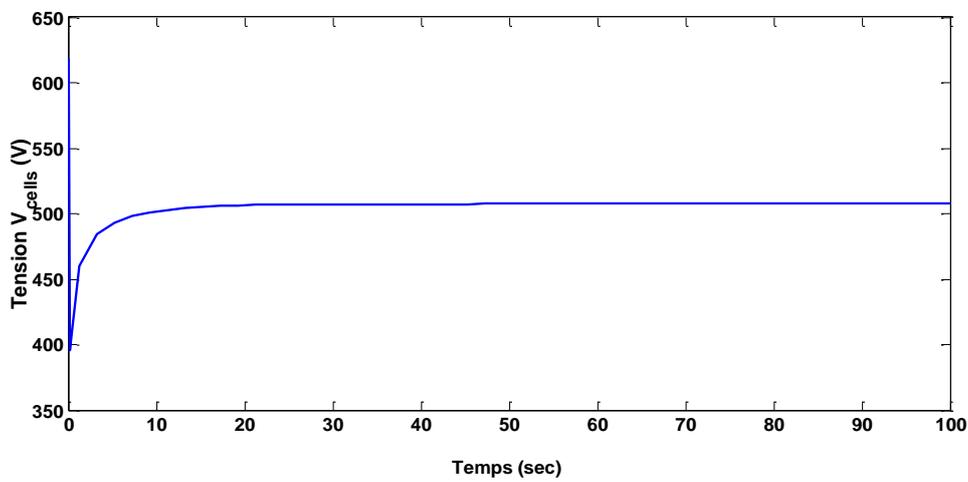


Fig. III.8: Variation de la tension  $V_{cell}$  de stacks d'une pile à combustible en fonction du temps

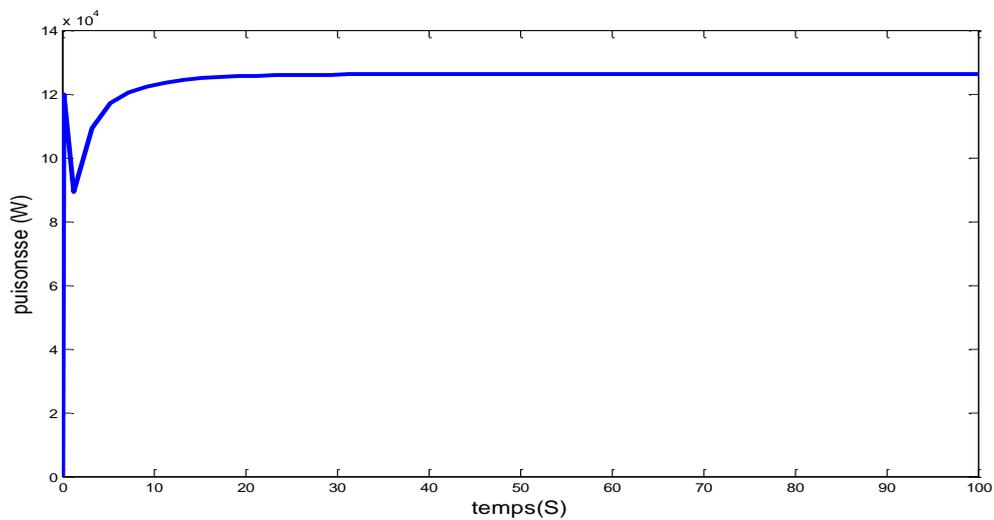


Fig. III.9: Variation de la puissance d'une pile à combustible en fonction du temps

La Fig.III.7, Fig.III.8, Fig III.9 illustrent la variation du courant, tension et puissance d'une stack de PEMFC en fonction du temps. On voit que la pile à combustible PEMFC attende ce régime permanent  $I_{stack} = 240$  A,  $V_{cell} = 500$  V et  $P = 12$  kW après un temps de 10 sec

### III.2.2.1 L'effet de l'humidité relative sur les performances de pile PEMFC

La figure (figure III.10), représente de l'humidité relative en fonction du temps. Où l'humidité relative est calculée en fonction du débit molaire d'eau.

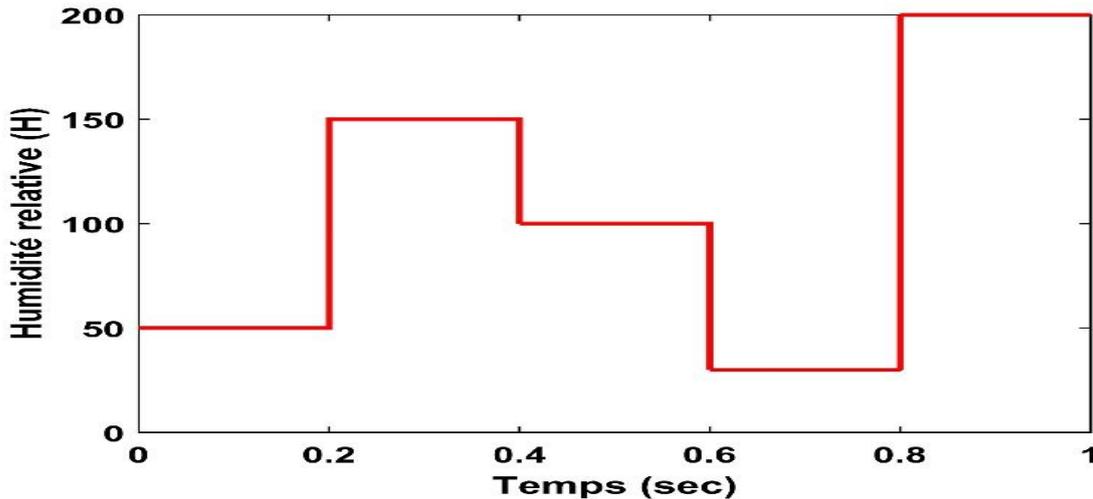


Fig. III.10 : Variation de l'humidité relative fonction du temps

Les figures.III.11 Et III.12 représentent respectivement les réponses électriques dynamiques de la pile à combustible (tension, puissance) aux variations abruptes de l'humidité relative (la variation du débit molaire d'eau) en fonction du temps de fonctionnement.

Entre l'intervalle de temps 0s et 0.2s on a fixé le taux d'humidité relative RH à 50% (figure III.10), on remarque sur les résultats relatifs (figures.III.11 Et III.12) et dans le même intervalle, une augmentation exponentielle de la tension et la puissance. Entre l'intervalle de temps 0.2s et 0.4s on a effectué un changement brusque de l'humidité RH de 50% à 150% à l'instant 0.2s et de 150% à 100% à 0.4s. On observe sur les résultats (figures.III.11 Et III.12) une augmentation similaire de la tension et la puissance ce qui est expliqué par : La membrane de la pile à combustible conductrice de proton doit être saturée en eau, condition essentielle pour assurer une bonne conductivité ionique et par conséquent le rendement de la pile augmente.

A l'instant 0.4s, l'humidité relative diminue 150% à 100% ce qui provoque une augmentation aussi de la tension et la puissance (figures.III.11 Et III.12). A l'instant 0.6s,

l'humidité relative baissait plus de 100 à 30%, mais dans ce cas, on note à la fois que la tension et la puissance sont également réduits parce que la diminution de RH peut entraîner un assèchement de la membrane, ce qui conduirait à la destruction de la PEMFC.

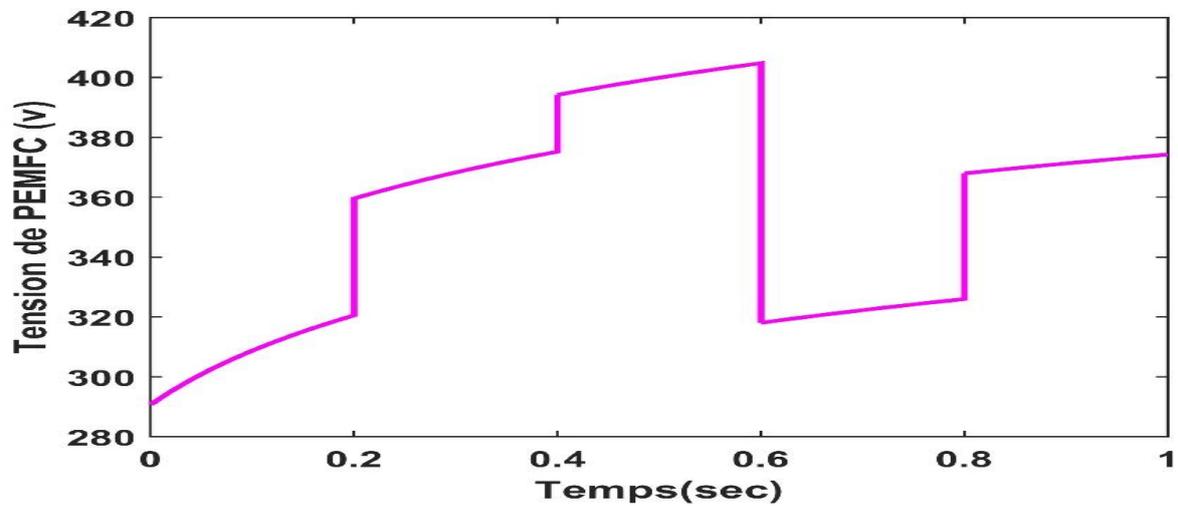


Fig. III. 11: Variation de la tension de PEMFC en fonction du temps.

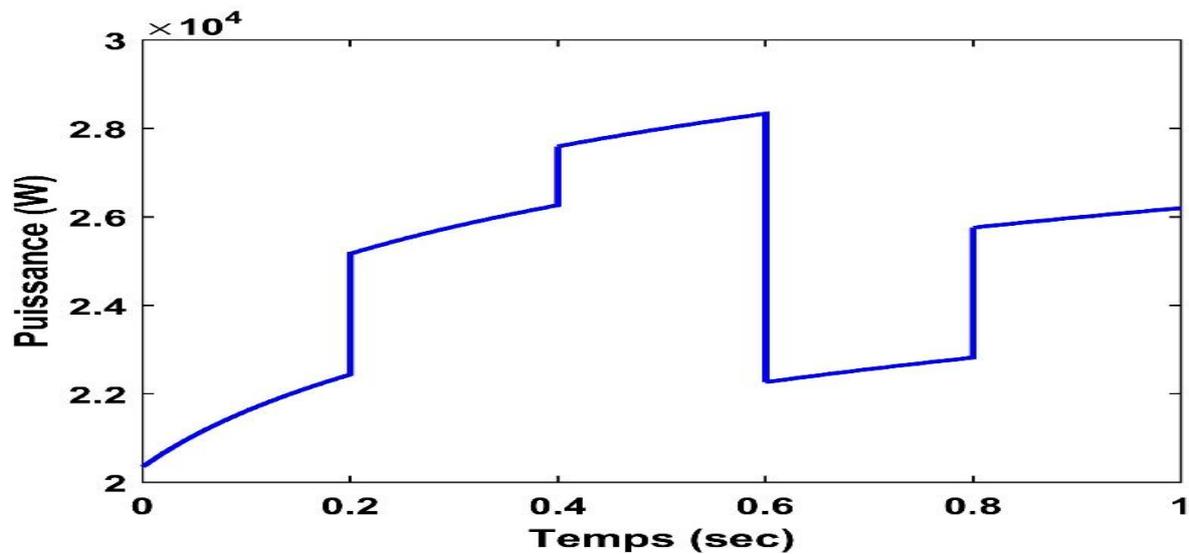


Fig. III. 12: Variation de la puissance de PEMFC en fonction du temps.

## III.2.2.2 L'effet de la température sur les performances de pile PEMFC

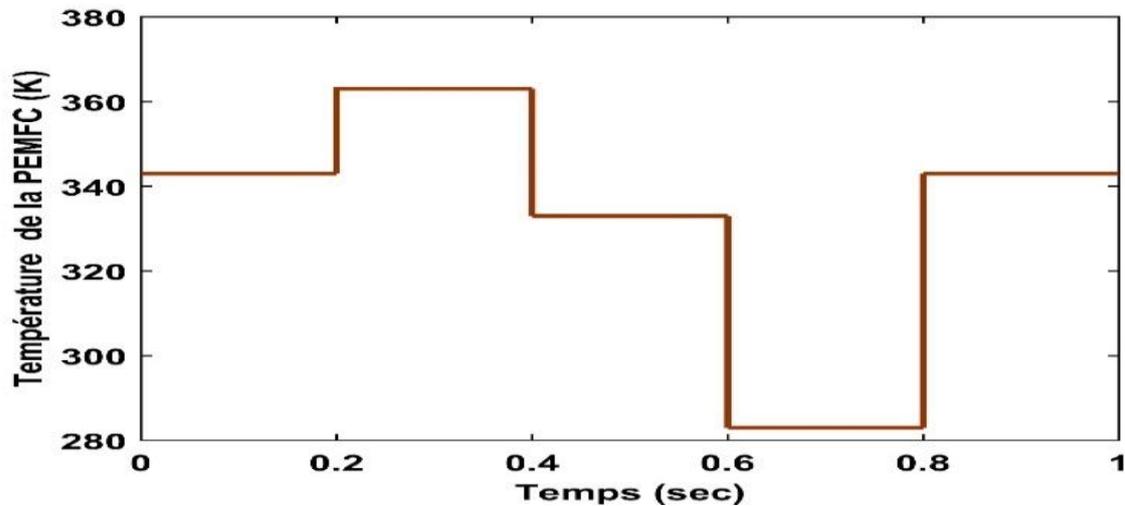


Fig. III.13 : Variation de Température en fonction du temps

Les figures.III.14 Et III.15 représentent respectivement les réponses électriques dynamiques de la pile à combustible (tension, puissance) aux variations abruptes de température en fonction du temps de fonctionnement.

Entre l'intervalle de temps 0s et 0.2s on a fixé la température à 342K (figure III.13), on remarque sur les résultats relatifs (figures.III.14 Et III.15) et dans le même intervalle, une augmentation exponentielle de la tension et la puissance. Entre l'intervalle de temps 0.2s et 0.4s on a effectué un changement brusque de la température entre 342K à 360K à l'instant 0.2s et de 360K à 330K à 0.4s. On observe sur les résultats (figures.III.14Et III.15) une augmentation similaire de la tension et la puissance ce qu'est expliqué par : expliqué par : l'augmentation de température provoque une diminution de l'humidité relative qui est attendue une valeur optimale ce qui assurée une bonne conductivité ionique et par conséquent le rendement de pile à combustible augmente.

A l'instant 0.4s, la température diminue 360K à 330K ce qui provoque une diminution de la tension et de la puissance (figure. III.14 et figure.III.15), cette effet peut expliquer par la diminution de température entraîne une augmentation de RH va gêner le transport ionique dans la cours de la pile et par conséquent le rendement de pile diminue. A l'instant 0.6s, la température baissait plus de 330 à 281, mais dans ce cas, on note à la fois que la tension et la puissance sont également réduits parce que la diminution de température peut entraîner un engorgement de la membrane, ce qui conduirait une gonflement de la membrane de la PEMFC.

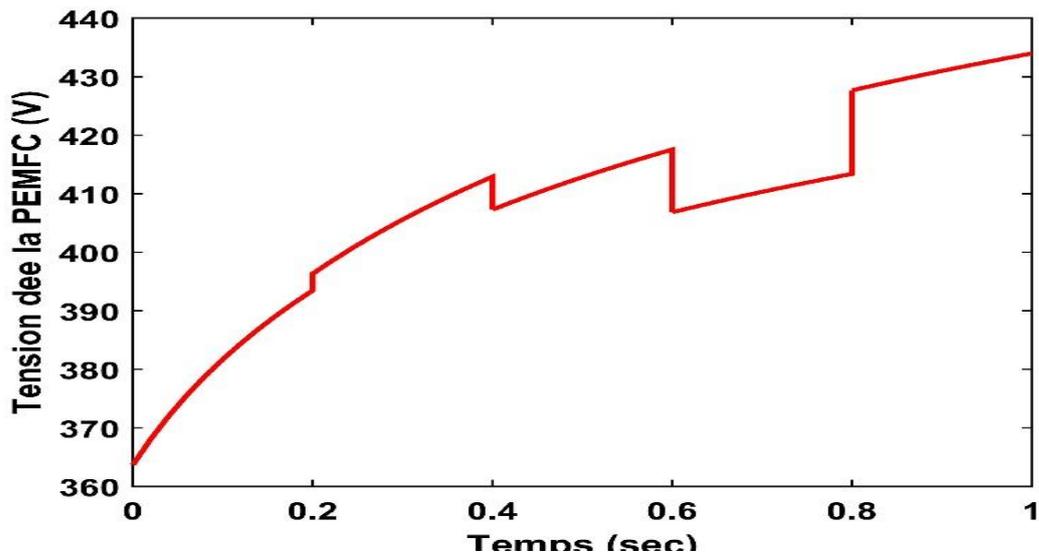


Fig. III.14 : Variation de la tension de PEMFC en fonction du temps.

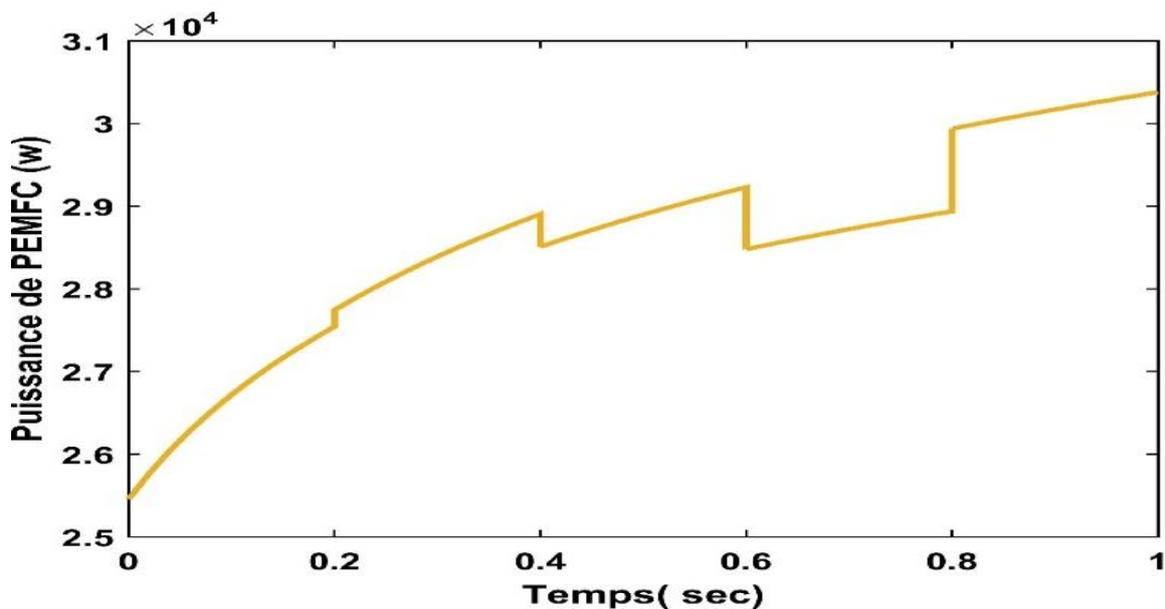


Fig. III.15 : Variation de la puissance de PEMFC en fonction du temps.

### III.3 Implémentation de la pile à combustible dans un système énergétique

La Fig III.16 représente un contrôle et une gestion optimale d'un système énergétique qui est constitué d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) connecté avec une charge au moyenne d'un hacheur (DC-DC). Le convertisseur DC/DC joue un rôle d'alimentation de la charge avec une puissance contrôlée et suivie par la technique MPPT(PO).

Les paramètres de convertisseur DC/DC utilisés dans cette simulation sont les suivants :  $R_L=100 \Omega$ ,  $R_1=1 \Omega$ ,  $C=2.10^{-4}F$ ,  $L=0.01H$ ,



III.3.1 l'effet de variation du débit molaire  $Q_{H_2}$  sur les performances électriques

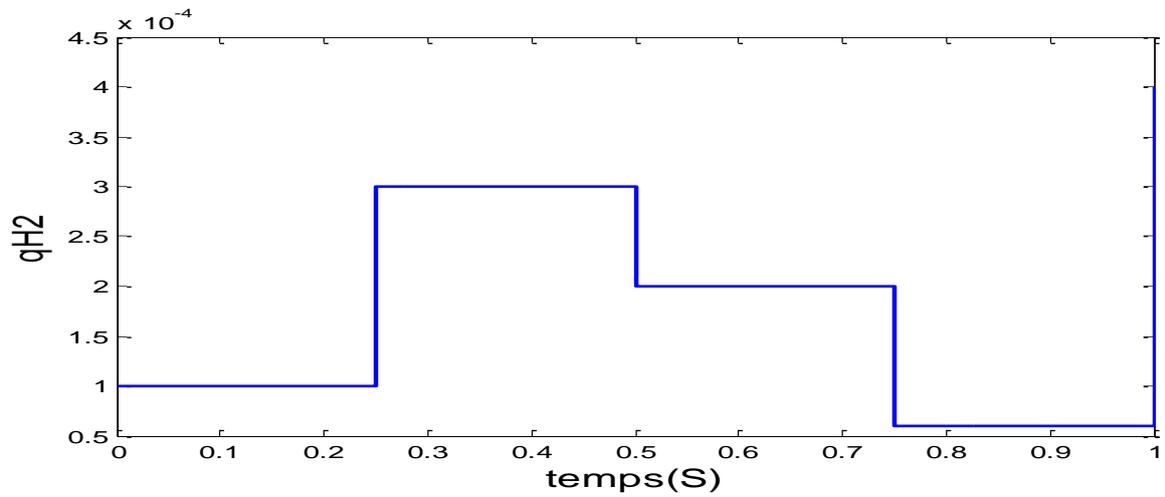


Fig. III.17 : Variation du débit molaire  $q_{H_2}$  en fonction de temps

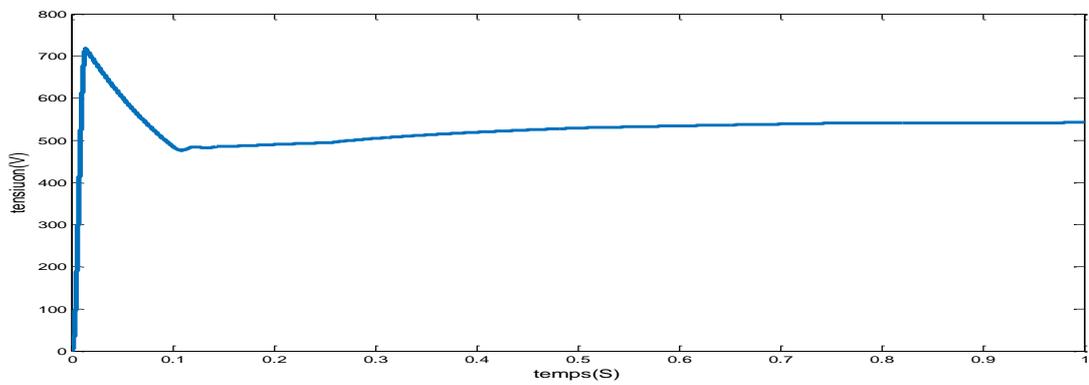


Fig. III.18 : Variation de la tension de convertisseur DC /DC (Boost)

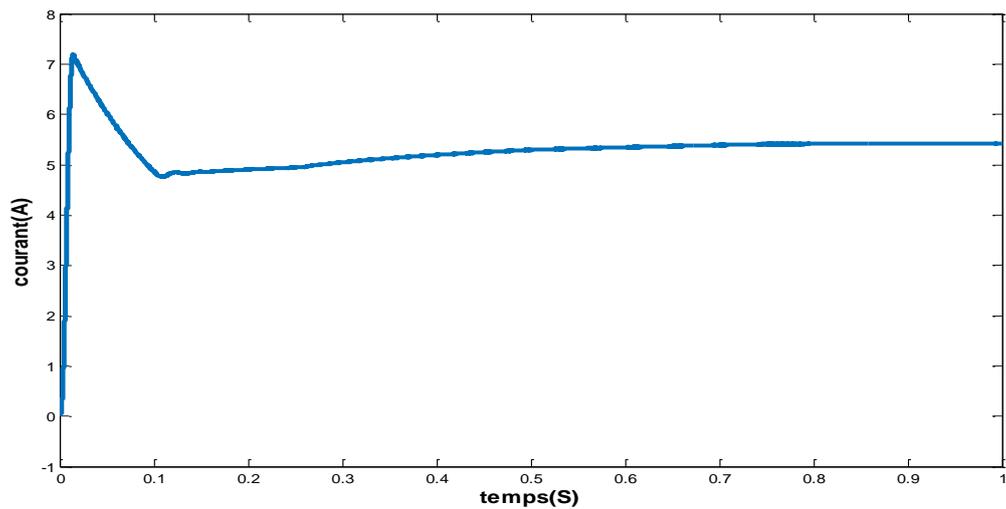


Fig. III.19 : Variation du courant de convertisseur (boost)

Les figures III.18 et III.19 montrent l'effet de débit molaire  $q_{H_2}$  (Fig. III.17) sur les performances électriques (tension, courant) respectivement. D'après les résultats obtenus on

remarque les grandeurs électriques de convertisseur prennent des valeurs stable malgré que le débit molaire  $q_{H_2}$  varié ; c'est-à-dire que grâce la commande MPPT le convertisseur fournie à la charge une tension où bien puissance stable comme illustré sur la figure III.20

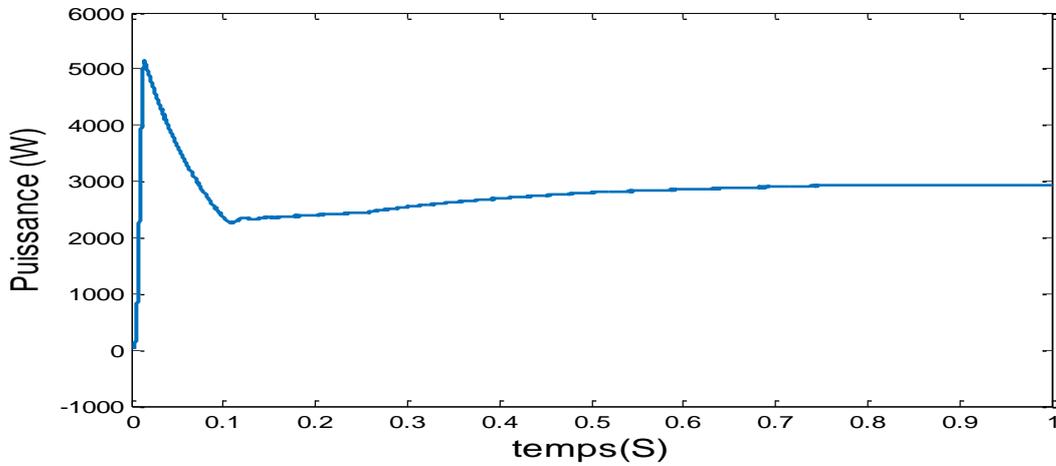


Fig. III.20 : Variation de la puissance de la charge

#### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de condition d'opérateurs tels que ( $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$ , Température, humidité relative) pour avoir l'impact sur les performances électrique de pile à combustible.

Nous avons conclu que commande MPPT applique au convertisseur DC/DC permis de maintenir les performances électriques (tension, puissance) de la pile à combustible PEM stable lorsque le débit molaire  $Q_{H_2}$  varié

### Conclusion général

Dans cette étude, nous avons effectué plusieurs manipulations afin de mieux comprendre le fonctionnement des piles PEMFC. En manipulant ces piles, nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation parce que plusieurs phénomènes contribuent au bon fonctionnement de cette dernière. Notre choix est commencé l'étude d'une pile unitaire avant d'entamer l'assemblage nous a été essentiellement bénéfique, ceci nous a même si la technologie des piles à combustible est apparue au dix-huitième siècle, mais ses intérêts technico-économiques ce sont révélés qu'au début des années soixante-dix. Sachant que pouvoir connaître les caractéristiques de fonctionnement dynamique ainsi que l'influence des conditions opératoires, constituent une base de données, qui est un champ de recherche pour un scientifique.

permis de mieux comprendre les processus électrochimiques et dynamiques à l'intérieur d'une seule pile et donc de conclure que :

L'architecture de la pile, l'humidification de la membrane ainsi que les conditions opératoires jouent un rôle prépondérant qui influence les performances de cette dernière. Nous avons constaté que l'humidification adéquate de la membrane ainsi qu'une température, pression et concentration des gaz réactifs appropriés sont les conditions qui adhèrent au bon fonctionnement de la pile et que tous ces paramètres doivent être optimaux pour obtenir des bonnes performances. Alors que si nous augmentons la pression, nous obtenons de meilleur transfert de matière qui se traduit par une réduction des polarisations d'activation et de concentration, cela surtout à des fortes densités de courant, mais si elle dépasse un certain seuil elle peut perforer la membrane, c'est pour cela qu'il est indisponible de trouver le meilleur compromis entre ses facteurs pour augmenter la conductivité de la membrane et avoir un bon aménagement des fluides et de la chaleur à l'intérieur de la pile. En fin nous allons voir l'efficacité de l'algorithme MPPT pour maximise la puissance fournir par la pile PEMFC quel que soit la variation des conditions d'opérateur.

**Bibliographie**

- [1] A. Lydia ,C. Zahra «ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM» Mémoire de master Université Université Bouira, 2016.
- [2]. **Z.ZHANG (2010)** : *Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible*, thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne.
- [3] J. LACHAISE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinées à la traction ». Thèse de doctorat de l'institut national POLYTECHNIQUE de Toulouse, 2004.
- [4] EL H. AGLZIM, « Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en charge ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincare-Nancy1, 2009
- [5] Jérôme LACHAIZE, Thèse : Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, Soutenue le 20 septembre 2004 Thèse préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH
- [6] Fuel Cell Systems Explained Second Edition. James Larminie Oxford Brookes University, UK. ISBN 0-470-84857-X.
- [7] United Technologies Co., Fuel Cell: Space and Defense, disponible à [:http://www.utcfuelcells.com/space/spaceshuttle.shtm](http://www.utcfuelcells.com/space/spaceshuttle.shtm)
- [8] J. M. Grimwood, B. C. Hacker et P. J. Vorzimmer, Project Gemini Technology and Operations: A Chronology, NASA SP-4002, 1969.
- [9] M.W. Ellis, M.R. Von Spakovsky et D.J. Nelson, Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century, Proceedings of the IEEE, vol.89, n° 12 , décembre 2001, pp.1808-1818
- [10] J. H. Hirschenhofer, Fuel cell status: 1996, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 12, n° 3, mars 1997, pp. 23-28.
- [11] J. T. S. Irvine, The Bourner lecture: Power sources and the new energy economy,” Journal of Power Sources, vol. 136, n° 2, 1 octobre 2004, pp. 203-207.
- [12] Y. Kishinevsky et S. Zelingher, Coming clean with fuel cells, IEEE Power & Energy Magazine, vol. 1, n° 6, novembre-décembre 2003.
- [13] J. J. Baschuck and X. Li, Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding. J. Power Sources, vol. 86, pp. 181–196,2000.
- [14] K.Chandler et B. L. Eudy, Thunder Power Bus Evaluation at Sun Line Transit Agency,

prepared for the DOE, Contract No. DOE/GO-102003-1786, November 2003, Available:

<http://www.eere.energy.gov>

[15] Fuel Cell Systems Explained Second Edition. James Larminie Oxford Brookes University, UK. ISBN 0-470-84857-X.

[16] Jérôme LACHAIZE, Thèse : Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, Soutenue le 20 septembre 2004 Thèse préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH

[17] Fuel cell handbook (seventh edition). Technical report, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy - National Energy Technology Laboratory, Nov. 2004.

[18] SR-12 Modular PEM Generator Operator's Manual, Last Revised 7/2000; Revision 0000, Avista Laboratories, Spokane, WA, July 2000.

[19] W. Friede, S. Raël et B. Davat, Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 19, n° 5, september 2004, pp. 1234-1241

[20] D. Chu and R. Jiang, Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks—Part I. Evaluation and simulation of an air-breathing PEMFC stack, J. Power Sources, vol. 83, pp. 128–133, 1999.

[21] X. Li, F. Feng, K. Zhang, S. Ye, D. Y. Kwok, and V. Birss, "Wettability of Nafion and Nafion/Vulcan carbon composite films," *Langmuir*, vol. 28, no. 16, pp. 6698–6705, 2012.

### **RESSAM Ibtissam these 2017**

[22] P. Serre-Combe, M. Pineri, G. Gebel, F. Jousse, "Les piles basse température PEMFC," *Clefs CEA*, vol. 44, pp. 48–56, 2000.

[23] V. M. Vishnyakov, "Proton exchange membrane fuel cells," *Vacuum*, vol. 80, no. 10, pp. 1053–1065, 2006.

[24] M. G. Santarelli and M. F. Torchio, "Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 1, pp. 40–51, 2007.

[25] A. Heinzl, F. Mahlendorf, and C. Jansen, "Bipolar plates," *Fuel Cells—Proton-Exchange Membr. Fuel Cells*, Elsevier, New York, 2009.

**SYSTEM/Schneuwly et al. 2002/** A. Schneuwly, M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Koetz, BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications, International Advance Automotive battery conference (AABC), Las Vegas , Février 2002.

- [26] Thomas A. Zawodzinski, John Davey, Judith Valerio, and Shimshon Gottesfeld. The water content dependence of electro-osmotic drag in protonconducting polymer electrolytes. *Electrochimica Acta*, 40 :297 – 302, 1995.
- [27] M. Cappadonia, J. Wilhelm Erning, Seyedeh M. Saberi Niaki, and Ulrich Stimming. Conductance of nafion 117 membranes as a function of temperature and water content. *Solid State Ionics*, 77 :65 – 69, 1995.
- [28] Jianlu Zhang, Zhong Xie, Jiujun Zhang, Yanghua Tang, Chaojie Song, Titichai Navessin, Zhiqing Shi, Datong Song, Haijiang Wang, David P. Wilkinson, Zhong-Sheng Liu, and Steven Holdcroft. High temperature pem fuel cells. *Journal of Power Sources*, 160 :872 – 891, 2006.
- [29] Qiangu Yan, Hossein Toghiani, and Junxiao Wu. Investigation of water transport through membrane in a pem fuel cell by water balance experiments. *Journal of Power Sources*, 158 :316 – 325, 2006.
- [30] E.J. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu, and Y. Yang. Cost analysis of pem fuel cell systems for transportation. Technical report, National Renewable Energy Laboratory, Cambridge, Massachusetts, 2005.
- [31] Jérôme LACHAIZE, Thèse : Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, Soutenue le 20 septembre 2004 Thèse préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH
- [32] Ballard Power Systems Company, fuel cell technology, [http://www.ballard.com/be\\_informed/fuel\\_cell\\_technology](http://www.ballard.com/be_informed/fuel_cell_technology)
- [33].. *myFC, JAQ Hybrid. Site myFC.*
- [34]. *BMW, Véhicule électrique BMWi3*
- [35]. Renault, Véhicule électrique Renault Zoé.
- [36]. *Maroselli, Y., Toyota mirai : j'ai conduit la voiture du futur. Le Point, 2014.*
- [37]. *combustible, T.M.-p.à., 2018.*
- [38] General Motors Corporation, Dow - GM Make World's First Significant Fuel Cell Application a Reality, <http://www.gm.com/company/gmability/advtech/500> stationary.
- [39] C. J. Hatziadoniu et al., A simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, pp. 467–473, Apr. 2002.
- [40] Y. Kim and S. Kim, An electrical modelling and fuzzy logic control of a fuel cell generation system, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, pp. 239–244, June 1999.

- [41] J. C. Amphlett et al., Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 26, pp. 625–629, 2001.
- [42] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, “Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell,” *J. Power Sources*, vol. 86, pp. 173–180, 2000.
- [43] J. M. Corrêa, F.A. Farret, L.N. Canha et M. Godoy Simões, An electrochemical based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, n° 5, octobre 2004, pp. 1103
- [44] P. Famouri and R. Gemmen, “PEM fuel cell electric circuit model, presented at the Power Electronics for Fuel Cells Workshop, Nat. Fuel Cells Res. Center, Univ. California, Irvine, CA, Aug. 8–9, 2002.
- [45] Bühler H., Réglage par logique floue, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Lausanne 1994
- [46] J. C. Amphlett et al., Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 26, pp. 625–629, 2001.
- [47] Khaled Mammar, Abdelkader Chaker: Fuzzy Logic Control of Fuel Cell System for Residential Power Generation. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, Vol. 60, 328–334, No. 6, 2009
- [48] Amel Lachichi Thèse : Modélisation et stabilité d’un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible». UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE. 2005
- [49] Data sheet of a 500W fuel cell stack. BCS Technologies, Englewood, CO, 2001.
- [50] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla, et T. Thomas, «A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 138, n° 1-2, novembre 2004, pp.199-204
- [51] M. Norgaard, O. Ravn, N. Poulsen et L. Hansen, *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*, Springer, London, 1st edition, 2003.
- [52] T. Cylia, A. Ouerdia <<Etude et simulation des techniques MPPT d’un système photovoltaïque>> Mémoire de master Université A. MIRA-BEJAIA, 2018/2019
- [53] N. Aouche, M.S. Ait cheilh et A. Malek. <<poursuite du point de puissance maximale d’un système photovoltaïque par les méthodes de l’incrémentation de conductance et la perturbation & observation>> *Revue des Energies Renouvelables* Vol .16 N 3(2013)

[54] : Cabal, C. (2008). *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*(Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université ToulouseIII-Paul Sabatier).