

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département de Électrotechnique

N° :...../2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Electrotechnique

SPECIALITE : Commande Électrique

Thème

**Commande en MPPT par logique floue d'un système à base des
piles à combustibles**

Présenté Par : HEBBACHE MERWAN

Encadré Par : LALILI DJAFER

BOUTAGHOU YUCEF

Date de soutenance : 30/06/2024

Jury de Soutenance

Président : MAUCHE A. AZIZ

Grade

Univ MSB jijel

Encadreur : LALILI DJAFER

Grade

Univ MSB jijel

Examineur : KHEL M. CHERIF

Grade

Univ MSB jijel

Promotion : 2023 /2024

Résumé

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Dans ce mémoire, nous présentons d'abord les généralités sur les piles à combustible, incluant leurs définitions, principes de fonctionnement, applications et composants. Nous discutons également de leurs avantages, inconvénients et diverses applications. Ensuite, nous nous concentrons sur les piles à combustible à hydrogène de type PEMFC, en présentant leur modèle mathématique et physique, avec une explication des différentes expressions de tension. Enfin, nous simulons trois techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) : perturbation et observation (P&O), conductance incrémentale (INC) et commande par logique floue, en utilisant MATLAB-SIMULINK pour comparer leur efficacité sous différentes conditions.

Summary

MPPT (Maximum Power Point Tracking) is a technique used to follow the maximum power point of a nonlinear electrical generator. In this thesis, we first present general information on fuel cells, including their definitions, operating principles, applications, and components. We also discuss their advantages, disadvantages, and various applications. Then, we focus on hydrogen fuel cells of the PEMFC type, presenting their mathematical and physical models, with explanations of the different voltage expressions. Finally, we simulate three techniques for tracking the maximum power point (MPPT): Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (INC), and Fuzzy Logic Control, using MATLAB-SIMULINK to compare their efficiency under different conditions

ملخص

استراتيجية تهدف إلى تتبع نقطة الطاقة القصوى لمولد كهربائي غير خطي. (MPPT) تعد تقنية تتبع نقطة الطاقة القصوى في هذا البحث، نقدم أولاً معلومات عامة حول خلايا الوقود، بما في ذلك تعريفاتها ومبادئ عملها وتطبيقاتها ومكوناتها. نناقش ، حيث نقدم PEMFC أيضاً مزاياها وعيوبها وتطبيقاتها المختلفة. بعد ذلك، نركز على خلايا الوقود الهيدروجينية من نوع نماذجها الرياضية والفيزيائية مع شرح للعديد من تعبيرات الجهد فيها. أخيراً، نقوم بمحاكاة ثلاث تقنيات تتبع لنقطة الطاقة ، والتحكم بالمنطق الضبابي، (INC) ، الموصلية التزايدية (P&O) تقنية الاضطراب والمراقبة: (MPPT) القصوى ، لمقارنة كفاءتها في ظل ظروف مختلفة MATLAB-SIMULINK باستخدام برنامج

Remerciements

Je remercie Allah de m'avoir donné le courage, la volonté, et la patience
de pouvoir terminer cette thèse

Je tiens, à exprimer ici tout mon respect et toute ma reconnaissance à mon
Encadreur Monsieur LEHLILI djafer, Professeur à l'Université de Jijel,
pour sa bienveillance, sa gentillesse, ses encouragements et ses conseils.

Je remercie vivement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce
Mémoire.

Nous remercions également les professeurs et toute la famille de la section
Commande Electrique.

Enfin, nous voudrions également remercier nos chères parentes nos amis
et collègues et tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin afin de
réaliser ce travail.

Dédicace

À celle Qui m'a appris le sens de la vie, notre premier

Professeur : « **nos mères** »

À celle Qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les

difficultés : « **nos pères** »

À notre frère et notre sœur

Nos chères amis :

Nacer, Anis, Kamal, Oussama, Fares, Raid, Yasser, Ala,
Khaled, Aymen, Fadi, Rayane, Redouan

Dédicace

À celle Qui m'a appris le sens de la vie, notre premier

Professeur : « nos mères »

À celle Qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les

difficultés : « nos pères »

À notre frère et notre sœur

Nos chères amis :

Nacer, Anis, Kamal, Oussama, Fares, Raid, Yasser, Ala,
Khaled, Aymen, Fadi, Rayane, Redouan

Sommaire

Résumé	I
Summary	I
ملخص	I
Remerciements	II
Dédicace	III
Dédicace	IV
Sommaire	V
Liste Des Figures	VII
Liste des tableaux	XI
Nomenclature	XII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les piles à combustibles	3
1. Généralité sur la pile à combustible	4
1.1 Historique	4
1.2 Principe de fonctionnement	5
1.3 Les différents types de pile à combustible	7
1.3.1 Les piles à combustible à Basse Température	8
1.3.2 Piles à combustible à haute température	11
1.4 Domaines d'application	13
1.4.1 Applications portables	13
1.4.2 Les applications stationnaires	14
1.4.3 Les applications transports	15
2. Choix technologique de la pile à combustible	17
2.1 Principe de fonctionnement de la PEMFC	17
2.2 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM	18
2.3 Les composants de la pile à combustible PEMFC	19
2.4 Dimensionnement du stack de type PEM	22
2.5 Système pile à combustible PEM	23
2.5.1 Auxiliaires d'une pile à combustible PEM	23
2.5.2 Alimentation de pile à combustible de type PEM	24
2.6 Description générale des phénomènes physicochimique au sein d'une pile des PEM	25
2.6.1 Phénomènes fluidiques	25
2.6.2 Diffusion des gaz	25
2.6.3 Phénomènes électrochimiques	26
2.6.4 Phénomènes thermiques	27
2.6.5 Transport de l'eau	28
2.7 Rendements de la pile à combustible	28

2.7.1	Rendement matière - Quantités de combustibles	28
2.7.2	Rendement voltaïque	29
2.7.3	Rendement thermodynamique	29
2.7.4	Rendement global	29
Chapitre II : Modélisation de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC		31
1.	Modèle physique de la pile à combustible	33
2.	Modélisation mathématique de la pile	33
2.1	potentiel de Nernst	34
2.2	Pertes d'activation	34
2.3	Pertes par concentration	36
2.4	Pertes ohmiques	36
3.	Paramètres du modèle d'une pile à combustible	37
4.	Courbe de polarisation	39
4.1	Courbe caractéristique tension-courant :	39
4.2	Courbe caractéristique puissance-courant :	40
5.	Analyse l'influence des paramètres environnementaux sur les performances de la pile PEMFC	40
5.1	Influence de la température	40
5.2	Influence de la pression de L'hydrogène	42
Chapitre III : Command en MPPT de la pile		44
1.	Présentation du convertisseur (DC/DC) (hacheur)	45
2.	Critères d'évaluation d'une commande MPPT :	45
3.	Principe général de la commande MPPT :	46
4.	Les techniques de MPPT :	47
4.1	La commande Perturb And Observe P&O :	47
4.1.1	Définition :	47
4.1.2	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	49
4.1.3	Simulation de la command MPPT (P&O) pile à combustible :	49
4.2	Commande en MPPT par la méthode de la conductance incrémental	57
4.2.1	Définition :	57
4.2.2	Organigramme de l'algorithme incrémental conductance :	59
4.2.3	Schéma de simulation de la MPPT par conductance incrémental	59
4.3	Commande en MPPT par logique floue :	67
4.3.1	Définition :	67
4.3.2	Principe de poursuite du point de puissance maximale par un contrôleur flou	67
4.3.3	Simulation du command en MPPT par logique floue appliquée sur la pile à combustible :	72
	Conclusion Générale	81
	Bibliographies	83

Liste Des Figures

Figure (I.01) : L'expérience de Sir William Grove.	4
Figure (I.02) : Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible	6
Figure (I.03) : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique (points triples)	7
Figure (I.04): Principes de fonctionnement de la pile à combustible à électrolyte polymère.	9
Figure (I.06) : Principes de fonctionnement de la pile à combustible à acide phosphorique	10
Figure (I.07) : Schéma de principe d'une AF	11
Figure (I.08) : Schéma de principe d'une cellule MCFC alimentée en gaz naturelle (reformatage interne)	12
Figure (I.09) : Schéma de principe de la Pile à MCFC.	13
Figure (I.10) : la famille de SFC EFOY 2200	14
Figure (1.12) : Photographie de la pile à combustible de type PEMFC qui est située à Limoges dans le cadre du projet EPACOP.	15
Figure (1-13) : Schéma d'une voiture équipé de la pile à combustion.	16
Figure (1.14): Schematic diagram of the working principle of PEMFC	18
Figure (1.15) : Pile à combustible constituée de 3 cellules	18
Figure (I.16) : Représentation schématique d'une cellule élémentaire de PEMFC.	20
Figure (I.17) : Représentation schématique de la zone de triple contact	21
Figure (I.18) : photo d'un ensemble EME	21
Figure (I.19) : structure des électrodes et la zone de triple contacte	22
Figure (I.20) : Modularité d'un stack : 3 Exemples de conception d'une PAC de 700 W	23
Figure (I.22) : Description générale des phénomènes électrochimiques au sein d'une pile PEM	25
Figure (I.23) : Schéma de la diffusion de l'oxygène à la cathode	26
Figure (I.24) : Mécanisme réactionnel autour du triple contact côté cathode	27
Figure (II.01) : modèle physique d'une pile à combustible (PAC)	33
Figure (II.02) : Modèle pile PEMFC Matlab Simulink	37
Figure (II.03) : Courbe de caractérisation $V = f(I)$	39
Figure (II.04) : variation de la puissance d'une pile à combustible en fonction de courant.	40
Figure (II.05) : L'effet de la température sur la tension	41
Figure (II.06) : L'effet de la température sur la puissance	41
Figure (II.07) : Effet de la pression sur la caractéristique tension - courant	42
Figure (II.08) : Effet de la pression sur la caractéristique puissance - courant	42

Figure (III.01) : Convertisseur(DC/DC)	45
Figure (III .02) : Principe de la Commande	47
Figure (III .03) : Illustration de la MPPT Perturb and Observ	48
Figure (III .04) : Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation	49
Figure (III.05) : Schéma Simulink de la command en MPPT P and O	49
Figure (III.06) : Caractéristique puissance-courant en appliquant la MPPT P&O	50
Figure (III.08) : Tension de la pile à combustible PEMFC	51
Figure (III.09) : Courant de la pile à comestible PEMFC	51
Figure (III.10) : Caractéristique puissance-courant en variant la température	52
Figure (III .12) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	52
Figure (III.14) : Caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d’hydrogène	53
Figure (III .16) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d’hydrogène	54
Figure (III .17) : courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d’hydrogène	55
Figure (III .18) : Caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d’oxygène	55
Figure (III .19) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d’oxygène	56
Figure (III .20) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d’oxygène	56
Figure (III .21) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d’oxygène	57
Figure (III .22) : Illustration de la MPPT par conductance incrémentale	58
Figure (III .23) : Organigramme de l’algorithme incrémental conductance	59
Figure (III.24) : Schéma de Simulation de la command INC	59
Figure (III .25) : Caractéristique puissance-courant en appliquant la MPPT INC COND	60
Figure (III .26) : puissance de la pile à combustible PEMFC	60
Figure (III .27) : Tension de la pile à combustible PEMFC	61
Figure (III .28) : Courant de la pile à combustible PEMFC	61
Figure (III .29) : Courbe caractéristique Puissance-courant sous variation de température	62
Figure (III .30) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	62
Figure (III .31) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	63
Figure (III .32) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	63

Figure (III .33) : Courbe caractéristique puissance-courant de la pile à combustible PEMFC sous variation d'hydrogène	64
Figure (III .34) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène	64
Figure (III .35) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène	64
Figure (III .36) : courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène	65
Figure (III .37) : courbe caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d'oxygène	65
Figure (III .38) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène	66
Figure (III.39) : Tension e de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène	66
Figure (III.40) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène	66
Figure (III .41) : Organigramme du MPPT basé sur la logique floue	68
Figure (III .42) : Fonctions d'appartenances des variables d'entrée et de sortie	70
Figure (III.43) : Schéma de simulation du command par logique floue	72
Figure (III.44) : Caractéristique puissance-courant en appliquant la MPPT par logique floue	73
Figure (III.45) : Puissance de la pile à combustible PEMFC	73
Figure (III.46) : Tension de la pile à combustible PEMFC	73
Figure (III.47) : Courant de la pile à combustible PEMFC	74
Figure (III .48) : courbe caractéristique puissance-courant sous variation de température	74
Figure (III.49) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	74
Figure (III.50) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	75
Figure (III.51) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de température	75
Figure (III.52) : courbe caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d'hydrogène	75
Figure (III.53) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène	76
Figure (III.54) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène	76
Figure (III.55) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène	76
Figure (III.56) : courbe caractéristique puissance-courant.	77

Figure (III.57) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène.	77
Figure (III.58) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène.	77
Figure (III.59) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène.	78
Figure (III .60) : Comparaison entre le temps de réponse de la MPPT par logique floue et la MPPT Perturb and Observ	78

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : paramètre simulation	38
Tableau (III.1) : Règles floues pour la déduction de la variable de sortie	71

Nomenclature

Liste des abréviations :

PAC : Pile à combustible.

MCFC : Pile à combustible à carbonate fondu.

SOFC : Pile à combustible à oxyde solide.

AFC : Pile à combustible alcaline.

DMFC : Pile à combustible à méthanol direct.

PEMFC : Pile à combustible à membrane d'échange de protons.

PAFC : Pile à combustible à acide phosphorique.

EME : assemblées membrane-électrode.

Convertisseur DC-DC : convertisseur courant continue – continue.

PG: positif grand.

PP: positif petit.

ZE: Zéro.

NP: négatif petit.

NG: négatif grand.

Symboles

η_{act} : polarisation d'activation

η_{conc} : polarisation ohmique

η_{conc} : polarisation de concentration

E_{Nerst} : Tension d'alimentation : potentiel de Nernst

η_{MPPT} : Le rendement du point de fonctionnement.

P_{eff} : La puissance effectivement délivrée par la PAC

P_{max} : Le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie d'un PAC.

P_{H_2} et P_{O_2} : sont les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène (atm).

P_{H_2O} : la pression de l'eau.

ξ_1, ξ_2, ξ_3 et ξ_4 : coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC.

B : Coefficient empirique qui tient compte de toutes les contributions des phénomènes de transport de matière,

I_{max} : Courant limite de diffusion.

l : est l'épaisseur de la membrane (μm),

A : est la surface active de la pile (cm^2)

r_M : est la résistance spécifique de la membrane.

$G_{f,liq}$: Fonction de Gibbs état liquide.

T : est la température de fonctionnement du PEM (k),

F : est le constant faraday (C/k.mol),

R : est la constante de gaz universelle (J/k.mol).

R_c : est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.

R_m : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons.

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie augmente en raison de la dépendance croissante de notre mode de vie à l'énergie et de l'augmentation de la population mondiale.

Les problèmes énergétiques actuelles sont liés au risque d'épuisement des ressources fossiles et au risque environnemental tel qu'émission de gaz à effet de serre dans le cas des hydrocarbures, et production de déchets difficiles à traiter dans le cas du nucléaire.

Face à la diminution des ressources énergétiques due à l'utilisation irrationnel par l'humanité, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique. Ces sources d'énergie renouvelables (SER) offrent plusieurs avantages, elles sont inépuisables et leur impact sur l'environnement est beaucoup plus faible que les sources d'énergie traditionnelles, elles permettent d'éviter la pollution produite par les énergies fossiles, la réduction des coûts des technologies, en plus de l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité. Parmi ces sources énergétiques renouvelables disponibles utilisées est l'énergie de L'hydrogène [1].

L'hydrogène est l'une des sources d'énergie abondant à la surface de la terre mais n'existe pas à l'état pur. Il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau et les hydrocarbures.

L'hydrogène est un des vecteurs potentiels d'énergie d'avenir pour le stockage de l'électricité Il nécessite la transformation d'une énergie chimique en énergie électrique. Cette production d'énergie a lieu dans une pile à combustible.[2]

La pile à combustible est un générateur d'énergie électrique à partir de l'énergie chimique, elle utilise la réaction électrochimique d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour donner de l'électricité. Suivant le combustible de la réaction chimique produisant l'électricité, on distingue plusieurs types des piles à combustibles, parmi lesquels, on cite la pile à combustible à membrane échangeuse d'ions ou PEMFC.

Le but de ce travail est de présente une modélisation et simulation de la commande de poursuite du point de puissance maximale appliquée sur la pile combustible de type PEMFC On va appliquer trois méthodes de la MPPT, à savoir deux méthodes classiques qui sont la méthode de perturbation et observation et la méthode de la conductance incrémentale, en plus d'une méthode base sur la commande par logique floue

Ce travail comporte trois parties :

- ✚ Dans le premier chapitre nous donnons des généralités sur les piles à combustibles, des définitions et le principe de fonctionnement, ainsi que les éléments qui constituent les piles à combustible. Nous parlons de leurs avantages et de leurs inconvénients ainsi que de leurs applications dans différents domaines.
- ✚ Dans le deuxième chapitre nous abordons en détail la pile à combustible à hydrogène du type PEMFC, où nous exposons son principe de fonctionnement et nous donnons son modèle mathématique est physique d'taillés, en indiquant les expressions des différents termes de tension dans la pile à combustible PEMFC.
- ✚ Le troisième chapitre est réservé à la simulation de trois techniques de commande en MPPT, qui sont la technique perturbe et observe (P&O), la technique de la conductance et la technique basé sur la logique floue. Ces techniques vont être simulées avec le logiciel de calcul scientifique MATLAB-SIMULINK sous différentes conditions.

Chapitre I : Généralités sur les piles à combustibles

1. Généralité sur la pile à combustible

1.1 Historique

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits. L'électrolyse de l'eau consiste, à l'aide d'un courant électrique, de décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux. Certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Christian Friedrich Schönbein observe en réalisant une électrolyse que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience.

En 1839, lors d'une conférence scientifique à Birmingham, Schönbein rencontre l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillait à l'époque sur les batteries électriques. Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes.

Ceci débouche sur la célèbre expérience de Grove avec une pile à combustible : il s'agissait d'une cellule hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. En 1845, Grove génère un courant sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, c'est la première pile à combustible [3].

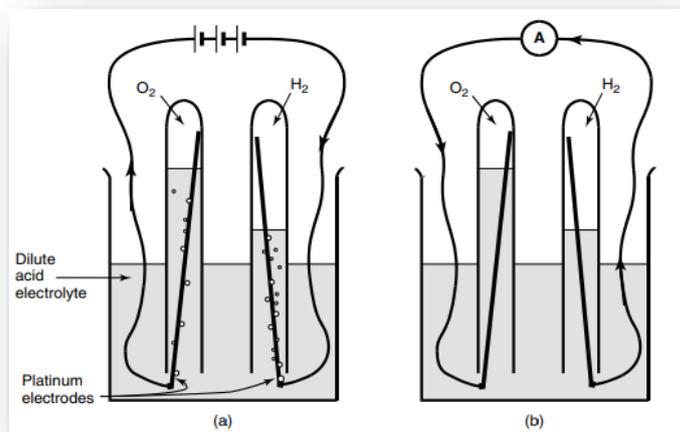


Figure (I.01) : L'expérience de Sir William Grove.

Les plus grandes avancées sur le développement des piles à combustible provinrent certainement de la NASA dès la fin des années 1950. L'agence spatiale américaine cherchait alors à mettre au point un générateur électrique capable de fournir de l'énergie à bord des futures missions spatiales. Après avoir écarté les sources nucléaires, trop risquées, les batteries, trop lourdes et à durée de vie trop limitée, et l'énergie solaire, la NASA se tourna vers les piles à combustible. Plus de 200 contrats de recherche furent alors signés, destinés à couvrir tous les aspects du fonctionnement des piles à combustible. Nous savons maintenant l'importance du rôle des piles dans le succès des missions Gemini et Apollo [4].

Malheureusement, ces piles, utilisant des électrolytes alcalins, nécessitaient un apport d'hydrogène pur, ce qui n'était techniquement pas compatible avec l'utilisation de combustibles ordinaires (gaz naturel, charbon) et peu coûteux comme source d'hydrogène. L'hydrogène ainsi produit contenait en effet des impuretés dommageables pour la pile (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone), ce qui écourtait considérablement la durée de vie des composants électrochimiques tels qu'ils avaient été conçus par la NASA.

A ce jour et malgré les avancées technologiques réalisées au cours des trente dernières années, la commercialisation des piles à combustible reste marginale.

Depuis 160 ans, les chercheurs ont donc tenté d'améliorer les performances des piles d'un point de vue électrique, chimique et physique. De ces nombreuses recherches ont émergé cinq grandes familles de piles à combustible, classées selon le type d'électrolyte utilisé : les piles alcalines (AFC pour Alkaline Fuel Cells), les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell), les piles à acide phosphorique (PAFC pour Phosphoric Acid Fuel Cell), les piles à oxyde solide (SOFC pour Solid Oxide Fuel Cell) et les piles à carbonate fondu (MCFC pour Molten Carbonate Fuel Cell). Ces distinctions dans le mode de fonctionnement des différentes piles conditionnent leur champ d'application [4].

1.2 Principe de fonctionnement

Le noyau d'une pile à combustible est formé d'une cellule élémentaire, qui est responsable de la production d'une énergie électrique à base d'une conversion électrochimique de l'énergie chimique. Un milieu conducteur ionique ou un électrolyte en contact avec une anode et une cathode de chaque côté forme la structure de base d'une cellule [5], montrée dans la figure I.1 :

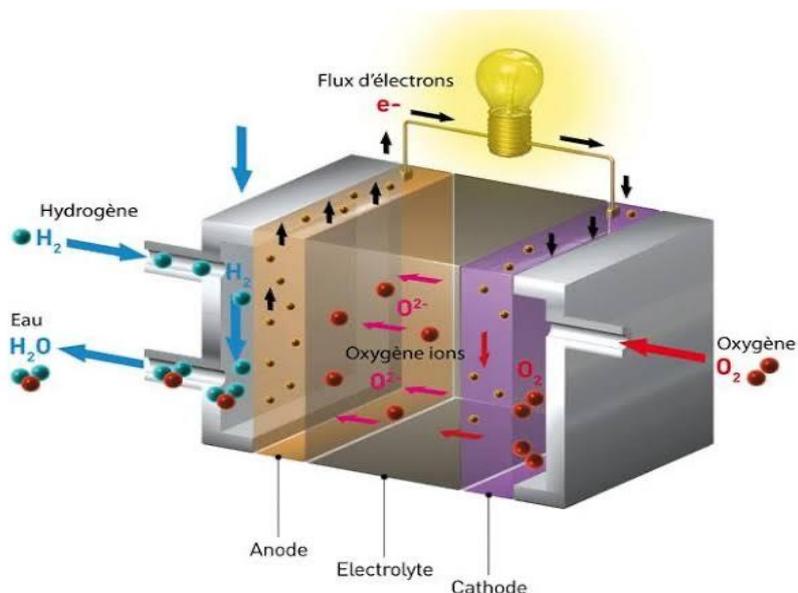
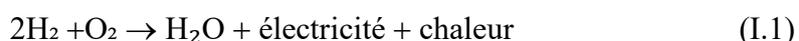


Figure (I.02) : Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible

Généralement le gaz est l'alimentaire principale d'une pile à combustible typique : un gaz réducteur à l'anode (l'électrode négative) et comburant un gaz oxydant à la cathode (l'électrode positive) souvent c'est l'oxygène de l'air. Les électrons doivent passer par le circuit électrique externe, ils ne pouvant pas traverser l'électrolyte, ce dernier est imperméable aux gaz et aux électrons, mais permet le transport des ions : Les électrons constitue le courant électrique utilisable [5].

On résume la réaction chimique du principe de fonctionnement d'une pile à combustible qui est une oxydoréduction électrochimique. L'électricité, l'eau et la chaleur seront produire par la réaction de l'hydrogène et l'oxygène selon la réaction chimique globale suivante [6] :



Les conducteurs électroniques sont deux électrodes (l'anode et la cathode) qui sont séparé par un conducteur protonique qui est un électrolyte solide. Les réactions aux électrodes :

A l'anode : couple H^+ / H_2 (électrolyte acide)



A la cathode : couple $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$



En présence d'un catalyseur ex : platine, les 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, sur des points appelés « points triples ».

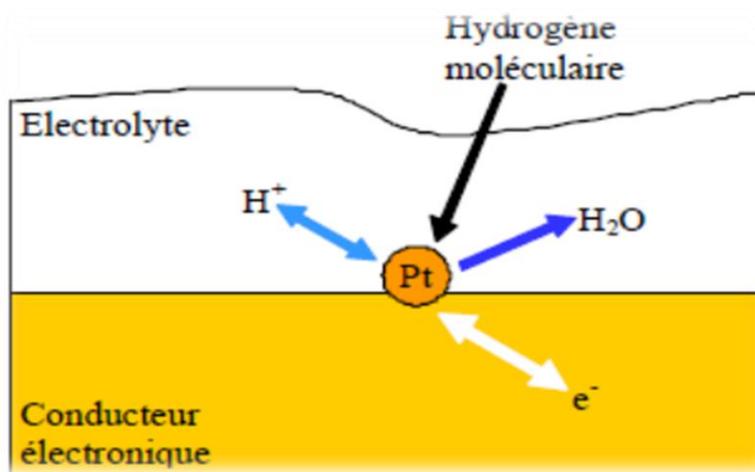


Figure (I.03) : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique (points triples)

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

- Une continuité physique avec l'électrolyte et le conducteur électronique, pour assurer la conduction des protons H^+ , et la conduction des électrons successivement.
- une diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire, est assurée par une structure poreuse, en plus l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode, est assurée par une structure hydrophobe, l'évacuation de la chaleur de réaction est assurée par une structure thermiquement conductrice.

1.3 Les différents types de pile à combustible

En général, les piles à combustible sont classées en fonction du type d'électrolyte utilisé, à l'exception des piles de type DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), qui sont en réalité des piles PEM (Proton Exchange Membrane) utilisant du méthanol comme carburant directement envoyé à l'anode.

La deuxième caractéristique utilisée pour classer les piles à combustible est leur plage de température de fonctionnement. On identifie généralement six types les plus couramment utilisés, que ce soit dans la phase de recherche et développement ou dans celle de l'industrialisation. Ces types sont :

1.3.1 Les piles à combustible à Basse Température

On distingue quatre types qui sont : PEMFC, DMFC, PAFC et AFC

✚ Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

Les piles à combustible à membrane électrolytique en polymère (PEFC) sont capables de générer efficacement des densités de puissance élevées, ce qui rend la technologie potentiellement attrayante pour certaines applications mobiles et portables. La technologie des PEFC se distingue des autres technologies de piles à combustible en ce qu'une membrane polymère en phase solide est utilisée comme séparateur de cellules/électrolyte. Les PEFC fonctionnent généralement à des températures basses (60°C à 80°C), ce qui permet un démarrage potentiellement plus rapide que les piles à combustible à température plus élevée.

Les PEFC sont considérées comme la principale technologie de pile à combustible pour les applications de transport léger. Bien que les PEFC soient particulièrement adaptées au fonctionnement à l'hydrogène pur, des reformeurs de combustible ont été développés pour permettre l'utilisation de carburants conventionnels tels que le gaz naturel ou l'essence.[5]

Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

À l'anode :



À la cathode :

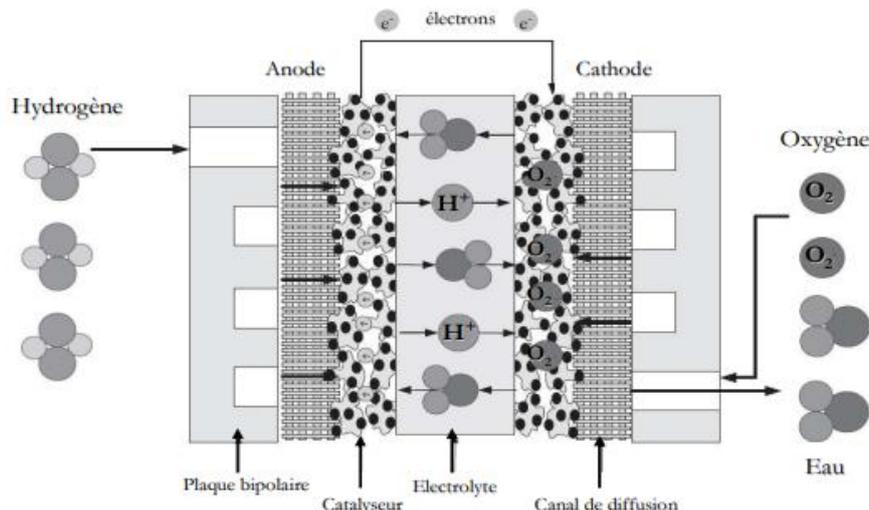


Figure (I.04): Principes de fonctionnement de la pile à combustible à électrolyte polymère.

✚ Pile à méthanol direct (DMFC) :

Elle est considérée comme une alternative intéressante aux batteries à base de lithium, qui offrent actuellement les densités d'énergie les plus élevées parmi toutes les technologies de batteries pour les applications nomades. La technologie est similaire à celle de la pile PEMFC, à la différence qu'au lieu d'être alimentée en hydrogène (gaz), elle est alimentée en méthanol (liquide), ce qui la rend plus facile d'utilisation. L'électrolyte est une membrane échangeuse de protons, et la conductivité ionique est assurée par le transfert des ions H^+ . Le méthanol liquide (CH_3OH) est oxydé en présence d'eau à l'anode, libérant du CO_2 , des ions hydrogène et des électrons pour produire le courant électrique nécessaire. Les ions hydrogène traversent l'électrolyte et réagissent avec l'oxygène de l'air et les électrons du circuit électrique pour former de l'eau [7].

Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

À l'anode :



À la cathode :

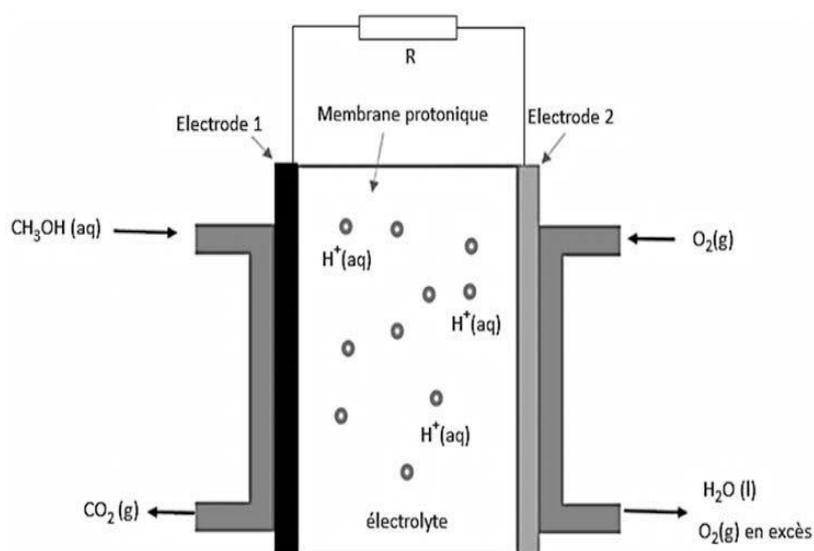
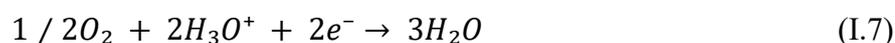


Figure (I.05) : Principes de fonctionnement de la pile à combustible à méthanol direct.

✚ Pile à acide phosphorique (PAFC) :

C'est une pile généralement réservée aux applications stationnaires, d'où un développement et une commercialisation plus importants comparés aux autres technologies de piles. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW [8]. L'électrolyte est de l'acide phosphorique sous forme liquide. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone. Le catalyseur est à base de platine. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat dans lequel l'électrolyte est stocké. [09]

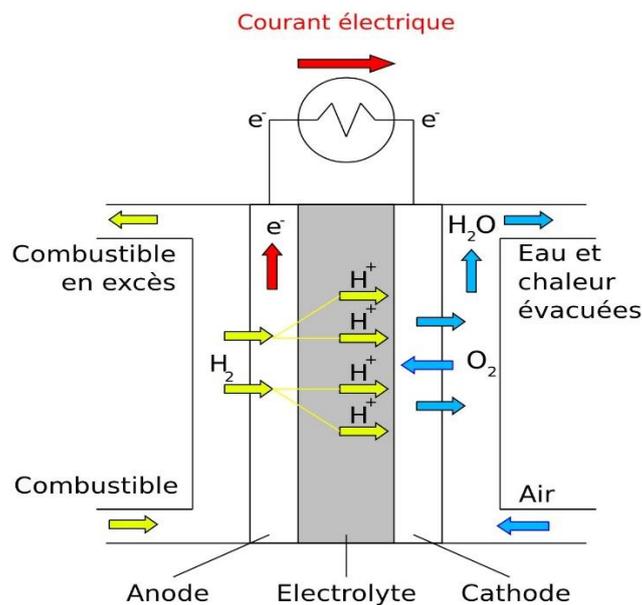


Figure (I.06) : Principes de fonctionnement de la pile à combustible à acide phosphorique

✚ Pile à combustible alcaline (AFC) :

Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement que lorsqu'elle utilise de l'hydrogène et de l'oxygène purs. En effet, lors de l'utilisation d'air ou d'hydrogène réformé, le dioxyde de carbone contenu dans ces derniers réagit avec l'électrolyte KOH et forme du carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions.[10]

Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :



À la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a :

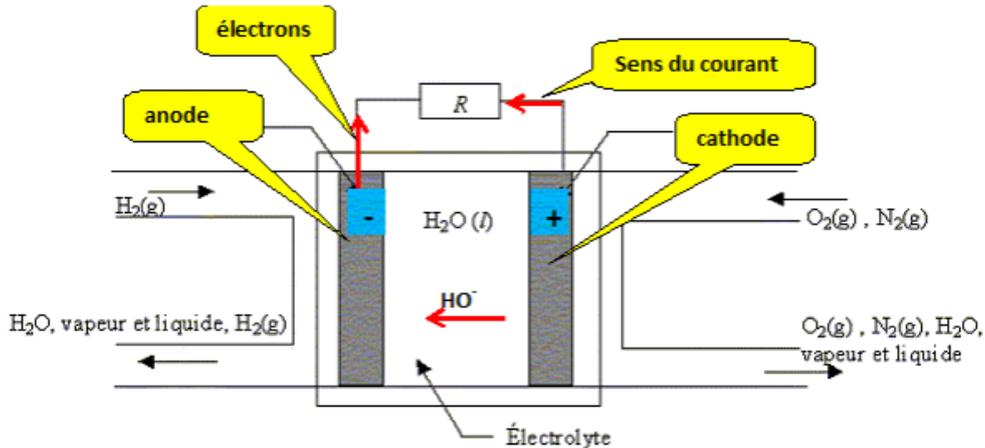
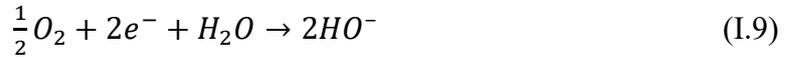


Figure (I.07) : Schéma de principe d'une AF

1.3.2 Piles à combustible à haute température

On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC :

✚ Pile à oxyde solide (SOFC) :

La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à haute température qui est de l'ordre de 650°C à 1000°C. Pour cela, c'est une pile généralement exploitée en cogénération et destinée à la production d'électricité décentralisée pour des gammes de puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW. L'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés, en se passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures.

L'électrolyte est solide, habituellement du Zircon (Zr2) dopé avec de l'ytterbium (Y3+), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O2-). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [11] [12].

Les réactions mises en jeu sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:



Ou :



Et à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction:

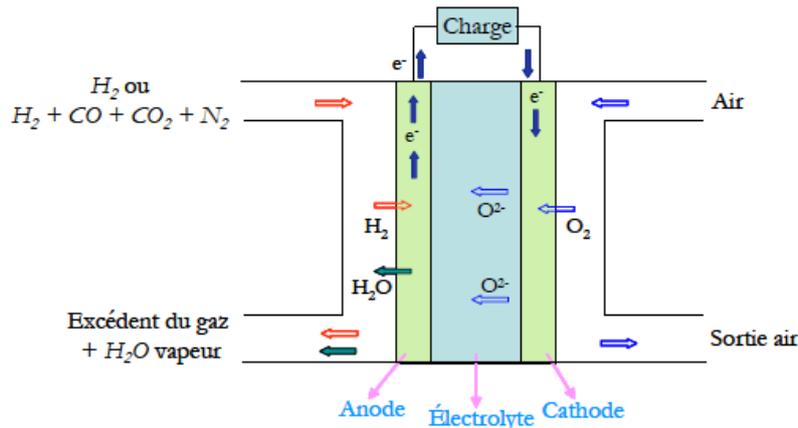


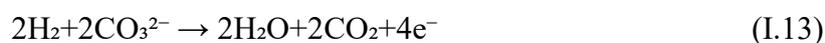
Figure (I.08) : Schéma de principe d'une cellule MCFC alimentée en gaz naturelle (reformage interne)

🚦 Pile à carbonate fondu (MCFC)

Elles sont des piles de seconde génération, car sont apparues bien après les piles fonctionnant à basses températures.[13] Le fonctionnement de ces piles repose sur un électrolyte constitué d'un mélange fondu de carbonates de métaux alcalins, généralement un mélange binaire de carbonates de lithium et de potassium, ou de lithium et de sodium, qui est retenu dans une matrice céramique de $LiAlO_2$. À des températures de fonctionnement élevées (typiquement de 600 à 700°C), les carbonates alcalins forment un sel fondu hautement conducteur, avec des ions carbonate CO_3 assurant la conduction ionique. Notez que, contrairement à toutes les autres piles à combustible, le dioxyde de carbone doit être fourni à la cathode ainsi qu'à l'oxygène, et celui-ci est converti en ions carbonate, assurant le transfert d'ions entre la cathode et l'anode. À l'anode, les ions carbonate sont convertis en CO_2 . Il y a donc un transfert net de CO_2 de la cathode à l'anode ; une mole de CO_2 est transférée avec deux faradays de charge ou deux moles d'électrons. (Notez que le besoin de fournir du CO_2 à la MCFC contraste avec la pile à combustible alcaline (AFC) que nous avons examinée au chapitre 5, où le CO_2 doit être exclu). [14]

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes :

À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction :



Et à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a :

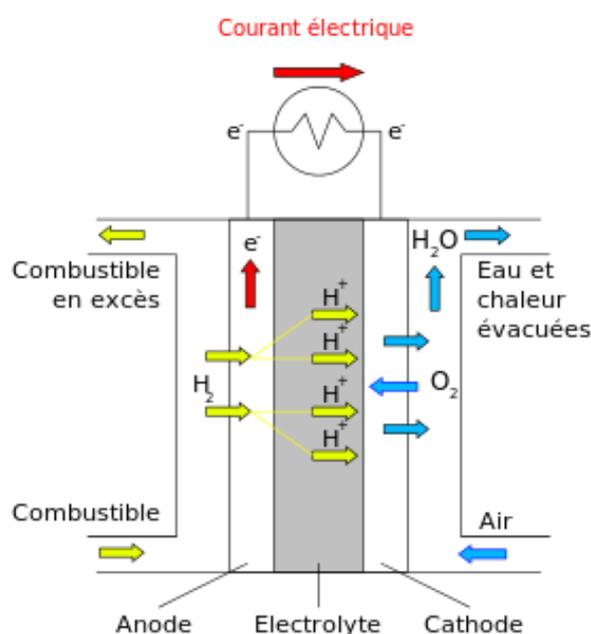
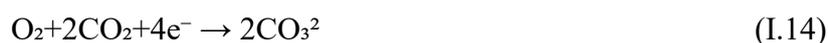


Figure (I.09) : Schéma de principe de la Pile à MCFC.

1.4 Domaines d'application

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

1.4.1 Applications portables

Cette famille représente les piles à combustible d'une puissance de quelques dizaines aux watts jusqu'au kilowatt, alimenté en combustible. Elle tend à remplacer les groupes électrogènes portables ou les batteries de forte puissance avec moins de bruit, un meilleur rendement, plus d'autonomie, le tout sans ou avec une faible pollution. Contrairement aux

batteries qui doivent être rechargées, elles fonctionnent en continu tant qu'elles sont alimentées en combustible. [15]

Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu sensibles aux conditions extérieures, seulement deux types de piles sont susceptibles d'avoir des applications portables, les PEMFC et DMFC, qui sont caractérisées par leur faible température de fonctionnement variable entre 60 et 80°C, ce qui diminue les problèmes de digestion thermique et fonctionnent à température ambiante. [04]



Figure (I.10) : la famille de SFC EFOY 2200

1.4.2 Les applications stationnaires

Les piles à combustible semblent très prometteuses pour des applications stationnaires. Ceci parce qu'elles permettent une production d'énergie décentralisée associée à un haut rendement énergétique. De nombreux prototypes sont déjà en cours d'essai. [16]

Les deux types de pile, « basses » et « hautes » températures, sont envisagés mais avec des objectifs différents. Les piles « basses températures » conviennent pour des systèmes de faible puissance (quelques kilowatts). Leur temps de mise en marche étant beaucoup plus court que celui des piles « hautes températures », elles semblent adaptées pour des applications domestiques (eau chaude, chauffage), pour des systèmes de secours ou de sécurité ainsi que pour une utilisation dans des lieux isolés. A contrario, leur température de fonctionnement étant basse, la valorisation de la chaleur dégagée s'avère difficile. De plus, leur réponse aux pics de consommation d'énergie n'étant pas instantanée, il est envisagé de les coupler à des batteries

qui se chargeraient d'assurer la réponse aux demandes ponctuelles et intenses de consommation ; ces batteries seraient rechargées lorsque la demande en courant diminue.[16]



Figure (1.12) : Photographie de la pile à combustible de type PEMFC qui est située à Limoges dans le cadre du projet EPACOP.

1.4.3 Les applications transports

Les années 90 ont connu le développement et l'application des piles à combustible dans le domaine de transport. La pile à membrane polymère protonique PEMFC a prouvé son efficacité dans les applications automobiles par comparaison à d'autres types de piles étudiées. Cette efficacité est due à sa faible température de fonctionnement, sa simplicité de fabrication, sa meilleure réactivité, son bon rendement aux puissances inférieures à la puissance maximale [17-18]. Les conditions pour un succès sont dures et sévères, le défi reste dans la nécessité de réduire le prix car actuellement la PAC fabriquée reste plus chère que celle utilisée dans l'automobile conventionnelle.[19]

Parmi les avantages importants de la pile à combustible, on trouve la grande propreté, le rendement élevé et le fonctionnement sans bruits gênants (presque silencieux).[20]

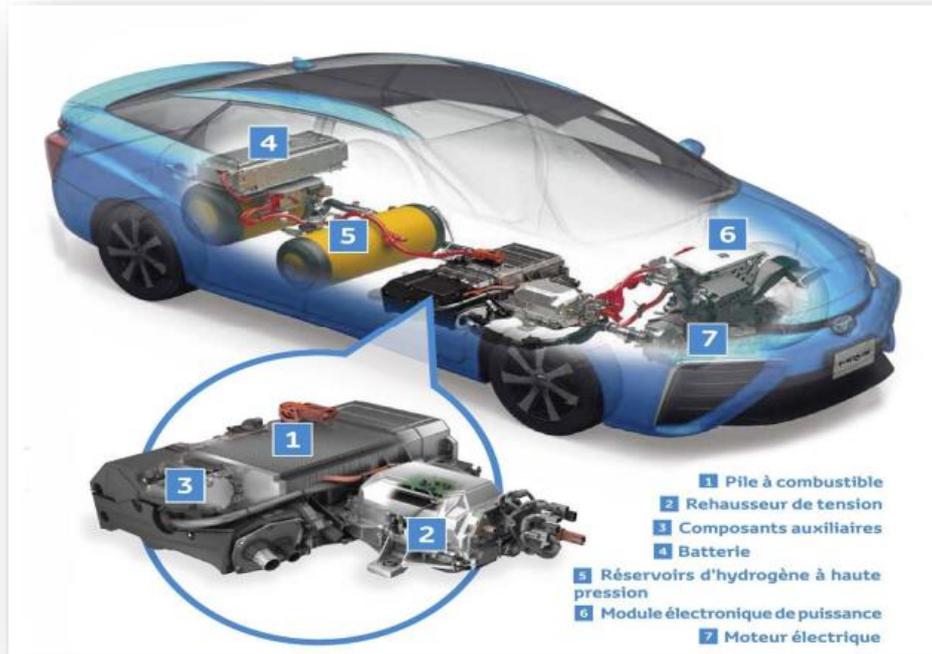


Figure (1-13) : Schéma d'une voiture équipée de la pile à combustion.

2. Choix technologique de la pile à combustible

2.1 Principe de fonctionnement de la PEMFC

La technologie de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) est composée d'un empilement de cellules électrochimiques en série (stack). Chaque cellule est le siège d'une réaction d'oxydoréduction dans laquelle l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour produire de l'eau, de la chaleur, et de l'énergie électrique.

Du côté de l'anode (pôle négatif), les molécules de l'hydrogène injecté (H_2) réagissent avec le catalyseur en platine pour donner des protons (H^+) et des électrons (e^-).

Le bilan de l'équation d'oxydation de l'hydrogène sera ainsi :



Les protons d'hydrogène passent à travers la membrane électrolytique pour arriver à la cathode (pôle positif) tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe pour générer un courant électrique.

Du côté de la cathode, les ions H^+ se combinent avec les ions O^{2-} , constitués à partir de l'oxygène, pour former de l'eau selon la réaction :



Finalement, le bilan de la réaction globale est :



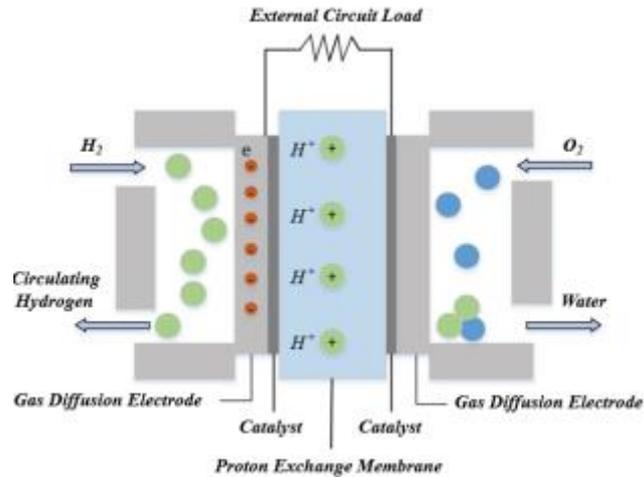


Figure (1.14): Schematic diagram of the working principle of PEMFC

Cette réaction crée une différence de potentiel entre les électrodes, du fait de ce caractère naturel de très basse tension, Les fabricants assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série pour produire une tension adéquate avec un rendement. La figure 1.15 présente par exemple le schéma d'une pile constituée de 3 cellules.[21]

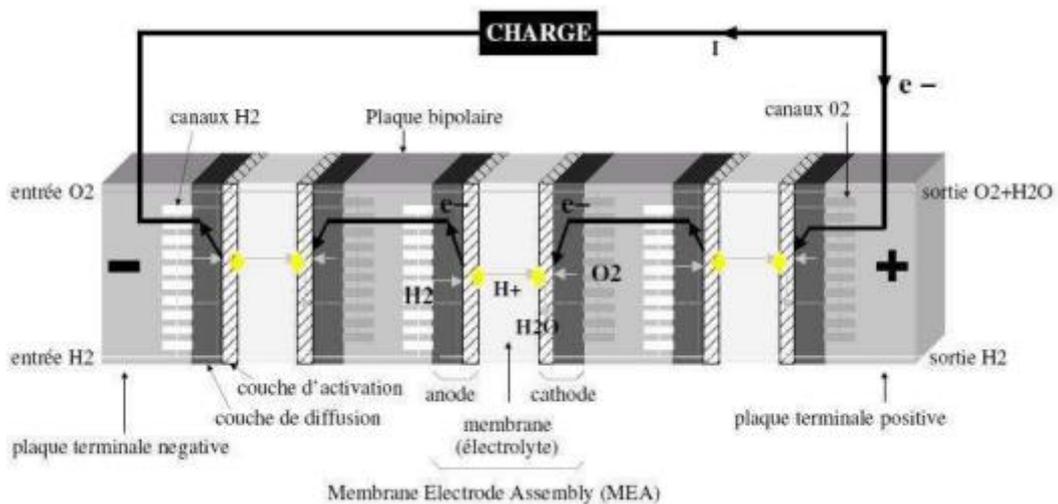


Figure (1.15) : Pile à combustible constituée de 3 cellules

2.2 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

✚ Avantages

Les avantages généralement cités sont :

- Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, Les pertes généralement liées à la combustion du combustible, ainsi qu'à la conversion de cette chaleur en énergie mécanique, puis de l'énergie mécanique en électricité, sont réduites au minimum ou éliminées.
- La PEMFC peut démarrer rapidement grâce à sa faible température de fonctionnement, sans risque de corrosion des composants de la cellule
- Peu d'émissions : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs.
- Un système modulable : les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustibles peut facilement être modifier et le rendement électrique est indépendant de cette taille.
- Un système de faibles émissions sonores : comme il n'a parétien pas d'une partie mobile. De ce fait, on peut placées à proximité de quartiers résidentiels.[10]

Inconvénients

Elles présentent aussi quelques inconvénients :

- Le principal défi des piles à combustible réside dans leurs coûts.
- La plage de température de fonctionnement limitée et étroite complique la gestion thermique, surtout à des densités de courant très élevées, et rend l'utilisation de la chaleur rejetée pour la cogénération ou dans des cycles de récupération d'énergie difficile.
- Une durée de vie faible spécialement si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.[10]

2.3 Les composants de la pile à combustible PEMFC

Trois composants principaux de la pile à combustible sont présentés dans la figure I.16.

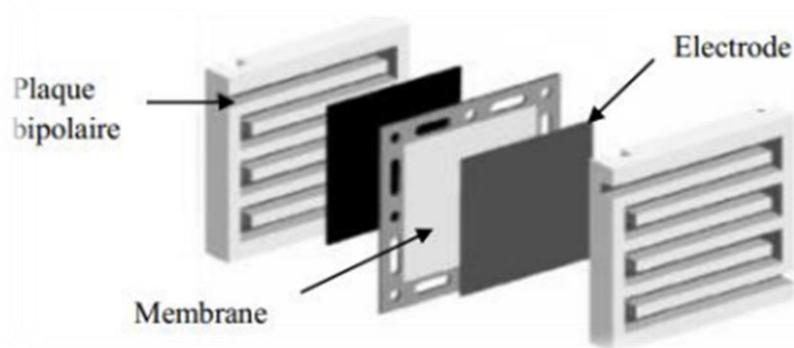


Figure (I.16) : Représentation schématique d'une cellule élémentaire de PEMFC.

Membrane :

La membrane est un élément de base dans la pile à combustible, elle intervient essentiellement dans les transferts de matière : le transport des H^+ vers la cathode, O_2 vers l'anode, substrat vers la cathode, et l'évaporation d'eau..., plusieurs fonctions doit être assurées par celle-ci : l'isolation électrique des deux électrodes, l'assurance de la conductivité ionique en permettant le transfert des ions d'une électrode vers l'autre, la séparation efficace des gaz afin d'éviter le contact direct du combustible et du gaz oxydant, etc. Plusieurs études ont été faites sur les marques et les types de séparations.

Lors de la réaction d'électrocatalyse, un circuit extérieur passant à travers la membrane, qui résultant la séparation des atomes d'hydrogène en protons et électrons (oxydation produite à l'anode). A la cathode, les protons vont combiner aux électrons et aux atomes d'oxygène pour former de l'eau (réaction de réduction de l'oxygène) et traverser la membrane pour atteindre la cathode. On remarque aussi que la chaleur produite (utilisée comme source secondaire d'énergie issue de la pile).[19]

Electrodes :

Une pâte contenant des métaux précieux ou généralement du carbone platiné, du polytétrafluoroéthylène (PTFE) et un électrolyte polymère conducteur protonique enduire l'électrolyte dont la face qui est en contact avec l'électrode, ce dernier est constitué par un feutre ou un papier de carbone.

Pour obtenir une bonne électrode il faut assurer la condition principale ; qui est l'existence d'une zone de triple contact entre le gaz fourni et les particules de catalyseur d'une part, et le conducteur ionique de l'autre (gaz/ électrolyte /électrode) essentielle pour un bon

fonctionnement, [22] afin d'assurer l'évacuation des électrons du site de réaction, les particules de catalyseur doivent être en contact direct avec le conducteur. Les particules de catalyseur qui sont généralement de platine pur (teneur est de 0.1mg/cm² à 1 ou allié à un élément de transition Mn, Fe.....), mélangé avec un électrolyte polymère conducteur protonique et un polymère hydrophobe tel que le PTFE (polytétrafluoroéthylène) doivent être fixées sur un support de charbon actif à très grande surface spécifique, ces métaux Nobel possédant la réduction de l'oxygène et l'oxydation de l'hydrogène (activité électrocatalytique), et peut, résister la corrosion des environnements chimique [05-23].

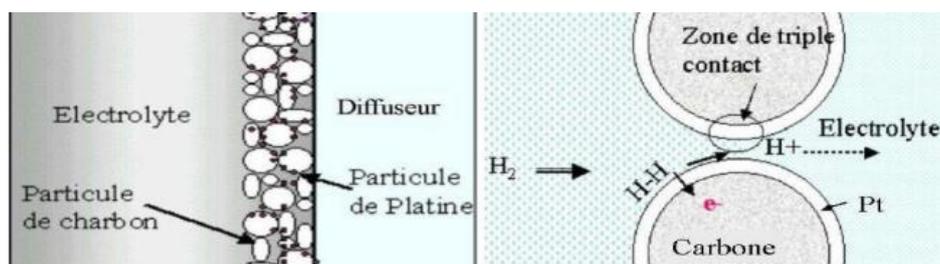


Figure (I.17) : Représentation schématique de la zone de triple contact

L'ensemble électrode-membrane-électrode EME a une épaisseur très fine (film mince de 5-15µm) [21-22] cet ensemble est intégré entre deux plaques bipolaires [23].

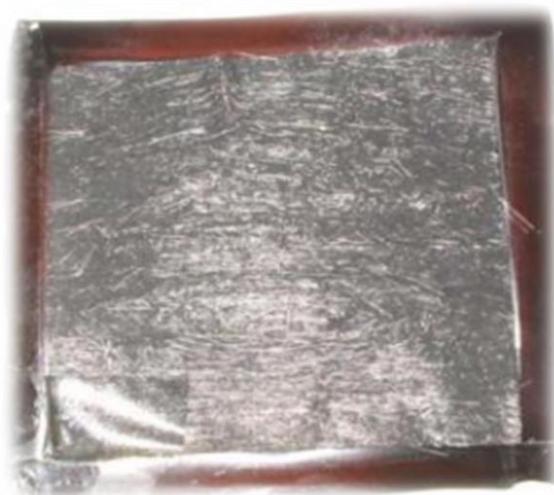


Figure (I.18) : photo d'un ensemble EME

⚡ Plaque bipolaire :

Les plaques bipolaires dirigent le carburant et l'oxydant des deux côtés opposés des assemblages membrane-électrodes. Chaque plaque contient des canaux de conception sinueuse qui maximise la répartition des gaz. La forme des canaux de gaz est un paramètre important

pour la production uniforme d'électricité, un fonctionnement stable des cellules et la gestion de l'eau. Des conceptions différentes des plaques bipolaires sont adaptées aux diverses applications de pile à combustible. Chaque plaque doit être électriquement conductrice pour que le courant issu de la réaction électrochimique puisse passer d'une cellule à l'autre, et finalement aux bornes électriques. Les plaques sont typiquement faites de graphite les canaux étaient usinés ou pressés. Le graphite est le matériau préféré en raison de sa conductivité excellente, sa neutralité et son coût relativement bas.[24]

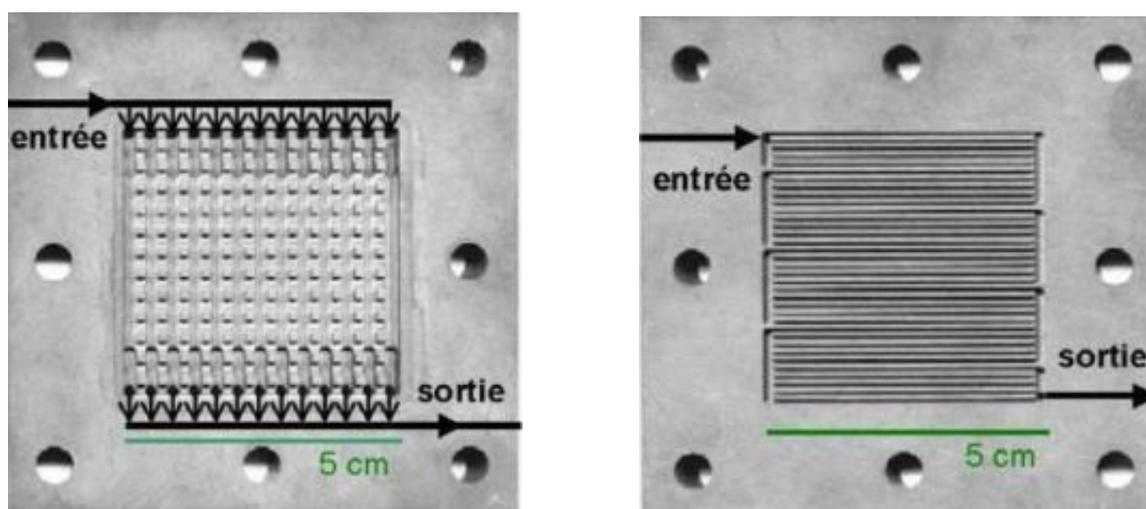


Figure (I.19) : structure des électrodes et la zone de triple contact

2.4 Dimensionnement du stack de type PEM

Le dimensionnement du stack est contraint par des limites technologiques liées au nombre de cellules, à la densité de courant et à la surface de contact. Par exemple, les plaques bipolaires en graphite permettent généralement jusqu'à 100 cellules au maximum, la densité de courant est limitée à 1 A/cm^2 et la surface totale est plafonnée à 800 cm^2 . [25]

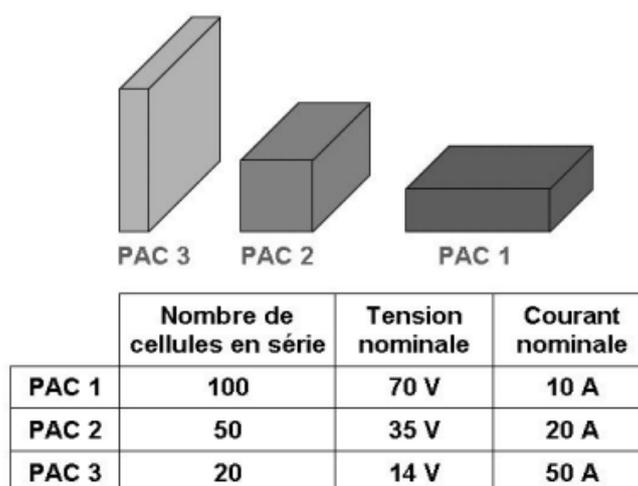


Figure (I.20) : Modularité d'un stack : 3 Exemples de conception d'une PAC de 700 W

En conséquence, le design du stack est déterminé en fonction de la puissance requise spécifiée dans le cahier des charges. Cela implique de jouer sur le nombre de cellules à empiler et la surface de chaque cellule. La modularité de cette approche est illustrée dans la figure (I.20)

2.5 Système pile à combustible PEM

Le bon fonctionnement d'un stack de pile à combustible exige l'intégration de divers équipements auxiliaires. Ces dispositifs sont essentiels pour l'alimentation en gaz, le traitement des gaz, la régulation de l'humidité de la membrane et le contrôle de la température du système en fonctionnement.

2.5.1 Auxiliaires d'une pile à combustible PEM

Le système PAC se compose du Stack (cœur de la pile) et de composants auxiliaires dont le rôle est d'assurer l'approvisionnement des réactifs, de les conditionner, d'évacuer les produits et de convertir l'énergie électrique générée par le Stack.

L'exemple d'architecture du système de pile complet, comprend plusieurs périphériques (compresseurs, des pompes, des échangeurs, des séparateurs et des humidificateurs). Ces périphériques regroupent différents circuits, notamment ceux dédiés à l'air, à l'hydrogène, à l'eau, au refroidissement et à l'électricité de la pile à combustible [25]

2.5.2 Alimentation de pile à combustible de type PEM

Circuit d'alimentation en hydrogène :

Pour une pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène direct, un système simple assure l'approvisionnement en hydrogène. Habituellement, l'hydrogène est stocké sous forme gazeuse dans des réservoirs à haute pression (entre 300 et 700 bars). Dans ce cas, une régulation mécanique de la pression à l'aide d'un détendeur est utilisée pour ajuster l'hydrogène à une pression appropriée (entre 1 et 3 bars). L'hydrogène non utilisé peut être recyclé en utilisant une pompe de recirculation ou un dispositif passif tel qu'un Venturi pour éviter tout gaspillage de combustible.

La cathode peut également fonctionner en circuit fermé, ce qui nécessite une purge occasionnelle contrôlée par une valve pour éviter l'accumulation d'azote qui se diffuse à travers la membrane électrolytique. Dans ce cas, tout excès d'hydrogène peut être consommé dans un petit brûleur catalytique.

Si nécessaire, l'hydrogène entrant dans le réacteur peut être humidifié à l'aide d'eau ionisée par le biais d'un système d'humidification à membrane. [25][26]

Circuit d'alimentation en air :

L'oxygène nécessaire à l'alimentation de la pile à combustible est généralement extrait de l'air ambiant pour éviter le stockage d'oxygène. Cependant, l'air ne contient que 21% d'oxygène. Afin d'augmenter la concentration en oxygène, il est parfois nécessaire, surtout pour les puissances élevées, de comprimer l'air. Dans certains cas, l'énergie contenue dans les gaz de sortie de la pile (l'air appauvri en oxygène) peut être récupérée par une turbine. Pour les petites puissances, une simple soufflante peut suffire.

Cependant, l'utilisation d'un compresseur a des conséquences sur le rendement global du système. Ce compresseur est alimenté par la pile à combustible et lui prélève une puissance significative, pouvant représenter jusqu'à 25% de la puissance électrique délivrée par la pile. Ainsi, le compresseur est un auxiliaire crucial dans le fonctionnement de la pile, et plusieurs défis technologiques doivent être surmontés dans ce domaine : il doit permettre l'admission d'air, l'évacuation de l'eau produite sans assécher la membrane de la pile, tout en assurant une dynamique optimale du système.[27]

2.6 Description générale des phénomènes physicochimique au sein d'une pile des PEM

Bien que le principe de fonctionnement des PEM soit simple, Il existe de nombreux phénomènes physico-chimiques qui se déroulent dans le cœur de la pile. Nous avons les phénomènes thermodynamiques, fluidiques, électrochimiques et thermiques. L'interaction entre ces divers phénomènes fortement liés est essentielle pour le bon fonctionnement du système

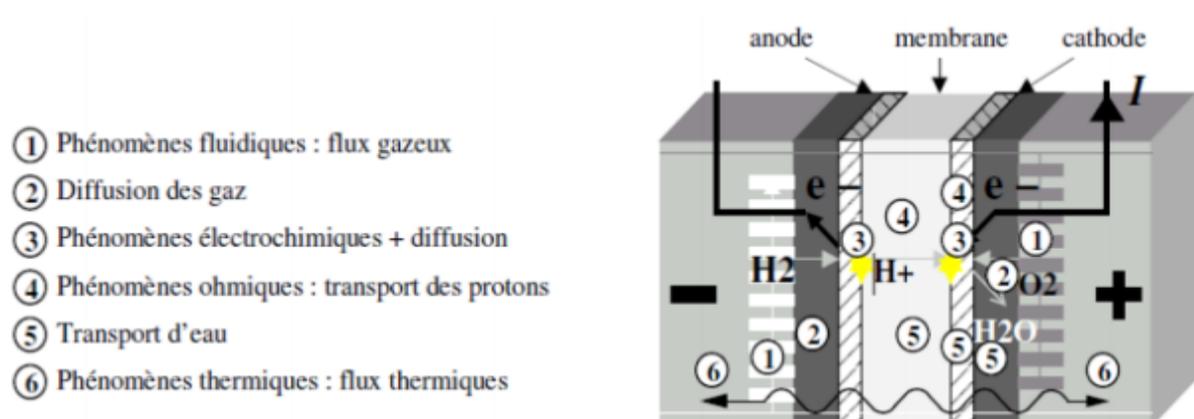


Figure (I.22) : Description générale des phénomènes électrochimiques au sein d'une pile PEM

2.6.1 Phénomènes fluidiques

Les gaz injectés dans les canaux de distribution des plaques bipolaires, subissent une perte de charge se traduisant par une chute de pression à l'intérieur des canaux. Cette perte de charge dépend principalement de la conception géométrique des canaux. La géométrie des canaux est particulièrement importante pour assurer une répartition homogène des gaz sur toute la surface de l'électrode tout en minimisant les pertes de charge. Ainsi, la pression partielle des gaz est généralement inférieure à la pression totale des gaz réglée à l'entrée de la pile [28]

2.6.2 Diffusion des gaz

La couche de diffusion, étant un milieu poreux, représente la zone intermédiaire entre le canal et la couche de réaction dans une PEMFC. D'une épaisseur variante entre 100 et 500 micromètres, sa structure fibreuse est généralement hydrophobe, sa structure fibreuse est généralement hydrophobe pour faciliter l'évacuation de l'eau liquide produite [29]. Les pores de ce matériau sont partiellement remplis d'eau et opposent de fait une résistance à la diffusion des gaz. En effet, même si cette couche de l'électrode est hydrophobe, la présence d'eau l'état

liquide est très probable en pratique, particulièrement coté cathode où l'eau est produite. Notons que la présence de cette eau peut être vue comme un noyage de la couche de diffusion de l'électrode ; elle réduit l'espace disponible pour une diffusion rapide des gaz, et augmente ainsi la résistance au transport des gaz. Ces phénomènes de diffusion entraînent une diminution et une limitation de la concentration des gaz au niveau des sites réactifs de l'électrode.

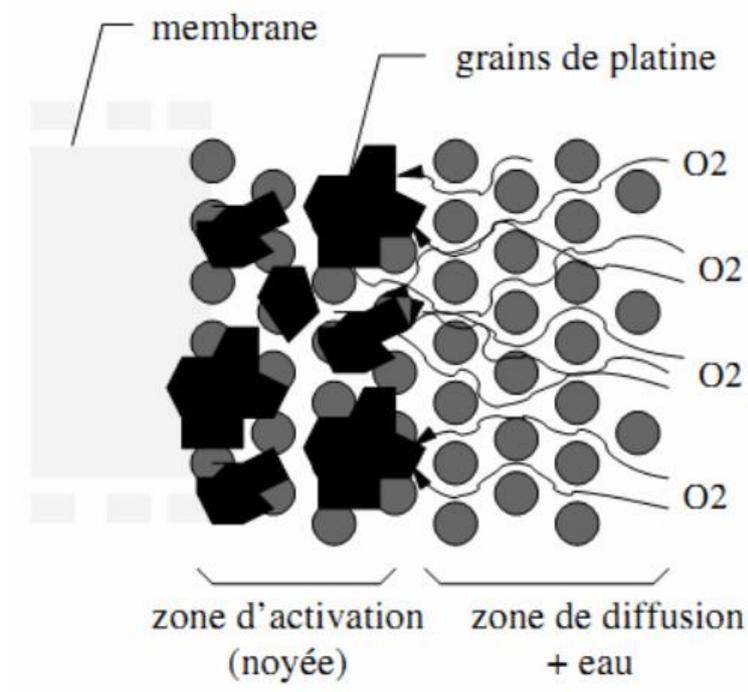


Figure (I.23) : Schéma de la diffusion de l'oxygène à la cathode

2.6.3 Phénomènes électrochimiques

Les gaz qui passent à travers la couche de diffusion parviennent à une région désignée comme étant soit active soit de catalyse. C'est dans cette région que se déroule le processus réactionnel des deux demi-réactions d'oxydoréduction, permettant ainsi la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique.

C'est ici que se produit la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique. Des pertes dues à la cinétique chimique des réactions se manifestent malheureusement. La condition nécessaire à ce mécanisme réactionnel est la mise en présence au même point du gaz réactif, du proton, des électrons et du catalyseur (cas de la cathode). Ce lieu est appelé le lieu

du « triple contact ». La couche active de l'électrode présente peu de caractère hydrophobe. Elle est généralement considérée comme noyée [25].

Cette condition est satisfaite si le catalyseur est recouvert d'électrolyte et si le gaz peut diffuser à travers ce dernier pour atteindre lui-même le catalyseur.

La figure I.24 représenté le mécanisme :

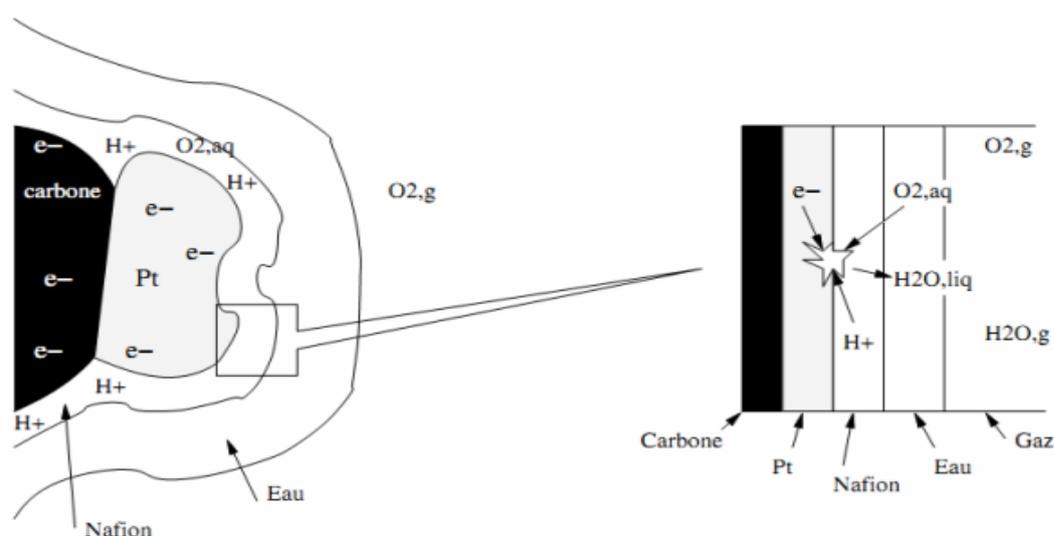


Figure (I.24) : Mécanisme réactionnel autour du triple contact côté cathode

2.6.4 Phénomènes thermiques

Les phénomènes thermiques jouent un rôle crucial dans les piles à combustible (PAC). En effet, la température est un paramètre essentiel pour les réactions chimiques : plus la température est élevée, plus la vitesse des réactions est élevée. Pour que l'électrolyte puisse bien conduire les ions, il doit être maintenu à une température suffisamment élevée. Cependant, afin d'assurer un fonctionnement optimal de la pile, il est nécessaire de maintenir une température inférieure à un certain seuil (qui varie selon le type de pile), afin d'éviter que la membrane ne se dessèche [25].

Deux moyens classiques de refroidissement sont actuellement envisagés [28] :

- Naturellement, la chaleur est dissipée par rayonnement et convection à partir des surfaces externes, ainsi que par l'évacuation des gaz excédentaires au niveau de la cathode. L'efficacité de la convection peut être augmentée en ajoutant un système de refroidissement par air pulsé, tel que des ventilateurs, pour les piles à combustible de faible puissance
- Circuit de refroidissement interne et dédié par air, eau ou fluide caloporteur.

2.6.5 Transport de l'eau

La réduction de l'oxygène (côté cathode) génère de l'eau liquide qui se déplace de part et d'autre de la zone de catalyse : à travers la zone de diffusion cathodique et à travers la membrane. Un schéma des principaux phénomènes de transport d'eau est présenté dans la Fig. Au niveau d'une membrane en Nafion, il y a deux phénomènes opposés qui ont un impact sur l'hydratation :

- L'électro-osmose, phénomène qui se définit par un entrainement des molécules d'eau qui se trouvent autour des sites sulfonates, dans le sillage des protons migrant sous l'effet du champ électrique. Ce phénomène entraîne les molécules d'eau de l'anode à la cathode, et a, en particulier, tendance à dessécher la membrane côté anode.
- Le transport dû au gradient de concentration de molécules d'eau qui est plus important côté cathode lieu de la production d'eau. Ce phénomène entraîne les molécules de la cathode vers l'anode. La dominance de l'un ou de l'autre phénomène dépend du niveau de courant a remarqué qu'à partir d'un certain niveau de courant, l'électro-osmose était mal compensée par la diffusion de l'eau.[28]

2.7 Rendements de la pile à combustible

2.7.1 Rendement matière - Quantités de combustibles

Pour les deux configurations mentionnées précédemment, le rendement matière est défini comme le rapport entre la quantité d'hydrogène consommée par la pile et la quantité produite par le reformeur.

Suivant :

$$\eta_{mat} = M_{H_2}^{PILE} / m_{H_2}^R = (M_{H_2}^R - M_{H_2}^{ex}) / M_{H_2}^R \quad (I.18)$$

Dans le contexte du rendement global, la consommation des gaz constitue également un problème. En pratique, toute la quantité de gaz fournie n'est pas utilisée par la pile, et nous définissons donc un coefficient d'utilisation des gaz, généralement estimé à 0,95 :

$$\eta_{matiere} = 95\%.[25]$$

2.7.2 Rendement voltaïque

Comme nous avons pu le voir dans la dernière expression de la variation d'enthalpie libre (1.8), la pression et la température viennent modifier cette variation d'enthalpie libre. De plus, les pertes irréversibles de la réaction dépendantes de la pression et de la température dans le cas général jouent un rôle considérable. Il est alors commode de comparer le potentiel réel de la cellule avec le potentiel maximal théoriquement atteignable de $E_0 = 1,23\text{V}$. On introduit alors un rendement voltaïque : $\eta_{\text{voltaïque}} = V_{\text{cellule}} / 1,23 \times 100$ [25]

2.7.3 Rendement thermodynamique

On peut définir un rendement thermodynamique théorique maximal (dans les conditions standards) : il s'agit de comparer l'énergie électrique créée avec l'énergie calorifique de la réaction électrochimique : $\eta_{\text{thermo}} = \Delta G^\circ(T) / \Delta H^\circ(T)$

Pour la réaction de formation de l'eau, lorsque celle-ci est produite à l'état liquide à 25°C et sous une pression de 1bar, ces grandeurs valent :

- variation d'enthalpie libre standard : $\Delta G^\circ = -237\text{ kJ/mol}$.

- variation d'enthalpie standard : $\Delta H^\circ = -265,8\text{ kJ/mol}$. [25]

Le rendement thermodynamique vaut alors :

$$\eta_{\text{thermo}} = 83\%$$

2.7.4 Rendement global

Il convient de considérer l'ensemble des rendements mentionnés précédemment :

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{matiere}} \times \eta_{\text{thermo}} \times \eta_{\text{voltaïque}} \quad (\text{I.19})$$

En pratique, la tension typique d'une cellule PEM en fonctionnement est d'environ 0,7V. En utilisant cette valeur, on peut estimer un rendement global d'environ 45%. [25]

Conclusion

Au début de ce premier chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM. On a abordé l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement.

Dans ce contexte nous nous sommes intéressés dans ce travail qu'aux piles à membranes polymères échangeuses de protons PEM (Proton Exchange Membrane) aux causes de leurs avantages. Ensuite, la description du principe de fonctionnement d'une de type PEM et la structure complète de leur cellule sont présentés. Par suite, on s'intéresse à la modélisation mathématique des piles à combustibles de type PEM.

Chapitre II : Modélisation de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC

Introduction

Il existe un grand nombre de modèles quasi statique pour décrire la réaction chimique présente dans une cellule de pile à combustible. Ces modèles se différencient suivant des objectifs fixés.

Les piles PEMFC ont été principalement développées dans le but de convertir des composants d'entrée en composants de sortie. Elles opèrent en transformant le combustible et le carburant en eau et en électricité. Au cours de ce processus de transformation, pendant cette transformation ces éléments d'entrées ont des caractéristiques et les éléments de sorties ont des caractéristiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation mathématique de la pile à combustible. On va présenter la relation entre la tension, le courant et la puissance de sortie de la pile. On présente les pertes de tensions surgies au cours de fonctionnement de la pile, à savoir les pertes de concentration, les pertes d'activation et les pertes ohmiques. On présente les caractéristiques puissance – courant et tension- courant de la pile, et on va étudier les différents facteurs influant sur ces caractéristiques, notamment la température de la pile et la pression des réactants.

1. Modèle physique de la pile à combustible

La figure (II.2), représente un modèle physique d'une pile à combustible (PAC)

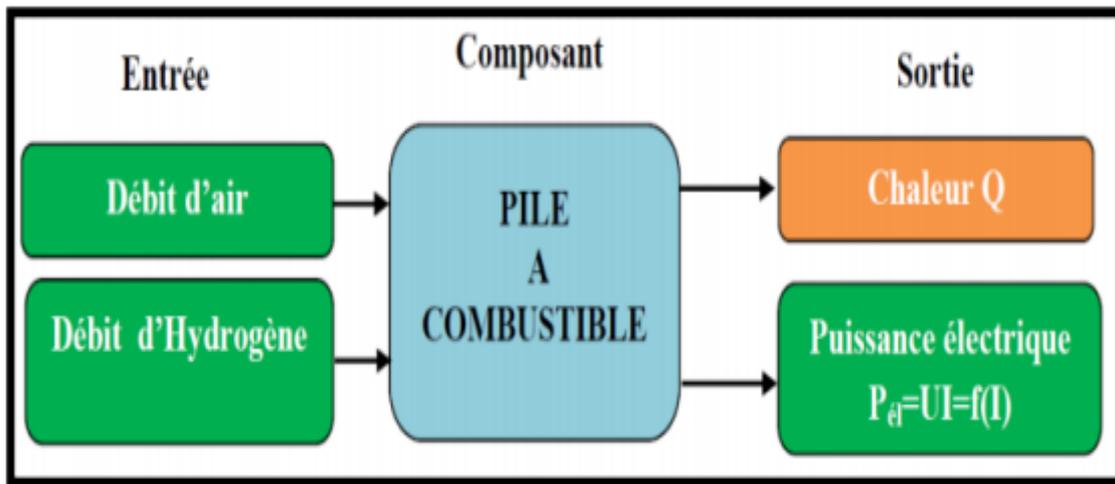


Figure (II.01) : modèle physique d'une pile à combustible (PAC)

La PAC correspond à une source d'énergie, en fonction du besoin de la charge un point de fonctionnement (Tension / Courant) va s'établir. La quantité d'hydrogène consommée est proportionnelle à la quantité d'électricité absorbée par la charge.

2. Modélisation mathématique de la pile

La potentielle thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H_2/O_2 à 25°C et à 1 atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (V) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations (surtension) qui sont : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration.

L'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit [31] :

$$V = E_{Nerst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (II.20)$$

Avec :

E_{Nerst} : potentiel de Nernst

η_{act} : polarisation d'activation

η_{ohm} : Polarisation ohmique

η_{conc} : Polarisation de concentration

2.1 potentiel de Nernst

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst arrangé avec un calcul numérique se présente comme suit :

$$E_{Nerst} = \frac{G_{f,liq}}{2 * F} - \frac{R * T}{2 * F} * \ln \left(\frac{P_{H2O}}{P_{H2} * P_{O2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (II.21)$$

Où :

P_{H2} Et P_{O2} sont les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène (atm).

T est la température de fonctionnement du PEM (k),

F est le constant faraday (C/k.mol),

R est la constante de gaz universelle (J/k.mol).

P_{H2O} est la pression de l'eau

$G_{f,liq}$ Fonction de Gibbs état liquide

2.2 Pertes d'activation

Les pertes d'activation se produisent en raison de la vitesse des réactions chimiques à la surface de la réaction. Une partie de l'énergie est utilisée pour initier et accélérer ces réactions chimiques, ce qui entraîne une diminution de tension, qui est souvent fortement non linéaire. En d'autres termes la polarisation d'activation est présente quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. Une autre source de chute de tension est également causée par les courants de fuite.

L'expression simple proposée par J.C. Amphlett pour la surtension d'activation est exprimée dans l'équation :

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln((CO_2^*)) + \xi_4 T \ln(I_{PAC}) \quad (II.22)$$

Chapitre II : Modélisation de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC

Où ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 et ξ_4 : les coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la PEM,

I_{PAC} : le courant de fonctionnement de la PEM (A)

$$\xi_1 = -0.948$$

$$\xi_2 = k_{Cell} + 0.197 \times 10^{-3} \ln(Afc) + 4.3 \times 10^{-5} (CH)$$

$$\xi_3 = 6.3 \times 10^{-5}$$

$$\xi_4 = 0.72 \times 10^{-4}$$

Le CO_2^* est le foyer d'oxygène sur la zone du catalyseur (mol/cm^3) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry :

$$CO_2^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.8 \times 10^6 e^{-(498/T)}} \quad (II.23)$$

A des basses densités de courant, la forme de la courbe est principalement déterminée par la polarisation d'activation de la cathode. La cathode est généralement l'électrode qui limite la performance d'exécution de la PEMFC, car la densité de courant d'échange de la réaction de réduction de l'oxygène est basse, elle est approximativement de l'ordre 5 à 6 fois inférieure à celle de la réaction au niveau de l'anode [32].

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \left[1 - \chi_{H_2O}^{sat} \right] \quad (II.24)$$

P_{cath} : La pression de l'oxygène à la cathode, $\chi_{H_2O}^{sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée $\approx 50\%$, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} P_{cath} \quad (II.25)$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone.

$$P_{H_2}^* = P_{anod} \left[1 - \frac{1}{2} \chi_{H_2O}^{sat} \right] \quad (II.26)$$

P_{anode} est La pression de l'hydrogène à l'anode, et ($\chi_{H_2O}^{sat} = 0.5$), l'équation devient:

$$P_{H_2}^* = \frac{4}{3} P_{anod} \quad (II.27)$$

2.3 Pertes par concentration

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite, pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro, et d'une constante appelée constante de transport ou de transfert de masse. [33] :

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{I}{I_{max}}\right) \quad (\text{II.28})$$

Avec :

B : Coefficient empirique qui tient compte de toutes les contributions des phénomènes de transport de matière,

I_{max} : Courant limite de diffusion.

2.4 Pertes ohmiques

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

$$\eta_{ohm} = I(R_m + R_c) \quad (\text{II.29})$$

Avec:

R_c est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons,

R_m est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante:

$$R_m = \frac{r_M \times l}{A} \quad (\text{II.11}) \quad (\text{II.30})$$

Où :

l est l'épaisseur de la membrane (μm),

A est la surface active de la pile (cm^2)

r_M est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante :

$$r_m = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{l}{A} \right) + 0.06 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{T}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3}^{-0.634 - 3 \times \frac{T}{A}} \right] \times \exp \left[4.18 \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (II.31)$$

Le terme $\frac{181.6}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3}^{-0.634} \right]}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega \cdot \text{cm}$) à une température de 30 °C (T = 303 K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

$\left[\lambda_{H_2O/SO_3}^{-} \right]$ est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22. [33]

3. Paramètres du modèle d'une pile à combustible

LA Figure (II.3) montre le modèle allons suivre pour la modélisation d'une pile à combustible (PAC) de type PEM.

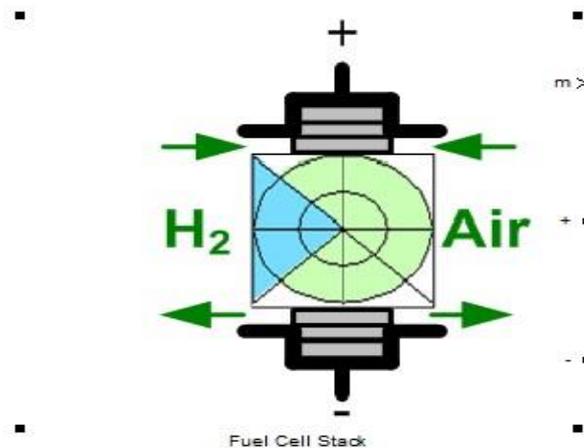


Figure (II.02) : Modèle pile PEMFC Matlab Simulink

Les données et les caractéristiques d'une pile à combustible considérées dans notre simulation sont illustrées en tableau (II.1) :

**Chapitre II : Modélisation de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons
PEMFC**

Paramètres du	Modèle PAC
Constante de Faraday	$F = 964872 \text{ C.}$
Constante des Gaz parfaits.	$R=8.314 \text{ (J/mol k).}$
Température.	$T_c=65 \text{ }^\circ\text{C.}$
Pression de l'hydrogène	$P_{\text{H}_2} = 1.5 \text{ (bar).}$
Pression de l'Air	$P_{\text{air}} = 1 \text{ (bar).}$
Surface de Cellule	$A_{\text{cell}}=170(\text{cm}^2).$
Nombre de cellules	$N_{\text{cell}}=65$
Résistance interne	$r = 0.19 \text{ (Ohm-cm}^2\text{)}$
Coefficient de transfert	$\text{Alpha} =0.5$
Facteur d'Amplification	$\text{Alpha}_1 = 0.085$
Facteur d'échange densité de courant	$i_o = 10^{-6},912 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
Densité de courant limite	$i_l = 1.4 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
Fonction de Gibbs état liquide	$G_{f_liq} = -228170 \text{ (J/mol).}$
Constante transport de masse	$k = 1.1.$

Tableau (II.01) : paramètre simulation (Modèle prédéfinie dans Matlab/Simulink)

4. Courbe de polarisation

4.1 Courbe caractéristique tension-courant :

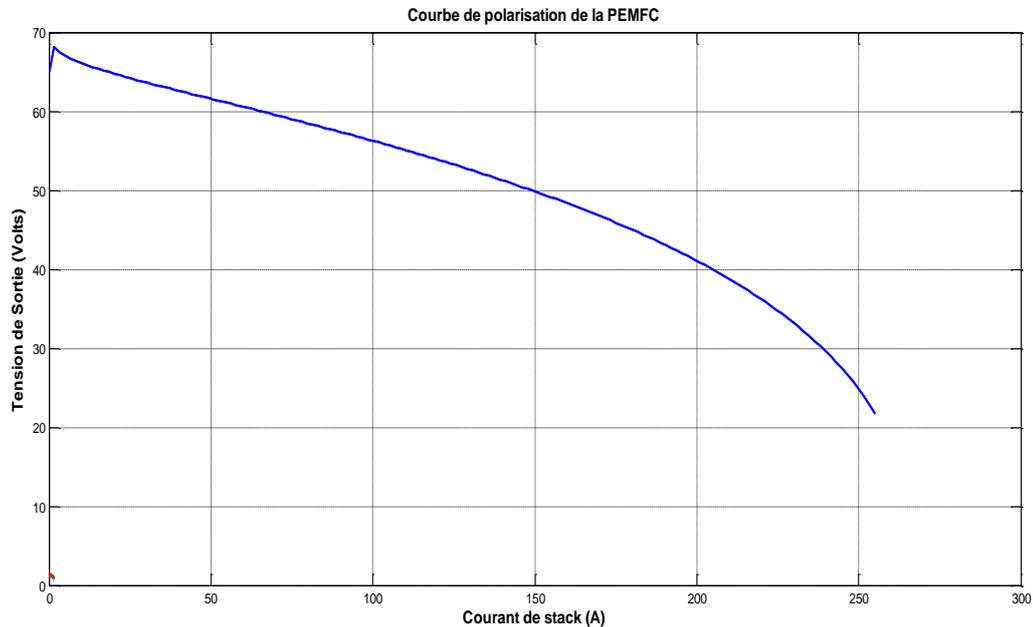


Figure (II.03) : Courbe de caractérisation $V = f(I)$

La Figure (II.03) présente la tension de sortie en fonction du courant du stack. On constate que la tension de la cellule est inversement proportionnelle avec le courant due aux pertes internes de la cellule. On peut distinguer sur la courbe caractéristique de la pile PEMFC, trois zones de polarisation, la première zone correspondant aux faibles valeurs du courant, c'est la zone de polarisation d'activation due au transfert de charges à l'interface électrode/électrolyte (due la lenteur de la réaction chimique a la surface de l'électrode), la deuxième zone correspondantes aux milieu de la courbe, c'est la zone de polarisation de résistance qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte. La troisième zone, correspondant aux forts courants, c'est la zone de de polarisation de diffusion qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes [34].

4.2 Courbe caractéristique puissance-courant :

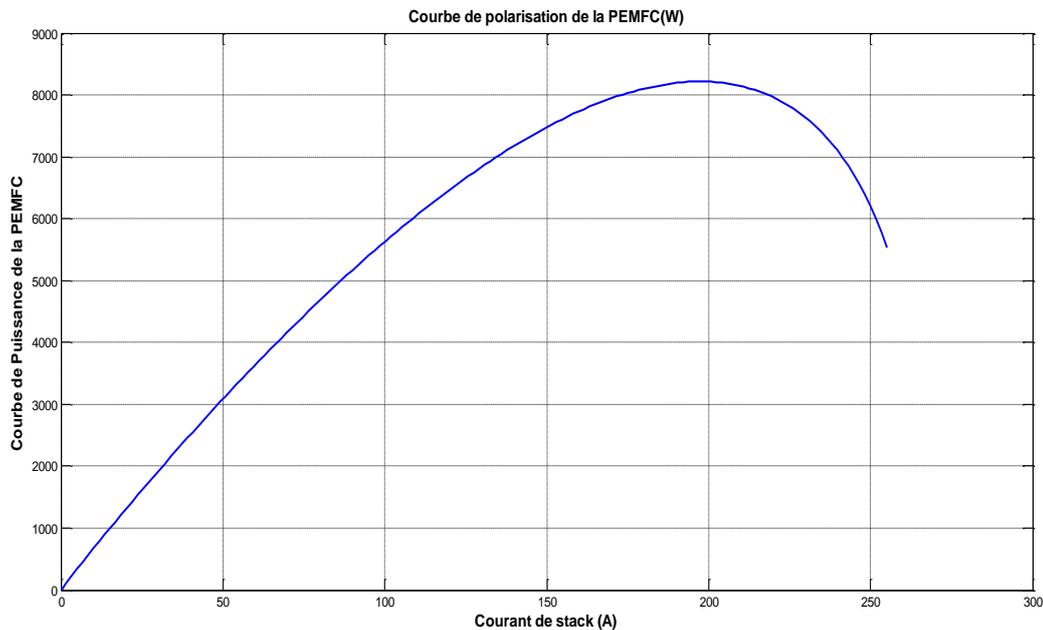


Figure (II.04) : variation de la puissance d'une pile à combustible en fonction de courant.

La figure II.04 présente l'évolution de la puissance du stack en fonction du courant. Nous remarquons que la puissance augmente progressivement avec le courant pour passer par un maximum d'environ 8300 Watts, correspondante à un courant d'environ 200 amers, puis elle commence à diminuer de nouveau si le courant continu à augmenter. A noter que la courbe de la puissance en fonction de la tension a pratiquement la même allure que la courbe de la puissance en fonction du courant.

5. Analyse l'influence des paramètres environnementaux sur les performances de la pile PEMFC

5.1 Influence de la température

La température de la PAC est un facteur important qui affecte les réactions chimiques d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène : la vitesse de ces réactions est proportionnelle à la température. Ainsi, elle influe sur le potentiel électrochimique V et sur les pertes d'activation, ohmique et de concentration.

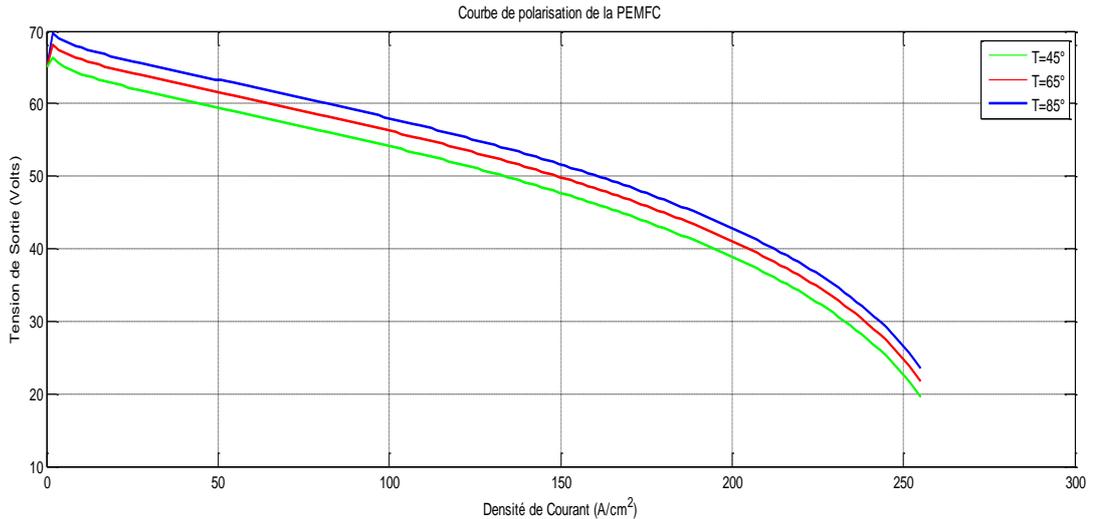


Figure (II.05) : L'effet de la température sur la tension

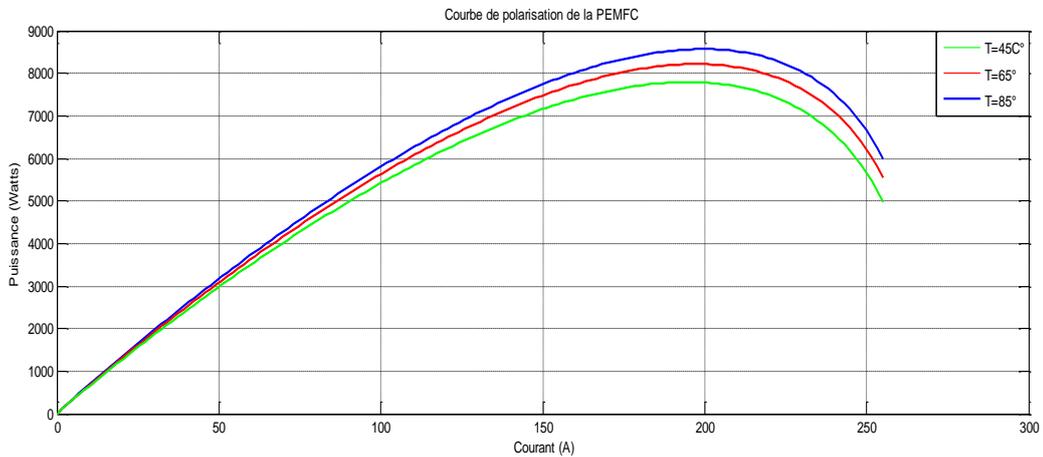


Figure (II.06) : L'effet de la température sur la puissance

La figure (II.05) montre le réseau de caractéristique $V(I)$ pour différentes valeurs de la température. On constate que l'augmentation de la température influe positivement sur la tension de la pile.

La figure (II.06) représente le réseau de caractéristique $P(i)$ pour différentes valeurs de la température. On constate que le niveau de la puissance produite est directement proportionnel à la température de la pile ou du stack. On constate une augmentation de la puissance lorsque le courant augmente et également une augmentation de la puissance lorsque la température augmente

5.2 Influence de la pression de L'hydrogène

Les figures II.07 et II.08 montrent les réseaux des caractéristiques V(I) et P(I) pour différentes valeurs de la pression de l'hydrogène. On constate que l'augmentation de la pression entraîne l'augmentation de la tension de sortie et de la puissance produite.

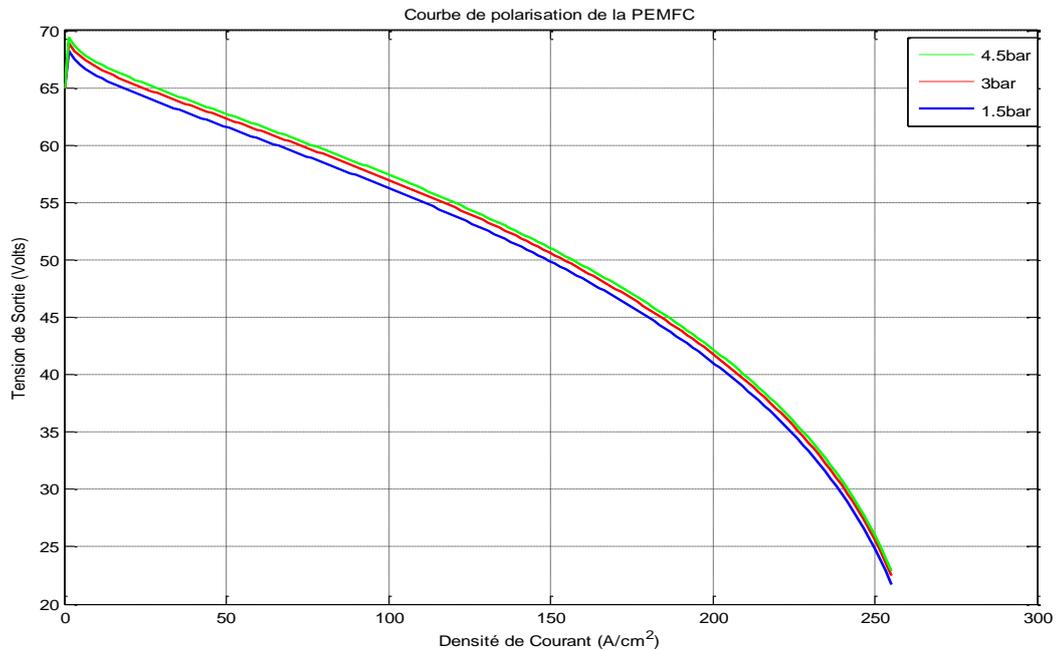


Figure (II.07) : Effet de la pression sur la caractéristique tension - courant

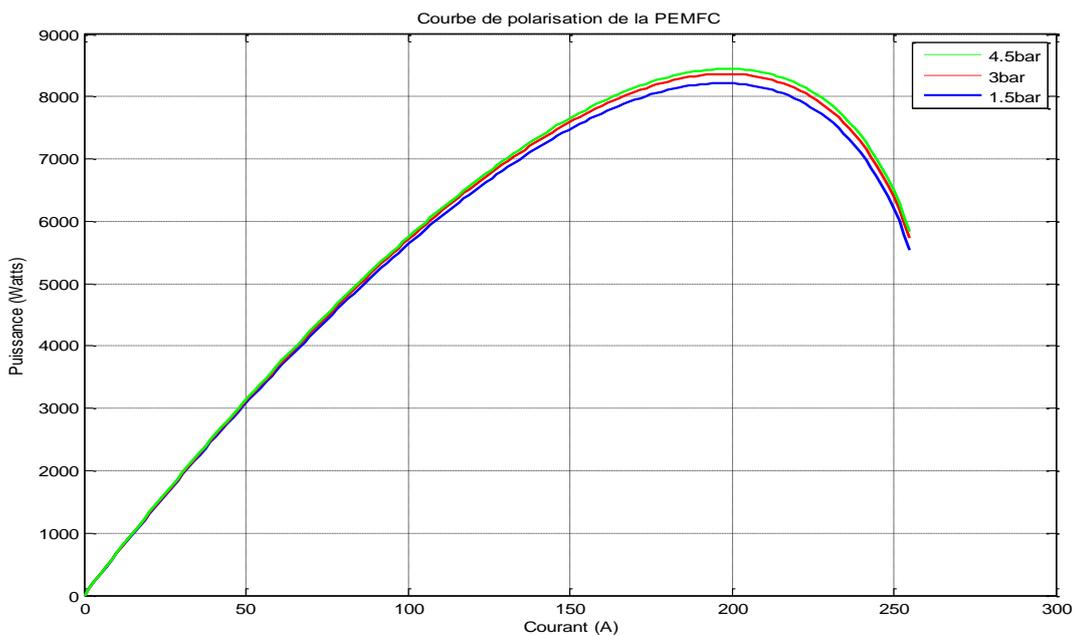


Figure (II.08) : Effet de la pression sur la caractéristique puissance - courant

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié le modèle et les équations mathématiques qui gèrent le fonctionnement des piles à combustibles de type PEMFC. Cette modélisation permet Par de tracer des caractéristique tension- courant et puissance courant de la pile, et de constater l'existence d'un point correspondant à une production maximale de puissance. Nous avons étudié à travers des simulations l'influence de la température et de la pression du combustible sur le réseau des caractéristiques.

Dans le chapitre suivant, on va étudier et simuler les algorithmes de recherche du point de puissance maximale sur la caractéristique de la pile à combustible.

Chapitre III : Command en MPPT de la pile

Introduction

La puissance délivrée par la pile à combustible (PAC) est influencée par plusieurs facteurs, dont la nature de la charge alimentée, la température, et la pression de l'oxygène et de l'hydrogène. En raison de cette variabilité, la position du point de puissance maximale (MPP) change constamment. Pour maximiser la puissance extraite de la PAC et optimiser son transfert à la charge, un algorithme de recherche du point de puissance est nécessaire.

1. Présentation du convertisseur (DC/DC) (hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques de type DC-DC (continu-continu) qui permettent de gérer la puissance électrique dans les circuits à courant continu avec une flexibilité et une efficacité remarquable. Un hacheur optimise le flux efficace d'énergie d'une source continu vers la charge. Il peut être élévateur ou abaisseur, et dans des situations spécifiques, renvoyer de l'énergie à l'alimentation, selon la construction.

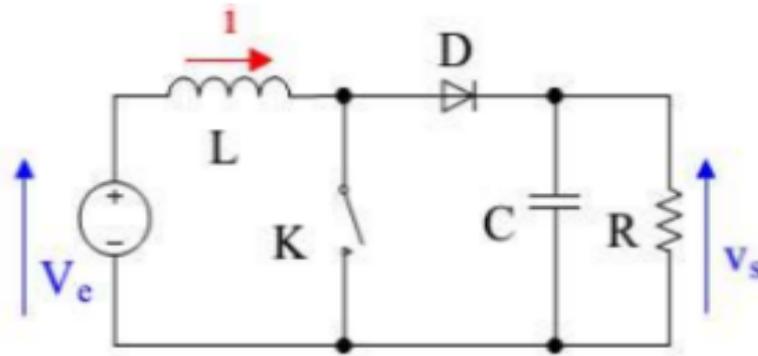


Figure (III.01) : Convertisseur (DC/DC)

2. Critères d'évaluation d'une commande MPPT :

La qualité de la commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au Point de Puissance Maximum (PPM). La puissance réelle fournie par la PAC dépend des commandes utilisées au niveau du convertisseur (MPPT, contrôle de tension, connexion directe, etc.). L'efficacité du point de fonctionnement qui en résulte (η_{MPPT}) permet de mesurer l'efficacité de la commande du convertisseur de puissance. Le η_{MPPT} détermine le % de perte de puissance du module (PAC) par rapport à la puissance maximale qui peut être produite [35].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{eff}}{P_{max}} \quad (III.31)$$

Où :

η_{MPPT} : Le rendement du point de fonctionnement

P_{eff} : La puissance effectivement délivrée par la PAC

P_{max} : Le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie d'un PAC.

L'évaluation de la performance d'une commande MPPT n'est pas limitée au seul paramètre η_{MPPT} . D'autres critères, aussi importants, sont utilisés pour l'évaluation de la qualité de commande :

- ✓ **Simplicité et Coût** : La commande MPPT doit être de conception simple, non énergivore et à coût d'exploitation raisonnable de sorte que son utilisation compense les dépenses supplémentaires investies.
- ✓ **Réponse dynamique** : La commande MPPT doit avoir de bonnes performances dynamiques pour contrôler l'étage d'adaptation et assurer que suite aux changements de température, un nouveau PPM soit trouvée le plus rapidement possible.
- ✓ **Flexibilité** : Quelles que soient les conditions d'utilisation, la commande MPPT doit être précise et stable. Elle doit être conçue pour fonctionner, avec précision et robustesse, de manière universelle avec des PAC de technologies différentes sans exigence d'importantes modifications.
- ✓ **Compétitive sur une large gamme de puissance** : La commande MPPT est considérée compétitive, si le PPM est atteint avec une erreur statique, qui correspond à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible dans une large plage de puissance [35].

3. Principe général de la commande MPPT :

C'est un montage électronique au niveau du régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie fournir par stack 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 stack à pile à combustible, ainsi quels que soient les conditions d'opérateires p_{H_2} et P_{O_2} , Température, Humidité relative, la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum (V_{mpp}, I_{mpp}) [36].

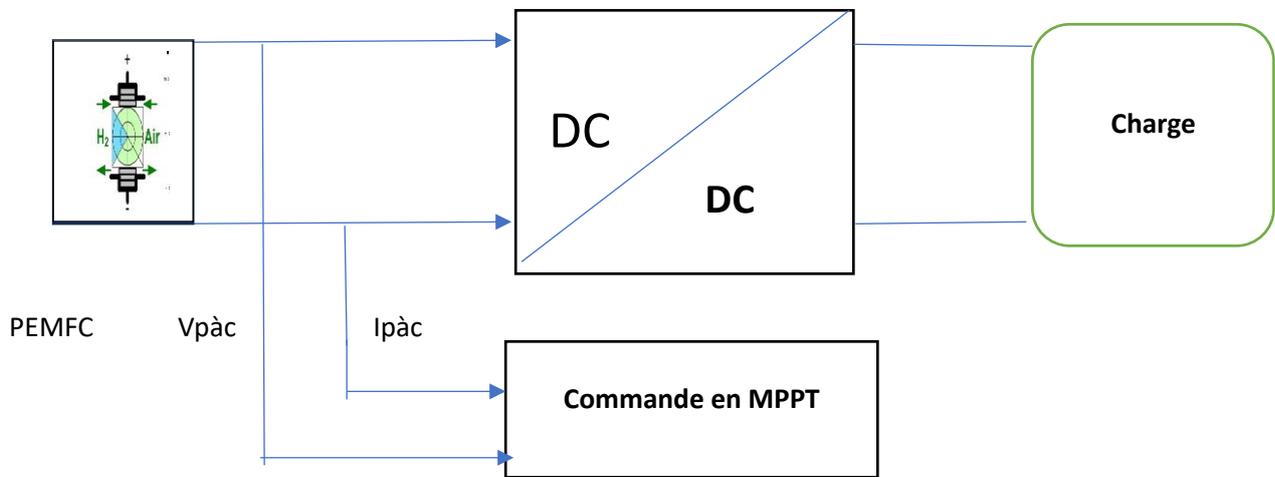


Figure (III .02) : Principe de la Commande

4. Les techniques de MPPT :

Il existe différents types de contrôleurs MPPT, mais tous ces contrôleurs sont basés en général sur la variation de rapport cyclique de convertisseur statique. Diverses approches ont été développées et employées. Dans cette section, nous aborderons les aspects théoriques de certaines méthodes de suivi du point de fonctionnement à puissance maximale d'une pile à combustible, ainsi que les éléments qui les caractérisent [37]:

- ✓ Méthode de perturbation et observation (PO).
- ✓ Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- ✓ Méthode de logique floue (FL).

4.1 La commande Perturb And Observe P&O :

4.1.1 Définition :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$)

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ à MPP} \quad (III.33)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ à gauche de MPP} \quad (\text{III.34})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ à droite de MPP} \quad (\text{III.35})$$

La figure (III .02) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V engendre un accroissement de la puissance P , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

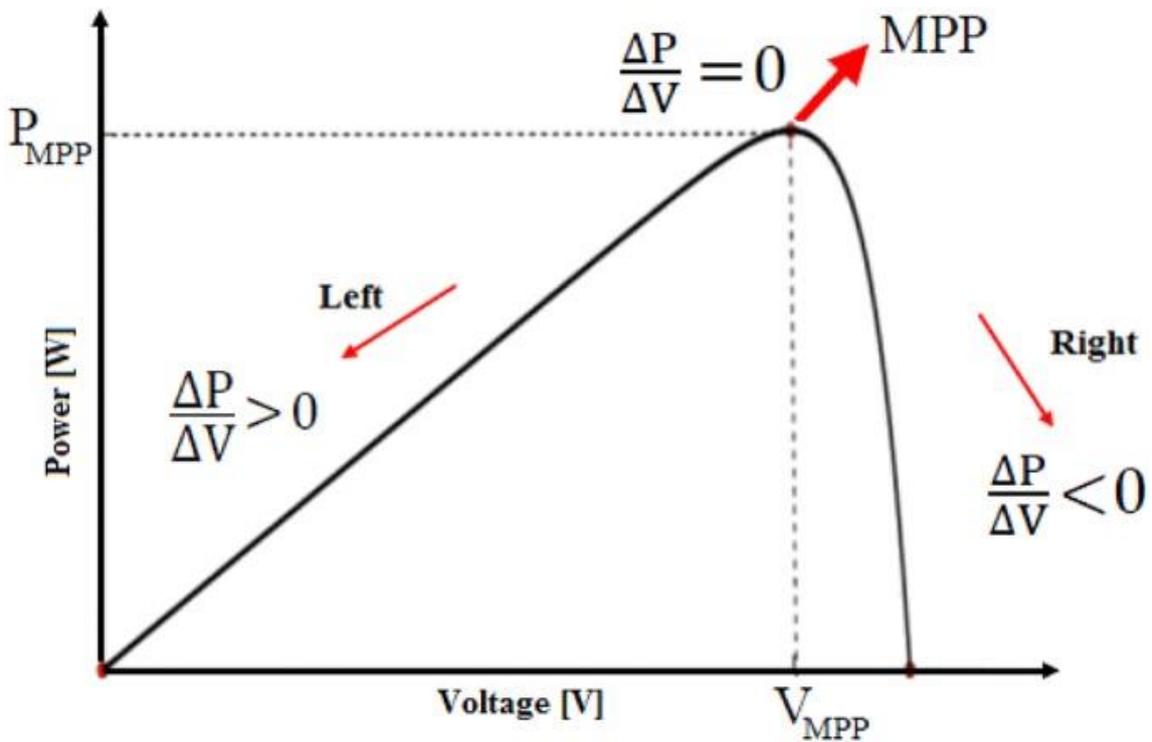


Figure (III .03) : Illustration de la MPPT Perturb and Observ

4.1.2 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation



Figure (III .04) : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

4.1.3 Simulation de la command MPPT (P&O) pile à combustible :

La figure(III.05) représente la command en MPPT sous MATLAB/SIMULINK

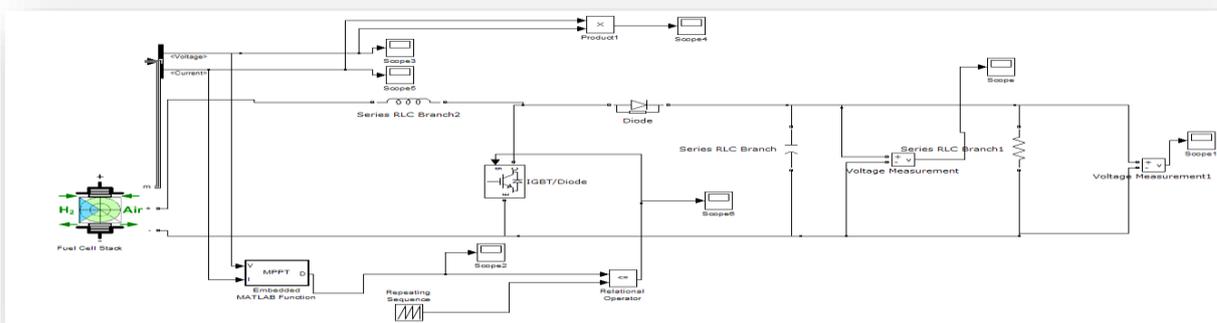


Figure (III.05) : Schéma Simulink de la command en MPPT P and O

Pour une évaluation des performances d'un pile à combustible sous une commande MPPT du type P and O, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (PILE-hacheur-élévateur-charge résistive) sous des conditions fixes nominales (une température de 65°C, pression d'hydrogène 1.5bar, pression d'oxygène 1 bar).

 **Simulation du système avec les conditions standards :**

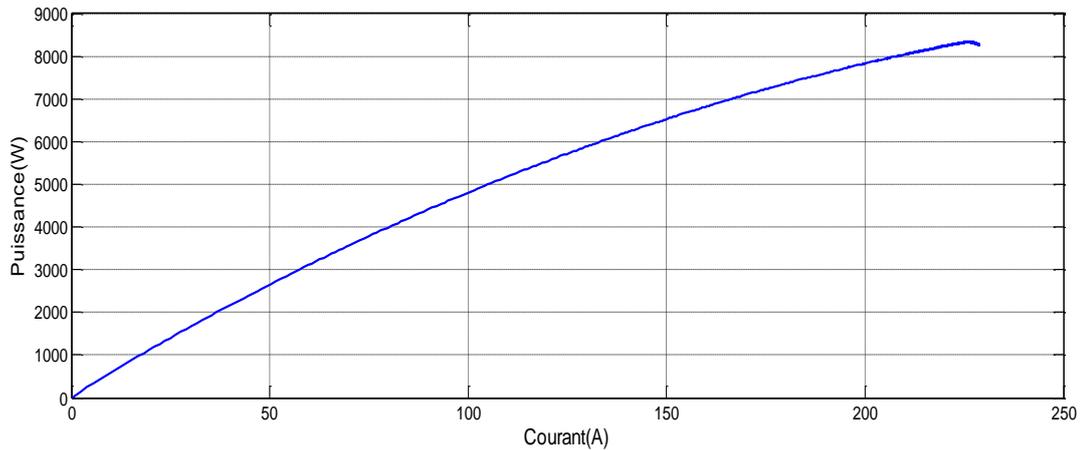
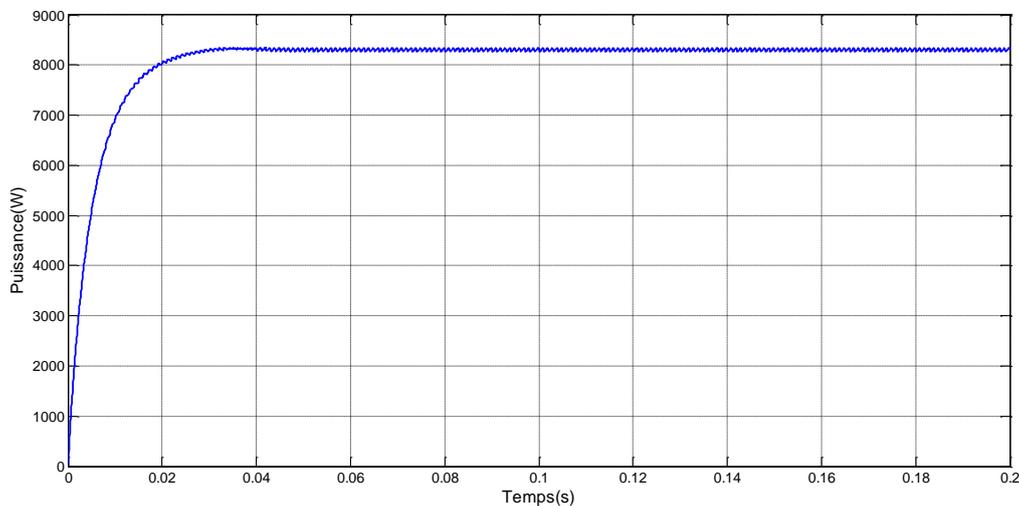


Figure (III.06) : Caractéristique puissance-courant en appliquant la MPPT P&O



Figure(III.07) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de Temperature

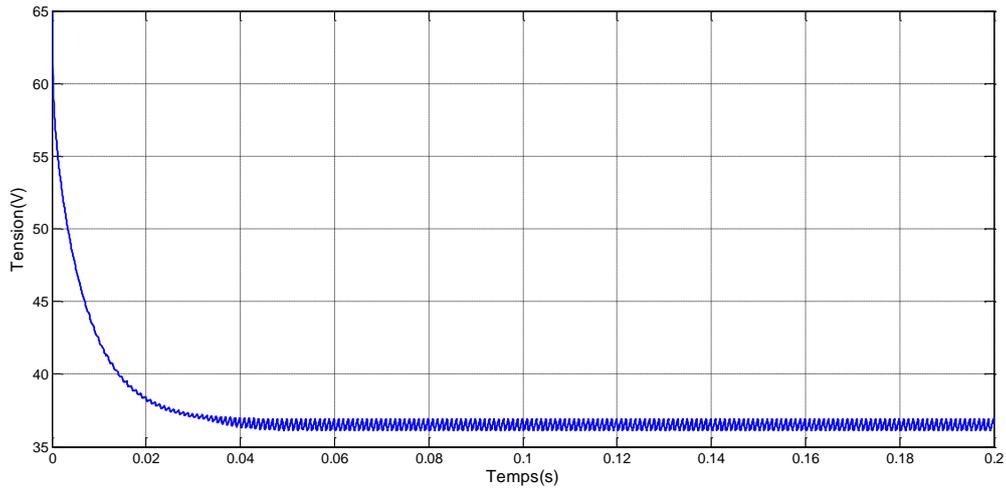


Figure (III.08) : Tension de la pile à combustible PEMFC

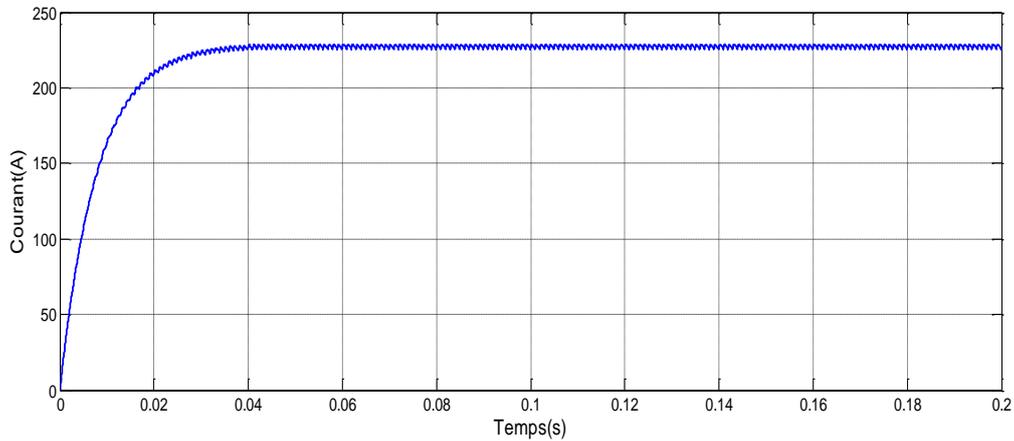


Figure (III.09) : Courant de la pile à comestible PEMFC

Les résultats de simulation présentés dans les Figures (III.06), (III.07), (III.08),(III.09) et montrent que la puissance, le courant et la tension d'une pile à combustible convergent vers le point de puissance nominale après une courte phase transitoire et donne un temps de réponse envirent de 0.04s.

Simulation du système sous conditions variables de température :

Les caractéristiques électriques de la pile dépendent de la température. Les courbes suivantes représentent la convergence du courant, de la tension ainsi que de la puissance avec un variation de température, la température passe, a l'instant $t=0.1s$, de $65^{\circ}C$ à $T=55^{\circ}C$, les autres conditions de fonctionnement restant fixes.

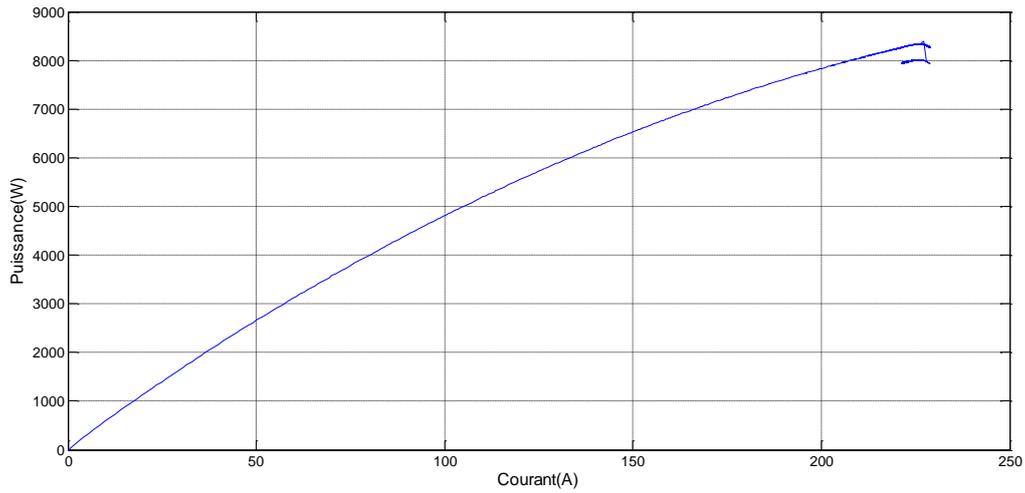


Figure (III.10) : Caractéristique puissance-courant en variant la température

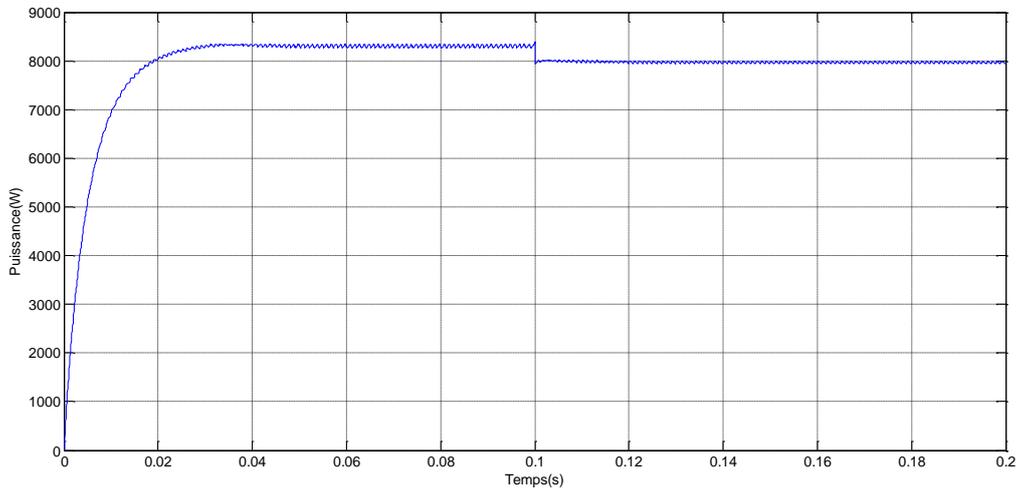


Figure (III .11) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

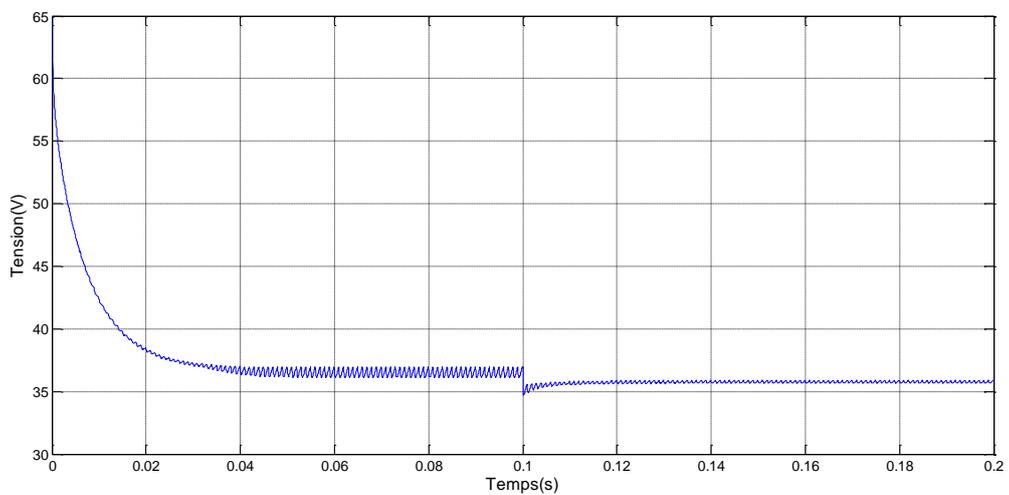


Figure (III .12) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

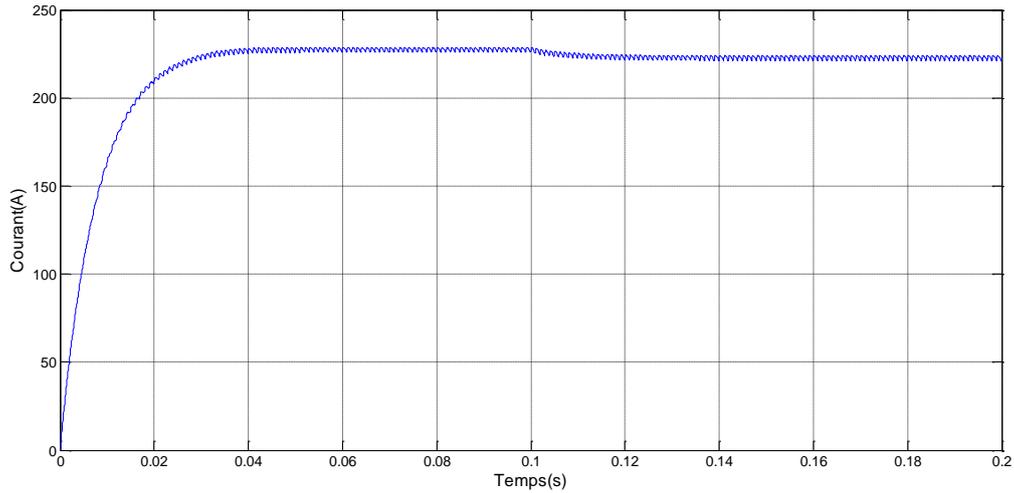


Figure (III.13) : Courant de pile à combustible PEMFC sous variation de température

A partir de résultat de simulation Figure (III .10),Figure (III .11) , Figure (III .12), Figure (III .13) on remarque que en cas de variation de température la tension, le courant et la puissance changent pour assure la poursuite du nouveau point de puissance maximale, correspondant aux nouvelles conditions de fonctionnement.

Simulation du système sous conditions variables de la pression d'hydrogène :

Nous allons simuler le système et sa commande sous une variation de la pression d'hydrogène de 1.5bar à 3bar.

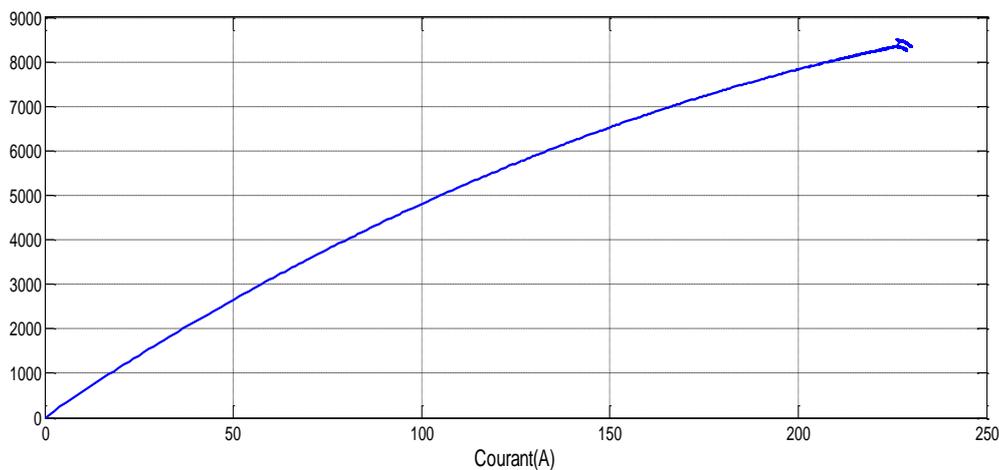


Figure (III.14) : Caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d'hydrogène

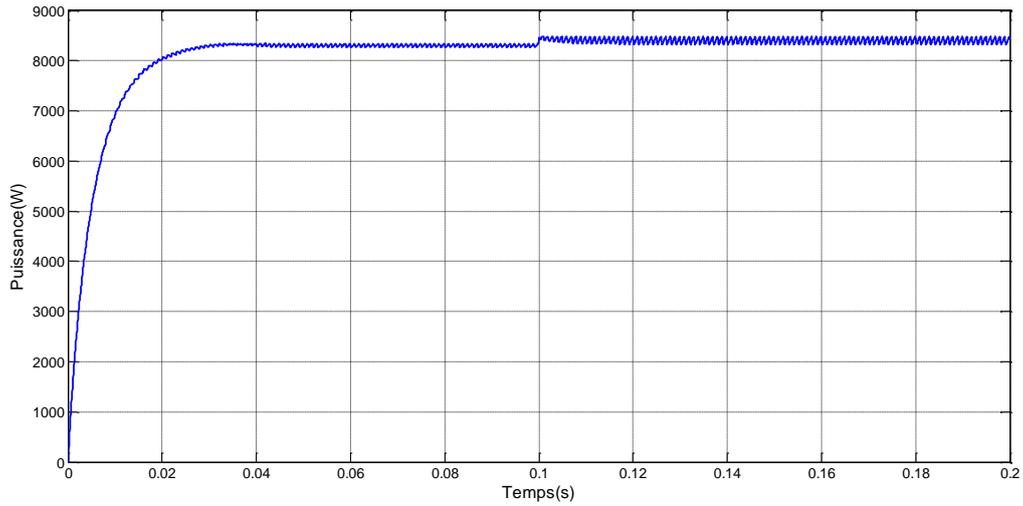


Figure (III .15) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

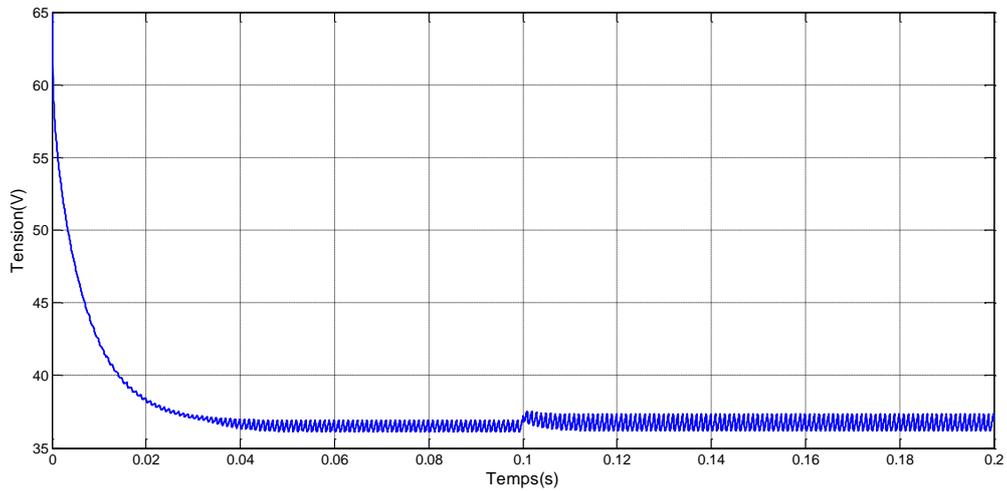


Figure (III .16) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

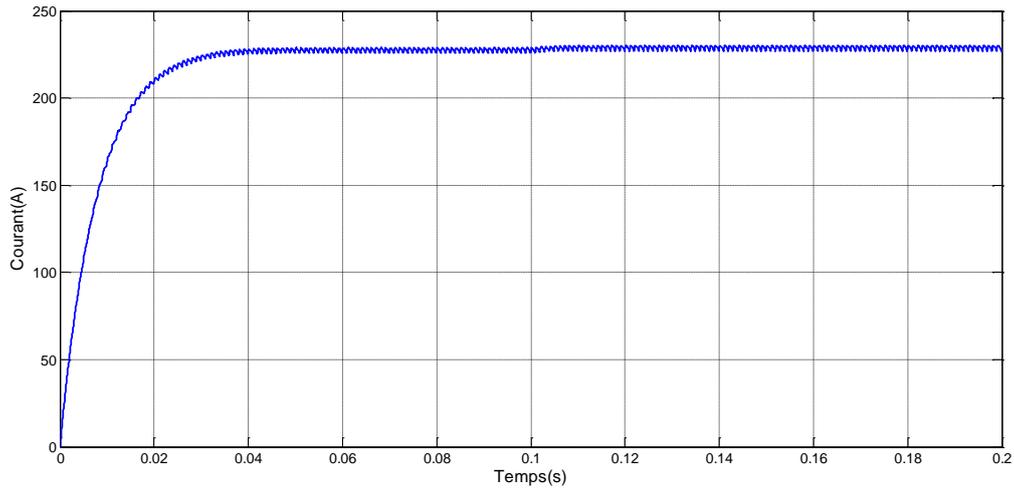


Figure (III .17) : courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

On sait que la variation la pression d'hydrogène influence la caractéristique courant-tension et le point de puissance maximale. D'après les résultats des figures (III.14), (III.15), (III.16)et(III,17) on constate que lorsque la pression passe de 1.5 bar à 3 bar, l'algorithme de la MPPT assure la poursuite du nouveau point de puissance maximale.

Simulation du système sous conditions variables de la pression d'oxygène :

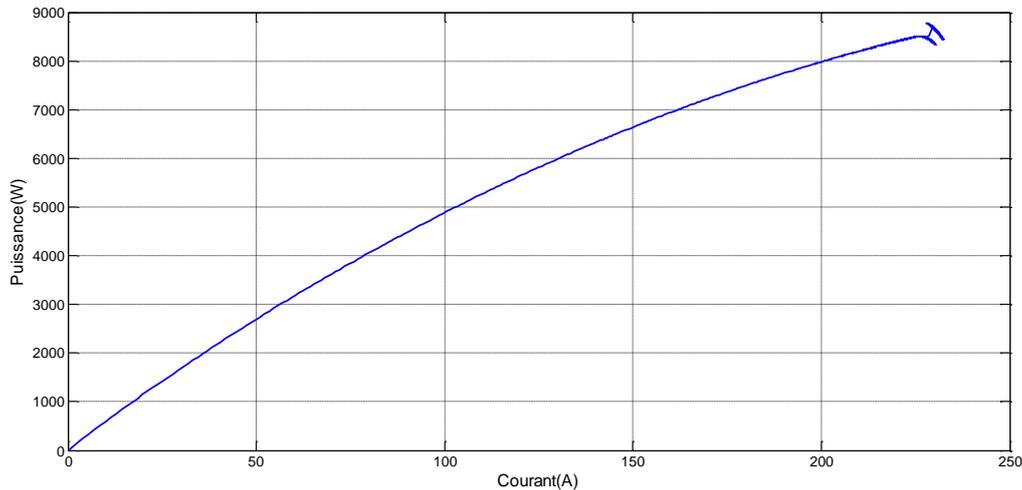


Figure (III .18) : Caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d'oxygène

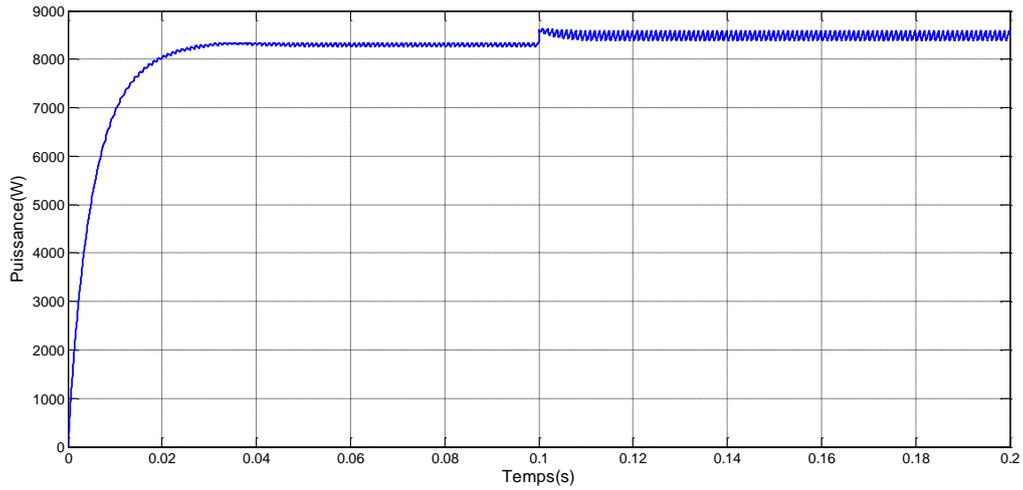


Figure (III .19) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène

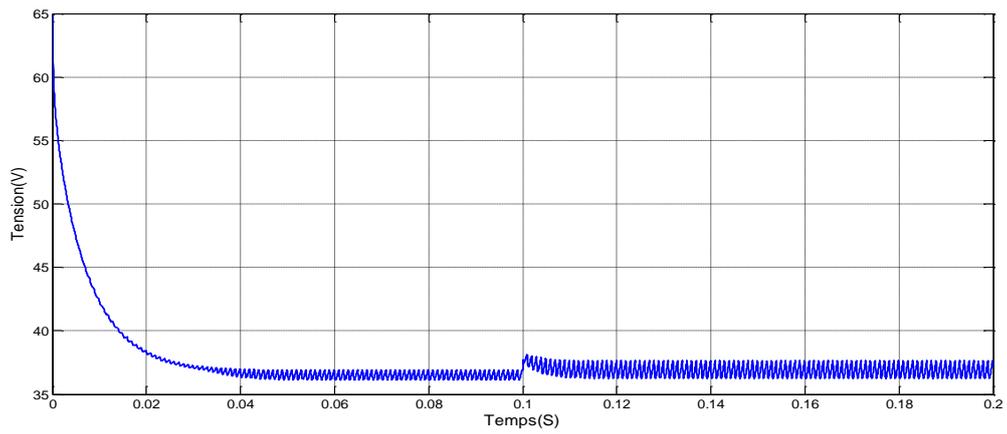


Figure (III .20) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène

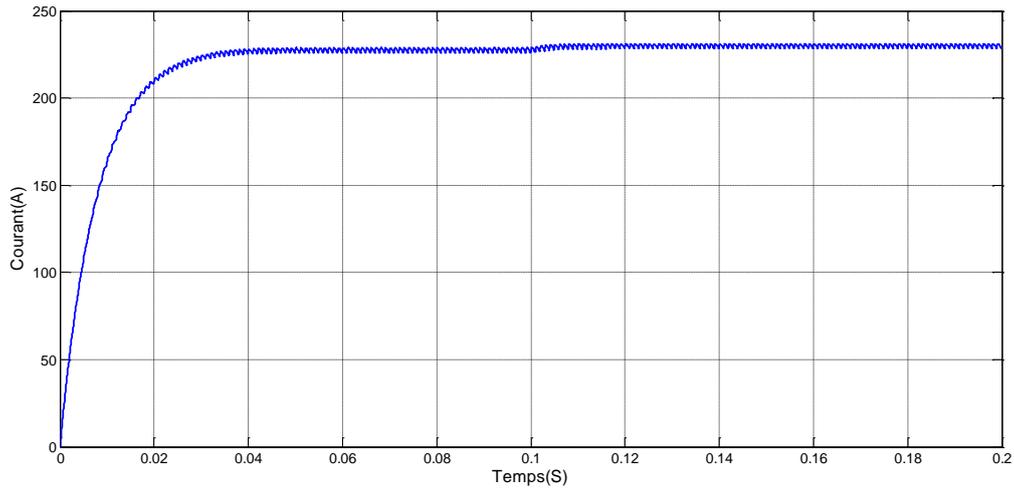


Figure (III .21) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène

Comme indiqué dans le chapitre 2, le changement de la pression d'oxygène provoque un changement du point de puissance maximale. D'après le résultat des figures (III .18), (III .19), (III .20),et(III.21) l'algorithme de la MPPT assure la poursuite de ce nouveau point de puissance maximale.

4.2 Commande en MPPT par la méthode de la conductance incrémental

4.2.1 Définition :

Dans la méthode de la conductance incrémentale, la tension aux bornes du réseau est toujours ajustée en fonction de la tension MPP. Elle est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée du pile. Nous allons chercher le point de puissance maximale à travers le point d'annulation de la dérivée de puissance de la figure (III .16), en comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG . Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire:

$$P = V.I \quad (\text{III.36})$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial (IV)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III.37})$$

Donc :

$$\frac{dp}{dv} = 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{-I}{V} \quad (a) \text{ Au point du MPP} \quad (III.39)$$

$$\frac{dp}{dv} > 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > \frac{-I}{V} \quad (b) \text{ Au gauche du MPP} \quad (III.40)$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < \frac{-I}{V} \quad (c) \text{ Au droite du MPP} \quad \text{Équation(III.41)}$$

Les deux équations (b) et (c) sont employées pour déterminer la direction du déplacement de points de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.

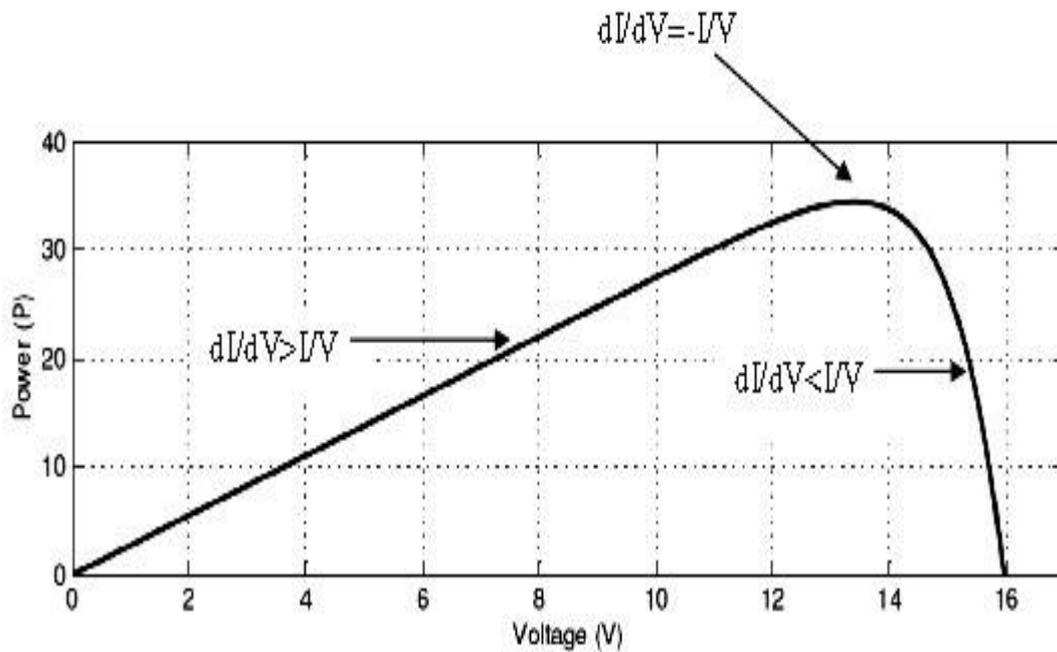


Figure (III .22) : Illustration de la MPPT par conductance incrémentale

4.2.2 Organigramme de l'algorithme incrémental conductance :

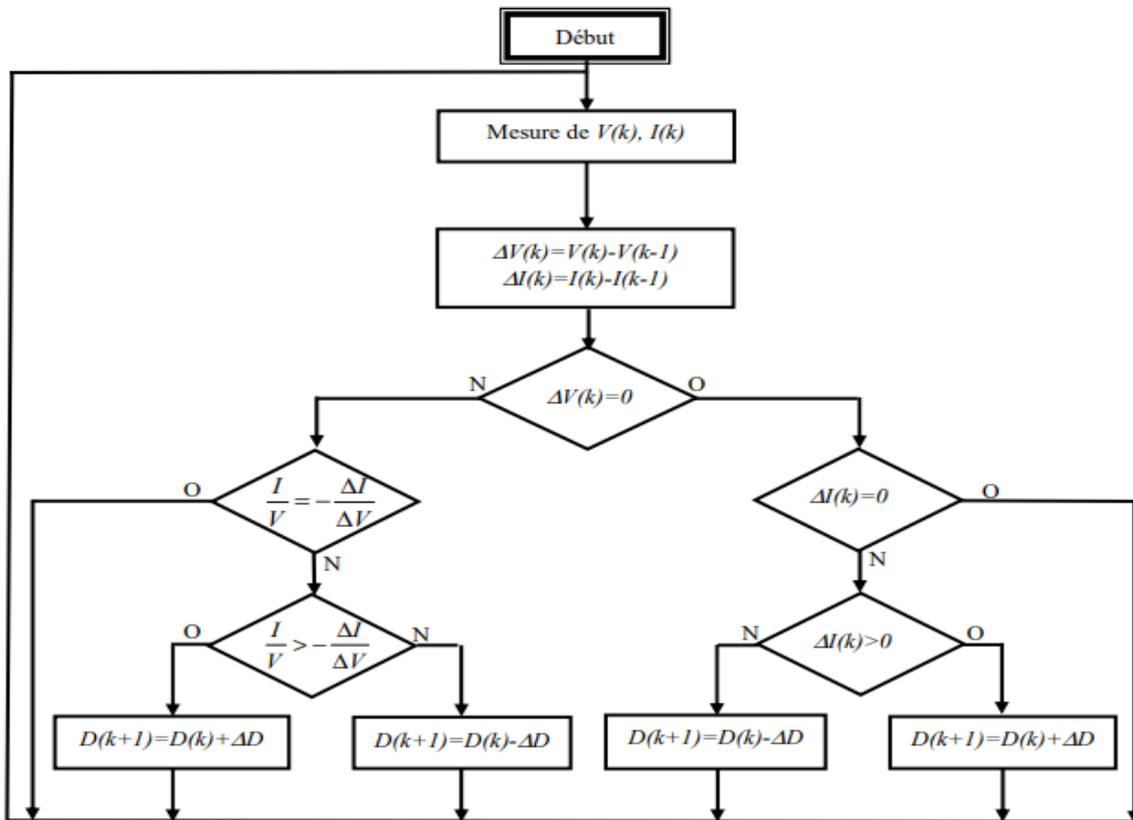


Figure (III .23) : Organigramme de l'algorithme incrémental conductance

4.2.3 Schéma de simulation de la MPPT par conductance incrémental :

La figure(III.24) représente la commande en MPPT sous MATLAB/SIMULINK

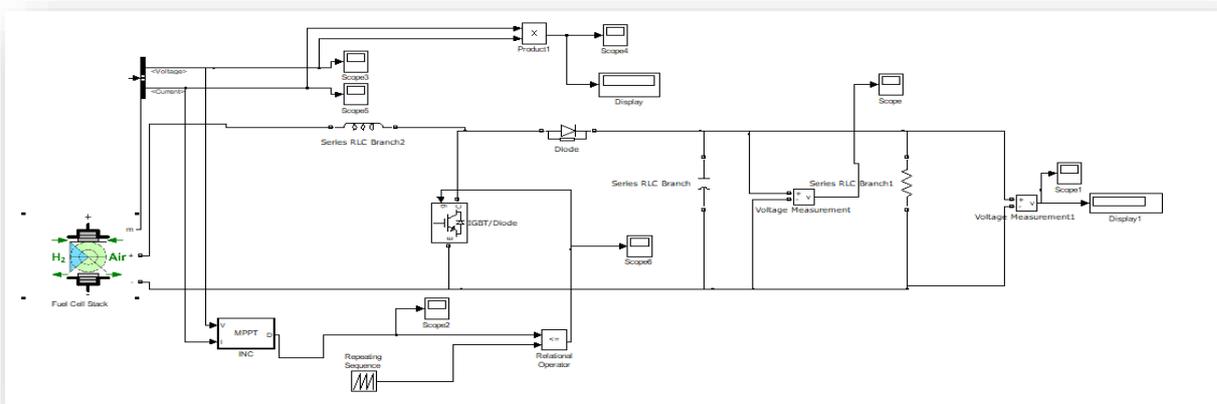


Figure (III.24) : Schéma de Simulation de la command INC

Simulation de l'algorithme dans les conditions standards :

Nous avons simulé le fonctionnement de l'algorithme de la MPPT par conductance incrémental sous des conditions normales fixes (une température de 65°C, la pression d'hydrogène 1.5bar, d'oxygène 1bar)

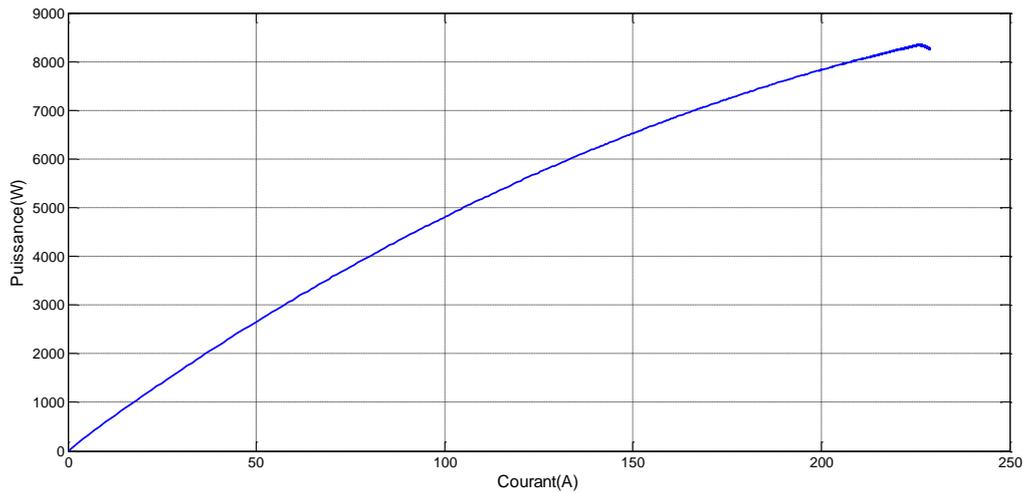


Figure (III .25) : Caractéristique puissance-courant en appliquant la MPPT INC COND

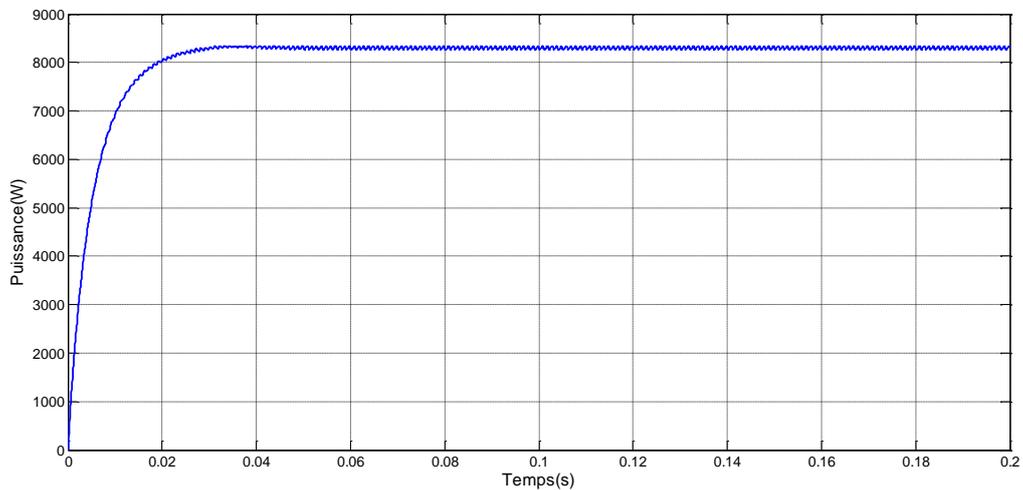


Figure (III .26) : puissance de la pile à combustible PEMFC

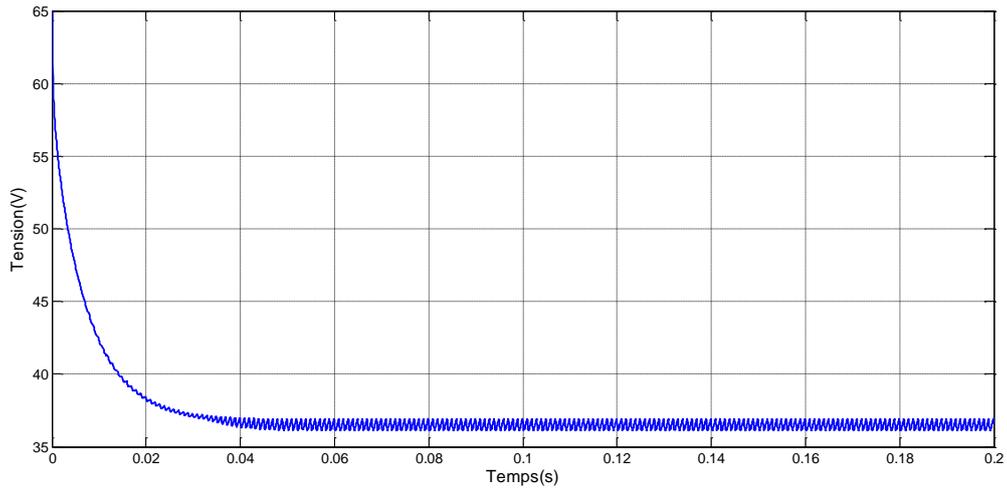


Figure (III .27) : Tension de la pile à combustible PEMFC

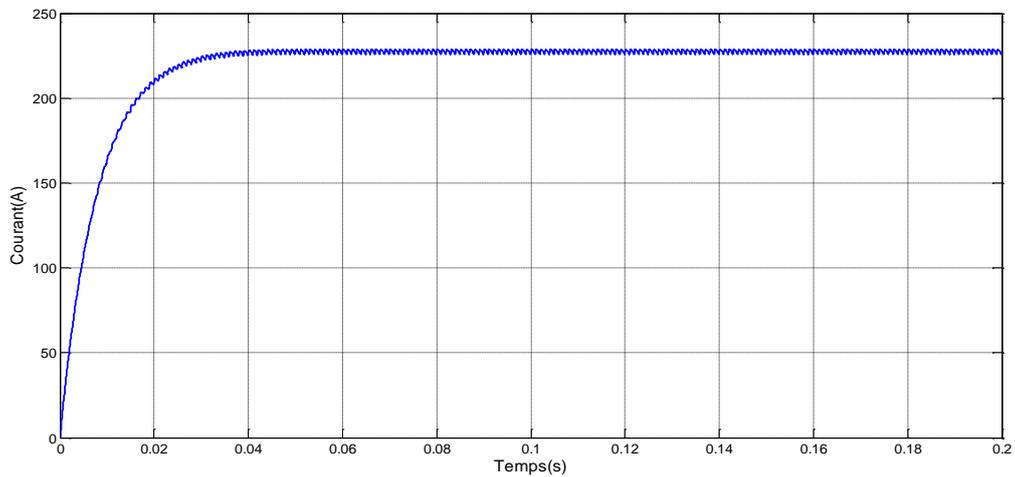


Figure (III .28) : Courant de la pile à combustible PEMFC

Les résultats de simulation présentés dans les Figures (III.25), (III.26), (III.27) et (III.28) montrent que la puissance, le courant et la tension correspondants au point de puissance maximale sont atteints après un temps de 0.04 s

 **Simulation de l'algorithme sous variation de température :**

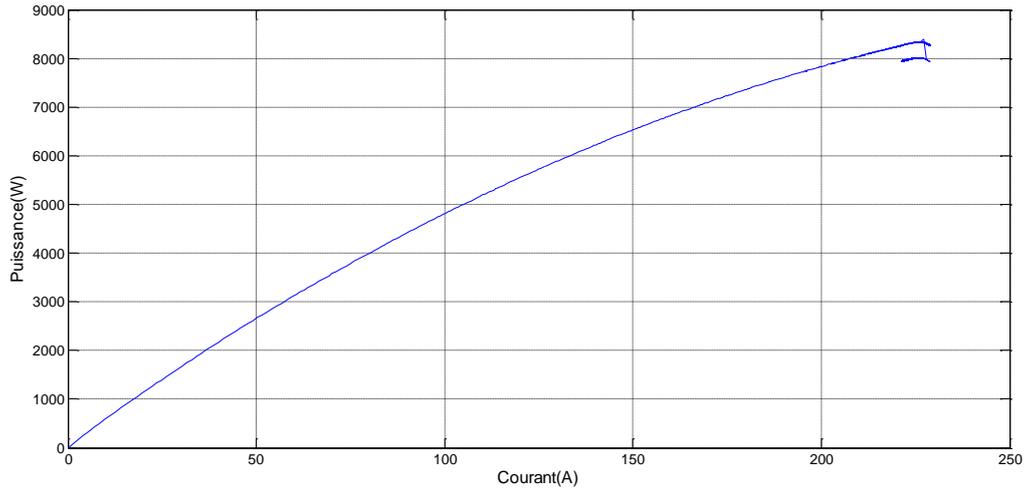


Figure (III .29) : Courbe caractéristique Puissance-courant sous variation de température

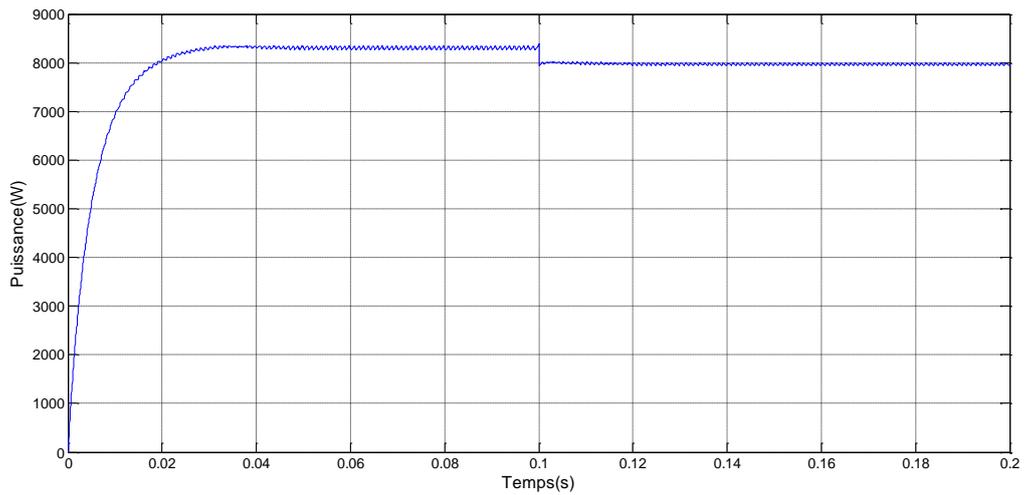


Figure (III .30) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

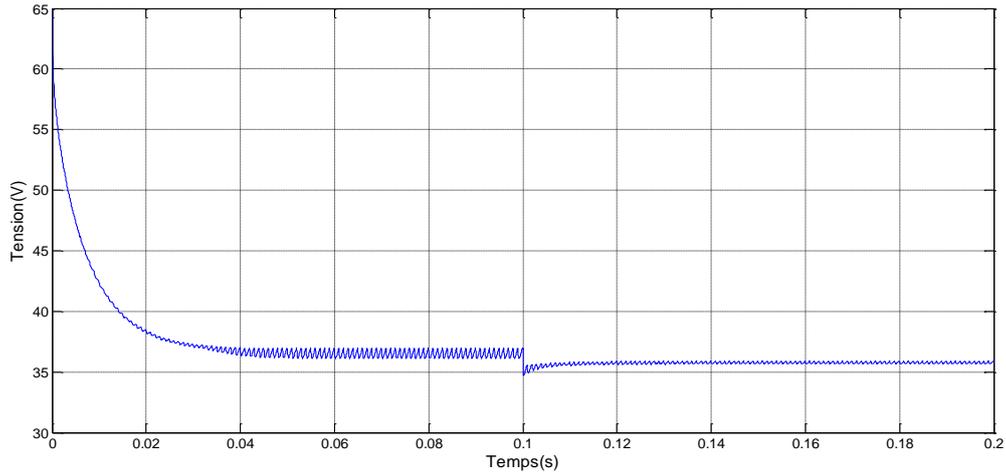


Figure (III .31) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

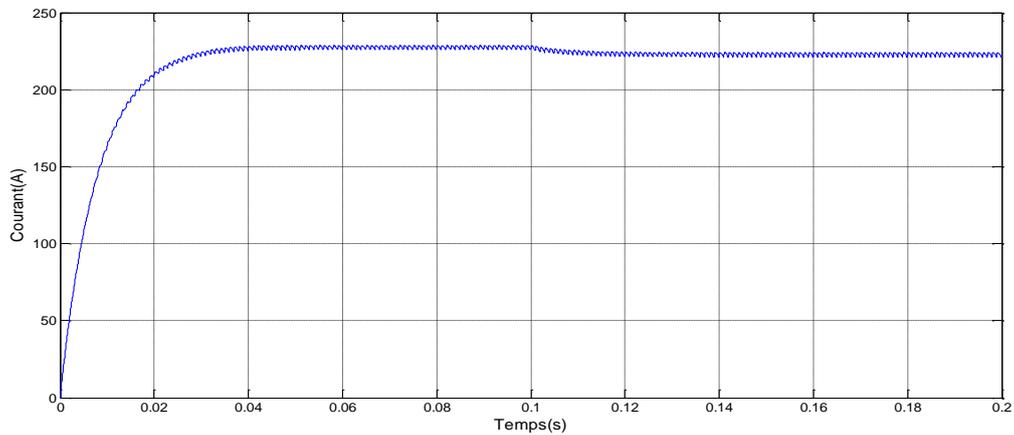


Figure (III .32) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

On sait qu'un changement de la température entraîne un changement du point de puissance maximale, D'après les résultats des simulations présentés dans les Figures (III.29), (III.30) et (III.31) et (III.32) on constate la capacité de l'algorithme à poursuivre ce nouveau PPM.

Simulation du système sous variation de la pression d'hydrogène :

Nous allons varier la pression d'hydrogène à l'instant 0.1s de 1.5bar à 3bar.

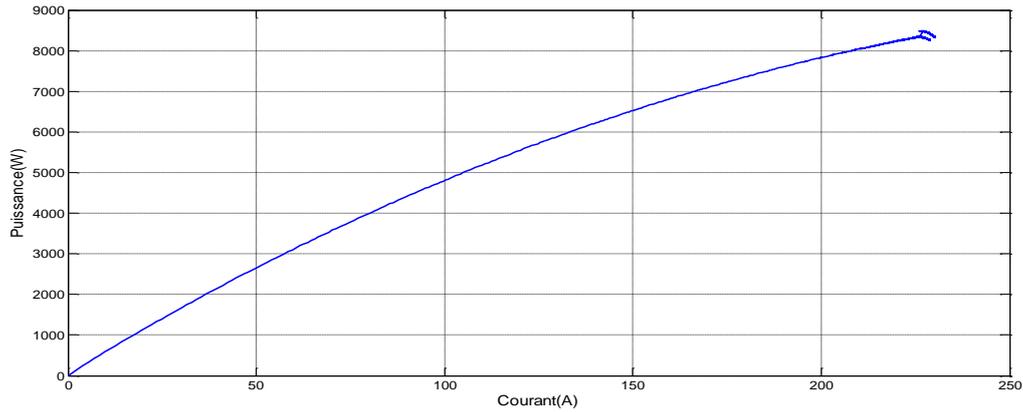


Figure (III .33) : Courbe caractéristique puissance-courant de la pile à combustible PEMFC sous variation d'hydrogène

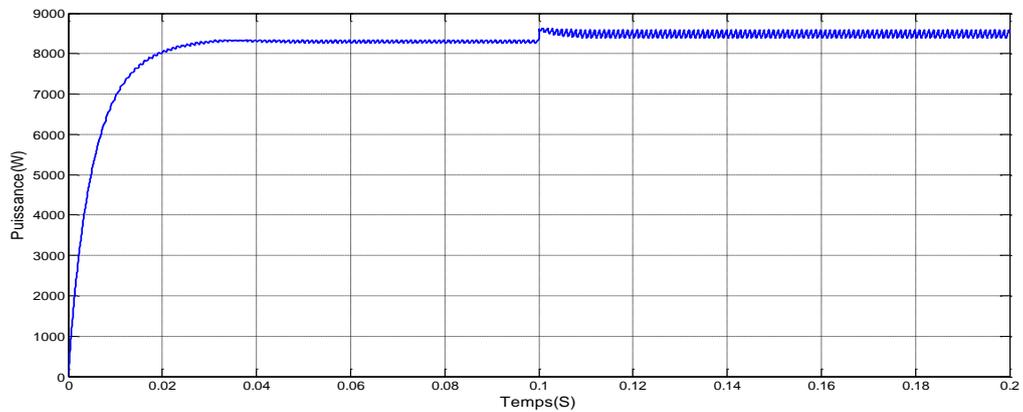


Figure (III .34) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

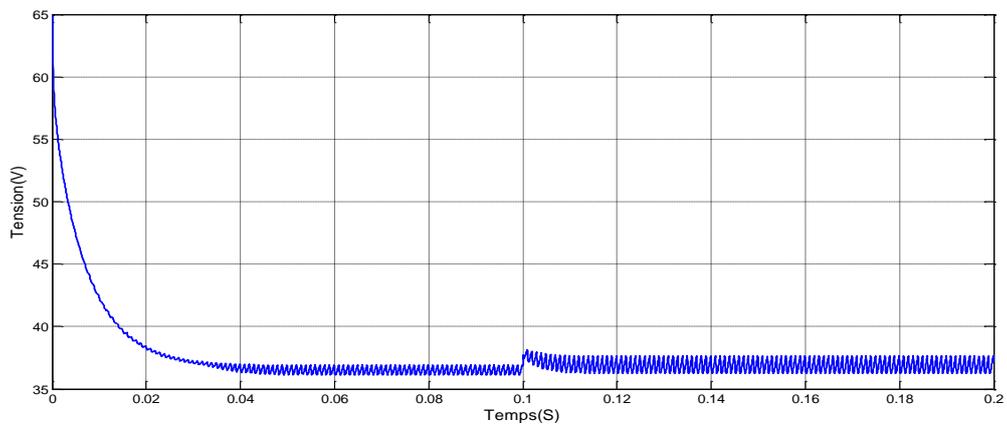


Figure (III .35) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

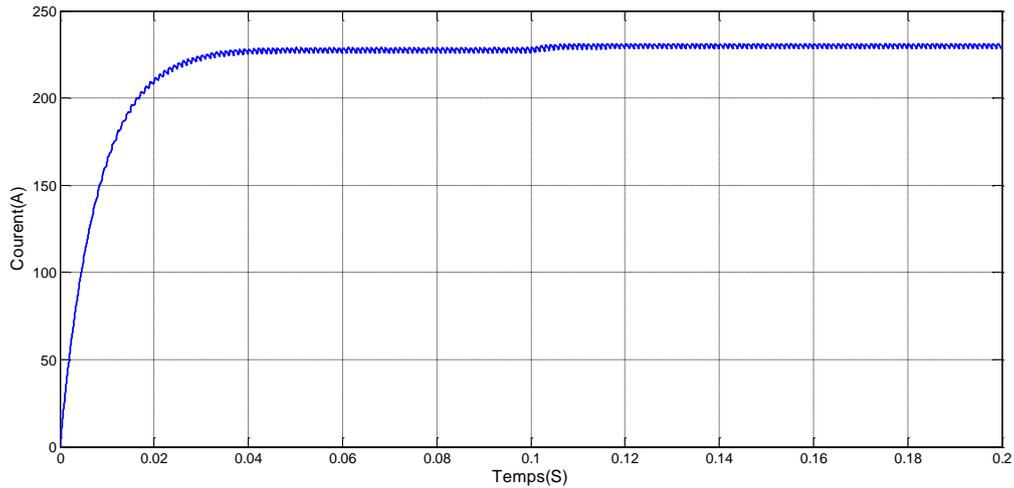


Figure (III .36) : courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

On a vu dans le chapitre 2 que la variation de la pression d'hydrogène influence la caractéristique courant-tension ainsi que le point de puissance maximale. D'après les résultats des figures (III.34), (III.35) et (III.36), en augmentant la puissance de 1.5 bar à 3 bar, on constate que les conditions du nouveau point de puissance maximale sont rapidement atteintes.

Simulation du système sous variation de la pression d'oxygène :

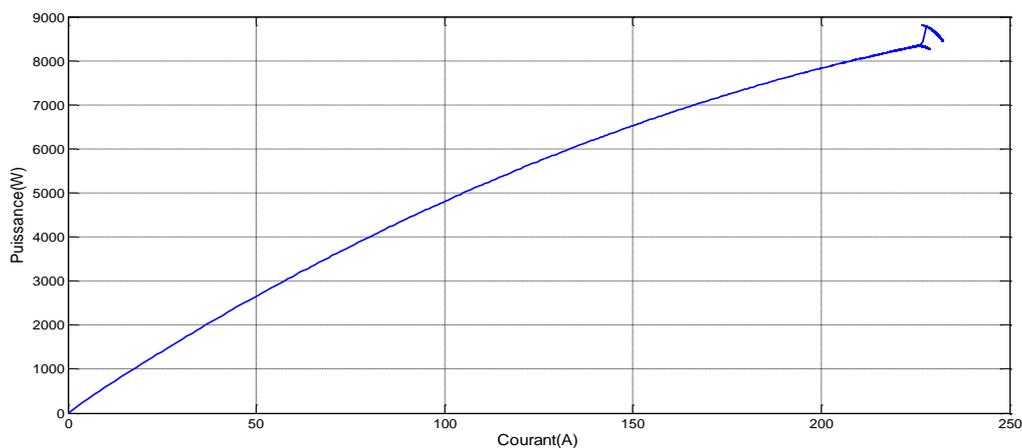


Figure (III .37) : courbe caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d'oxygène

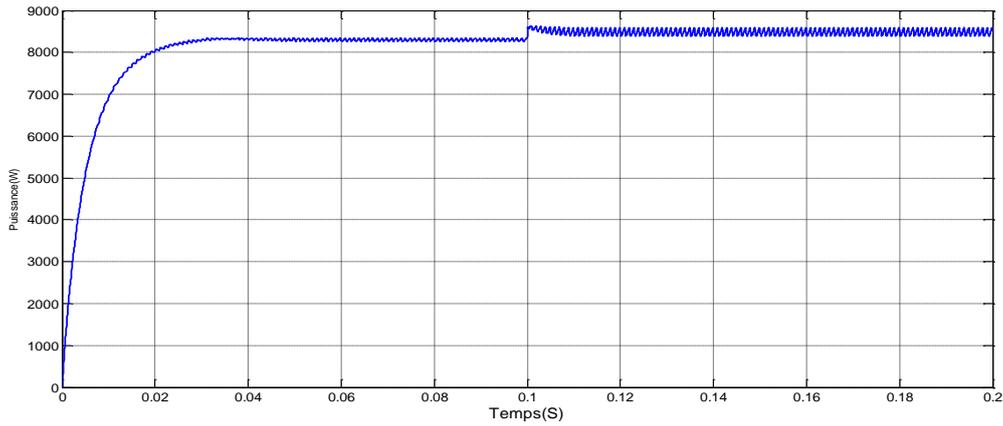


Figure (III .38) : puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène

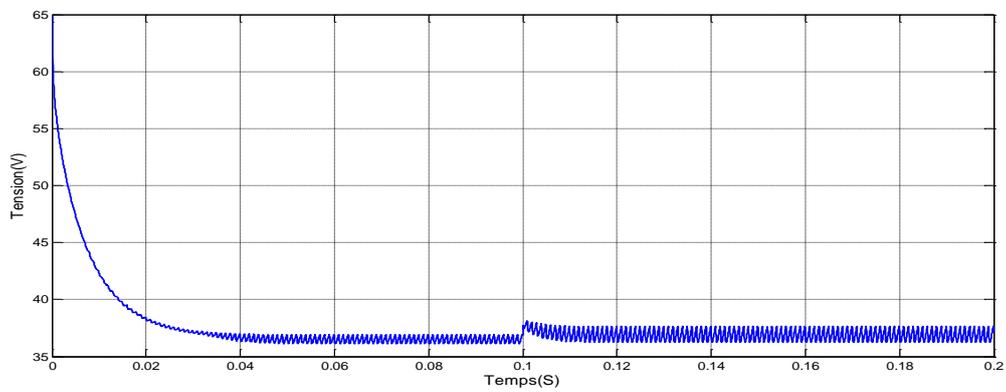


Figure (III.39) : Tension e de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène

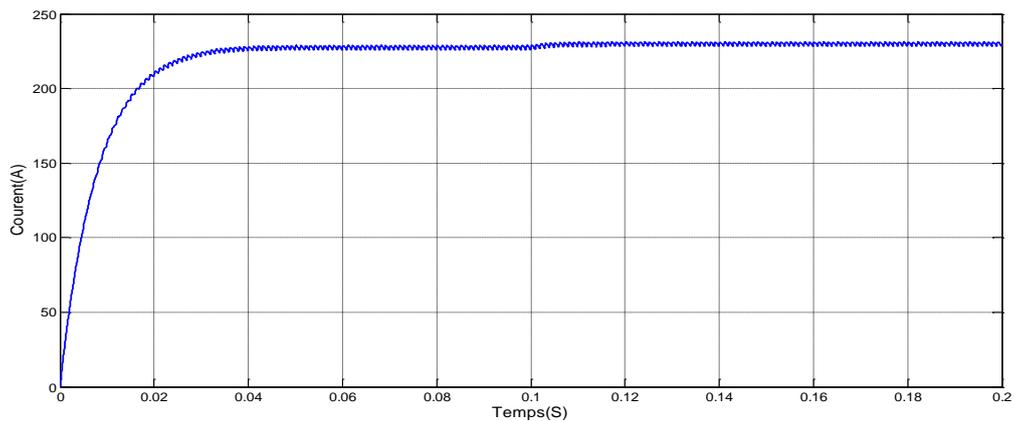


Figure (III.40) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène

D'après l'étude effectuée dans le chapitre 2, on a constaté que la variation de la pression d'oxygène influence la caractéristique courant-tension et le point de puissance maximale. D'après les résultats des figures (III.37), (III.38) et (III.39), et (III.40) lorsque le débit passe de 1 bar à 3 bar, l'algorithme impose la poursuite du nouveau point de puissance maximale.

D'après les tests de simulation des deux méthodes d'MPPT, Perturb and Observ et la conductance incrémentale, On remarque pratiquement les mêmes résultats, que ce soit en termes de temps de réponse ou en terme d'efficacité de suivre le MPP. Si la technique de la conductance incrémentale requiert plus de matériel par rapport à P&O, elle est plus efficace et stable quand elle atteint le MPP.

4.3 Commande en MPPT par logique floue :

4.3.1 Définition :

La logique floue est une forme de logique qui traite un raisonnement approximatif plutôt que fixe et exact. Contrairement à la logique traditionnelle qui définit généralement la logique à deux valeurs comme vraie ou fausse, la logique floue peut avoir des valeurs variables. Les variables de la logique floue peuvent avoir une valeur vraie ou fausse qui varie à différents degrés et être exprimées par des variables linguistiques. Dans ces cas, le contrôle à logique floue pourrait fournir à la fois une vitesse rapide du processus et la précision nécessaire [38].

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point à maximum de puissance. L'objectif de cette commande est de suivre et d'extraire la puissance maximale des systèmes à énergie renouvelable, en particulier de la pile à combustible. Cette commande ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système, tandis que sa simplicité lui donne un avantage dans le suivi de son MPP dans des conditions atmosphériques à variation rapide [38].

4.3.2 Principe de poursuite du point de puissance maximale par un contrôleur flou

Le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants : le bloc de fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite le bloc d'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin le bloc de la défuzzification pour convertir les sous-

ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification. La structure de base de contrôleur flou est donnée par la Figure (III .41).

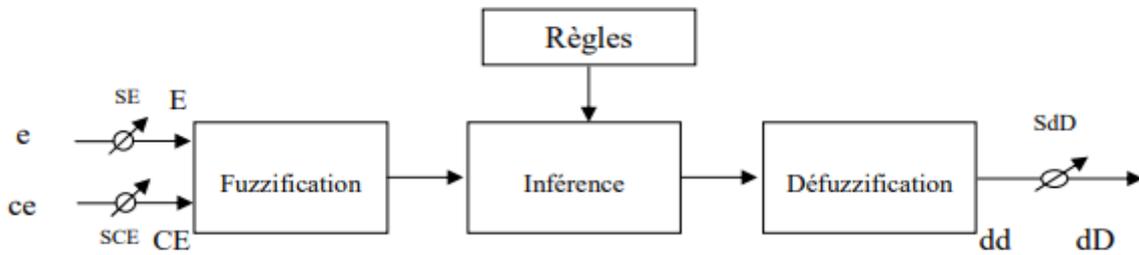


Figure (III .41) : Organigramme du MPPT basé sur la logique floue

a) **Fuzzification** : La tension et le courant de la pile sont mesurés, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(K) = V(k).I(k) \quad \text{Équation(III.42)}$$

Généralement, le contrôle flou se fait par la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont : l'erreur (E) et le changement de l'erreur (CE) à des instants échantillonnés (k).

Dans le cas de la commande floue du point de puissance maximale, les variables E et la pente de variation de la puissance par rapport à la tension, et la variable CE et la vitesse de variation de cette pente. Ces variables sont ainsi exprimées comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \quad \text{(III.43)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad \text{(III.44)}$$

Ou $P(k)$ et $V(k)$ sont respectivement : la puissance et la tension la pile à l'instant K .

$P_{(k+1)}$ et $V_{(k+1)}$ sont respectivement : la puissance et la tension la pile à l'instant $K + 1$.

D'après l'entrée $E(k)$ on peut savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe puissance-tension

Donc :

- Si $E(k)$ est positif, le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale
- Si $E(k)$ est négatif, le point de fonctionnement est a droite du point de puissance maximale
- $E(k)$ est Zéro au point de puissance maximale.

- D'après l'entrée $CE(k)$ on peut déterminer la valeur de la variation de l'erreur de l'entrée du contrôleur flou qui représente la direction du point de fonctionnement. Dans ce cas, pour atteindre le point de puissance maximale on doit :
- Pousser vers la droite le point de fonctionnement qui se situe à gauche du point de puissance maximale, ce qui veut dire qu'on doit augmenter la tension
 - Pousser vers la gauche le point de fonctionnement qui se situe à droite du point de puissance maximale ce qui veut dire qu'on doit diminuer la tension.

En utilisant les bases des sous-ensembles flou on peut exprimer les variables d'entrées et de sortie en terme de variable linguistiques, ces dernières sont écrites en étiquettes comme suit :

PG: (positif grand)

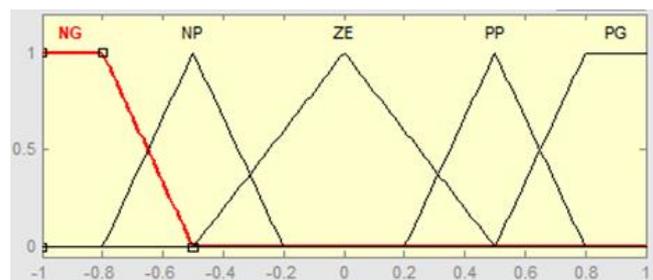
PP: (positif petit)

ZE: (Zéro)

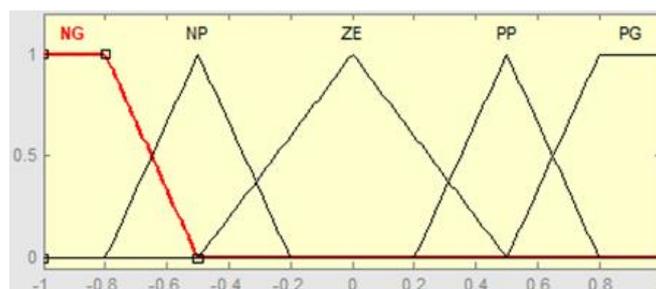
NP: (négatif petit)

NG: (négatif grand).

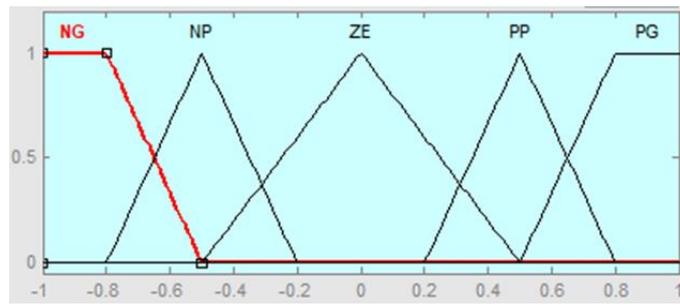
La figure (III .42) montre les fonctions d'appartenances des 5 sous-ensembles flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie.



(a) L'entrée E



(b) L'entrée CE



La sortie dD .

Figure (III .42) : Fonctions d'appartenances des variables d'entrée et de sortie

b) Méthode et règles d'inférence :

La table (III.1) montre la table de règles du contrôleur flou, à la base de la méthode de Mamdani. Les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (E) et le changement de l'erreur (CE) et la sortie de la matrice de règles est le changement du rapport cyclique (dD).

Dans le cas de notre contrôleur flou, les règles de contrôle doivent être désignées de sorte à amener la variable d'entrée (E) à Zéro.

CE	PG	PP	ZE	NP	NG
E	PG	PP	ZE	NP	NG
PG	PG	PG	PG	PG	ZE
PP	PG	PG	PP	ZE	PP
ZE	PG	PP	ZE	NP	NG
NP	NP	ZE	NG	NG	NG
NG	ZE	NG	NG	NG	NG

Tableau (III.1) : Règles floues pour la déduction de la variable de sortie

On prend comme exemple de règles de contrôle de la table (III.1) :

- Si E est PG et CE est ZE Alors dD est NG

Ce qui veut dire que :

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (PPM) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe $P = f(V)$ est environ Zéro ; Alors diminuer le rapport cyclique (dD) largement".

On a choisi la méthode *Mamdani* comme une méthode d'inférence floue avec (opération MAX-MIN). Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OÙ de plus l'opérateur ALORS est également pour le Minimum.

c) **Défuzzification :**

L'entrée pour le processus de défuzzification est un ensemble flou et la sortie est un nombre unique qui doit être appliqué au système, pour la sortie finale souhaitée selon le système, une valeur non floue de sortie de contrôle est requise, donc une étape de défuzzification est obligatoire. Il existe différentes méthodes de défuzzification qui sont utilisées de nos jours, mais la méthode la plus courante est le centroïde de l'aire et la bissectrice de l'aire [39].

4.3.3 Simulation du command en MPPT par logique floue appliquée sur la pile à combustible :

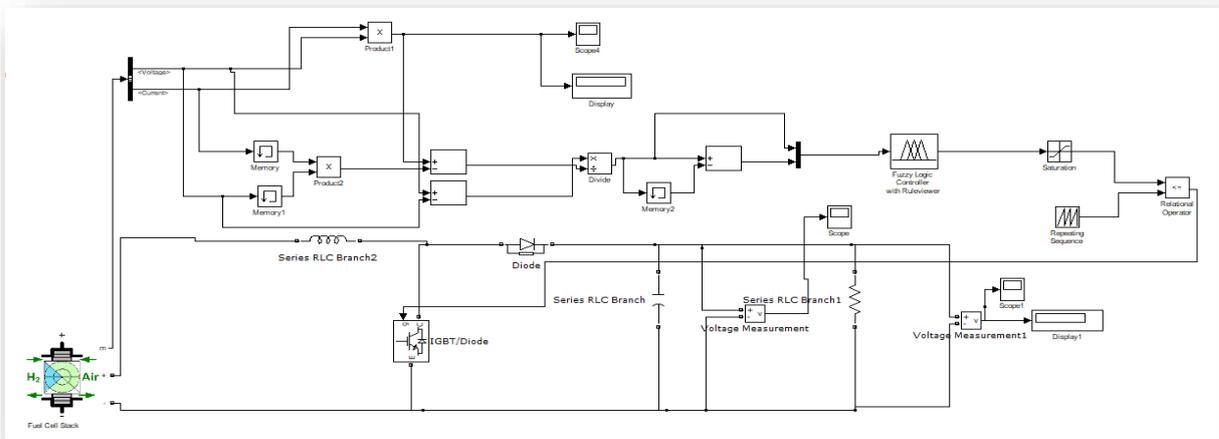


Figure (III.43) : Schéma de simulation du command par logique floue

Simulation du système sous les conditions standards :

Pour une évaluation des performances de la commande en MPPT floue appliquée sur le système de pile à combustible , nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (PILE-hacheur élévateur- charge résistive), sous des conditions fixes (une température de 65°C, la Pression d'hydrogène 1.5bar, pression d'oxygène 1bar)

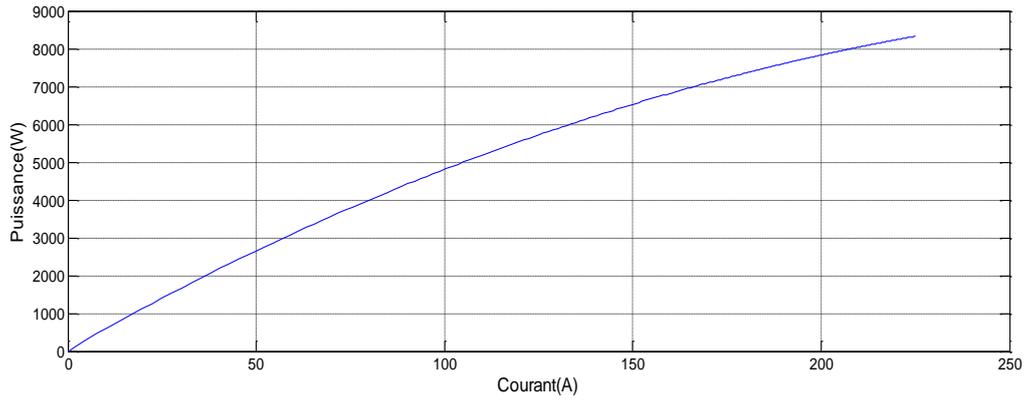


Figure (III.44) : Caractéristique puissance-courant en appliquant la MPPT par logique floue

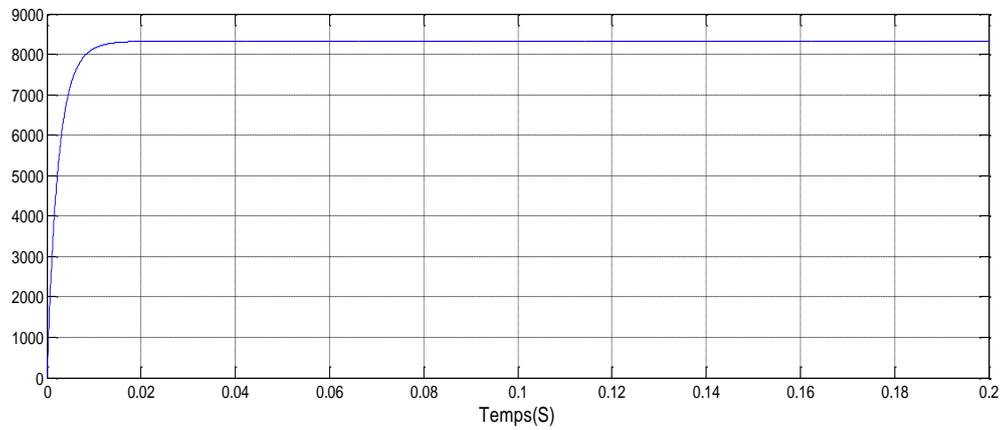


Figure (III.45) : Puissance de la pile à combustible PEMFC

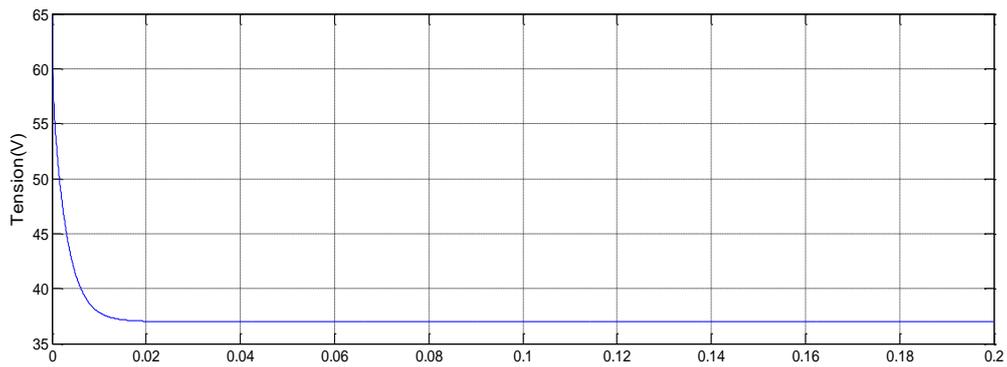


Figure (III.46) : Tension de la pile à combustible PEMFC

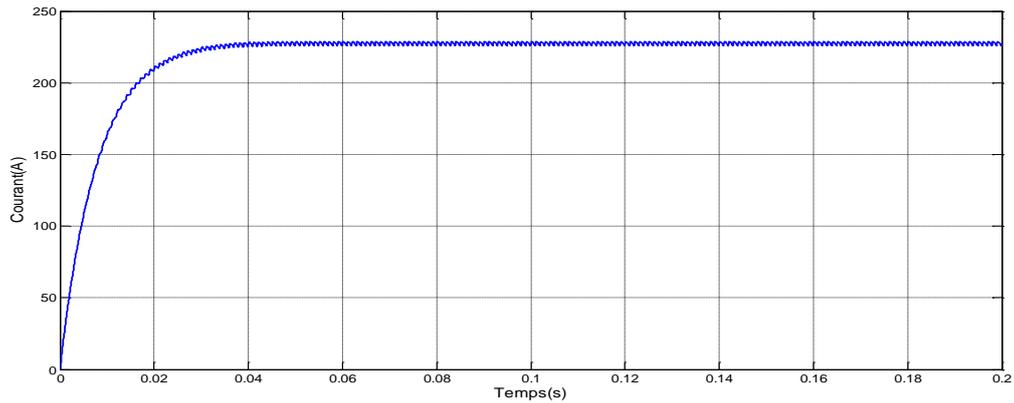


Figure (III.47) : Courant de la pile à combustible PEMFC

A partir des résultats obtenus on remarque que la puissance de la pile atteint sa valeur maximale de 8300 Watts après un temps 0.025se. La tension et le courant convergent vers les valeurs correspondantes.

Simulation de la MPPT avec variation de la température :

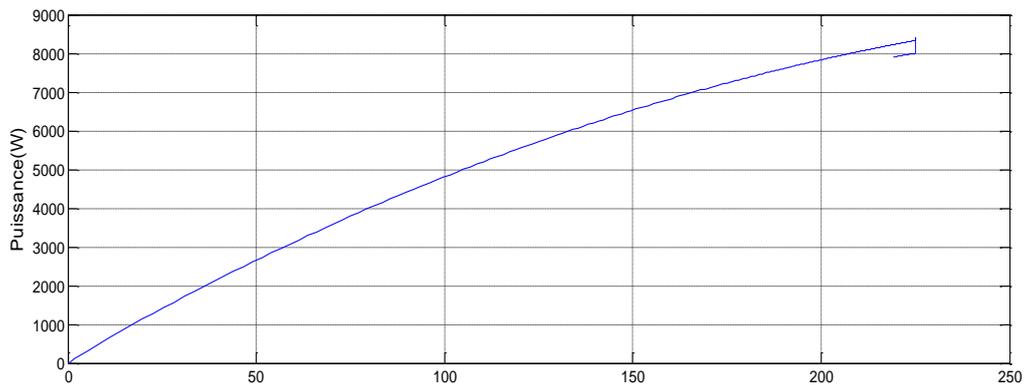


Figure (III .48) : courbe caractéristique puissance-courant sous variation de température

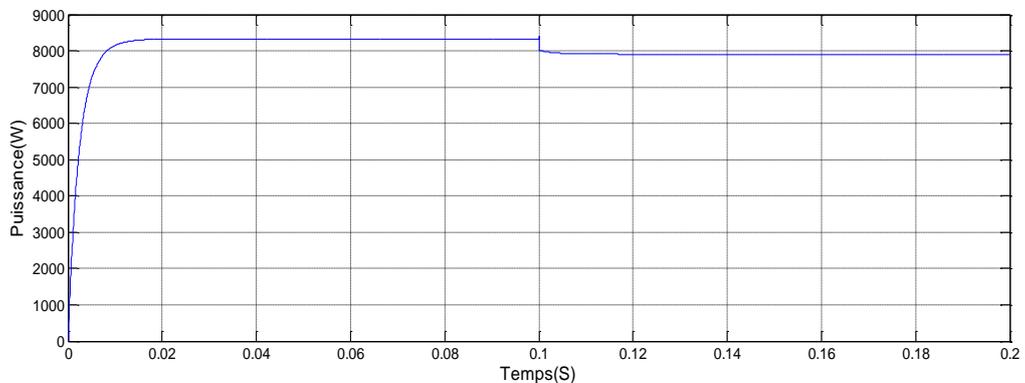


Figure (III.49) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

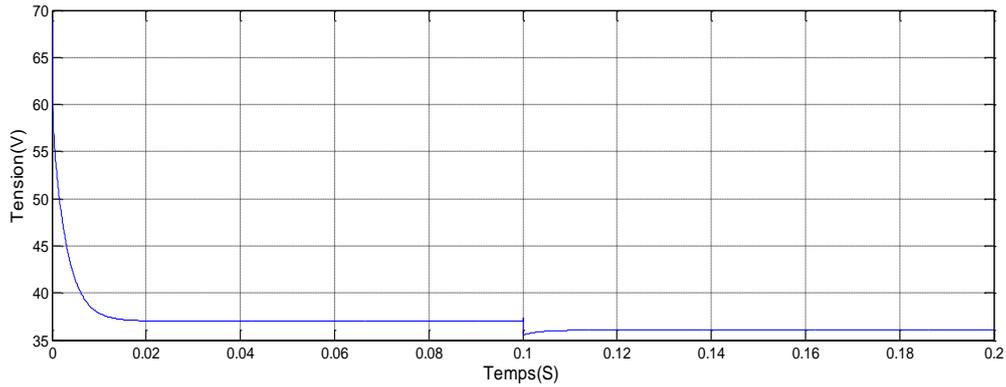


Figure (III.50) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

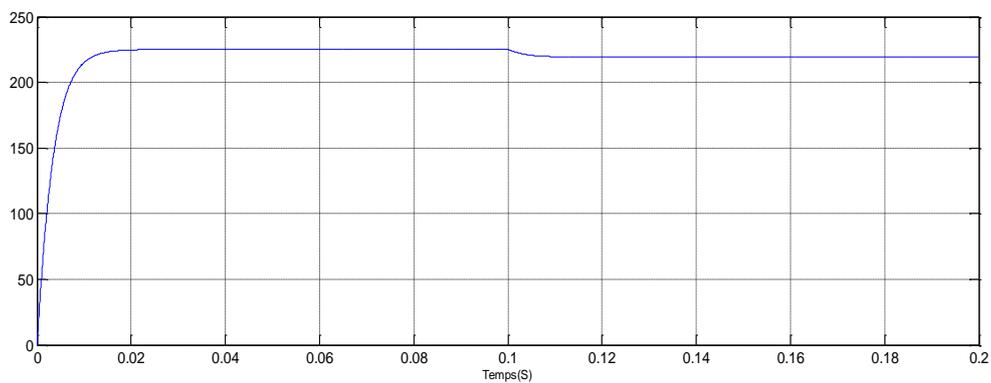


Figure (III.51) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de température

En remarque que suite au changement de la température, l'algorithme impose rapidement la poursuite du nouveau point de puissance maximale.

Simulation de la variation de la pression d'hydrogène

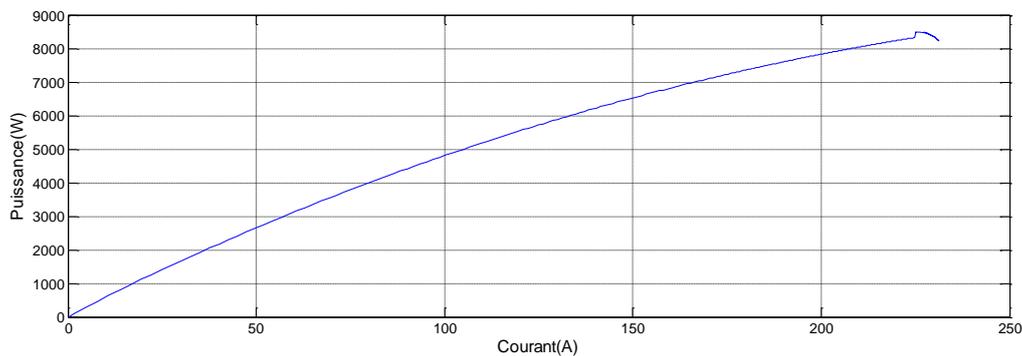


Figure (III.52) : courbe caractéristique puissance-courant sous variation de la pression d'hydrogène

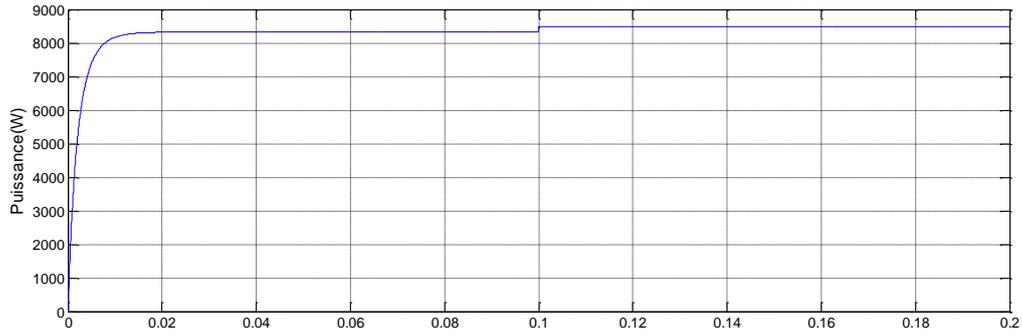


Figure (III.53) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

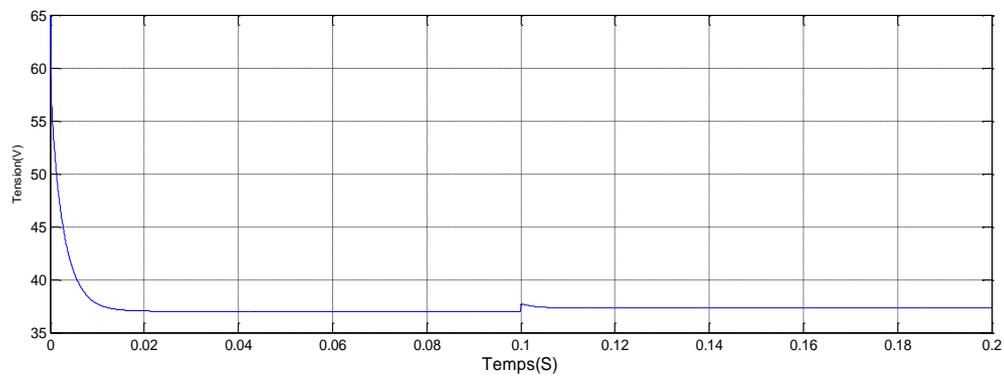


Figure (III.54) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

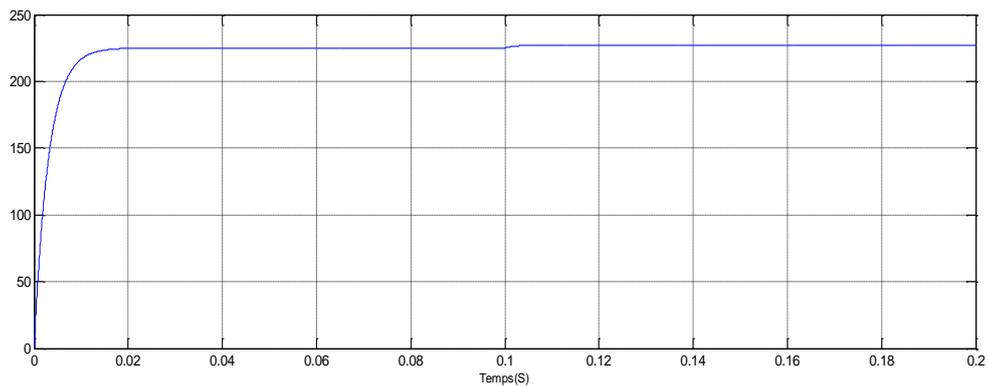


Figure (III.55) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'hydrogène

En remarque que suite au changement de la pression, la commande en MPPT par logique floue provoque rapidement la poursuite du nouveau point de puissance maximale, dans un temps très court.

Simulation du système sous conditions variables de la pression d'oxygène :

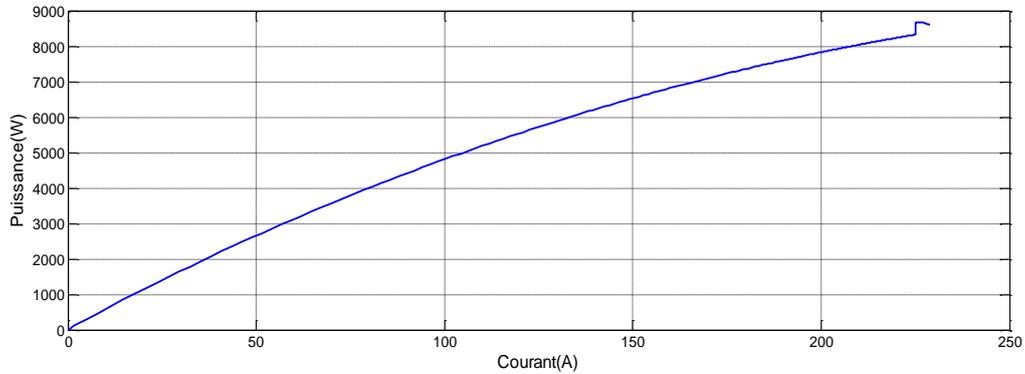


Figure (III.56) : courbe caractéristique puissance-courant.

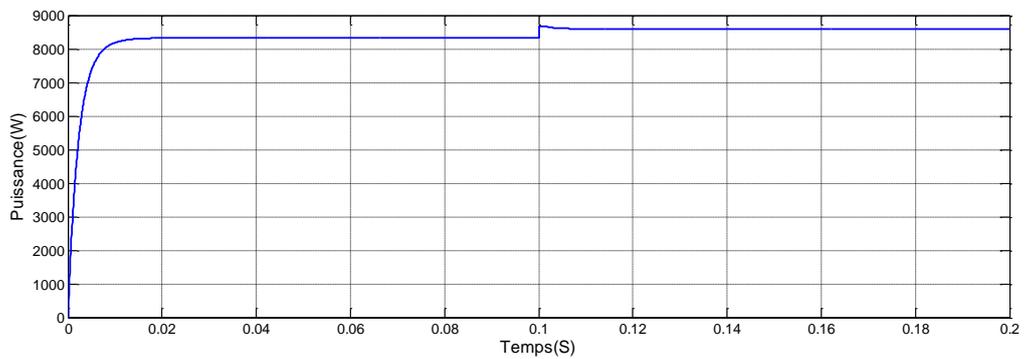


Figure (III.57) : Puissance de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène.

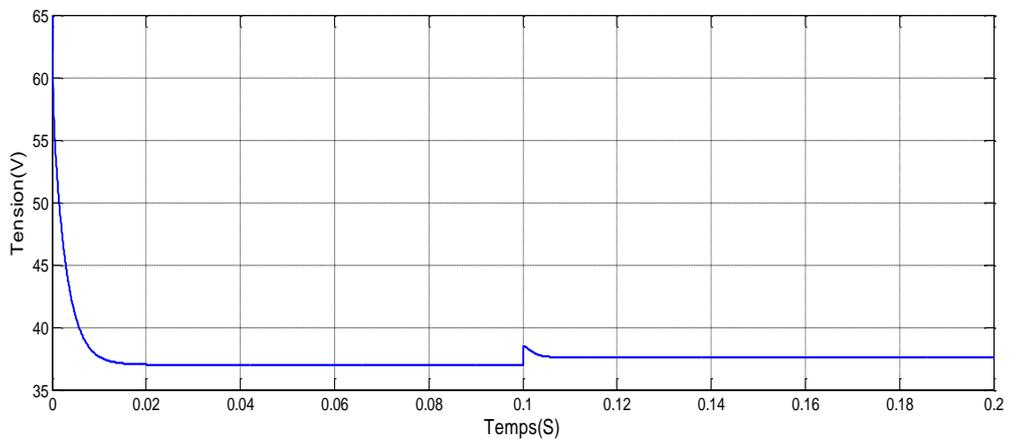


Figure (III.58) : Tension de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène.

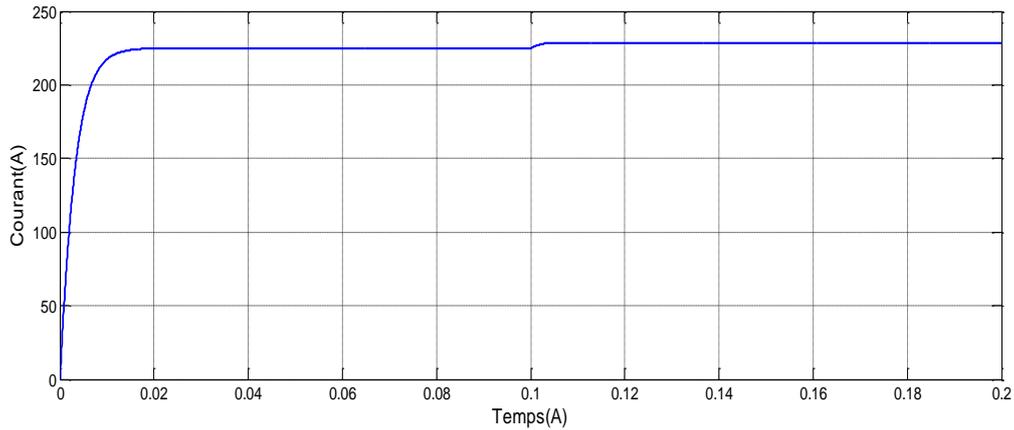


Figure (III.59) : Courant de la pile à combustible PEMFC sous variation de la pression d'oxygène.

En remarque que suite au changement de la pression, la commande par logique floue provoque la poursuite du nouveau point de puissance maximale, dans un temps très court. La tension, le courant et la puissance convergent vers es valeurs correspondantes au nouveau PPM.

Etude comparative :

Une comparaison entre les résultats des trois méthodes MPPT traitées dans ce chapitre permet de conclure que la MPPT par logique floue a l'avantage d'une convergent plus rapide vers le point de puissance maximale, par rapport à la méthode Perturb and Observ, et à la méthode de la conductance incrémentale. Comme indiqué à la figure (III.45).

Un autre avantage est la réduction remarquée des amplitudes des oscillations autour du point maximale, une fois le point de fonctionnement converge vers ce PPM.

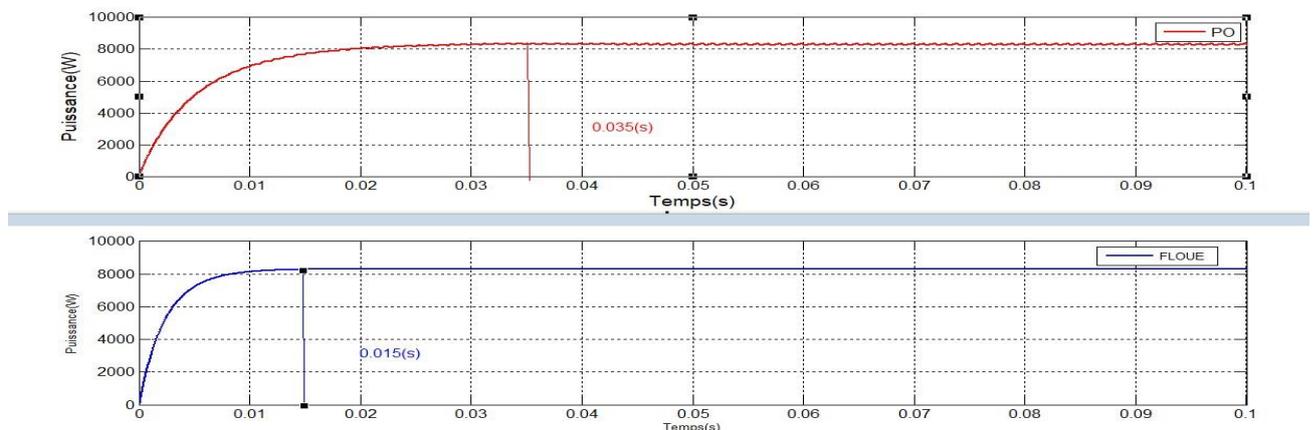


Figure (III .60) : Comparaison entre le temps de réponse de la MPPT par logique floue et la MPPT Perturb and Observ

Conclusion :

Ce chapitre présente la simulation de trois méthodes de commande de MPPT appliqué à une pile à combustible. Le travail a été réalisé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Nous avons utilisé une série de tests pour mettre les en épreuve dans les cas de conditions climatiques constantes et variables. Nous avons pu constater, à travers les résultats obtenus, que les trois méthodes donnent d'assez bons résultats. Cependant, la commande par logique floue présente des résultats très compétitifs par rapport aux deux autres méthodes.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré le domaine des piles à combustible, en mettant particulièrement l'accent sur la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et ses applications dans la production d'énergie propre et durable. Dans le premier chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble des piles à combustible, en définissant leurs principes de fonctionnement et en discutant des différents types et composants qui les constituent. Nous avons également examiné leurs avantages potentiels ainsi que les défis associés à leur utilisation dans divers secteurs.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur la pile à combustible à hydrogène de type PEMFC. Nous avons développé un modèle mathématique détaillé pour décrire le comportement de la PEMFC, en détaillant les expressions des termes de tension et en illustrant leur impact sur la performance globale de la pile à combustible. Cette modélisation a permis de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et de préparer le terrain pour les simulations ultérieures.

Le troisième chapitre a été consacré à la simulation de trois techniques populaires de suivi du point de puissance maximale (MPP) : la méthode Perturb and Observe (P&O), l'Incrémentale Conductance (INC) et la logique floue. À l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK, nous avons étudié comment ces techniques peuvent optimiser l'efficacité énergétique de la PEMFC sous différentes conditions de fonctionnement.

En intégrant ces aspects théoriques et de simulation, ce travail a contribué à approfondir la compréhension des piles à combustible PEMFC et de leurs applications potentielles dans le contexte de la transition énergétique mondiale. Les résultats de simulation ont démontré que la logique floue présente des avantages significatifs en termes de flexibilité et de capacité d'adaptation aux fluctuations environnementales, offrant ainsi une méthode prometteuse pour améliorer la performance des systèmes PEMFC.

En conclusion, ce mémoire a souligné l'importance croissante des piles à combustible PEMFC dans le paysage énergétique moderne, en mettant en évidence leur potentiel pour fournir une énergie propre et durable tout en réduisant l'impact environnemental. Les avancées continues dans la modélisation, la simulation et le contrôle des PEMFC ouvriront la

voie à une utilisation plus étendue de cette technologie innovante dans les secteurs industriels, commerciaux et résidentiels à l'avenir.

Bibliographies

- [1]: **Chen Junhui, Yan Yajie** «Output characteristics simulation analysis of PEMFC»
Department of Electrical Engineering Xi'an University of Technology Xi'an, China, May 2021.
- [2]: **Zhiming ZHANG** « Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible », UNIVERSITÉ D'ÉVRY-VAL D'ESSONNE, novembre 2010
- [03]: **K. Kordesch et G. Simader**, « Fuels Cells and Their Applications », ed VCH (1996).
- [04]: **N. MEDDOUR** : *Simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide*. Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2010.
- [05]: **Fuel cell handbook, Technical report 7th ed**, U.S. Department of Energy - Office of Fossil Energy - National Energy Technology Laboratory, (Nov. 2004).
- [06]: **T. Alleau**, Mémento de l'hydrogène : La pile PEMFC AFH2 – FICHE 5.2.2, (2003).
- [07]: **Miraoui, F. G.** *Modélisation de piles à combustible à membrane échangeuse de protons*. Paris : Lavoisier, 2011.
- [08]: **Fuel Cell Handbook EG&G Technical Services, Inc.**, 6ème édition, novembre 2002.
- [09]: **AZZI Halim.** *Etude et modélisation d'une pile à combustible*, mémoire de magister, Université A. MIRA-BEJAIA, 2016.
- [10]: **A. Lachichi**, *Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible*, thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 24 novembre 2005.
- [11]: **G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjaer, F. Blaabjerg**, « A new green power inverter for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'02, 2002, vol. 2, pp. 727-733.
- [12]: **K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring**, « the power conditioning system for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, 2001, vol. 4, pp. 2197-2202.
- [13]: **Assil, C. M.**, *Modélisation floue de la pile à combustible de type SOFC*, mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique, 2019.
- [14]: **J. Larminie, A. Dicks** "Fuel Cell Systems Explained" 2nd ed. Wiley JohnWiley and Sons, England. 1-433p, (2003).
- [15]: **Méziane Boudellal.** La pile à combustible. Paris: Éditions Dunod, 2008.
- [16]: **Jérôme Bedet**, *Caractérisation du transport de l'eau dans les piles à combustibles par Imagerie et Spectroscopie de Résonance Magnétique Nucléaire*, thèse de doctorat, Université Henry Poincaré, Nancy 1, novembre 2007.
- [17]: **S. Ch. Kim, M. S. Kim, I. Ch. Hwang, and T. W. Lim**, International Journal of refrigeration, 30, 1215-1226, (2007).
- [18]: **S. Ch. Kim, J. Ph. Won, Y. S. Park, T. W. Lim, M. S. Kim**, International Journal of refrigeration, 32, 70-77, (2009).

- [19]: **Hafsa, B.** *Synthèse et caractérisation des membranes protoniques à base de polymère pour les piles à combustibles*, thèse de doctorat, 2022.
- [20]: **Xin Kong, Ashwin M. Khambadkone**, Modeling of a PEM Fuel-Cell Stack for Dynamic and Steady-State Operation Using ANN-Based Submodels[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009,56(12):4903-4914
- [21]: **B. Min, S. Cheng, B.E. Logan**, Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells, Water Research 39, 1675 -1686, (2005).
- [22]: **S. Gottesfeld, T. Zawodzinski**, In advances in electrochemical science and engineering, eds, Wiley-VCH: Weinheim, new York, 5, (1997)
- [23]: **L. Carrete, K.A. Friedrich**, U. Stimming, fundamentals and application fuel cells, 1, 1, (2001).
- [24]: **P. Thounthong**, *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [25]: **HADDAD**, *Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique*, thèse de doctorat, Université De Technologie De Belfort-Montbéliard, 2009.
- [26]: **I. SADLI**, *Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [27]: **T. AZIB**, *Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible*, thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 2010.
- [28]: **G. FONTES**, *Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [29]: **Djalili, N. and P.C. Sui**, Transport phenomena in fuel ceUs: from microscale to macroscale. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2008.22(1):p. 115-133.
- [30]: **Mohammed Jourdani**, *Simulation numérique couplée des phénomènes thermo-fluide, électrochimique et mécanique dans une pile à combustible type PEMFC*, Mécanique des fluides [physics.class-ph], Université Mohammed V - Rabat, 2019
- [31]: **F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel, H. Benmoussa**, *Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale*, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, pp. 109-121, 2005.
- [32]: **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 generalised steady state electrochemical model for a PEM fuel cell*, Journal of Power Sources, Vol. 86, No. 1-2, pp. 173-180, 2000.
- [33]: **M. Belatel, F.Z. Aissous, F. Ferhat**, *Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte*, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15, No. 1, pp. 13-28, 2012.

[34] : **BOUCHAALA Soumia, BEGGARI Hadjer**, *Etude d'un système de pile à combustible de type PEMFC*, Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 13 juin 2022.

[35] : **Ounissi, Med Bachir, et Dogga, Mohammed Yacine**. "Contrôle et optimisation d'un système photovoltaïque basé sur logique floue." Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2022.

[36]: **Hadjaji, Salha, and Mustafa Mougay**. "Étude et simulation d'un système énergétique à pile à combustible PEMFC." Université Ahmed Draïa, 2021.

[37] **T. Cylia, A.Ouerdia** <<Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque>>Mémoire de master Université A. MIRA-BEJAIA, 2018/2019.

[38]: **Eltamaly, A. M., Abdelaziz, A. Y. (2020)**. Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems. Suisse : Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3>

[39] Commande MPPT à base de la logique floue - 14/01. (2024). récupéré June 11, 2024, depuis www.studocu.com

[40] : **Arab.L, Chebbi,Z** "Etude et simulation d'une pile a combustible de type pem".<<Universite akli mohnd oulhadj de bouira>> ,2016