REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : commande électrique

Simulation d'un système de production de l'énergie électrique triphasé à base de la pile combustible << fuel cell >>

Présenté par :

BENFARES Mohamed amine

ZEMIRLINE Riadh

Proposé et Dirigé par :

Dr. SKENDER Mohamed Redha

Promotion 2022

ملخص

وفي ظل المناخ الحالي من الانحباس الحراري العالمي ونضوب الإمدادات من النفط فإن استخدام خلايا الوقود الغشائية المزدهرة لابد وأن ينمو. ومن أجل تحقيق كفاءة عالية في استخدام الطاقة فإن الأمر يتطلب الحد الأقصى من التحكم في خلايا الوقود. ومن الضروري بصفة خاصة وجود إدارة سليمة للمياه (بسبب رطوبة الغازات الداخلة والإنتاج الداخلي) في الرصة. والواقع أن الترنث الزائد (الغرق) وعدم PEMFC القدرة على الترطيب (الجمر) من الأمور التي تؤثر على أداء البطارية. لذلك فإن الهدف من هذا العمل هو تطوير أدوات نمذجة وبالتالي تحديد إعدادات العمليات المثلى للحصول على أفضل ترطيب داخلي للبطاريات. وقد تم تطوير نموذج ديناميكية وقائم على التحكم ويصف هذا النموذج على وجه الخصوص نقل الأنواع الغازية إلى أقطاب كهرباء الرصة ونقل المياه في الغشاء. يتم .PEMFC في حساب الأداء الكهربائي للبطارية أيضا. ومن شأن القيام بعمل تجريبي رقمي أن يساعد على ضمان ملاءمة النموذج. وفي النهاية يمكننا إستخدام النموذج من دراسة مدى تأثير مختلف بارامترات التشغيل (درجة الحرارة ونسبة سوتشي المترية والضغوط وإرذلال غاز الإدخال) على مستوى الإماهة الداخلية للبطارية. كما تقارن التكوينات المختلفة لتشغيل البطاريات (قناة الهيدروجين المفتوحة أو المغلقة). ويتحدد هذا الوضع على أفضل وجه ممكن للتيار التشغيلي لمجموعة من ظروف التشغيل. هذا التيار المثالي يعني أنه في حالة تشغيل الخلية عند مستوى أقل من التيار الكهربائي

كلمات مفتاحية

قاطع متناوب - محولات - خلية الوقود

Abstract

In the current climate of global warming and depleting supplies of oil, the use of thriving membrane fuel cells must grow. In order to achieve high energy efficiency, maximum control over the fuel cells is required. It is particularly necessary to have proper water management (due to the moisture of the inlet gases and internal production) in the stack. In fact, excessive wear (sinking) and inability to hydrate (embers) are among the things that affect battery performance. Therefore the aim of this work is to develop PEMFC modeling tools and thus determine the optimal process settings to obtain the best internal hydration of the batteries. A dynamic and control-based model has been developed in PEMFC. In particular, this model describes the transport of invasive species to the stack electrodes and the transport of water in the membrane. The electrical performance of the battery is also calculated. A numerical trial would help ensure the fit of the model. Finally, we can use the model to study the effect of different operating parameters (temperature, metric Sochi ratio, pressures and input gas humidification) on the internal rehydration level of the battery. It also compares different battery powering configurations (open or closed hydrogen channel). This mode is best determined for the operating current for a range of operating conditions. This ideal current means that if the cell is operated at a lower level of electric current

Key words

fuel cell-Chopper-Hinverter

Résumé

Dans le climat actuel de réchauffement climatique et d'épuisement des réserves de pétrole, l'utilisation de piles à combustible à membrane florissantes doit se développer. Afin d'atteindre une efficacité énergétique élevée, un contrôle maximal des piles à combustible est nécessaire. Il est particulièrement nécessaire d'avoir une bonne gestion de l'eau (due à l'humidité des gaz d'entrée et à la production interne) dans la cheminée. En fait, l'usure excessive (coulement) et l'incapacité à s'hydrater (braises) font partie des éléments qui affectent les performances de la batterie. L'objectif de ce travail est donc de développer des outils de modélisation PEMFC et ainsi de déterminer les paramètres de procédé optimaux pour obtenir la meilleure hydratation interne des batteries. Un modèle dynamique et basé sur le contrôle a été développé dans PEMFC. En particulier, ce modèle décrit le transport des espèces invasives vers les électrodes de la pile et le transport de l'eau dans la membrane. Les performances électriques de la batterie sont également calculées. Un essai numérique permettrait de s'assurer de l'ajustement du modèle. Enfin, nous pouvons utiliser le modèle pour étudier l'effet de différents paramètres de fonctionnement (température, rapport de Sotchi métrique, pressions et humidification des gaz d'entrée) sur le niveau de réhydratation interne de la batterie. Il compare également différentes configurations d'alimentation par batterie (canal hydrogène ouvert ou fermé). Ce mode est mieux défini pour le courant de fonctionnement pour une gamme de conditions de fonctionnement. Ce courant idéal signifie que si la cellule fonctionne à un niveau inférieur de courant électrique

Mots clés

Pile à combustible – les onduleurs – les Hacheurs

REMERCIEMENTS

Avant tous, nous tenons nos remerciements à notre Dieu ALLAH de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail. À la suite, nous tenons à remercier vivement Mr. SKENDER. M et Mr. MODJBER. Nos encadreurs qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements, nos vifs remerciements à Mr. GASMI et Mr. GADMANI pour son aide. Nous tenons également à remercier tous les membres de jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance. Et tous les professeurs du département de Génie électrique. À tout ce qui fut à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail. Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à : Tout d'abord, je rends grâce à Allah pour toutes ses bénédictions et la grâce de la réussite. À mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aidé à affronter les difficultés. À ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mise au monde .Mes chers frères

À toute ma famille et tous mes proches. À mon binôme Amine. Pour m'avoir participé ce travail. À tous mes amis, chacun en son nom. Pour tous les enseignants du département de génie électrique. À mes collègues du département électrotechnique.

À tous ceux que j'aime Riad

Liste des abréviations :

Signe	nomination	Unite
δ	Declination	°
ω	Hour angle	°
γ	Surface azimuthal angle	°
θ	Angle of Incidence	°
$\boldsymbol{\varphi}$	Latitude	°
β	Slope of the surface	°
FF	fill factor of solar cell	%
I_{mp}	current at maximum power point	A
V_{mp}	voltage at maximum power point	V
I_{sc}	short circuit current of solar cell	A
V_{oc}	open circuit voltage of solar cell	V
η	efficiency of solar cell	%
G	the radiation power on the earth	KW/m²
S	the exposed surface area of the cell	m²
T_{cell}	the cell temperature	°C
T_{amb}	the ambient temperature	°C
NOCT	nominal operating cell temperature given by manufacturers	°C
S_V	salvage value	DA
C_{rep}	replacement cost of the component	DA
R_{rem}	remaining life of the component	Year
R_{comp}	the lifetime of the component	Year

C_{npc}	total net present cost	DA
$C_{ann,tot}$	total annualized cost	DA
$CRF_{(i,R_{proj})}$	capital recovery factor	DA
COE	cost of energy	DA
E_{prim}	total amounts of primary load	KW/Year
E_{def}	total amounts of deferrable load	KW/Year
$E_{grid,sales}$	amount of energy sold to the grid	KW/Year
P_{PV}	power output of the PV array	KW
f_{PV}	PV derating factor	%
Y_{PV}	rated capacity of the PV array	KW
I_T	global solar radiation	KW/m²
I_S	standard amount of radiation	KW/m²
$P_{PV-rated}$	PV rated power at standard test conditions	KW
K_C	temperature coefficient of the PV array	%/°C
T_C	PV cell temperature	°C
T_{ref}	PV cell temperature under standard test conditions	°C
η_{inv}	inverter efficiency	%
$P_{inv,out}$	output power of the inverter	KW
$P_{inv,in}$	input power of the inverter	KW

Sommaire

CHAPITRE I 5

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PILES A COMBUSTIBLE 6

I.1 Introduction 6

I.2. Historique 6

I.3. Principe de fonctionnement 8

I.4. Différents types des piles 10
I.4.1. La pile alcaline (AFC) 11
I.4.2. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) 12
I.4.3. La pile à acide phosphorique (PAFC) 13
I.4.4. La pile à méthanol direct (DMFC) 14

I.5. Constitution d'une pile à combustible PEMFC 15
I.5.1. Membranes polymères ioniques 15
I.5.2. Les électrodes 16
I.5.3 Catalyseur 17
I.5.4. Les plaques bipolaires 17

I.6. Caractéristique électrique 18
I.6.1. Tension de Nernst 18

I.7. Les applications des piles à combustible 19
I.7.1. Automobile 20
I.7.2. Stationnaires 20
I.7.3. Maritimes 20
I.7.4. Portables 21

I.8. Architecture du système à pile à combustible 21
I.8.1. Configuration système 22
I.8.2. Interfaces externes 23

I.9. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles 24
I.9.1. Les avantages 24
I.9.2. Les inconvénients 25

I.10. Conclusion 25

CHAPITRE II 27

CHAPITRE II : SYSTEMES DE PRODUCTION DECENTRALISEE DE PILES A COMBUSTIBLE 28

II.1. Introduction 28

III.2. Description du système 29

III.3. Modèles dynamiques pour PEMFC et dispositifs électroniques d'alimentation 32
III.3.1. Modèle dynamique pour la centrale PEMFC 33
III.3.2. Modèle d'espace d'état du convertisseur Boost dc/dc 34
III.3.3. Modèle d'espace d'état de l'onduleur triphasé 35

III .4. Conception des contrôleurs pour les dispositifs électroniques d'alimentation 36
III.4.1. Conception du contrôleur pour le convertisseur Boost dc/dc 37
III.4.2. Conception du contrôleur pour la VSI triphasée 37

***CHAPITRE III*..... 42**

CHAPITRE III : SIMULATION D'UN SYSTEME DE GESTION DE L'ENERGIE POUR RESEAU ELECTRIQUE..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

III.1 INTRODUCTION..... 43

III.2 Système de gestion de l'énergie 44

III.3 module de puissance à pile à combustible (fuel cell power module)..... 45

III.4 convertisseur DC/DC (fc dc/dc boost converter):..... 46

III.5 Convertisseur DC/AC..... 46

III.6 Charge Triphasé AC 47

III.7 Batterie 47

III.8 Contacteur 48

III.9 Super condensateur..... 48

III.10 résultats de simulations..... 49

III.11 CONCLUSION..... 52

CONCLUSION GENERALE 53

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 55

Introduction générale

La consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde, ceci est lié à la croissance de la population mondiale ainsi qu'à l'activité industrielle des pays en voie de développement qui a entrainé une explosion des besoins en énergie.

Cette énergie est assurée à l'origine par les fossiles (pétrole, gaz…). La consommation excessive de ces ressources énergétiques limitées conduit à l'épuisement progressif de cesréserves et intensifie les rejets de gaz à effet de serre d'où la pollution de l'atmosphère qui cause un changement climatique. Face à ces conséquences, il est nécessaire de prendre en considérationle développement des énergies alternatives dites sources d'énergies renouvelables. L'utilisationdes énergies renouvelables comme alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire, s'avère une solution très attrayante du fait que celles-ci sont inépuisables, non polluantes, très adaptées à la production décentralisée et les technologies sont actuellement au point pour utiliser ces énergies au quotidien. Leur exploitation pour la production d'électricité esttrès rentable dans les sites isolés ; là où l'extension du réseau électrique serait un échec financier.Comme pour toutes, les sources d'énergie renouvelables, elles ont aussi leurs inconvénients : Onnote en priorité le coût relativement élevé des installations nécessaires dont on peut espérer leur durée pendant des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont soumises aux caprices de la Dame nature. En fait, les jours sans vent ou sans trop de lumière peuvent sérieusement entraver la production d'énergie éolienne et solaire et peuvent ne pas être disponibles toute heurede la journée. Pour cela, il fallait réfléchir à une solution adaptée et idéale ; cela a abouti à l'idée[1]

D'un système de production de l'énergie électrique triphasé à base de la pile combustible qui a montré des résultats très efficaces. Dans ce travail, nous avons étudié un système de production de l'énergie électrique triphasé à base de la pile combustible et nous avons fait une application sur une charge. Et par définition le système hybride est une combinaison de deux sources d'énergie, une classique et l'autre renouvelable. L'objectif principal de cette étude est d'incarner lesystème de production de l'énergie électrique triphasé à base de la pile combustible sur la charge,et cela en utilisant à la fois des panneaux solaires, des piles à combustible et des batteries pour stocker et transférer de l'énergie si nécessaire. Pour cela, notre travail sera structuré comme suit Le premier chapitre présente une description des différents concepts de base liés au système de production de l'énergie électrique triphasé a base de la pile combustible (,la pile à combustible etles batteries), en mentionnant leurs types, les avantages et les inconvénients ainsi que le principe

de fonctionnement de chaque concept.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier, pour faciliter la simulation dans le troisième chapitre.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous simulerons le système de production de l'énergie électrique triphasé a base de la pile combustible en utilisant Matlab-Simulink, en extrayant puis en comparant les différentes courbes. [2]

CHAPITRE I

Généralités sur les piles à combustible

I.1 Introduction :

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous-produits très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications. Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxydede carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air).

I.2. Historique :

C'est un peu avant 1840 que William GROVE décrit la première pile à combustible. Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte Cependant, la principale matière première énergétique étant, au siècle dernier, le charbon, celui-ci sera rapidement utilisée comme combustible pour la mise au point des piles. Dès 1855 de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Wittney (aujourd'hui dans le même groupe que International Fuel Cell).

Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux. Ce fut d'abord la NASA qui les utilisa pour ses engins spatiaux dans les années 60 : les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electrices) et Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney). Ayant prouvé leur efficacité, L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Pour la première fois apparaît la nécessité d'être indépendantsur le plan énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à

développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été met au point la membrane Nation, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop important pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie.

En Amérique du Nord, dans le secteur de l'automobile, des associations d'entreprises sont créées (U.S. Fuel Cell Council, California Fuel Cell Partnership). Les piles bénéficient aussi de subventions par les pouvoirs publics, de programmes pour les développements d'énergies propres : le programme PNGV (Partnership for a new Génération Véhicule) regroupant entre autres Daimler Chrysler et Ford vise à mettre au point des véhicules à faible consommation et un véhicule à pile alimenté à l'hydrogène. Du côté des applications stationnaires, des installations de forte puissance (plusieurs MW) sont mises en place pour la production décentralisée mais aussi pour la cogénération.

Au Japon, Soutenu par le MITI (Ministry for International Trade and Industry) et par l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology), les programmes ont commencé en 1981 avec le programme Moonlight, suivi dès 1992 du programme New Sunshine. Beaucoup d'installations stationnaires sont implantées au Japon, tant pour la cogénération que pour la production centralisée d'électricité : c'est au Japon que se trouve la plus grosse installation (11 MW). Le secteur automobile est présent, Toyota ayant lancé fin 2002 un programme pour vendre des véhicules aux universités, et aussi aux ministères.

L'an énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été mis au point la membrane Nation, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse,

de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop important pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie.

En Amérique du Nord, dans le secteur de l'automobile, des associations d'entreprises sont créées (U.S. Fuel Cell Council, California Fuel Cell Partnership). Les piles bénéficient aussi de subventions par les pouvoirs publics, de programmes pour les développements d'énergies propres : le programme PNGV (Partnership for a new Génération Véhicule) regroupant entre autres Daimler Chrysler et Ford vise à mettre au point des véhicules à faible consommation et un véhicule à pile alimenté à l'hydrogène. Du côté des applications stationnaires, des installations de forte puissance (plusieurs MW) sont mises en place pour la production décentralisée mais aussi pour la cogénération.

Au Japon, Soutenu par le MITI (Ministry for International Trade and Industry) et par l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology), les programmes ont commencé en 1981 avec le programme Moonlight, suivi dès 1992 du programme New Sunshine. Beaucoup d'installations stationnaires sont implantées au Japon, tant pour la cogénération que pour la production centralisée d'électricité : c'est au Japon que se trouve la plus grosse installation (11 MW). Le secteur automobile est présent, Toyota ayant lancé fin 2002 un programme pour vendre des véhicules aux universités, et aussi aux ministères.

I.3. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{chaleur} + \text{électricité} \qquad \text{(I.1)}$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :

A l'anode : couple H+/H2 (électrolyte acide) :

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad \text{(I.2)}$$

A la cathode : couple O2/H2O

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad \text{(I.3)}$$

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples » [4]

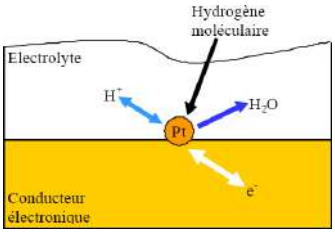


Figure (1.1) : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique .

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

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H+.
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e-.

➢ Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène moléculaire.

- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.

Nous pouvons ainsi apprécier la difficulté de réalisation de cette interface qui représente un point clé de la réalisation de l'ensemble Electrode-Membrane-Electrode, appelé souvent EME… [4] Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

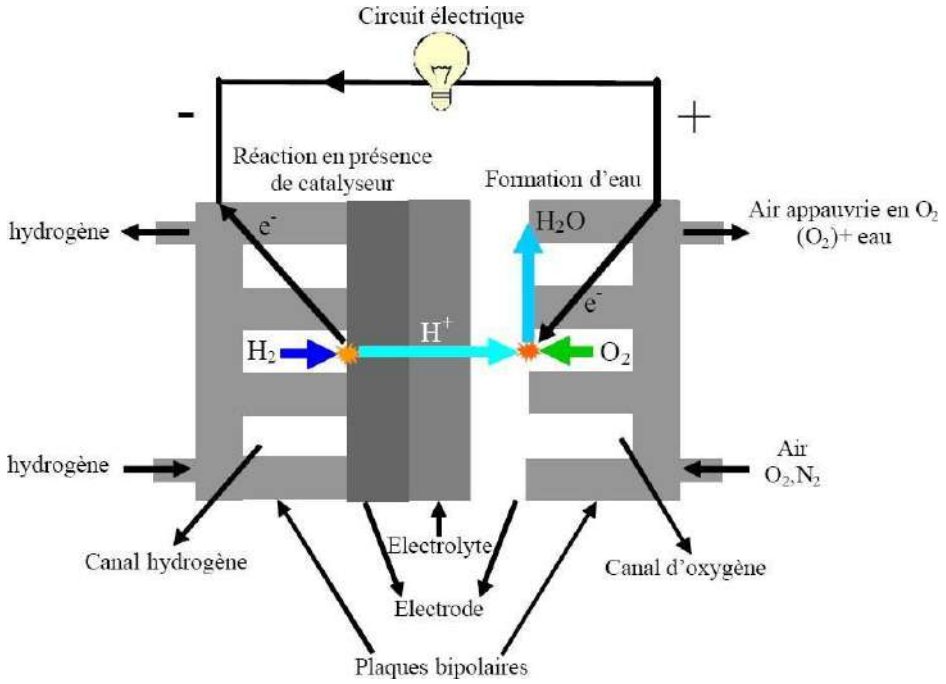


Figure (1.2) : Principe de fonctionnement d'une cellule à pile à combustible H_2/O_2 [1, 8].

I.4. Différents types des piles :

Notre étude portant sur l'application de la pile à combustible dans un réseau électrique. Le niveau de température ainsi que la gamme de puissance ont justifié le choix de type de pile PEMFC dans cette application.

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

- Les piles alcalines (AFC Akaline Fuel Cell).
- Les piles à membranes polymères échangeuses de protons (PEMFC Proton Exchang Membranes Fuel Cell).
- Les piles au Méthanol direct (DMFC Direct Méthanol Fuel Cell).
- Les piles à acide phosphorique (PAFC Phosphorique Acid Fuel Cell).

- Les piles à carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell).
- Les piles à oxydes solides (SOFC Solid Oxide Fuel Cell).

Le Tableau (1.1) décrit les six grandes catégories, leurs caractéristiques techniques et leursapplications. [1,2, 9].

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkalin Fuel Cell	Polymer Exchang Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxyd Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li_2CO_3 et KCO_3 fondu dans une matrice $LiAlO_2$	ZrO_2 et Y_2O_3
Ions dans l'électrolyte	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H_2	H_2 (pur ou rformé)	Méthanol	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)
Oxydants	O_2 (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime (?)	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU),Maritime (?)
Niveau de développement	Utilisée	Utilisé	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau (1.1) : Description des six grandes catégories des piles à combustible [1, 2, 4].

I.4.1. La pile alcaline (AFC) :

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Elle Utilise depuis le début des années 1940, cette pile se retrouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trentes dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 120 à 150°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes

A l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction:

$$2H_2 + 4\,HO^- \rightarrow 4\,H_2O + 4\,e^- \quad \text{(I.4)}$$

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

$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4HO^- \quad \text{(I.5)}$$

Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (OH-). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques. L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le CO2 contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante

$$CO_2 + 2OH^- \rightarrow (CO_3)^{2-} \quad \text{(I.6)}$$

Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage (ou stack) en reliant plusieurs piles en série. [1,2]

I.4.2. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) :

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fût ensuite vite remplacé par des AFC, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de types Nation (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau A l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

A l'anode, on a :

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ 4e^- \quad \text{(I.7)}$$

Et à la cathode, on a :

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad \text{(I.8)}$$

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une

diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche sont à la recherche des catalyseurs plus robustes et moins chers, et des électrolytes polymériques échangeur d'ions plus efficaces et également moins coûteux.

Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir des feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone. [1,2]

I.4.3. La pile à acide phosphorique (PAFC) :

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC ont été installées dans différents endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFC sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système. Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans le cas de la PEMFC, avec des températures de fonctionnement variant de 180 à 220°C, on a donc :

A l'anode :

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad \text{(I.9)}$$

Et à la cathode :

$$O_2 + 4H^{+}{+}4e^- \rightarrow 2H_2O \quad \text{(I.10)}$$

Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique (aussi un électrolyte conducteur de protons), un liquide, alors qu'il s'agit d'un polymère solide dans le cas de la PEMFC. Au début du développement des PAFC, on a utilisél'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile. Mais avec les progrès faits dans les matériaux utilisés pour la construction des piles.

La concentration en acide est maintenant de 100%. 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.

Comme dans le cas des PEMFC, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat côtelé dans lequel l'électrolyte peut être stocké. On procède actuellement à l'essai d'autres catalyseurs pour

ce type de piles à combustible : fer-cobalt, titane, chrome, zirconium. [1,2]

I.4.4. La pile à méthanol direct (DMFC) :

Il ne faut pas confondre cette pile avec les piles qui utilisent du méthanol (ou éthanol) comme source d'hydrogène par le reformage externe (la pile à méthanol indirect). La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent (à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 100°C) :

A l'anode on a :

$$CH_3OH + H_2O \rightarrow 6H^+ + 6e^- + CO_2 \qquad (I.11)$$

Et à la cathode on a :

$$O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 6H_2 \qquad (I.12)$$

Il est important de noter que dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme c'est le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables (moment dipolaire), les molécules de méthanol sont aussi bien transportés vers la cathode que les molécules d'eau par un processus de drag osmotique. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels dus à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile. La traverséedu méthanol à travers la membrane dépend de plusieurs facteurs, les plus importants étant la perméabilité (et donc proportionnel à l'épaisseur) de la membrane, la concentration en méthanol, la température de fonctionnement, et les performances de l'anode elle-même. La membrane est un facteur très important dans le problème de la traversée du méthanol ; une membrane fine permet d'avoir une résistance de la pile moins importante, mais elle tend à avoir une plus grande perméabilité au méthanol. Une membrane épaisse est donc avantageuse dans le cas des piles au méthanol.

Comme pour les PEMFC, les plaques bipolaires sont faites de graphite, de métal ou de matériaux composites. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone, qui est l'intermédiaire dans la réaction. [1,2].

I.5. Constitution d'une pile à combustible PEMFC :

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME) figure (I.3).

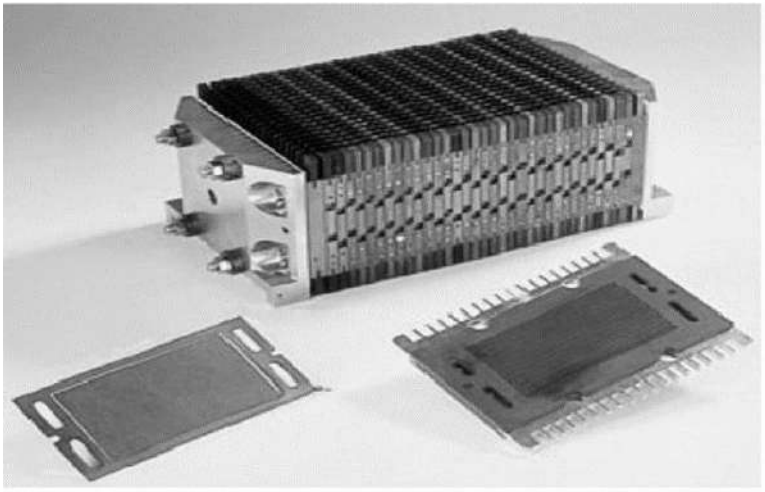


Figure (I.3) : 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC [1, 8]

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement.

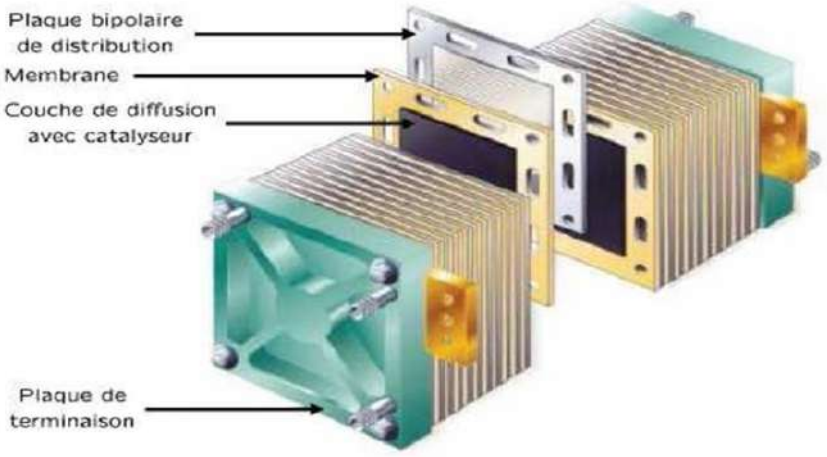


Figure (I.4) : empilement des cellules PEMFC [Electro Encyclo] [4]

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule : L'électrolyte (la membrane dans le cas de la PEMFC), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques.

I.5.1. Membranes polymères ioniques :

Les membranes conductrices protoniques constituent le coeur des piles à combustible de type PEMFC. Leur importance est évidente, puisque ce sont leurs propriétés de conduction qui

vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes (la résistance de la membrane étant liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau élevée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction.

Les membranes possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement de terminaison -SO3H ou COOH, permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode. [4]

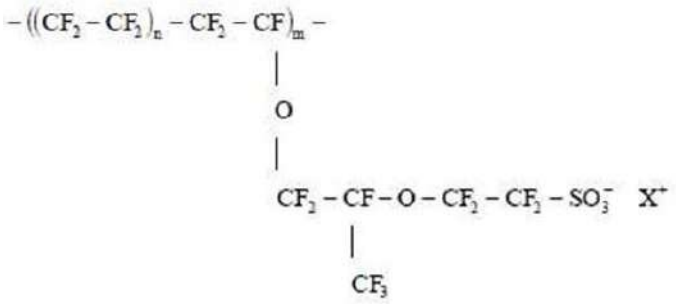


Figure (I.5) : Structure chimique d'une membrane de type Nafion.

L'épaisseur de la membrane polymère échangeuse d'ions, généralement comprise entre 50 et 150 mm, résulte d'un compromis entre ces divers paramètres : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la perméabilité des gaz, les caractéristiques d'hydratation et le coût de fabrication.

Les premières membranes à base de copolymère de di- vinyl-benzène permettant la réalisation de pile, ont été définitivement remplacées par des membranes ioniques à structure perfluorée (type Teflon : membranes commercialisées par différentes sociétés telles que Dow Chemical, Asahi Chemical ou Asahi Glass, Dupont de Nemours et plus récemment, Gore).

Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique. [4]

I.5.2. Les électrodes :

Ils sont le siège des réactions d'oxydoréduction, en plus ils ont une triple fonction :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit

grâce à la présence de polymère ionique.

- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques [1, 2].

I.5.3 Catalyseur :

Le catalyseur est un métal utilisé pour catalyser (accélérer) la réaction électrochimique au niveau des électrodes, de plus, pour résister durablement la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. C'est pour cela, le métal le plus utilisé est du platine (métal noble) pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe). [1, 2, 9]

I.5.4. Les plaques bipolaires :

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Elles ont plusieurs rôles :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur,
- Collecter les électrons (le courant),
- Gérer les flux d'eau.

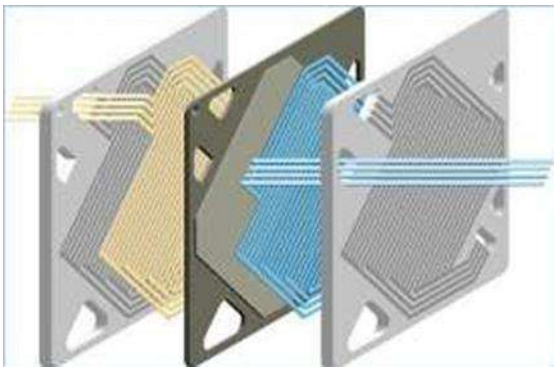


Figure (I.6) : Plaque bipolaire [1, 2]

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant (supérieur à 10 siemens/cm), une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le coeur de pile (eau, acide, oxygène...).

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point. Ce sont :

Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation

de charges (carbone, graphite...) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des matières de base et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieure d'usinage.

Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables. Celles-ci présentent un ensemble de propriétés (tenue mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés avec précision par circulation d'un fluide de refroidissement interne. [4]

I.6. Caractéristique électrique :

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites à la Figure (1.7). La tension à vide dite (tension de Nernst) est d'environ 1,23 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes (pertes d'activation et ohmique) : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement (pertes de concentration).

I.6.1. Tension de Nernst :

C'est le potentiel d'équilibre thermodynamique définit en utilisant l'équation de Nernst

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} + \frac{\Delta S}{2.F}(T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F}[ln(P_{H2}) + 1/2(P_{H2})] \quad (I.18)$$

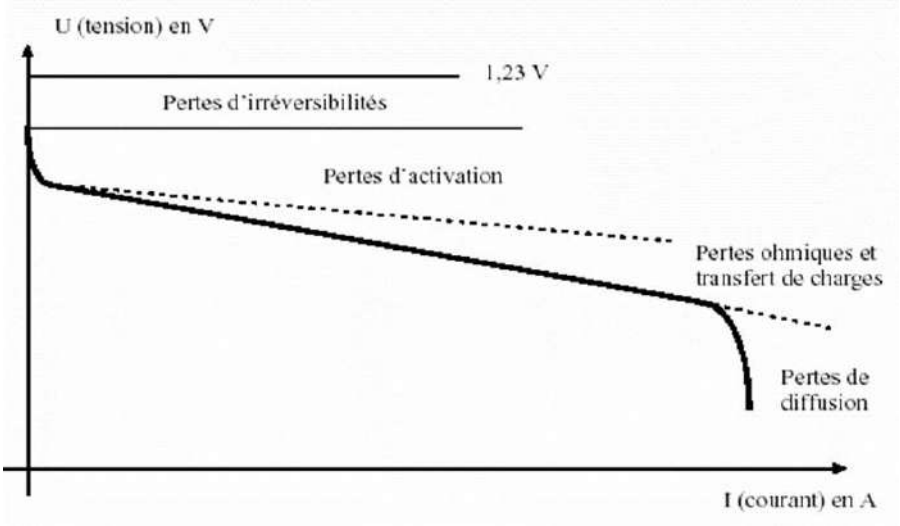


Figure (I.7) : Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible [1,2]

En accord avec l'équation de Nernst pour la réaction de l'hydrogène, le potentiel idéal d'une pile à une température donnée peut être augmenté en augmentant la pression des réactifs. Et on observe en effet des améliorations dans les performances des piles à haute pression.

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la polarisation d'activation, la polarisation ohmique, et la polarisation de concentration. Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal ENernst, une chute de la tension : V = Enernst – pertes.

I.7. Les applications des piles à combustible :

La pile à combustible peut être considérée comme un générateur d'électricité portable et autonome, si elle dispose de sa propre réserve de combustible. Elle est donc très sérieusement envisagée comme une candidate alternative aux moteurs thermiques dans la plupart des modes de transports, terrestres ou maritimes. Produisant électricité et chaleur à parts sensiblement égales, suivant le type de pile (niveau de température), une grande quantité d'applications en cogénération sont considérées comme I I r E F 27 réalistes, pour des cibles diverses, de l'habitat individuel à tout type de bâtiment collectif ou tertiaire, sans oublier les sites industriels. Au vu des très bons rendements électriques que l'on peut obtenir, il peut même être envisagé, pour des applications statiques, de ne récupérer que le courant produit, notamment dans les zones où, pour des raisons de bruit et de pollution, l'installation de tout autre générateur est exclue. Enfin, comme la pile garde de très bons rendements même au niveau d'une seule petite cellule, il n'est pas exclu de rêver à des micros générateurs portables pour diverses applications exotiques (en substitution des batteries plus ou moins limitées en capacités volumique et massique). [1,2] Nous présentons ici quatre principaux domaines d'application :

I.7.1. Automobile :

Les véhicules hybrides et les véhicules électriques ; les véhicules particuliers et de golf, les bus (PEMFC, SOFC, AFC

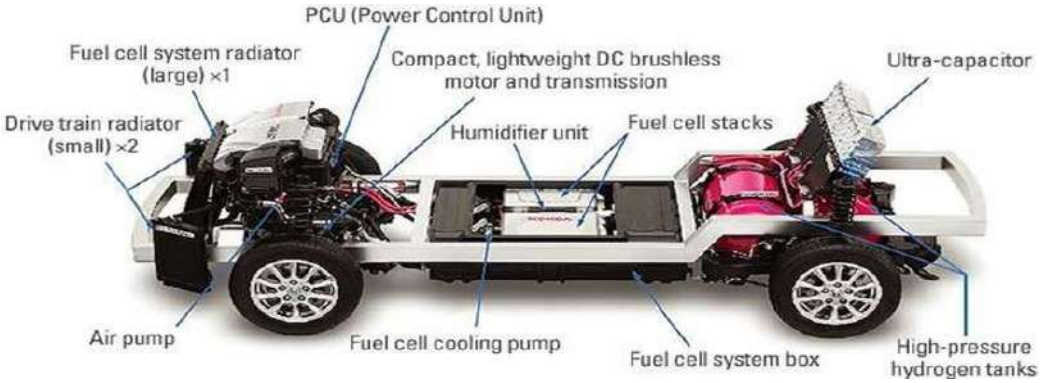


Figure (I.8) : Véhicule Honda équipe d'une pile à combustible et d'un système reformeur d'essence [1, 2]

I.7.2. Stationnaires :

Génération de chaleur et d'électricité (résidentiel, bâtiments publics type piscine, hôpital, école, résidences, générateur de secours). Le type de pile le plus testé est PAFC, et aussi la PEMFC.



Figure (I.9) : Un système complet de 250 kW électrique Ballard [2]

I.7.3. Maritimes :

Elles peuvent être utilisées dans des petits bateaux à moteur et même dans des sous-marins. C'est une application relativement peu connue - et peu médiatisée - des piles, mais qui pourrait connaître un développement certain. Les piles les plus utilisées sont PEMFC, MCFC. [2]

I.7.4. Portables :

Téléphone, ordinateur portable, caméra, matériel de camping ou militaire. Les piles utilisées sont seulement PEMFC et DMFC à cause de leur faible température de fonctionnement.



Figure (I.10) : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable [2]

I.8. Architecture du système à pile à combustible :

Comme pour un moteur thermique, divers périphériques sont nécessaires à la mise en oeuvre d'un générateur d'énergie à pile à combustible PEM

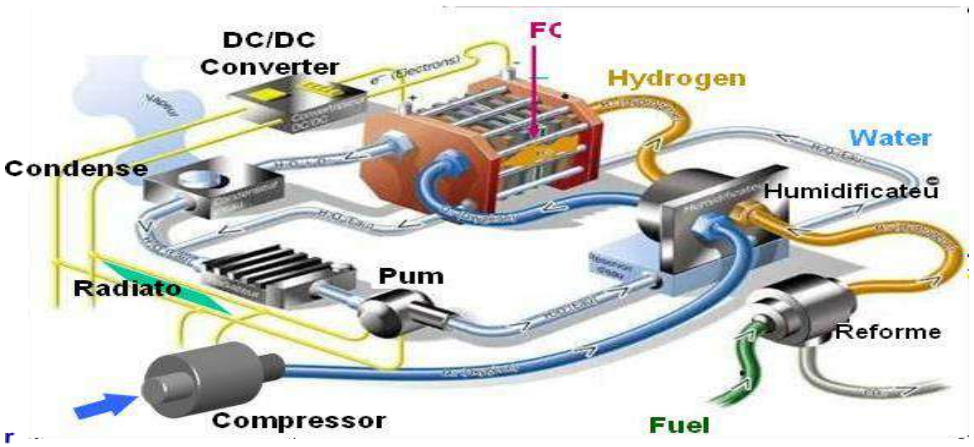


Figure (1.11) : Schéma fonctionnel d'un groupe électrogène à pile à combustible [1].

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés.

En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système

d'humidification

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle. [1]

I.8.1. Configuration système :

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la figure (1.11). Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose des sous-systèmes fondamentaux : le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite. La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet est un élément fondamental de la réalisation de systèmes pile à combustible performants. [4]

I.8.1.1. Gestion de l'air :

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant, qui est typiquement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part, l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. D'autre part, la puissance exigée pour comprimer l'air réduit la puissance disponible. Une partie de cette énergie peut être récupérée en plaçant une turbine sur la sortie d'air du côté de la cathode. Néanmoins, le compresseur d'air emploie typiquement plus de puissance que n'importe quel autre dispositif auxiliaire dans le système. Actuellement, la plupart des stacks de pile à combustible fonctionnent à une pression comprise entre 1 et 8 atmosphères. Afin d'obtenir des densités de puissance importantes et pour améliorer la gestion de l'eau, la plupart des systèmes développés pour l'automobile à partir de pile PEM fonctionnent à des pressions de 2 à 3 atmosphères. [4]

I.8.1.2. Gestion de l'eau :

L'eau est nécessaire à plusieurs endroits dans un procédé de reformage. Dans les systèmes de pile PEM, les gaz réactifs doivent être humidifiés afin d'éviter de dessécher la membrane. Si de l'eau est fournie au niveau de la réaction, celle-ci n'est pas toujours suffisante et l'air (et parfois l'hydrogène) doit être humidifié. Dans des systèmes autonomes, elle peut être récupérée dans les

gaz d'échappement. [4]

I.8.1.3. Gestion thermique :

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement. Pour les systèmes de petite puissance (< 200 W), l'air en excès circulant à la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour des systèmes plus importants la circulation d'air, d'eau ou d'un liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques est nécessaire. Avec un liquide de refroidissement, le stack est plus compact. En outre, avec un liquide, il est plus facile de transférer l'énergie thermique vers d'autres applications telles que le chauffage d'espace ou le chauffage d'eau dans des applications de cogénération. [4]

I.8.2. Interfaces externes :

Les interfaces externes du système sont :

- L'atmosphère pour l'arrivée d'air et le refroidissement.
- La sortie du détendeur pour l'arrivée d'hydrogène.
- La demande de puissance électrique au groupe électrogène.
- L'évacuation d'eau, trop-plein réservoir et purge anodique

I.8.2.1. Circuit d'air :

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

- un filtre
- un compresseur (vitesse commandée)
- un évaporé-condenseur à parois (flux d'entrée) un séparateur air/eau liquide
- la pile à combustible
- un deuxième séparateur (pour récupérer l'eau condensée)
- un évapo-condenseur à parois (flux de sortie)
- un troisième séparateur (pour récupérer l'eau condensée)
- une régulation de pression (vanne commandée)

I.8.2.2. Circuit d'humidification :

Ce circuit sert à la récupération de l'eau produite par la pile afin d'humidifier les gaz en entrée. Il

comporte :

- trois séparateurs pour récupérer l'eau liquide
- un réservoir
- une pompe ou un autre dispositif assurant la circulation un évapore-condenseur à parois

I.8.2.3. Circuit de refroidissement :

Ce circuit est fermé et hydrauliquement indépendant des autres circuits. Il comporte :

- une pompe avec un dispositif de régulation de débit
- un radiateur
- la pile à combustible (les plaques)
- Un by-pass en parallèle de la pile (vanne commandée)
- Un by-pass en parallèle du radiateur (vanne commandée) [4]

I.8.2.4. Circuit électrique :

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

I.9. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles :

I.9.1. Les avantages :

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [9] :

- de hauts rendements énergétiques.
- de faibles émissions sonores.
- peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé).

- elles sont de construction modulaire.
- diverses températures de fonctionnement.
- pas de parties rotatives.

I.9.2. Les inconvénients :

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler [9] :

- le coût.
- le poids et le volume.
- la durée de vie.
- la gestion thermique du module.

I.10. Conclusion :

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

Les réactions électrochimiques en jeu ne produisent pas d'émissions polluantes, et elles n'émettent ni bruit ni odeur

Déjà, de nombreuses installations fonctionnent, et des programmes de recherche ambitieux tentent de développer de nouvelles applications, notamment dans le domaine des transports et des applications statiques (production d'énergie électrique, cogénération).

Enfin le développement de sources autonomes d'énergie, notamment pour un véhicule propre et économe, est I 'un des enjeux technologiques majeurs du débit de ce siècle. L'utilisation d'un moteur électrique, de rendement énergétique élevé, et de fonctionnement silencieux et non polluant, apparaît être une solution idéale, à condition que soient mis au point des générateurs électrochimiques fiables et de faible coût. Si, dans un premier temps, les accumulateurs électriques peuvent jouer ce rôle, leur utilisation est cependant limitée par leur rendement de charge et décharge, le nombre relativement faible de cycles, et surtout le temps et l'installation électrique nécessaires pour leur recharge. Au contraire, les piles à combustible, dont les éléments production d'énergie (coeur de pile) et stockage d'énergie (réservoir de combustible) sont séparés, permettent une utilisation plus souple, similaire à celle des moteurs thermiques actuels, et pourraient donc bénéficier d'un réseau équivalent pour la distribution du combustible.

Déjà, de nombreuses installations fonctionnent, et des programmes de recherche ambitieux tentent de développer de nouvelles applications, notamment dans le domaine des transports et des applications statiques (production d'énergie électrique, cogénération).

Enfin le développement de sources autonomes d'énergie, notamment pour un véhicule propre et économe, est I 'un des enjeux technologiques majeurs du débit de ce siècle. L'utilisation d'un moteur électrique, de rendement énergétique élevé, et de fonctionnement silencieux et non polluant, apparaît être une solution idéale, a condition que soient mis au point des générateurs électrochimiques fiables et de faible coût. Si, dans un premier temps, les accumulateurs électriques peuvent jouer ce rôle, leur utilisation est cependant limitée par leur rendement de charge et décharge, le nombre relativement faible de cycles, et surtout le temps et l'installation électrique nécessaires pour leur recharge. Au contraire, les piles à combustible, dont les éléments production d'énergie (cœur de pile) et stockage d'énergie (réservoir de combustible) sont séparés, permettent une utilisation plus souple, similaire a celle des moteurs thermiques actuels, et pourraient donc bénéficier d'un réseau équivalent pour la distribution du combustible.

CHAPITRE II

Systèmes de production Décentralisée de piles à combustible

II.1. Introduction :

La consommation d'énergie est toujours croissante et la sensibilisation croissante du public à la protection de l'environnement ont suscité un intérêt accru pour les systèmes de production d'électricité écologiques (c.-à-d. renouvelables et à base de piles à combustible). De plus, en raison des progrès constants de la déréglementation de l'électricité et de la restructuration des services publics et des contraintes strictes imposées à la construction de nouvelles lignes de transport d'électricité pour le transport d'électricité à longue distance, l'intérêt pour la production décentralisée (DG) les systèmes installés à proximité des centres de chargement augmentent.

Les piles à combustible sont des dispositifs de conversion d'énergie statique qui convertissent l'énergie chimique du combustible directement en énergie électrique. Ils sont très prometteurs pour être une source importante de DG de l'avenir en raison de leurs nombreux avantages, tels que la haute efficacité, zéro ou faible émission (de gaz polluants), et la structure modulaire flexible. Les systèmes de MD à pile à combustible peuvent être placés stratégiquement à n'importe quel emplacement d'un système d'alimentation (normalement au niveau de la distribution) pour renforcer le réseau, ce qui retarde ou élimine la nécessité de mettre à niveau le système et d'améliorer l'intégrité, la fiabilité et l'efficacité du système. Lorsqu'ils sont raccordés à un réseau de services publics, des exigences importantes en matière de fonctionnement et de rendement sont imposées aux systèmes de DG des piles à combustible. Par exemple, ils devraient être en mesure de fournir une quantité prédéfinie de puissance réelle et réactive au réseau ou de suivre un profil de charge variable dans le temps [2], [6], [27]. Par conséquent, les régulateurs appropriés doivent être conçus pour un système de DG à pile à combustible afin d'obtenir les caractéristiques de rendement souhaitées. Plusieurs types de piles à combustible, de piles à combustible à membrane de changement de protonexe (PEMFC),de piles à combustible à oxyde solide (SOFC) et de piles à combustible à carbonate fondu (MCFC) sont susceptibles d'être utilisés dans les applications de DG. Pour étudier les caractéristiques de rendement des systèmes de DG à pile à combustible, il faut des modèles précis de piles à combustible [1] – [8]. En outre, des modèles de circuits électroniques de puissance d'interface dans un système de DG à pile à combustible sont également nécessaires pour concevoir des contrôleurs pour l'ensemble du système afin d'améliorer ses performances

et de répondre à certaines exigences opérationnelles.

Ces aperçus présentent la configuration et le contrôle du système PEMFCDG avec une capacité de contrôle de puissance réelle et réactive. La centrale à pile à combustible est connectée au réseau électrique par l'intermédiaire de convertisseurs DC/DC et d'un onduleur à modulation pulsée (PWM) triphasé. Un modèle dynamique PEMFC validé, présenté dans [1], est utilisé dans le présent document. Les modèles pour le convertisseur Boost dc/dc et l'onduleur triphasé avec un filtre LC et des lignes de transmission sont également abordés. Les méthodologies de conception des contrôleurs pour les convertisseurs cc/cc et l'onduleur triphasé sont également présentées pour le système de DG de pile à combustible proposé. Basé sur les modèles de composants individuels développés et les contrôleurs conçus, un modèle de simulation du système PEMFC DG a été construit dans MATLAB/Simulink en utilisant SimPowerSystems block-set. Les résultats de la simulation montrent que la puissance réelle et réactive du système de DG de la pile à combustible au réseau électrique peut être contrôlée au besoin. Les résultats montrent également que le système de DG la pile à combustible est capable de suivre la charge et de demeurer stable en cas de graves pannes électriques.

III.2. Description du système :

Pour répondre aux exigences opérationnelles du système, un système de DG à pile à combustible doit être relié par un ensemble de dispositifs électroniques d'alimentation. L'interface est très importante pour le fonctionnement du système de piles à combustible et du réseau électrique. Divers circuits électroniques d'alimentation ont été proposés dans le cadre de travaux récents pour relier différentes sources d'énergie au réseau de services publics [9]- [16]. Les onduleurs de source de tension à modulation de largeur d'impulsion (VSI) sont largement utilisés pour interconnecter un système d'énergie de pile à combustible à un réseau de services publics à des fins de contrôle de puissance réelle et réactive [9], [11], [15], [16]. Enoutre, les systèmes à pile à combustible ont normalement besoin de convertisseurs dc/dc pour adapter la tension de sortie de la pile à combustible à la tension d'entrée souhaitée de l'onduleuret lisser le courant de sortie de la pile à combustible [17], [18].

La figure III.1 montre le schéma du système de DG à pile à combustible proposé dans le présent document. Les valeurs nominales et les paramètres de configuration du système sont présentés dans le tableau I. La centrale PEMFC se compose de dix réseaux de piles à combustible raccordés en parallèle.

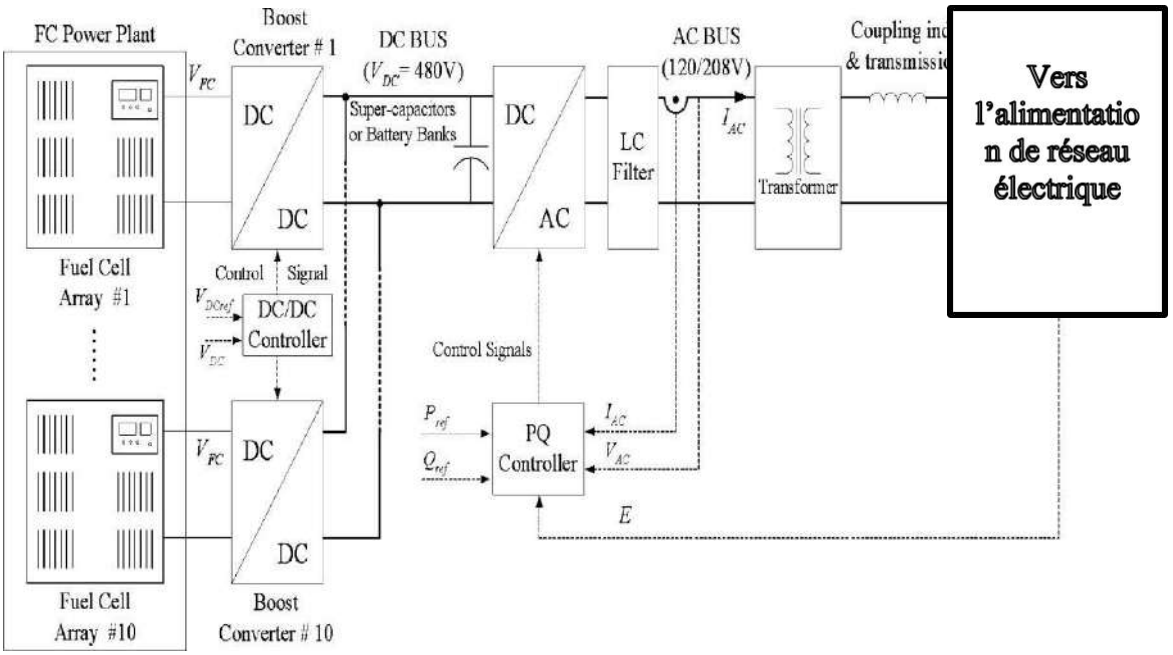


Figure (III.1) : Schéma fonctionnel d'un système de production décentralisée de piles à combustible .

TABLEAU III.1

PARAMÈTRES DE CONFIGURATION DU SYSTÈME PROPOSÉ

PEMFC centrale électrique	**216v/480kw Dix 48-kw FC réseaux sont connectés en parallèle**
PEMFC réseau	216v/480kw, composé de 8 (séries)x12(parallèle) 500-w empilements de piles à combustible
Convertisseur dc/dc élévateur	200V/480V, chacun 50 kw . 10 unités connectées en parallèle.
3-phase dc/ac onduleur	480V dc/208V ac, 500kw
LC Filtre	Lf = 0.15mH, Cf = 306.5µF
Transformateur élévateur	V_a = 208V /12.5kv, S_n = 500kw R_1 - R_2 - 0. $005_{p.u}$, X_1 - X_2 - $0.025_{p.u}$
Inducteur de couplage	Xc = 50 Ω
Ligne de transmission	0.5 km ACSR 6/0 R = 2.149 Ω/km , X = 0.5085 Ω/km
DC tension de bus	480V

AC tension de bus	120V/208V

Chaque tableau à un valeur nominale 48 kW, pour un total de 480 kW. Un convertisseur d'appoint est utilisé pour adapter la tension de sortie de chaque réseau de piles à combustible au courant continu tension du bus. Dans ce mémoire, la tension du bus DC (convertisseur DC/DC sortie) est choisie comme VDC = 480 V, qui est principalement déterminé par la tension de sortie AC de l'onduleur et la chute de tension sur le filtre LC. L'équation suivante devrait être satisfaite entre les tensions côté DC et côté AC de l'onduleur [15] :

$$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} m_\alpha V_{DC} \geq \sqrt{(V_{AC.LL})^2 + 3(\omega L_f I_{max})^2} \qquad \text{(III.1)}$$

où VDC est la tension du bus DC, VAC,LL est la ligne de ligne AC rms tension, Lf est l'inductance du filtre, Imax est la moyenne de la racine valeur carrée (rms) du courant alternatif maximal (IAC), et ma est l'indice de modulation de l'onduleur. PWM linéaire est utilisé pour l'onduleur, c'est-à-dire ma ≤ 1.0, dans ce document[16]. Dans ce document un rapport de droit autour 55 % est utilisé pour le convertisseur DC/DC au fonctionnement nominal de la pile à combustible.

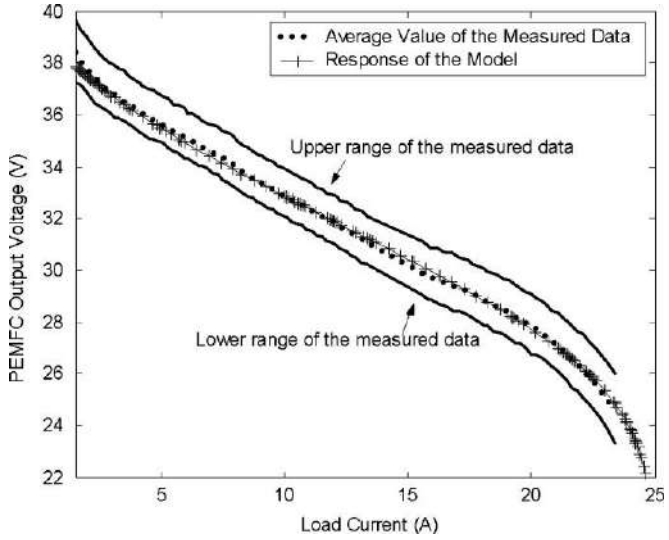


Figure (III.2) : Caractéristique PEMFC V –I : Comparaison de la réponse du modèle avec les données expérimentales [1]

La tension d'entrée approximative souhaitée pour le convertisseur DC/DC est de [(1 0,55) VDC = 216 V]. Selon les caractéristiques de la tension de sortie par rapport au courant de charge(V –I) du PEMFC, données à la figure 2, lorsque son courant de charge est supérieur à 23 A, lapile à combustible est dans la zone de concentration, ce qui devrait être évité [19], [20]. Pour

laisser une marge de sécurité, le carburant cellule est actionnée autour du point où son courant est de 20 A (nominale point de fonctionnement) et sa tension de sortie (VFC, cellule) est d'environ 27 V. Par conséquent, le nombre de piles à combustible que nous devons raccorder une série pour obtenir une tension de 216 V est :

$$Ns = \frac{VFC}{V_{FC.CELL}} = \frac{216}{27} = 8 \qquad \text{(III.2)}$$

Le nombre de piles de série de piles à combustible nécessaires pour composer un réseau de piles à combustible de 48 kW est :

$$N_p = \frac{P_{réseau}}{N_s \times P_{pile}} = \frac{48kW}{8 \times 0.5\ \text{kW}} = 12 \qquad \text{(III.3)}$$

Par conséquent, chaque réseau de piles à combustible est composé de 8×12 piles d'une puissance nominale de 48 kW.

Les supercondensateurs ou les batteries sont connectés au bus DC. pour fournir une capacité de stockage et une réponse dynamique rapide à la charge transitoires. Un onduleur triphasé à six switch avec un système d'alimentation 120 V/208 V ac. Un filtre LC est connecté à la sortie de l'onduleur pour réduire les harmoniques introduites par l'onduleur. Un transformateur élévateur 208 V/12,5 kV connecte le système d'alimentation électrique de la pile à combustible au réseau de services publics par un couplage inducteur et une ligne de transmission courte. L'inducteur de couplage est nécessaire pour contrôler le flux de puissance réel et réactif entre le système de DG des piles à combustible et le réseau de services publics et pour limiter les perturbations et les courants de défaut.

Les régulateurs des convertisseurs boost dc/dc sont conçus pour maintenir la tension du bus dc dans une fourchette acceptable (5 % dans ce papier). Par conséquent, l'entrée de l'onduleur triphasé peut être considéré comme une source de tension constante assez bonne. L'onduleur contrôle les flux de puissance réels et réactifs vers l'utilitaire réseau. Les flux de puissance P, Q suivent leurs valeurs de référence respectives, qui peut être défini soit comme valeurs fixes, soit pour suivre une certaine demande de charge.

III.3. Modèles dynamiques pour PEMFC et dispositifs électroniques d'alimentation :

Cette section décrit les modèles dynamiques des principaux composants du système illustré à la Figure.1, à savoir pour la centrale PEMFC, les convertisseurs dc/dc et l'onduleur triphasé.

III.3.1. Modèle dynamique pour la centrale PEMFC :

Les PEMFC, l'une des piles à combustible les plus développées, sont très prometteuses tant dans les applications de transport que dans les applications de production d'énergie stationnaire. Pour étudier les caractéristiques dynamiques d'une centrale électrique PEMFC soumise à des transitoires de charge, il est nécessaire d'utiliser un modèle PEMFC dynamique.Le modèle de centrale PEMFC utilisé dans cette étude est basé sur le modèle de cheminée PEMFC dynamique développé et validé dans [1]. Ce modèle physique utilise des circuits électriques équivalents pour représenter les phénomènes électrochimiques et thermodynamiques à l'intérieur du PEMFC. Le modèle a été validé par des données expérimentales mesurées à partir d'une pile SR-12 500-W PEMFC d'Avista Labs. Il s'agit d'unmodèle autonome fonctionnant sous pression de canal constante sans contrôle du débit de carburant entrant dans le réservoir. Le réservoir de carburant ajuste le débit de carburant d'entrée en fonction de son courant de charge pour maintenir la pression du canal constante. La figure 2 montre la courbe caractéristique (V –I) du 500-W modèle PEMFC comparé aux données expérimentales [1]. Courbe caractéristique peut être divisée en trois régions. La volt- baisse de l'âge à travers la pile à combustible associée aux faibles courants est due à la perte d'activation à l'intérieur de la pile à combustible, la chute de tension i le milieu de la courbe (qui est approximativement linéaire) est dû à la perte ohmique dans la cheminée de la pile à combustible, et en conséquence de la perte de concentration, la tension de sortie à la fin de la courbe baissera fortement à mesure que le courant de charge augmente [19], [20]. La propriété dynamique de PEMFC dépend principalement des trois aspects : effets de charge double couche.

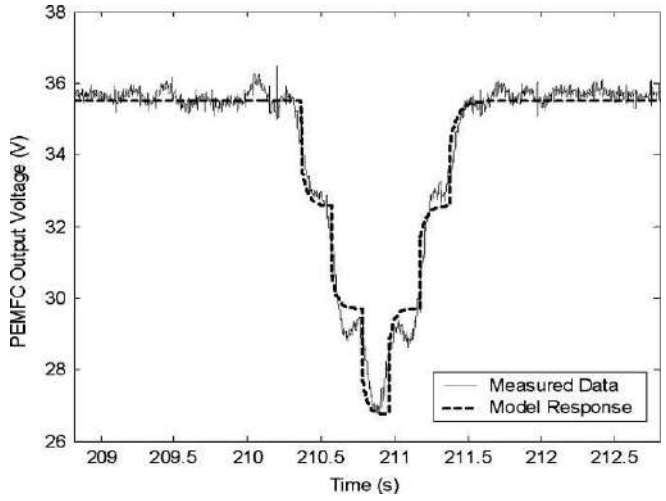


Figure (III.3) : PEMFC réponse dynamique dans un court laps de temps : comparaison de la réponse du modèle avec des données expérimentales [1].

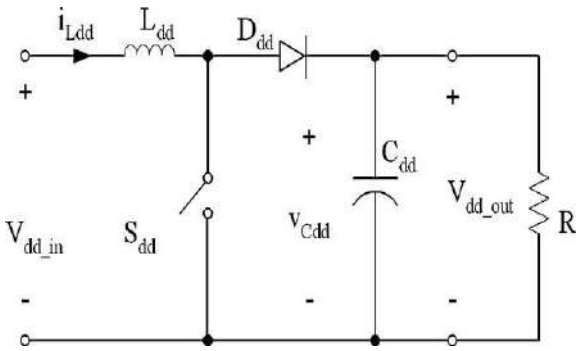


Figure (III.4) : Convertisseur Boost dc/dc

Les délais d'écoulement des oxydants et les caractéristiques thermodynamiques à l'intérieur de la pile à combustible. La réponse dynamique du PEMFC est dominée par les effets de charge à double couche dans la courte période (moins de 1 s) et par les retards d'écoulement du combustible et des oxydants et les caractéristiques thermodynamiques à l'intérieur de la pile à combustible dans la longue période (plusieurs minutes) [1], [20]. La réponse dynamique du modèle (tension de sortie de la pile à combustible par rapport au temps) aux variations de charge par paliers dans la courte période est illustrée à la figure 3. Il est noté à partir de cette figure que la réponse du modèle concorde bien avec les données mesurées. Pour plus de détails sur l'élaboration du modèle, le lecteur est invité à consulter [1].

III.3.2. Modèle d'espace d'état du convertisseur Boost dc/dc :

Un convertisseur DC/DC de suralimentation, illustré à la Fig. 4 [15], peut être utilisé pour convertir la tension de sortie de la pile à combustible à la tension de bus DC souhaitée. Une technique de calcul de la moyenne de l'espace d'État, proposée par Middle brook et Cuk [15], est largement utilisée pour développer des modèles d'espace d'État pour les convertisseurs. Le modèle d'espace d'état du petit signal pour le convertisseur DC/DC de suralimentation peut alors être obtenu comme suit :

$$\tilde{x}^{\cdot} = A_d\tilde{x} + B_d d \qquad \text{(III.4)}$$

$$\tilde{v}_{dd\,\text{out}} = C_T\tilde{x} \qquad \text{(III.5)}$$

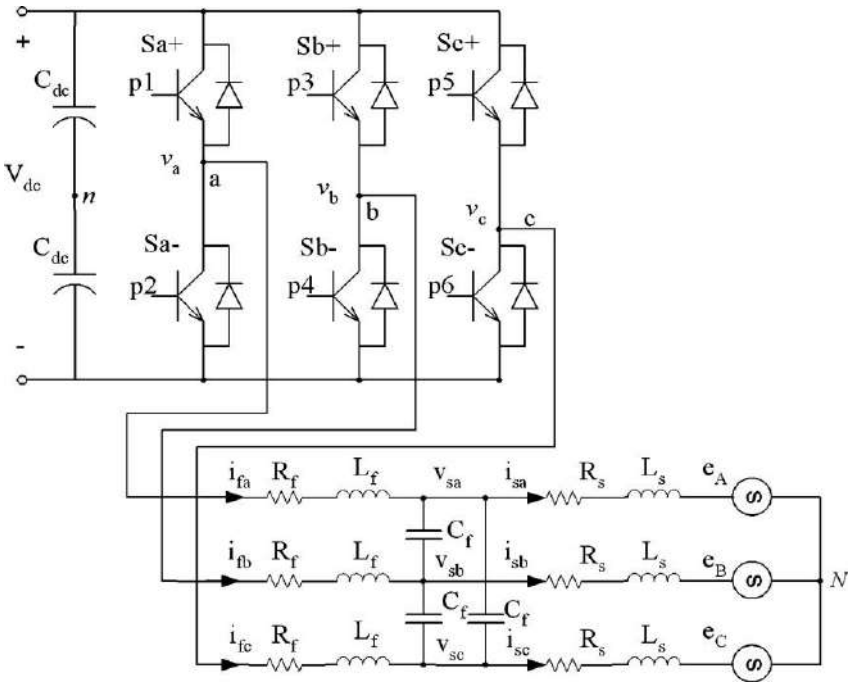


Figure (III.5) : Onduleur de source de tension DC/AC triphasé.

Où :

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ldd} \\ \tilde{v}_{dd} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-D)}{L_{dd}} \\ \frac{1-D}{C_{dd}} & \frac{-1}{RC_{dd}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{X_2}{L_{dd}} \\ \frac{-X_1}{C_{dd}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.6)}$$

Où CT = [0,1], X1, et X2 sont les valeurs d'état stable de x1 et x2 respectivement, et D est le rapport de service par impulsion au point de fonctionnement nominal. Le symbole " ~ " est utilisé pour désigner les petits signaux de perturbation.

III.3.3. Modèle d'espace d'état de l'onduleur triphasé :

Un PWM VSI triphasé à six commutateurs est utilisé pour convertir l'alimentation disponible au niveau du bus DC en alimentation AC La figure 5 montre le circuit principal de l'onduleur de la source de tension triphasée raccordé au réseau électrique par le filtre LC (Lf et Cf) et l'inducteur de filtre et de l'inducteur de couplage, respectivement. L'utilisation de la théorie de la circulation électrique de classe et de l'espace-états en utilisant la technique, ainsi qu'une description détaillée de l'espace-état du transformateur peut être obtenue [23], [24]. Cependant, le modèle détaillé de l'onduleur est trop compliqué pour être appliqué directement

dans la conception du contrôleur.

III .4. Conception des contrôleurs pour les dispositifs électroniques d'alimentation :

Les figures 2 et 3 montrent que la tension de sortie d'une pile à combustible est fonction de la charge. Le convertisseur DC/DC de suralimentation adapte la tension de sortie de la pile à combustible à la tension du bus DC, et le contrôleur de tension aide à réguler la tension de sortie dans une plage de tolérance de 5 % en fonctionnement normal. Dans cette section, le contrôleur PI conventionnel est utilisé pour les convertisseurs boost DC/DC. En pratique, un contrôleur de partage de charge (non abordé dans le présent document) peut être appliqué sur les convertisseurs, connectés en parallèle, afin d'obtenir une répartition uniforme de la charge entre eux [28]. En outre, un schéma de contrôle du courant à deux boucles transformées en dq

TABLEAU III.2. PARAMÈTRES DU CONVERTISSEUR BOOST DC/DC

L_{dd}	**1.2 mH**
C_{dd}	2500 µF
D_N	0.5833
R (charge équivalente)	4.608 Ω
X_1	250 A
X_2	480 V
K_{di}	20
K_{dp}	0.02

est présenté pour que l'onduleur contrôle la puissance réelle et réactive livrée du système d'alimentation de la pile à combustible au réseau.

III.4.1. Conception du contrôleur pour le convertisseur Boost dc/dc :

Les principaux composants du convertisseur DC/DC peuvent être déterminés par les spécifications techniques prescrites, telles que la tension et le courant de crête, l'ondulation du courant d'entrée, l'ondulation de la tension de sortie, etc., en utilisant la procédure de conception classique du convertisseur DC/DC d'appoint [15], [16]. Les valeurs des composants du convertisseur DC/DC de 48 kW utilisés dans le présent document sont indiquées dans le tableau III.2 Basé sur le modèle de convertisseur de (5), un contrôleur de courant PI ($K_{dp} + K_{di}/s$) peut être conçu en utilisant la méthode classique Bode-plot et root-locus [21]. Les paramètres du contrôleur de tension PI sont également répertoriés dans le tableau III.2.

III.4.2. Conception du contrôleur pour la VSI triphasée :

Pour satisfaire aux exigences d'interconnexion d'un système de pile à combustible à un réseau de services publics et contrôler le flux de puissance réel et réactif entre eux, il est nécessaire de façonner et de contrôler la tension de sortie de l'onduleur en amplitude, angle et fréquence [22]. Dans cette section, un contrôleur PWM est conçu pour que l'onduleur satisfasse à la régulation de tension ainsi qu'au contrôle de puissance réel et réactif. La transformation dq transfère un système stationnaire (abc) à un système rotatif (dq0). la transformation diminue le nombre de variables de contrôle de 3 à 2 (la composante 0 sera zéro) si le système est équilibré. De plus, les signaux dq peuvent être utilisés pour atteindre le contrôle zéro erreur de suivi [24]. En raison de ces mérites, la transformation dq a été largement utilisée dans la commande de convertisseur/onduleur PWM et est également appliquée pour la commande de convertisseur dans ce document. Pour un système de DG à pile à combustible, il n'y a pas de flexibilité pour la fréquence de modulation du générateur PWM sinusoïdal (SPWM) pour l'onduleur – il doit suivre la fréquence du réseau auquel il est connecté. L'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur peut avoir une tolérance de 5 % avec une valeur nominale de 1,0 p.u. [22], [25]. Par conséquent, l'angle de la tension de sortie sera contrôlé, ainsi qu'un réglage de magnitude de 5 %, pour obtenir un contrôle de puissance réel et réactif. Considérons une source de tension connectée à un réseau électrique par une impédance de couplage R + jX, comme le montre la Fig. 6. Les puissances réelles et réactives fournies à l'utilitaire.

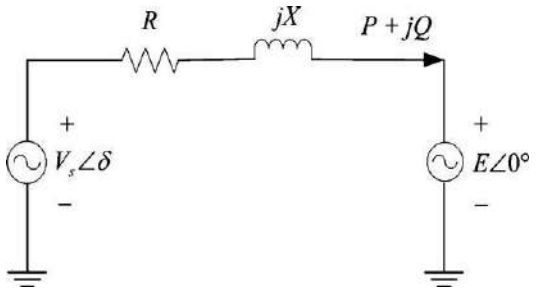


Figure (III.6) : réseau électrique proposer [25]

$$P = \frac{EVs}{z}\cos(\theta_z - \delta) - \frac{E^2}{Z}\cos(\theta_z) \qquad \text{(III.6)}$$

$$Q = \frac{EVs}{z}\sin(\theta_z - \delta) - \frac{E^2}{Z}\sin(\theta_z) \qquad \text{(III.7)}$$

Où $$Z = \sqrt{R^{2+} X^2} \text{ et } \theta_z = \tan^{-1}(X/R) \qquad \text{(III.8)}$$

À partir de équations (5) et (6), il est clair que les puissances réelles et réactives fournies au réseau de distribution sont entièrement déterminées par l'amplitude et l'angle de la source de tension d'émission, c'est-à-dire la tension de sortie de l'onduleur. Toutefois, si les valeurs souhaitées de puissance réelle et réactive sont indiquées, les valeurs de Vs et δ peuvent être déterminées à partir de (5) et (6) :

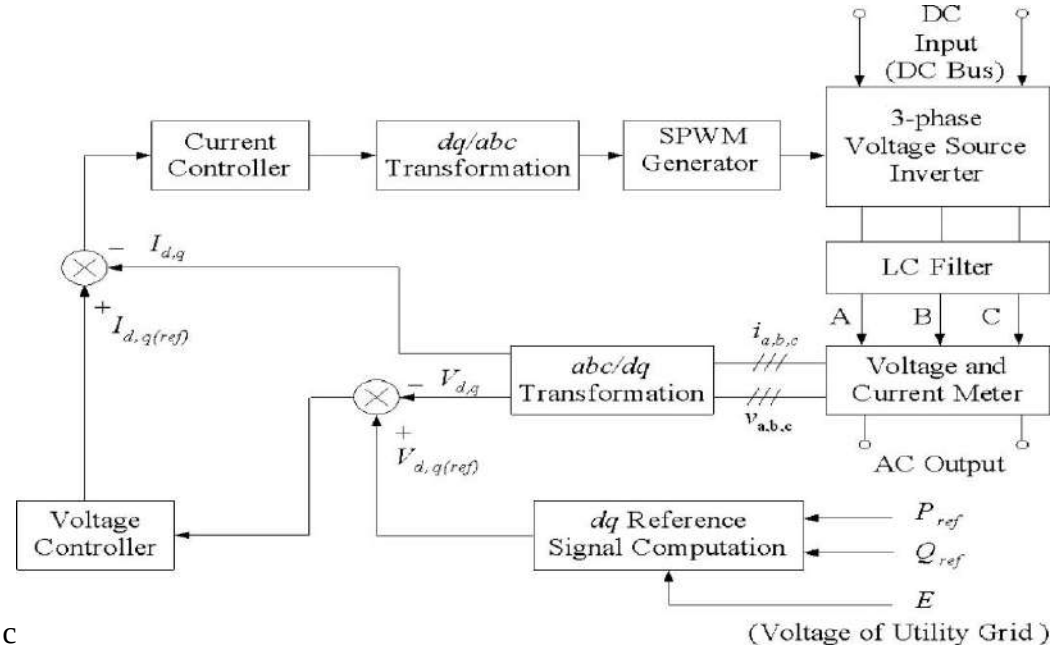
$$V_s = \left[\frac{Z^2}{E^2}(P^2 + Q^2) + E^2 + 2PZ\cos(\theta_z) + 2QZ\sin(\theta_z)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{(III.9)}$$

$$\delta = \theta_z - \cos^{-1}\left(\frac{ZP}{EV_s} + \frac{E}{V_s}\cos(\theta_z)\right) \qquad \text{(III.10)}$$

Les valeurs de composant d_{q_0} correspondantes a V_s dans (7) peuvent être obtenues par transformation abc/dq comme suit : où $T_{abc/dq}$est la matrice de transformation abc/dq. La méthodologie pour développer la transformation abc/dq est dans [29].Un schéma de commande consistant en un régulateur de tension externe avec une boucle de commande de courant interne, présenté dans [23], [24], a été adopté pour le contrôle de la source de tension triphasée. Le schéma fonctionnel global du système de commande de l'onduleur est donné à la Fig. 7. La

boucle de commande de courant interne est conçue pour répondre plus rapidement que la boucle

de commande de tension externe afin que les deux boucles de commande puissent être conçues indépendamment. En conséquence, lorsque nous traitons avec la boucle intérieure, nousprenons la boucle extérieure comme une entrée constante (c.-à-d.,$I_{d.q\ (ref)}$ est constante dans Fig. 7). La boucle de contrôle de courant interne (contenant le bloc de contrôleur de courant dans Fig. 7) peut être approchée comme bloc de décalage simple quand nous procédons avec laboucle extérieure. Les régulateurs de courant et de tension sont choisis comme compensateurs PI. Les procédures de conception classiques des régulateurs Bode-plot et root-locus PI [21] sontutilisées pour obtenir les paramètres des régulateurs de courant et de tension.



c

Figure (III.7) : Schéma fonctionnel du système de commande global de l'onduleur.

Figure (III.7), le bloc de calcul du signal de référence d_q, qui est basé sur les équations (7) et (8), calcule la magnitude et angle des tensions de sortie filtrées de l'onduleur, puis les convertit en signaux de référence de tension $d_q$conformément à (10). Le bloc de transformation abc/d_q prend le courant et la tension les valeurs (en coordonnées abc) des tensiomètres et les convertit en valeurs d_q. Le contrôleur de tension externe prend les signaux d'erreur entre la tension de sortie réelle en dq image ($V_{d.q}$) et la tension de référence ($V_{d.q\ (ref)}$) et génère les signaux de référence actuels ($I_{d.q\ (ref)}$) pour la commande de courant boucle. Le contrôleur de courant interne produit les signaux de commande d_q, qui sont convertis en signaux de commande en

coordonnées abc par le bloc de transformation d_q/abc . Ces signaux de commande sont utilisés pour moduler le générateur d'impulsions SPWM afin de produire les impulsions appropriées pour les commutateurs de l'onduleur Figure (III.5) , contrôler la tension de sortie de l'onduleur.

Les contrôleurs donnés dans cette section pour les convertisseurs électroniques de puissance sont conçus sur la base de modèles linéarisés à petits signaux. Conceptuellement, il n'y a aucune garantie que les contrôleurs conçus fonctionneront bien sur une large plage de fonctionnement en raison de la non-linéarité des appareils électroniques de puissance. Néanmoins, La majorité des régulateurs pour les dispositifs électroniques de puissance sont linéaires invariants dans le temps (LTI) qui sont conçus sur la base de modèles linéarisés. L'efficacité des contrôleurs LTI peut être vérifiée par des simulations sur des modèles plus détaillés (non linéaires) que les modèles linéarisés utilisés pour la conception initiale des contrôleurs [30]. Nous Avons vérifié la validité des schémas de contrôle proposés sur une large plage de fonctionnement au moyen de simulations sur des modèles convertisseur/onduleur non linéaires. Les résultats de la simulation seront discutés dans la section suivante.

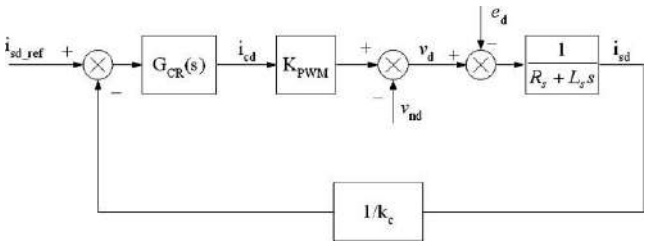


Figure (III.8) : Schéma fonctionnel de la boucle de commande de courant de l'onduleur.

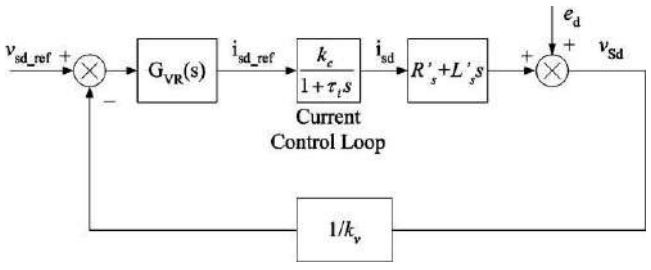


Figure (III.9) : Schéma fonctionnel de la boucle de contrôle de la tension de l'onduleur.

Le convertisseur de CC/CA transforme la puissance dans les bus CC en puissance CA vers le

moteur électrique et permet de contrôler le couple de traction de celui-ci. De plus, il doit être réversible pour permettre de récupérer de l'énergie lors de freinages.

Les convertisseurs CC/CC contrôlent la distribution de la puissance entre la PAC et l'ES. Ils permettent d'adapter les tensions de la PAC et de l'ES au bus CC et de limiter leurs courants.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté le schéma globale d'un système de production d'un réseau électrique alimenter par un ensemble de pile de combustible dite : » fuel cell », ou nous avons présenté les différents blocs comme onduleur et hacheur.

CHAPITRE III

Simulation d'un système de gestion de l'énergie pour réseau électrique

III.1 INTRODUCTION

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous-produits très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications. Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxydede carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air).

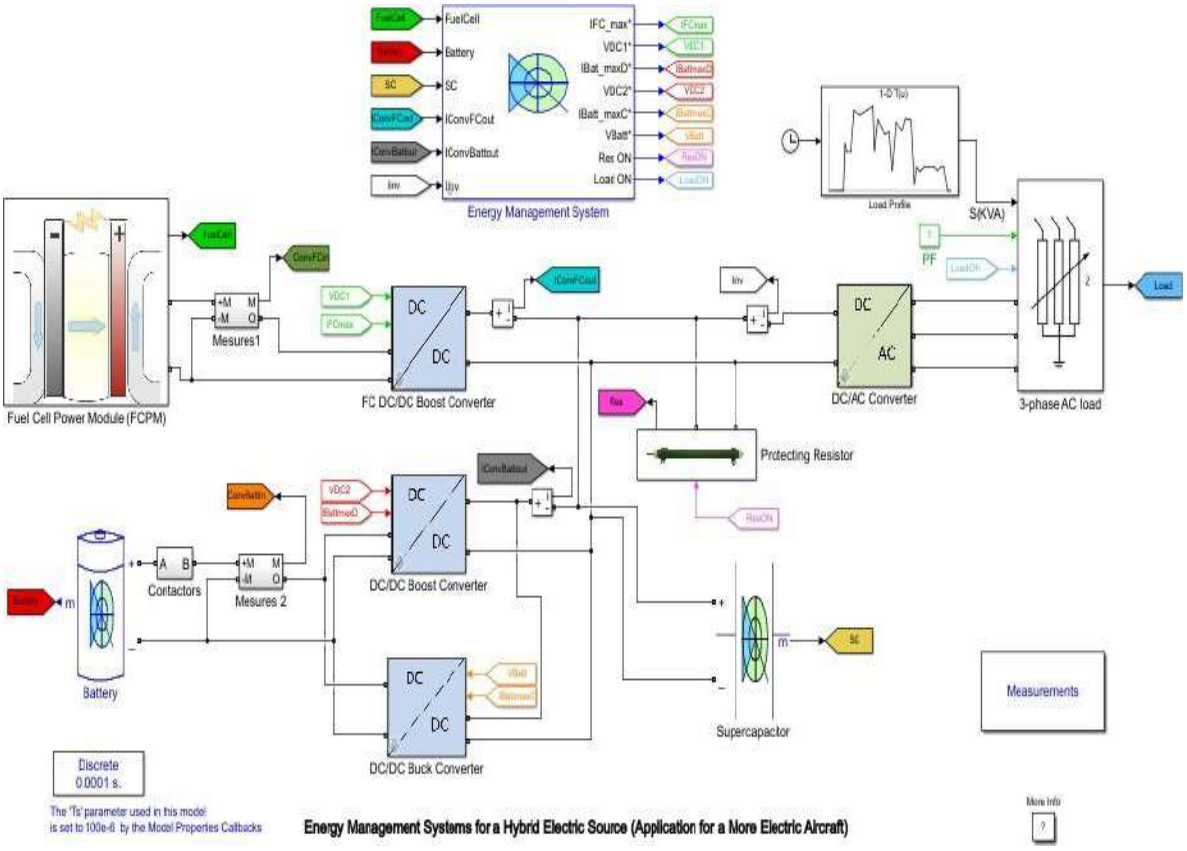


Figure III. 1 : système globale de gestion de réseau électrique

III.2 Système de gestion de l'énergie :

La gestion de l'énergie dans les systèmes embarqués est fondamentale pour leur bon fonctionnement. Le nombre de ces systèmes est en augmentation constante et leurs domaines d'utilisation sont de plus en plus variés. Les contraintes sont très différentes selon que laconception porte sur un capteur environnemental, un téléphone portable ou une sonde corporelle. L'objectif principal peut être une grande longévité, une taille réduite ou encore un fonctionnement sans batterie.

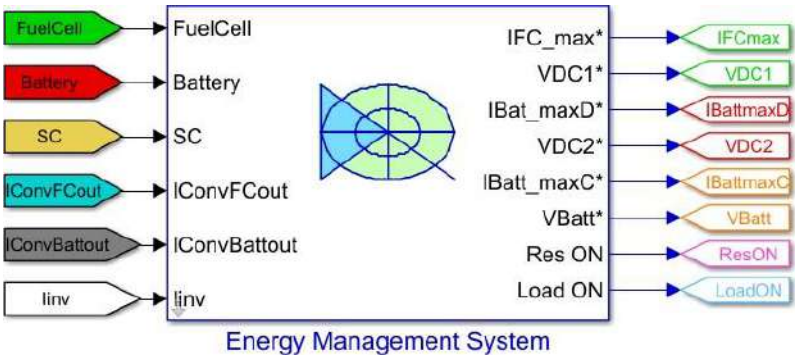


Figure III. 2 Commande de la pille combustible

En plus des sources d'énergies utilisables, ce mémoire aborde les méthodes permettant d'analyser la consommation énergétique d'un système et donc de valider que telle méthode est plus efficace que telle autre, dans l'atteinte d'objectifs précis. Deux domaines sont pris en exemple pour pointer le fait que les objectifs peuvent grandement différer en fonction de l'utilisation qui est faite du système embarqué : les téléphones portables et les capteurs corporels. L'optimisation de la consommation peut être réalisée selon différentes méthodes, dont certaines peuvent même être combinées. L'amélioration peut par exemple se faire au niveau matériel, en pilotant sélectivement certains composants ou périphériques. Des composants particuliers peuvent également être sélectionnés dès la conception, en fonction des objectifs recherchés. L'amélioration peut également être de type logicielle (système d'exploitation, type du code, programmation de l'applicatif,…). Beaucoup d'éléments participent à la consommation énergétique, dont certains ne sont pas évidents de prime abord. En fonction de la manière de coder, par exemple, un système peut consommer plus ou moins d'énergie.

III.3 module de puissance à pile à combustible (fuel cell power module) :

Le système en simulant des profils de charges (basés sur une dimension industrielle). Module de pile à combustible, stockage d'hydrogène, batterie et électronique de puissance peuvent être étudiés et caractérisés séparément. L'acquisition de données et la configuration du système sont effectuées via un PC pour plus de confort. Les utilisateurs découvrent les profils de charge, les rendements et les critères de conception, pour devenir des experts du dimensionnement de systèmes.

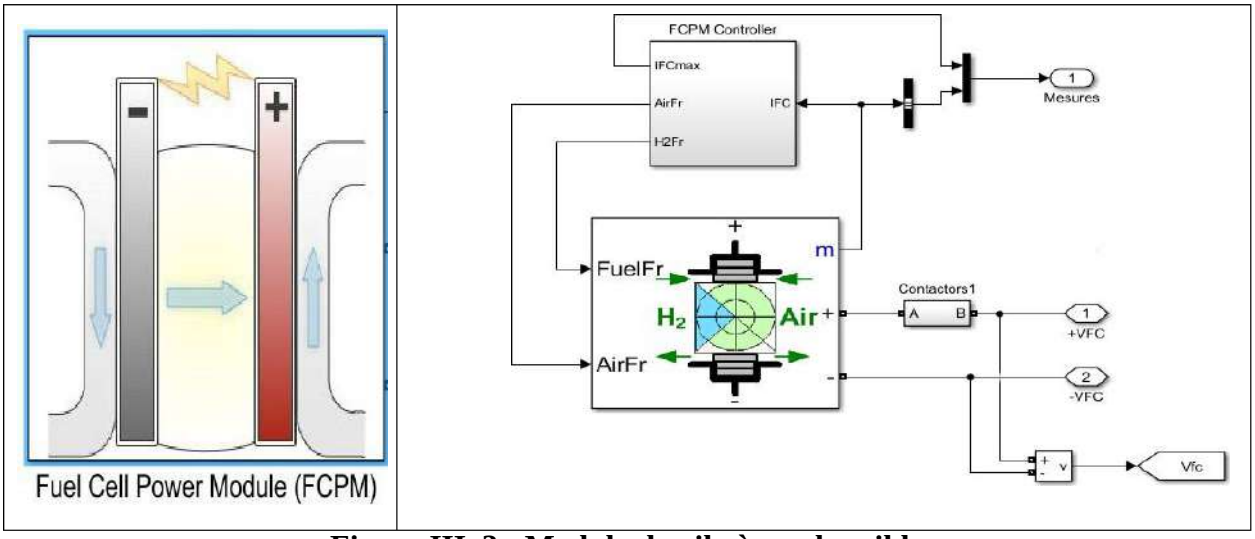


Figure III. 3 : Module de pile à combustible

Caractéristiques du produit:

»» Module de pile à combustible PEM industriel 1,2 kW.

»» Logiciel d'apprentissage et d'expérimentation avec génération automatique de courbes caractéristiques.

»» Visualisation et contrôle centralisés de tous les processus du système par ordinateur.

»» Deux possibilités de batterie pour configurations d'expériences.

»» Puissance de sortie pour alimentation CC et CA via un onduleur.

»» Stockage d'hydrogène intégré.

III.4 convertisseur DC/DC (fc dc/dc boost converter):

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S: Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S (voir figure 4) est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

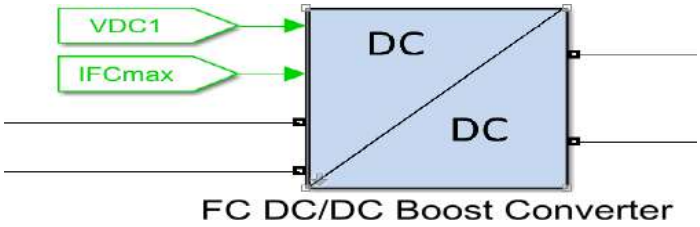


Figure III. 4 : convertisseur élévateur

III.5 Convertisseur DC/AC :

On appelle aussi les convertisseurs de courant continu (DC) en courant alternatif (AC), des onduleurs.

A ne pas confondre avec les onduleurs pour les ordinateurs, qui sont des appareils de protection et de stabilisation du courant, afin que les surtensions ne viennent pas endommager votre informatique.



Figure III. 5 : Convertisseur DC/AC

Dans le cas du photovoltaïque, les onduleurs DC/AC sont des générateurs de courant alternatif à partir de courant continu, nécessaires pour faire fonctionner des appareils ménagers, de la Hi-Fi, de l'informatique.

En sortie des batteries le courant est continu et en général en 12 V (parfois 24 V), alors que les appareils de la maison sont en 230 VAC.

III.6 Charge Triphasé AC :

Un système de courant (ou tension) triphasé est constitué de trois courants (ou tensions) sinusoïdaux de même fréquence et de même amplitude qui sont déphasés entre eux d'un tiers de tour soit $2\pi/3$ radians (ou 120 degrés) dans le cas idéal. Si la fréquence est de 50 Hz, alors les trois phases sont retardées l'une par rapport à l'autre de $1/150$ seconde (soit 6,6 ms). Lorsque les trois conducteurs sont parcourus par des courants de même valeur efficace et sont déphasés de $2\pi/3$, le système est dit équilibré.

Dans le cas de la distribution électrique, le réseau peut se modéliser par trois sources de tension sinusoïdales d'amplitude identique, par exemple 230 V efficaces dans la plupart des pays européens, présentant un angle de phase de 120° entre elles. Idéalement la tension des trois phases est constante et indépendante de la charge, seul le courant de chaque phase devant être dépendant de la puissance de sortie.

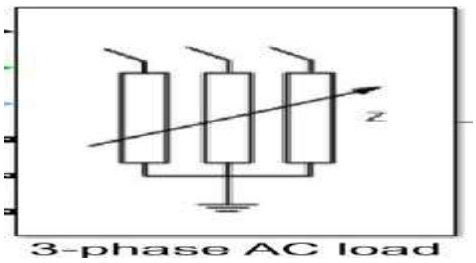


Figure III. 6 : 3-phasé charge en courant alternatif

III.7 Batterie :

Une batterie d'accumulateurs, ou plus communément une batterie1, est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension et de capacité désirée. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellules.

On appelle aussi batteries les accumulateurs rechargeables destinés aux appareils électriques et électroniques domestiques.

La batterie d'accumulateurs permet de stocker l'énergie électrique sous forme chimique et de la restituer sous forme de courant continu, de manière contrôlée.

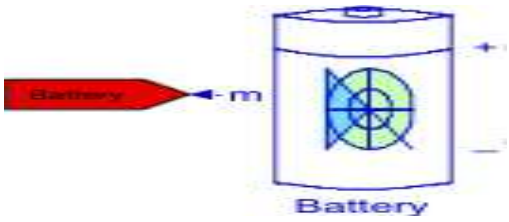


Figure III. 7 : Batterie

III.8 Contacteur :

Un contacteur est un organe électrotechnique avec la même fonction qu'un relais électromécanique, mais dont les contacts sont prévus pour supporter un courant beaucoup plus important. Ainsi, ils sont utilisés afin d'alimenter des moteurs industriels de grande puissance (plus de 0.5 kW) et en général des consommateurs de fortes puissances.

Ils sont aussi utilisés en milieu domestique pour alimenter des appareils électriques comme le chauffage ou le chauffe-eau, car les organes de commande (thermostat, interrupteur-horaire et autres contacts de commande) risqueraient d'être rapidement déteriorés par le courant trop important.

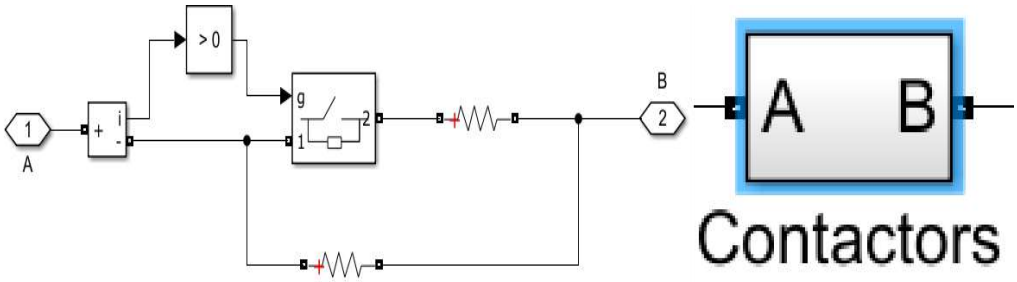


Figure III. 8 : Contacteurs

III.9 Super condensateur :

Un super condensateur est un condensateur de technique particulière permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie intermédiaires entre les batteries et les

condensateurs électrolytiques classiques.

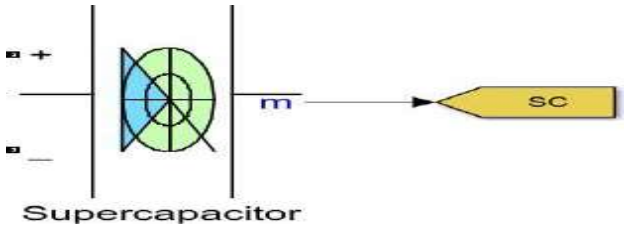


Figure III. 9 : Super condensateur

Composés de plusieurs cellules montées en série-parallèle, ils permettent une tension et un courant de sortie élevés (densité de puissance de l'ordre de plusieurs kW/kg) et stockent une quantité d'énergie intermédiaire entre les deux modes de stockage cités ci-dessus (densité d'énergie de l'ordre de quelque Wh/kg), et peuvent la restituer plus rapidement qu'une batterie. Ils sont donc souvent utilisés comme élément de stockage d'appoint d'énergie, en complément à des batteries ou à une pile à combustible. Ils présentent notamment l'intérêt d'être efficaces par très faible température.

Un super condensateur est principalement constitué de collecteurs de courant (généralement en aluminium), d'électrodes (une anode et une cathode) généralement en charbon actif imprégnées d'un électrolyte organique ou aqueux, et d'un séparateur qui isole les deux électrodes l'une de l'autre.

III.10 résultats de simulations :

Après la simulation on a obtenir les courbes suivants :

- ***Pille a combustible :***

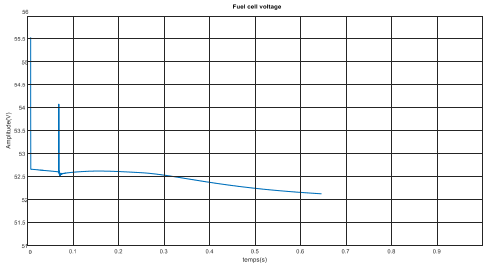


Figure III.12 : Tension de pile à combustible

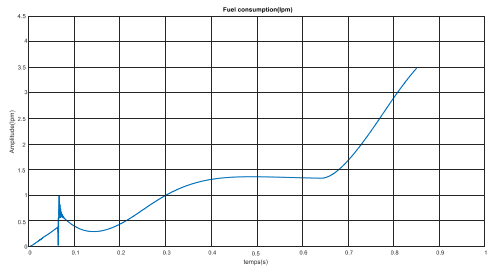


Figure III.13 : consommation de carburant

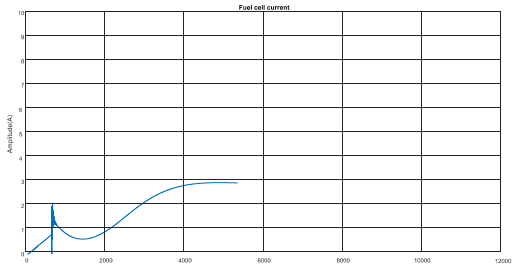


Figure III.14 : courant de pile

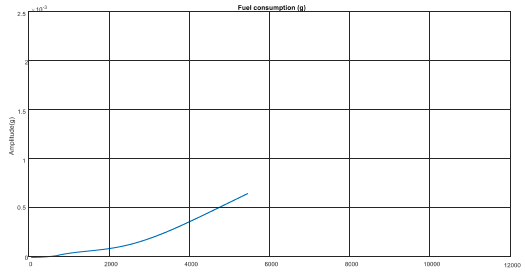


Figure III.15 : consommation de carburant

- ***convertisseur :***

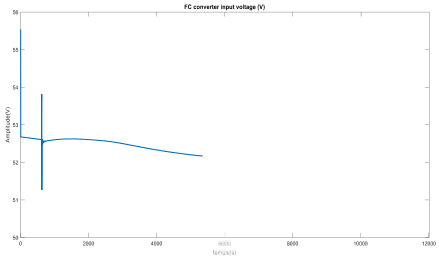


Figure III.16 : tension d'entrée du convertisseur fc

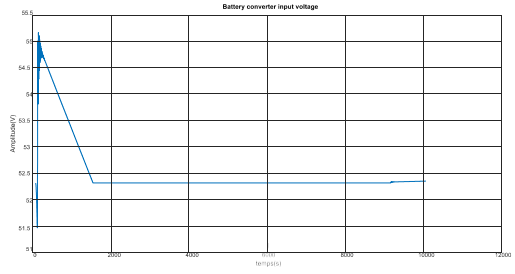


Figure III.17: tension d'entrée du convertisseur de batterie

➢ ***Puissance :***

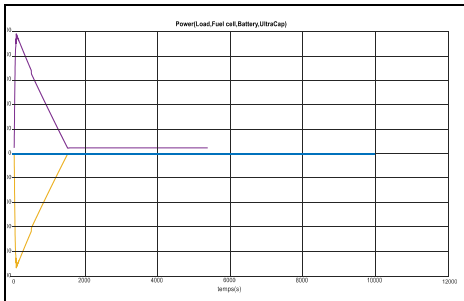


Figure III.18 : puissance (charge, pile à combustible, batterie, ultra cap

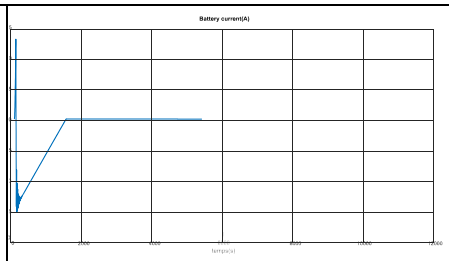


Figure III.19 : courant de batterie

➢ ***Batterie :***

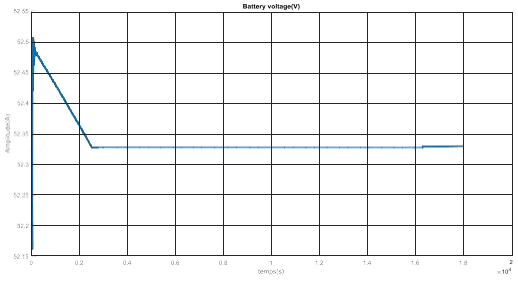


Figure III.20 : tension de batterie

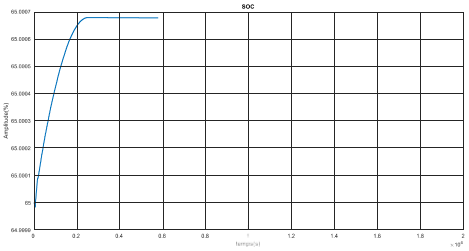


Figure III.21 : SOC

➢ ***Charge :***

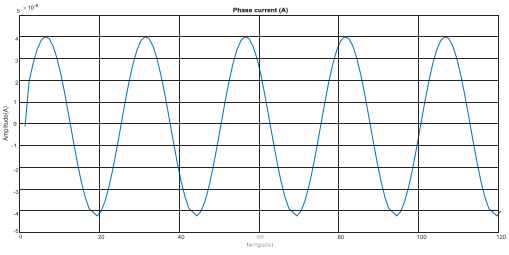


Figure III.22 : Courant de phase

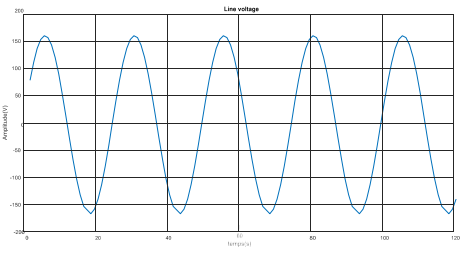


Figure III.23 : line de voltage

III.11 CONCLUSION

Même si la technologie des piles à combustible est apparue au dix-huitième siècle, mais ses intérêts technico-économiques se sont révélés qu'au début des années soixante-dix. Sachant que pouvoir connaitre les caractéristiques de fonctionnement dynamique ainsi que l'influence des conditions opératoires, constituent une base de données, qui est un champ de recherche pour un scientifique. Donc le travail expérimental est la clef qui nous permettra de résoudre tous les problèmes, ou du moins faire une approche de résolution en se basant sur la théorie établie auparavant.

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.

Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons) ; une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

L'électrolyte à la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.

L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

Dans le langage courant, les piles à combustible utilisant généralement l'hydrogène ou un combustible hydrogéné sont appelées « piles à hydrogène ».

Dans cette étude, nous avons effectué plusieurs manipulations afin de mieux comprendre le fonctionnement des piles PEMFC. En manipulant ces piles, nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation parce que plusieurs phénomènes contribuent au bon fonctionnement de cette dernière. Notre choix de commencer notre étude par une pile unitaire avant d'entamer l'assemblage nous a été essentiellement bénéfique, ceci nous a permis de mieux comprendre les processus électrochimiques et dynamiques à l'intérieur d'une seule pile et donc de conclure que : L'architecture de la pile, l'humidification de la membrane ainsi que les conditions opératoires jouent un rôle prépondérant qui influence les performances de cette dernière .nous avons constaté que l'humidification adéquate de la membrane ainsi qu'une température, pression et concentration des gaz réactifs appropriés sont les conditions qui adhérent au bon fonctionnement de la pile et que tous ces paramètres doivent être optimaux pour obtenir des bonnes performances. L'augmentation de la température est indispensable pour augmenter les performances, mais en même temps elle dessèche la membrane et si nous l'humidifions trop elle s'inonde et réduit les

performances. Alors que si nous augmentons la pression , nous obtenons de meilleur transfert de matière qui se traduit par une réduction des polarisations d'activation et de concentration , cela surtout à des fortes densités de courant, mais si elle dépasse un certain seuil elle peut perforer la membrane, c'est pour cela qu'il est indisponible de trouver le meilleur compromis entre ses facteurs pour augmenter la conductivité de la membrane et avoir un bon aménagement des fluides et de la chaleur à l'intérieur de la pile . Avec ces manipulations, nous avons constitué une base de données expérimentale pour la modélisation. [15].

L'objectif de ce travail est d'utiliser ces piles pour alimenter un réseau électrique ce qui rend une large gamme d'utilisation, et cela a été prouver par les différents résultats obtenus par simulation.

[1] S.MEZZAI, K.TADJINE « Étude D'un Système de production de l'énergie électrique triphasé à base de la pile combustible» Mémoire de fin Cycle, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2015.
[2] S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf « Optimisation du dimensionnement d'un système de production de l'énergie électrique triphasé a base de la pile combustible», article (reçu le 10 juin 2017 -accepté le 30 juin 2017).
[3] W.HANKACHE,« Gestion Optimisée de l'Energie électrique d'un groupe électrogène à pile à combustible », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, 2008.
[4] Notes de cours, B. Azoui, Master Energies renouvelables/stockage UB2MB, 2020/2021
[5] mémoire de Mme BEN YAHIA NAIMA , Modélisation et simulation d'un système hybride(Photovoltaïque – Pile à combustible) , 2019 / 2020
[6] - enfsolar, solar panel prices on the link : https://www.enfsolar.com/pv/panel
[7] - enfsolar, inverter prices on the link : https://www.enfsolar.com/pv/inverter [8] - enfsolar, solar panel mounting system prices on the link : https://www.enfsolar.com/pv/mounting-system [9] - wikipedia, solar power in algeria on the link : https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country
[10] - britannica, solar energy on the link : https://www.britannica.com/science/solar-energy
[11] - energy, photovoltaic technology basics on the lonk : https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics
[12] - electrical4u, solar cell working principle on the link : https://www.electrical4u.com/solar-cell/
[13] - environmentalsystemsresearch.springeropen, photovoltaic modeling on the link : https://environmentalsystemsresearch.springeropen.com/articles/10.1186/s40068-015-0047-9
[14] - alternative-energy-tutorials, solar cell I-V characteristic on the link : https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html
[15] - electrical4u, characteristics and parameters of a solar cell on the link :45 https://www.electrical4u.com/characteristics-and-parameters-of-a-solar-cell/
[16] - electrical4u, standalon power sustem on the link : https://www.electrical4u.com/what-is-standalone-solar-system/
[17] - cleanenergyreviews, hybrid power systems on the link : https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/8/14/what-is-hybrid-solar
[18] - energy, PV/grid-conected energy system on the link : https://www.energy.gov/energysaver/grid-connected-renewable-energy-systems
[19] - homerenergy, HOMER modeling on the link : https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html