

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE- ÉLECTROTECHNIQUE
FILIÈRE :ELECTROTECHNIQUE
OPTION :COMMANDE ÉLECTRIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Modélisation d'un compresseur alimentant d'une pile à combustible type PEMFC

Présentée par : Hamlaoui roumaïssa
Guedouari salem

Soutenu le : 30/09/2020

Devant le jury composé de :

Pr. MAGHERBI Mohamed chaouki	Professeur	Président
Dr. SAADI Aïcha	MCA	Encadreur
Dr. HADHRI Amel	MCA	Examinateur

Année Universitaire : 2019/2020

جمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Modélisation d'un compresseur alimentant
d'une pile à combustible type PEMFC**

Présenté par :

HAMLAOU ROUMAÏSSA
Aicha GUEDOUARI Salem

Avis favorable l'encadreur :

Dr. SAADI

Avis favorable du Président du Jury

Pr. MAGHERBIMohamed Chaouli

Cachet et signature

Dédicaces

À

mes parents,

mes chères soeur "sadya,hayet,samira", et mes chères frère "hicham,walid"

toute ma famille,

mon oncle et à mon partenaire commerciale guedouari salem,

tous mes amies,

Et à tous la promotion d'électrotechnique surtout groupe commande 2019/2020,

hdijila, widad, atra, fouzia ,Ahmed, hamid, housseem, Akram, djamel eddin,.

je dédie ce modeste travail.

HAMLAOUI Roumaissa

Dédicaces

À

Je dédis ce modeste mémoire ,

A ma famille, qui m'a encouragé ,

D'aller en avant et qui m'a donnée tout,

son soutien pour reprendre mes études,

ma femme saliha qui m'a donné son,,

L'encouragement permanent durant toutes mes ,

Années d'études.

mes filles (asma;dounya;nour;aïcha;sara) ,

GUEDOUARI Salem

Remerciements

Avant toute chose, je remercie dieu qu'il a donné le tout puissant, la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Je voudrais exprimer toute gratitude à mon encadreur de ce memoire Dr.Saadi Aicha pour, sa patience,son soutien et ses encouragements et aussi ses conseils,les efforts et les aidées qu'elle a donnée pendant tout au long de ce travail.

Toutes nos expressions de gratitude et de reconnaissance vont vers les membres du jury. Je remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département électrotechnique pour la formulation qu'ils nous ont donné notre cycle d'étude.

Je voudrais remercier vivement Pr.Magherbi Mohamed Chaouki, pour avoir accepté d'en présider et le jury Dr.Hadhri Amel pour son évaluation de nos travail de thèse.

Enfin, je remercie, avec toute la suprême sincérité tout ceux qui ont aidé de près ou de loin pour terminer et réaliser mon projet de fin d'étude.

Résumé

Dans ce mémoire , on a modélisé le compresseur centrifuge d'air qui alimentant la cathode de la pile à combustible (PEMFC), a grande puissance , où le changement de charge entraîne le changement de la consommation du courant électrique et donc le changement des réactions chimiques, ce qui oblige le compresseur à changer la pression et le débit d'air adaptée à la charge donc on a proposé technique de la commande, par moteur (MSAP) électrique Qui est contrôle le compresseur et avec la pile à combustible connectée en cascade par une chaine de convertisseur l'hacheur elevateur de tension(Boost),et le ondeleur très phasés , ce systeme de pile a combistuble garantit a vitesse appropriée jusqu'à ce que nous obtenions sur les changements correspondent à la charge.les résultats de simulation de systemes phisique plus illustratifs de notre travail en tenant compte de l'effet debit d'air raccordement en et la pression sur la production électrique

Les mots clés : Compresseur centrifuge d'air, Pile à combustible (PEMFC), Modélisation ,Moteur (MSAP) , Convertisseur (DC/DC) , Convertisseur (DC/AC) .

ملخص

في هذه الرسالة قمنا بتعديل ضاغط الهواء المركزي الذي يغذي الكاثود لخلية الوقود (PEMFC) ، بطاقة عالية ، حيث يتسبب تغير الحمل في تغيير استهلاك التيار الكهربائي و بجالي تغيير الضغوطات المواد الكيميائية ، والتي تلتزم الضاغط بتغيير الضغط و معدل تدفق الهواء المتكثف مع الحمل لذلك اقترحنا تقنية الذي يتحكم في الضاغط و مع خلية الوقود المتصلة في سلسلة من خلال (MSAP) التحكم ، عن طريق محرك كهربائي ، و عاكس الطور ذاته ، نظام خلية الوقود هذا (Boost) سلسلة حول ، و منظم الجهد التصاعدي . ضمانات بالسرعة المناسبة حتى نحصل على التغيرات تناسب مع الحمل . نتائج محاكاة الأنظمة الفيزيائية أكثر توضيحاً لعمليا مع مراعاة تأثير تدفق الهواء المتصل و الضغط على الإنتاج الكهربائي .

الكلمات المفتاحية : ضاغط هواء بالطرد المركزي ، خلية الوقود (PEMFC) ، العزم المحرك ، المحرك (MSAP) ، محول (DC / AC) ، محول (DC / DC)

Modélisation d'un compresseur alimentant d'une pile à combustible type PEMFC

Guedouari salem

7 novembre 2020

Table des matières

table des matière	I
Liste des figures	VI
Liste des tables	IX
Introduction générale	1
1 Généralités sur les Piles a Combustible	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les déférents types de piles à combustible	3
1.2.1 Principe de fonctionnement	4
1.3 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)	7
1.3.1 Constitution d'une PEMFC	8

1.3.2	Avantages des piles à combustible	10
1.3.3	Inconvénients des piles à combustible	11
1.4	Présentation du système PEMFC	11
1.4.1	Dimensionnement d'un stack	13
1.5	Caracteristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC	14
1.6	Modélisation d'une pile à combustible	15
1.7	Conclusion	18
2	Généralités sur groupe Moto-Compresseur	20
2.1	Introduction	20
2.2	Les types de compresseurs	21
2.2.1	Les compresseurs alternatifs	21
2.2.2	Les compresseurs rotatifs	22
2.2.3	Compresseurs volumétriques	22
2.2.3.1	Compresseurs volumétriques alternatifs	22
2.2.3.2	Compresseurs volumétriques rotatifs	25

2.2.3.3	Compresseur à palettes	26
2.3	Les turbocompresseurs (compresseurs dynamiques)	27
2.3.1	Compresseurs centrifuges	28
2.3.2	Compresseurs axiaux	28
2.4	Comparaison entre le compresseur axial et centrifuge	29
2.5	Modélisation du compresseur centrifuge	30
2.6	Moteur MSAP	33
2.6.1	Modélisation de la machine	33
2.6.2	Transformation de Park	37
2.7	Conclusion	39
3	Modélisation des convertisseurs statiques (DC/DC,DC/AC)	40
3.1	Introduction	40
3.2	Convertisseur continu/alternatif (DC/AC)	40
3.2.1	Modélisation de l'onduleur de tension	41
3.2.2	Principe de la commande MLI	43

3.3	Convertisseur continu/continu (DC/DC)	44
3.3.1	Les avantages et des inconvénients de convertisseur hacheur Boost	45
3.3.1.1	Les avantages	45
3.3.1.2	Les inconvénients	46
3.4	Conclusion	47
4	Simulation et resultats de systeme pile à combistuble(PEMFC) liée par le groupe moto-compresseur	48
4.1	Introduction	48
4.2	Simulation du systemes pile à combustible raccord avec le compresseur	48
4.2.1	Caractéristique de (P à C)	49
4.2.2	Simulations des convetisseurs (DC/DC),(DC/AC)	51
4.2.3	Caractéristiques de (P à C) en fonction de temps	52
4.2.4	Caractéristiques de moteur MSAP	54
4.2.5	Caractéristiques du groupe moto-compresseur	56
4.2.6	Resultats simulations des convertisseurs (DC/DC),(DC,AC)	58

4.3 Conclusion	60
Conclusion générale	61
Bibliographie	72

Liste des figures

1.1	Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.	5
1.2	Photographie d'une pile à combustible de type PEMFC.	9
1.3	Empilement de cellule s« stack ».	9
1.4	Différents constituants d'une cellule.	10
1.5	Schéma simplifié du système (P à C)	11
1.6	Caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEMFC. . .	14
2.1	Schéma des différent types de compresseur,A)- compresseurs volumé- triques, B)- compresseurs dynamiques	23
2.2	Schema represente le compresseur à piston	24
2.3	Schema represente le compresseur à membrane.	25
2.4	Schema represente le compresseur à vis.	26
2.5	Schema represente le compresseur à palettes	27
2.6	Schema represente le compresseur centrifuge	28
2.7	Schema represente le compresseur axia.	29
2.8	Schema represente du compresseur centrifuge [12]	31

2.9	Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère(a-b-c).	34
2.10	Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (d-q).	37
3.1	Schéma de l'onduleur triphasé	41
3.2	Principe de la commande MLI naturel.	44
3.3	Schema bloc de l'hacheur élévateur boost de tension.	45
4.1	Caracteristique tension de sortie de(PEMFC).	49
4.2	Caracteristique de puissance de la PEMFC PEMFC.	50
4.3	Schéma de simulation types des convertisseur,A)-Schema de simulation l'hacheur élévateur de tension(Boost) , B)-Schema de simulation onduleur triphasé avec la commende MLI	51
4.4	L'effet de la température sur la tension des stacks du cellules pile à Combustible PEMFC.	52
4.5	L'effet de la température sur la puissance des stacks du cellules pile à Combustible PEMFC.	53
4.6	L'effet de la surface sur la tension des stacks du cellules pile à Combustible PEMFC	53
4.7	Variation couple électromagnétique en fonction de temps.	54
4.8	Variationde du puissance en fonction de temps.	55
4.9	Variationde de la vitesse en fonction de temps.	55
4.10	l'Effet de la température du compresseur en fonction de temps.	56
4.11	Caractéristique de debit en fonction de temps.	57
4.12	Caractéristique de la puissance en fonction de temps.	57

4.13	Caractéristique la pression de sortie en fonction de temps.	58
4.14	L'allure de tension a la sortie de l'hacheur.	59
4.15	L'allure de tension a la sortie de l'onduleur.	59
4.16	Modele globale des systeme pile à combustible (PEMFC).	71

Liste des tables

1.1	Différents types de piles à combustible[4]	6
2.1	Les avantages et les inconvénients de chaque compresseur.	30
4.1	Limites de fonctionnement et pureté des gaz de la (P à C)30kW en mode Hydrogène/Air.	65
..		

Introduction générale

L'économie mondiale et le développement industriel ont modifié le concept de richesse des nations. Ce dernier est devenu étroitement lié à la capacité de production, et par suite aux ressources énergétiques disponibles et leurs utilisations dans l'économie. Actuellement, l'énergie est l'indicateur principal de la situation économique d'un pays, d'où la nécessité de développer ce secteur malgré ses contraintes diverses actuelles. La production d'énergie actuelle doit affronter deux contraintes majeures : le non renouvellement des ressources d'une part et un réchauffement trop rapide du climat d'autre part. En effet, les sources primaires d'énergie actuellement utilisées sont à réserves finies que ce soit pour les énergies fossiles (pétrole, charbon, méthane) ou pour les énergies fissiles (uranium). D'autre part, la combustion des hydrocarbures et l'échappement des gaz qui accentuent l'effet de serre, posant ainsi un défi important vis-à-vis du climat terrestre. De même la fission nucléaire engendre des déchets radioactifs à grande durée de vie et la pérennité du stockage de ces matières dangereuses n'est pas encore garantie. Il s'avère donc intéressant de trouver une source basée sur une matière première abondante sur notre planète, et qui pourra remplacer les sources à base de pétrole utilisées à l'heure actuelle. L'hydrogène est l'élément le plus abondant de notre planète, il a été identifié pour la première fois par Henry Cavendish en 1766. Cependant, il n'existe pas dans la nature à l'état pur, mais plutôt lié à d'autres atomes comme le carbone ou l'oxygène. Par exemple, l'eau qui couvre 70% de la surface du globe terrestre, comporte deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène. Si actuellement les procédés les plus rentables de production d'hydrogène sont basés sur le craquage des molécules de gaz naturel, de nouveaux procédés d'extraction de l'hydrogène pur sont en cours de développement. Parmi ces méthodes, on peut citer principalement l'électrolyse de l'eau. Pour que le cycle de production d'énergie soit rentable, l'électrolyse est surtout réalisée en utilisant de l'élec-

tricité générée par des sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydraulique, marémotrice ...). Ces méthodes sont intéressantes car elles ont peu d'impact sur l'environnement. Du point de vue de l'utilisation de l'énergie, l'électricité est un vecteur très souple, à pollution locale (déchets, bruit, ...) et facilement réglable. Il peut être obtenu à partir d'hydrogène grâce aux piles à combustible qui permettent la conversion directe de l'énergie chimique du couple H₂/O₂ en énergies électriques. L'hydrogène pourra ainsi occuper une place importante dans la production d'énergies comme vecteur d'énergie. L'objectif principal de ce travail a été organisé de façon complémentaire. Il est ainsi structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre, concerne d'une façon générale sur la pile combustible. Nous décrivons l'histoire de la pile combustible et leurs conceptions, après nous indiquons les différents types (P à C), nous intéressons plus particulièrement à (P à C) PEMFC leur structure, principe de fonctionnement et aussi les avantages et les inconvénients, ainsi que les majeurs techniques de production d'hydrogène, et la modélisation de la pile combustible, stockage et sécurité.
- Le deuxième chapitre, concerne sur compresseur, nous donnons une rappel générale sur les types de les compresseurs. Puis la comparaison, nous présentons les technologies les plus utilisés et aussi les associations sur (P à C) PEMFC et les avantages et les inconvénients qui concerne est des convertisseurs. et découvre un peu de tâche la modélisation du compresseur centrifuge est consacré la modélisation de la machine (les équations élec, meq ..)
- Le troisième chapitre, est consacré aux les convertisseurs DC-DC, AC-DC après quelques rappels sur les convertisseurs, aussi nous intéressons d'expliquer la méthode de la modélisation consacrée et le principe de la commande de chaque convertisseurs
- Le quatrième chapitre, représenté aux résultats de simulation de la (P à C) et le compresseur centrifuge précédents, nous réalisons sous l'environnement MATLAB/Simulink

Chapitre 1

Généralités sur les Piles à Combustible

1.1 Introduction

La pile à combustible (P à C) est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un gaz carburant directement en électricité. Elle est largement considérée comme une source de puissance alternative aux sources actuelles et sa technologie novatrice permet des applications dans des différents domaines très variés.

1.2 Les différents types de piles à combustible

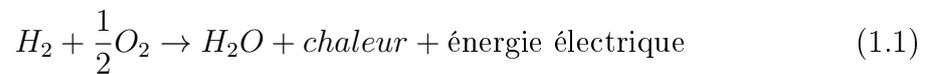
Il existe actuellement cinq technologies de piles à combustible classées selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement, basse ($< 150C^0$), moyenne ($200C^0$), haute ($650C^0 - 1000C^0$). [1]

- Pile à membrane polymère échangeuse de protons, proton Exchange Membrane Fuel Cell : PEMFC
- Pile à acide phosphorique, Phosphoric Acid Fuel Cell :PAFC.
- Pile à oxyde solide, Solid Oxide Fuel Cell :SOFC.

- Pile à carbonate de fondu, Molten Caronat Fuel Cell : MCFC.
- Pile alcaline, Alkaline Fuel Cell : AFC.
- Pile alimentée directement par méthanol, Direct Methnol Fuel Cell : DMFC.[2]

1.2.1 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[3]



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^+/H_2



A la Cathode : couple O_2/H_2O



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 » (1.1)

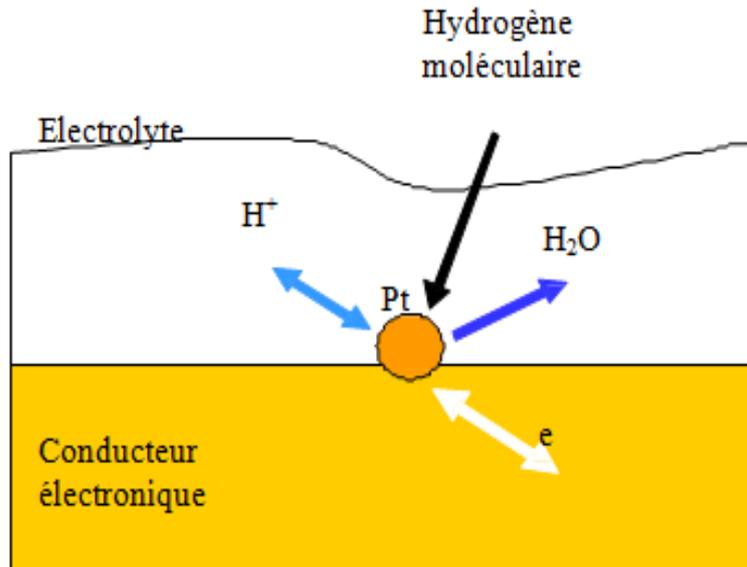


FIGURE 1.1 – Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

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 thermique-ment 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 Électrode-Membrane-Électrode, appelé souvent EME.

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

TABLE 1.1 – Différents types de piles à combustible[4]

Paramètre	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Puissance électrique	1 W - 250 kW	10 - 50 kW	100 - 200 kW	500 kW - 10 MW	1 kW - 10 MW	mW - 100 kW
Densité de courant	0,6 A.cm ⁻²	0,09 A.cm ⁻²	0,18 A.cm ⁻²	0,13 A.cm ⁻²	0,25 - 1,25 A.cm ⁻²	-
Rendement	30 - 50 %	40 - 60 %	35 - 45 %	50 - 60 %	50 - 70 %	20 ? 30 %
Durée de vie	5000 h	2000 h	40000 h	20000 h	20000 h	100000 h
Pression	2 - 5 bar	1 bar	1 bar	1 bar	1 bar	-
Température	60 - 90 °C	50 - 250 °C	160 - 220 °C	600 - 700 °C	800 - 1000 °C	90- 120 °C
Electrolyte	Polymère perfluoré (solide)	Hydroxyde de potassium (liquide)	acide phosphorique (liquide)	carbonate de lithium / potassium (liquide)	Céramique (solide)	Polymère
Catalyseur	Platine	Platine, nickel	Platine	Nickel	Pérovskites	Platine
Combustible	Hydrogène pur ou reformé	Hydrogène	Gaz naturel reformé	Reformage interne de gaz naturel	Gaz naturel direct	méthanol
Applications	Transports portables, stationnaires	Spatiales transports	Transports stationnaires	Stationnaires	Transports stationnaires	applications mobile transport

Le tableau (1.1) rassemble les principales caractéristiques de chaque assemblage (nature de l'électrolyte, réactifs consommés, température de fonctionnement...). Les différents électrolytes utilisés nécessitent des architectures et des températures de fonctionnement variées. Les mêmes réactifs sont utilisés pour ces différentes applications : de l'hydrogène (pur ou, reforme) et de l'air (ou de l'oxygène pur pour les AFC), l'exception des piles DMFC qui permettent la combustion directe du méthanol et des SOFC et MCFC capables d'oxyder également l'oxyde de carbone CO. [5] Les températures de fonctionnement ($600C^0$) des piles dites « hautes températures » (SOFC, MCFC) demandent des installations importantes pour assurer la montée en température. Ces piles sont alors plus adaptées à la production centralisée d'énergie avec cogénération.

En revanche, les piles « basses températures » peuvent être envisagées pour des applications portables et automobiles, comme nous l'expliquons dans la section suivante. Enfin, dans l'état actuel de développement, les filières PEMFC et SOFC présentent l'avantage d'un électrolyte solide et restent les principales architectures envisagées respectivement pour les applications portables et comme source auxiliaire de puissance en stationnaire.

1.3 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

Parmi les différents types de piles à combustible couramment développées, c'est la filière dite « à membrane échangeuse de protons » qui a été retenue par presque tous les acteurs de programmes automobiles dans le monde [6]. Généralement appelée PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), elle intéresse également les industriels pour des applications stationnaires (centaines de kW), portables (jusqu'à 100W) et transportables (de l'ordre de 100kW). Cette technologie retient l'attention pour trois raisons essentielles. Sa température de fonctionnement, relativement basse ($<100C^0$), d'environ ($80C^0$), laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante ; ce premier point est essentiel pour l'application automobile (La température de fonctionnement dans le domaine de l'automobile est entre ($-40C^0$) et ($85C^0$)). Elle est ensuite insensible à la présence de CO₂ dans l'air, contrairement à la fi-

lière alcaline. Ainsi, la PEMFC peut facilement utiliser l'oxygène de l'air ambiant dans la réaction chimique produisant de l'électricité. Enfin, elle est de technologie toute solide et peut donc prétendre à la fois à des durées de vie sensiblement supérieure aux filières à électrolyte liquide, ainsi qu'à une industrialisation plus simple de la filière. Ceci permet d'envisager un coût prospectif compatible avec le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières [7] et [8].

PEMFC concentre actuellement le plus gros effort de recherche et développement dans le monde. Les recherches visent essentiellement à augmenter les performances (en termes de rendement, compacité et masse) et à diminuer le coût (d'un facteur 5 à 100 selon le type d'application).

D'autre part, il est important de noter qu'un module de pile à combustible, doit pour fonctionner, être associé à des équipements auxiliaires qui assurent l'approvisionnement des réactifs (hydrogène et air), leur conditionnement (pression, débit), la gestion des produits de la réaction (eau, chaleur, électricité). Ces annexes peuvent représenter jusqu'à 60% en masse et en volume du système et une dépense énergétique de l'ordre de 20%. Parmi elles, le stockage du combustible constitue un verrou technologique majeur, car il conditionne pour certaines applications l'autonomie du système.

1.3.1 Constitution d'une PEMFC

Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments de cellules reliés par l'intermédiaire d'inter connecteurs (plaques bipolaires) formant ainsi un «stack». Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME)(1.2).

Dans cette partie, nous ne décrivons que la pile à membrane échangeuse de proton (PEM) : Les cellules individuelles sont électriquement inter connectées entre elles par des plaques bipolaires, d'épaisseur de l'ordre du centimètre. Chaque cellule d'une pile est constituée de plusieurs composants :[2]

- la membrane qui permet le transport de protons et sépare le carburant de l'oxydant.
- deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons) et une cathode (collectrice d'électrons).

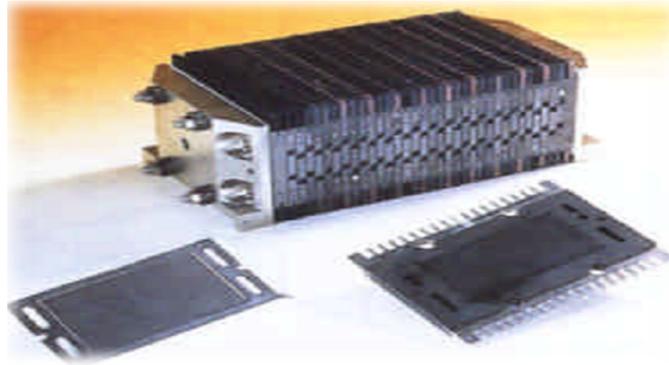


FIGURE 1.2 – Photographie d'une pile à combustible de type PEMFC.

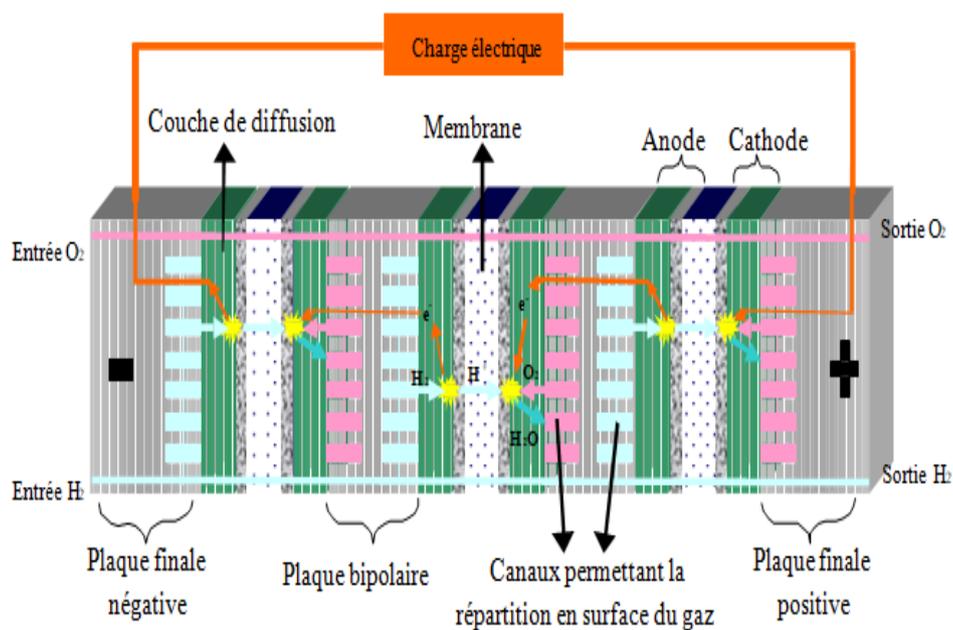


FIGURE 1.3 – Empilement de cellules « stack ».

- deux couches de diffusion qui approvisionnent en gaz réactifs les électrodes.
 - deux plaques bipolaires qui alimentent en gaz et évacuent l'eau produite.
 - les joints d'étanchéité qui empêchent le carburant de l'anode et l'oxydant de la cathode de se mélanger mais également de fuir vers l'extérieur de la pile.
- Ils sont présentés dans le Figure (1.4)

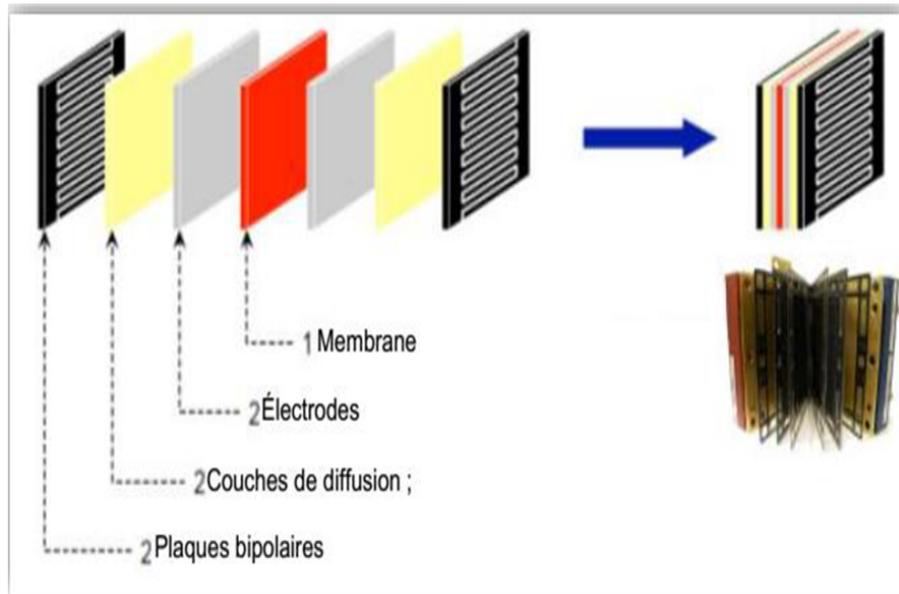


FIGURE 1.4 – Différents constituants d'une cellule.

1.3.2 Avantages des piles à combustible

- Haut rendement énergétique :Le rendement énergétique net électrique dépend du type de pile,et généralement élevé.
- Silencieuses :Lors de leur fonctionnement,les piles sont silencieuses :dans les systèmes(P à C),seuls certains organes comme les compresseurs,les pompes,le système de ventilation,produisent un léger bruit.
- Emissions de pollution limitées :On cite les piles à combustible comme à tout dans la lutte contre la pollution,les émissions produites par un système pile dépendent étroitement du carburant utilisé et de son origine.
- Modularité :Les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue.Il est donc possible en adaptant le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre $1kW$ et plusieurs MW .
- Diverses températures de fonctionnement :dans les deux cas basse ou élevée le fonctionnement de la pile est bien assuré.
- Pas de parties rotatives :Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible,aucun mouvement :il n'y a donc pas d'usure mécanique pour le Coeur de la pile.¹[4]

1.3.3 Inconvénients des piles à combustible

les piles à combustible pressentent beaucoup d'avantages, cependant elles présentent des inconvénients aussi :

- Le coût global.
- La fiabilité du système.
- La logistique de production du carburant.

1.4 Présentation du système PEMFC

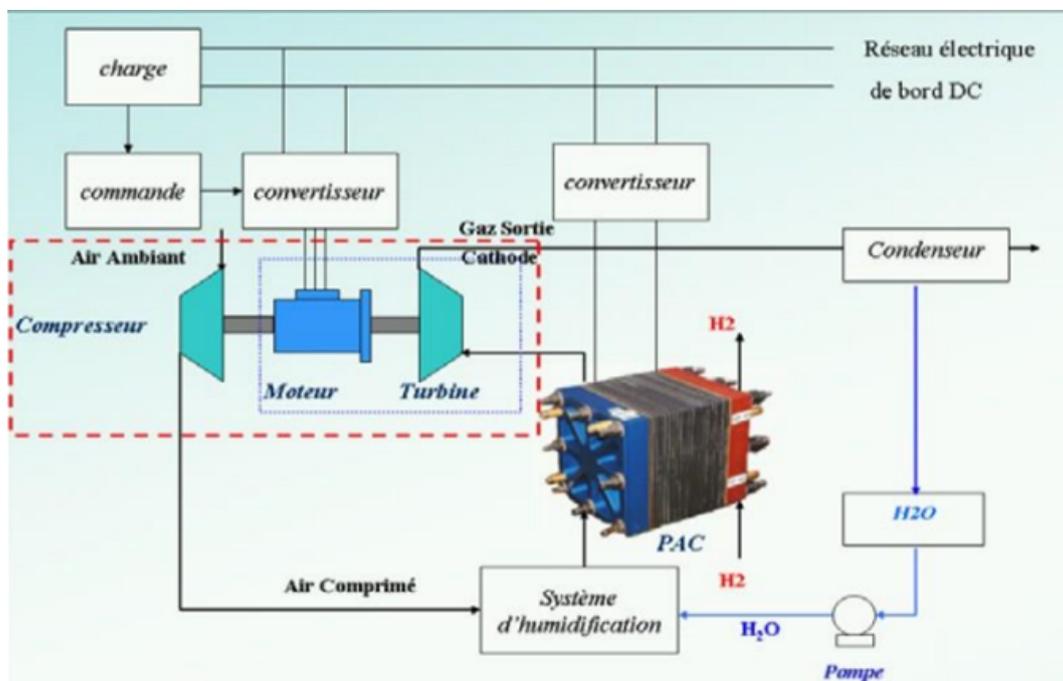


FIGURE 1.5 – Schéma simplifié du système (P à C)

Le système (P à C) constitue donc un générateur d'énergie électrique. C'est un dispositif complexe dont les performances dépendent du cœur du système (P à C) (le stack) mais également des débits, pressions et températures des gaz, carburant et comburant, et donc des auxiliaires. Autour du stack, élément actif, il faut mettre en oeuvre un certain nombre d'auxiliaires pour faire fonctionner correctement le générateur électrique et en obtenir le meilleur rendement. La figure représente, ainsi

le schéma de base décrivant le système (P à C), basé sur une pile du type PEMFC, qui comporte le stack et les différents auxiliaires :

- Le circuit de refroidissement, pour extraire la chaleur produite durant la réaction électrochimique.
- L'humidificateur pour maintenir l'hydratation des gaz et de la membrane de la (P à C).
- L'approvisionnement d'hydrogène, qui est souvent composé d'un réservoir d'hydrogène associé à un réducteur de pression.
- L'approvisionnement d'air (plus précisément d'oxygène), qui se compose souvent d'un moto-compresseur d'air qui peut-être couplé à une turbine de détente.
- Le convertisseur statique réalisant l'interface entre la (P à C) et le bus de courant continu (DC). Et finalement, un système de supervision permet de contrôler et de commander les différentes variables de travail (la température, la circulation d'air, l'écoulement d'hydrogène, l'hydratation des membranes de la (P à C), etc.) et de superviser la sûreté du système (P à C) [9].

Circuit de refroidissement :

il s'agit d'un circuit d'eau, qui permet de réguler la température interne de la (P à C). Ainsi, la température de fonctionnement pourra être maintenue, grâce au débit de l'eau de réfrigération régulée via une pompe.

Circuit d'alimentation en hydrogène :

Ce circuit a pour fonction d'alimenter le compartiment anodique de la (P à C) en combustible. Ce dernier peut être produit à partir d'un hydrocarbure au moyen d'un reformeur ou bien être stocké directement dans des réservoirs sous haute pression (de 300 à 700 bars). Les réservoirs haute-pression permettent de simplifier le schéma du circuit d'alimentation en combustible. En effet, grâce à un détendeur, il sera possible de réguler, presque instantanément, le débit d'hydrogène en fonction de sa consommation. Ce circuit doit également permettre de purger le compartiment anodique (voire même de réinjecter l'hydrogène non consommé) afin d'éviter l'accumulation d'azote et d'eau en provenance du compartiment cathodique dans ce compartiment.

Circuit d'alimentation d'air :

Ce circuit permet d'alimenter en comburant le compartiment cathodique de la pile. Comme pour l'hydrogène, le comburant (l'oxygène pur ou l'air) peut être stocké dans des réservoirs sous pression. Mais pour les applications transports (hors sous-marins et applications spatiales), l'alimentation se fait généralement à partir de l'air ambiant, qui est abondant et gratuit. Cependant, une telle alimentation présente également des inconvénients. L'air ambiant est en effet très souvent pollué par diverses particules (CO , les poussières, etc.), qui réduisent d'autant la durée de vie de la pile. Les piles PEMFC peuvent fonctionner en mode atmosphérique ou en mode pressurisé. En mode atmosphérique, l'alimentation de la pile se fait avec des pompes air. Pour les (PàC) d'une puissance supérieure à $1KW$, le fonctionnement en mode pressurisé est généralement préconisé. L'air comprimé est alors obtenu au moyen d'un groupe moto-compresseur. Ce dernier permet de fournir un débit d'air variable à différents niveaux de pression (typiquement de 1,5 à 4 bars).

1.4.1 Dimensionnement d'un stack

. Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné, le concepteur dispose de deux degrés de liberté voire annex A :

- Le nombre N de cellules
- La surface A

1.5 Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC

:

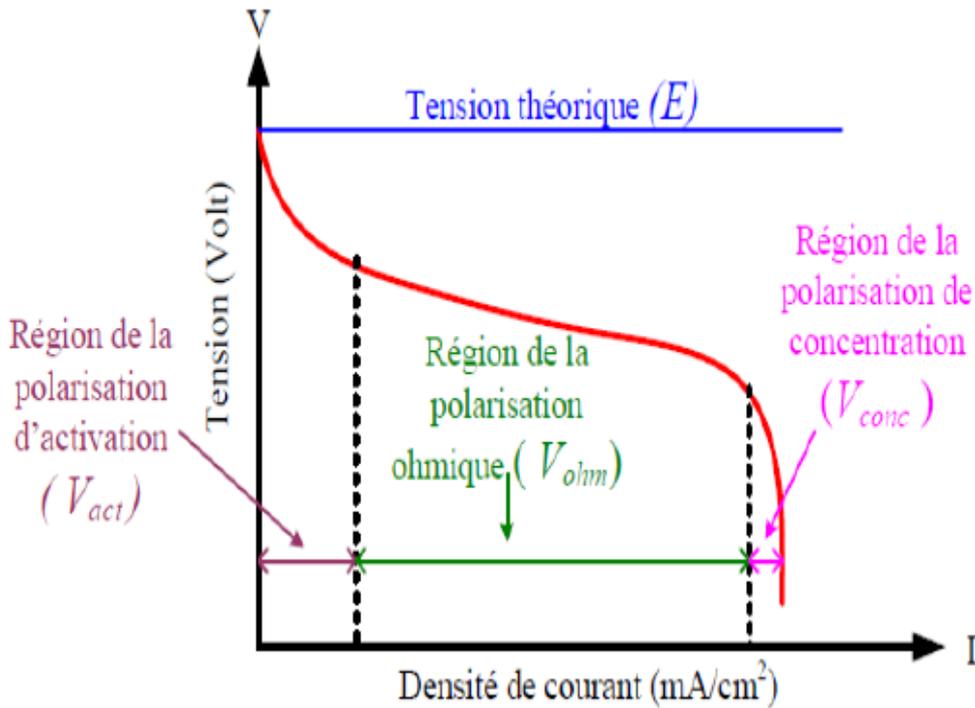


FIGURE 1.6 – Caractéristique tension-courant d'une pile à combustible PEMFC.

Les densités de courant que l'on peut obtenir en $\frac{A}{cm^2}$ varient en fonction du type de pile, de sa température de fonctionnement, de la densité de catalyseur, de la stoechiométrie de l'alimentation en gaz réactifs... A l'heure actuelle, on estime qu'une valeur de $0,5 A/cm$ est déjà une densité importante, mais certaines piles de petite taille atteignent les $2 A/cm$. Le potentiel thermodynamique théorique est donc de $1,23 V$. Cependant, la tension en circuit ouvert ($I = 0$) varie en réalité entre $0,9$ et $1,1 V$. Cette première réduction est liée aux irréversibilités des réactions électrochimiques, notamment de la réduction de l'oxygène à la cathode. De plus, pour les faibles densités de courant, des contre réactions sur les électrodes, dont l'importance est liée à leur cinétique, génèrent des surtensions d'activation.

Ensuite, pour la partie linéaire de la courbe, ce sont les pertes liées aux résistances électroniques et ioniques internes qui diminuent la tension entre électrodes.

Enfin, pour les hautes densités de courant, c'est la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes qui devient le facteur limitant. Ce phénomène est d'autant plus précoce si l'on utilise de l'oxygène actif). A partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement. [9]

1.6 Modélisation d'une pile à combustible

Afin de simplifier l'analyse, plusieurs hypothèses sont faites comme suit : [10]

- La pile est bien conçue pour que toutes les cellules fonctionnent de la même manière et peut être regroupée sous forme de pile.
- Tous les gaz obéissent à la loi des gaz parfaits et sont équitablement distribués.
- On suppose que le gaz d'hydrogène pur est fourni à l'anode à partir d'un réservoir d'hydrogène et le débit d'hydrogène d'entrée et le débit d'oxygène sont supposés avoir une humidité relative de 100%.
- Les températures de l'hydrogène à l'intérieur de l'anode et de l'oxygène à l'intérieur de la cathode sont égales à la température de l'empilement.
- Les pressions dans les canaux d'écoulement de gaz sont constantes. Le seul produit de réaction est l'eau liquide.
- Les températures de l'hydrogène à l'intérieur de l'anode et de l'oxygène à l'intérieur de la cathode sont égales à la température de l'empilement.

Le potentiel standard idéal d'une pile à combustible hydrogène/oxygène à les conditions d'état standard ($25C^0$ et $1atm$) sont de $1,229V$ avec un liquide produit de l'eau. Cependant, le potentiel réel de la cellule diminue de son potentiel d'équilibre en raison de pertes irréversibles. Il existe trois types de pertes irréversibles, à savoir les pertes d'activation, pertes ohmiques et pertes de concentration. Aux faibles densités de courant, les pertes d'activation de la réaction de réduction d'oxygène sont presque entièrement responsables de la chute potentielle de la cellule. Cependant, à des densités de courant élevées, les pertes de concentration deviennent plus importantes. La tension de sortie de la cellule unique est donnée par (1) selon les caractéristiques

de sortie PEMFC empiriques l'équation, qui a été développée par Amphlett et Kim. L'expression de la tension d'une cellule unique est :

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (1.4)$$

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

$$E_{Nernst} = \frac{1}{2f} \left[\Delta_G - \Delta_S(T - T_{ref}) + RT \left(\ln P_{H_2} + \frac{\ln P_{O_2}}{2} \right) \right] \quad (1.5)$$

La perte d'activation de PEMFC est causée par la lenteur cinétique des réactions se déroulant sur la surface active d'électrodes et il peut être calculé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} V_{act} &= \zeta_1 + \zeta_2 T + \zeta_3 T [\ln(C_{O_2})] + \zeta_4 T [\ln(i)] \\ \zeta_1 &= -\frac{\Delta G_c}{2F} - \frac{\Delta G}{\alpha n F} \\ \zeta_2 &= \frac{RT}{\alpha n F} \ln [n F A K_c^0 (C_{h+})^{1-\alpha_c} (C_{H_2o})^{\alpha_c}] + \frac{RT}{2F} \ln (4 F^4 K_\alpha^0 C_{h_2}) \\ \zeta_3 &= \frac{1 - \alpha_c}{\alpha_c n F} \\ \zeta_4 &= -\left(\frac{R}{2F}\right) + \left(\frac{R}{\alpha_c n F}\right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Dans ce modèle, tous les paramètres sont obtenus expérimentalement, et sont énumérés dans l'annexe B. Selon la loi de Henry.

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 * 10^6 \exp(-498/T)} \quad (1.7)$$

Différent des pertes ohmiques de l'équation empirique qui est déjà présenté, dans ce modèle, les pertes ohmiques consistent en chute de tension causée par R_M , la membrane équivalente l'impédance et la chute de tension provoquée par R_C , le contact résistances à la fois entre la membrane et les électrodes comme les électrodes et les plaques bipolaires. Il est constant une fois que la cellule est fabriquée.

Il peut être affiché comme :

$$V_{ohmic} = i R_{ohmic} = i (R_M + R_C) \quad (1.8)$$

L'impédance de membrane équivalente R_M peut être exprimée via la loi d'Ohm

$$R_M = \frac{r_M l}{A} \quad (1.9)$$

La résistivité r_M de la membrane échangeuse de protons de la série à Nafion peut être calculé par :

$$r_M = \frac{181.6[0.03(i/A) + 0.0625(T/303)^2(i/A)^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3(i/A)] \exp[4.18(T - 303)/T]} \quad (1.10)$$

Où λ est la teneur en eau de la membrane, qui est un paramètre réglable et fonction de l'humidité relative de le gaz dans l'anode, et a une valeur stoechiométrique. Dans ce modèle, l'effet des pertes de concentration est également considéré, qui est différent des modèles précédents. Concentration les pertes sont causées par le transport en commun, qui à son tour affecte la concentration d'hydrogène et d'oxygène à courant élevé densité. Ce terme est ignoré dans certains modèles, peut-être parce que il n'est pas souhaitable de faire fonctionner la cheminée dans des régions où la concentration les pertes sont élevées (l'efficacité est faible). Cependant, si la pile fonctionne à haute densité de courant, ce terme doit être inclus. Les pertes de concentration peuvent être exprimées comme :

$$V_{con} = Bl \ln\left(1 - \frac{J}{J_{Max}}\right) \quad (1.11)$$

Il existe une double couche de charge dans le PEMFC. James et Andrew ont analysé la double couche de charge à la surface de la cathode de la (P à C) et a donné un équivalent simple modèle de circuit du PEMFC dans lequel un condensateur électrique peut être considérée comme la couche de charge sur ou à proximité de l'électrode-interface d'électrolyte, qui est une réserve de charge électrique et l'énergie, comme le montre sur la figure (1.5), R_a est la résistance équivalente qui comprend l'activation résistance équivalente R_{act} et la concentration équivalente résistance R_{con} ; la capacité équivalente C peut effectivement lisser la chute de tension à travers R_a . En tant que fonction de la double couche de charge, le PEMFC porte une dynamique éminente caractéristiques. Si V_d est la chute de tension globale aux bornes de R_a , les caractéristiques dynamiques de la cellule unique peuvent être exprimées en équation différentielle (1.12), qui est distincte de l'état d'équilibre modèle.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{V_d}{T} \quad (1.12)$$

Où la constante de temps τ changera avec la charge changeante, ce qui affectera la réponse dynamique de la tension. la résistance équivalente R_a est fonction des pertes d'activation, de la concentration pertes et courant, comme indiqué dans (1.13). Le condensateur C peut être négligé en régime permanent.

$$\tau = CR_a = \frac{C(V_{act} + V_{con})}{i - i_C} \quad (1.13)$$

où i_C est le courant traversant la capacité équivalente C . Si la pile est fabriquée en série par N cellules simples identiques, la tension de sortie de la pile est :

$$V_{stack} = NV_{cell} \quad (1.14)$$

La puissance de sortie de la pile PEMFC est :

$$P_{stack} = V_{stack}i \quad (1.15)$$

La puissance consommée par la pile PEMFC est

$$P_{consumed} = (V_d + V_{ohmic})i \quad (1.16)$$

Ainsi, l'efficacité de la pile PEMFC est :

$$\eta = \frac{iV_{stack}}{E_{Nerst}i} = \frac{V_{stack}}{E_{Nerst}} \quad (1.17)$$

1.7 Conclusion

Au début de ce premier chapitre, nous avons présenté le problème énergétique dans le monde, l'énergie d'hydrogène est une énergie renouvelable pour le futur, la (P à C) permet de transformer efficacement de l'énergie chimique en énergie élec-

trique. Ce chapitre est consacré à la modélisation dynamique de la(P à C) de type (PEMFC). Cette modélisation est liée à plusieurs phénomènes physico-chimiques et même thermique complexe qui rendent son élaboration difficile. On a pu aussi, donner la variation de le courant et de la tension interne d'un module de puissance PEMFC.

Chapitre 2

Généralités sur groupe Moto-Compresseur

2.1 Introduction

Le Groupe Moto Compresseur est composé de l'association d'un de ces deux sous ensembles.compresseur d'air et d'une machine électrique tournante MSAP.Nous allons développer dans cette partie la modélisation.Un problème majeur dans les piles à combustible est la privation d'oxygène lorsque la charge change rapidement.Si la charge augmente,elle a besoin de plus Puissance;et le courant de la (P à C) augmente.Cela nécessite une accélération des réactions chimiques,ce qui entraîne une augmentation consommation d'oxygène Par conséquent,un contrôle précis du moto-compresseur,qui fournit de l'air à la pile à combustible,est important pour optimiser la puissance de sortie nette.

Le présent chapitre a pour le but de découvrir les différents types de compresseurs, critères de choix et de présenter les caractéristiques de construction de ces compresseurs. Un compresseur est un organe mécanique destiné à augmenter par un procédé uniquement mécanique la pression d'un gaz. Pour exercer la même fonction sur un liquide, quasi l'incompressible, on utilise une pompe. Les fluides traversant les compresseurs peuvent être de nature diverse :

- Gaz pur.
- Mélange gazeux.
- Vapeur surchauffée ou saturée.

Pour obtenir un accroissement de pression des fluides il y a eu recours à l'une des deux méthodes suivantes :

- La première, de beaucoup la plus importante en quantité, l'élévation de pression est obtenue en réduisant un certain volume de gaz par action mécanique.
- Tandis que la seconde, la pression est élevée en convertissant, de façon continue, l'énergie cinétique communiquée au gaz en énergie de pression.

Le compresseur est utilisé dans le circuit de conditionnement de l'air arrivant dans le compartiment cathodique d'une pile à combustible. Les contraintes sur ce compresseur sont :

- Compacité et poids.
- Rendement.
- Qualité du gaz en sortie (exempt d'huile et de particules).
- Coût.
- Les compresseurs utilisés dans ce type d'applications sont de type volumétrique car ils permettent de contrôler facilement le débit en sortie.

2.2 Les types de compresseurs

Ces types de compresseurs sont classés en deux familles :

2.2.1 Les compresseurs alternatifs

- Compresseurs à pistons

- Compresseurs à membranes.

2.2.2 Les compresseurs rotatifs

- Compresseurs à palettes.
- Compresseurs à lobes.
- Compresseurs mono vis
- Compresseurs double vis (ou hélico-compresseur).

Les compresseurs alternatifs ne sont pas utilisés, car leur couple est irrégulier et le débit en sortie est pulsé, de plus la lubrification est nécessaire et les compresseurs commerciaux ne sont pas de type sec.

Dans les applications de (P à C), ce sont les compresseurs rotatifs de type double vis qui sont utilisés, car ils n'ont pas besoin de lubrification.

D'après leurs principes de fonctionnement, on distingue les types suivants :

2.2.3 Compresseurs volumétriques

Ces compresseurs réalisent la compression du gaz par réduction du volume qui se distingue :

2.2.3.1 Compresseurs volumétriques alternatifs

On a deux types de ces compresseurs :

- Compresseurs à piston : Le compresseur à piston est l'un des tout premiers modèles de compresseurs, mais il reste le plus polyvalent et offre toujours un excellent rendement.
- Le compresseur à piston pousse : Un piston dans un cylindre au moyen d'une bielle et d'un vilebrequin. Si un seul côté du piston est utilisé pour la compression, le compresseur est appelé compresseur à simple effet.

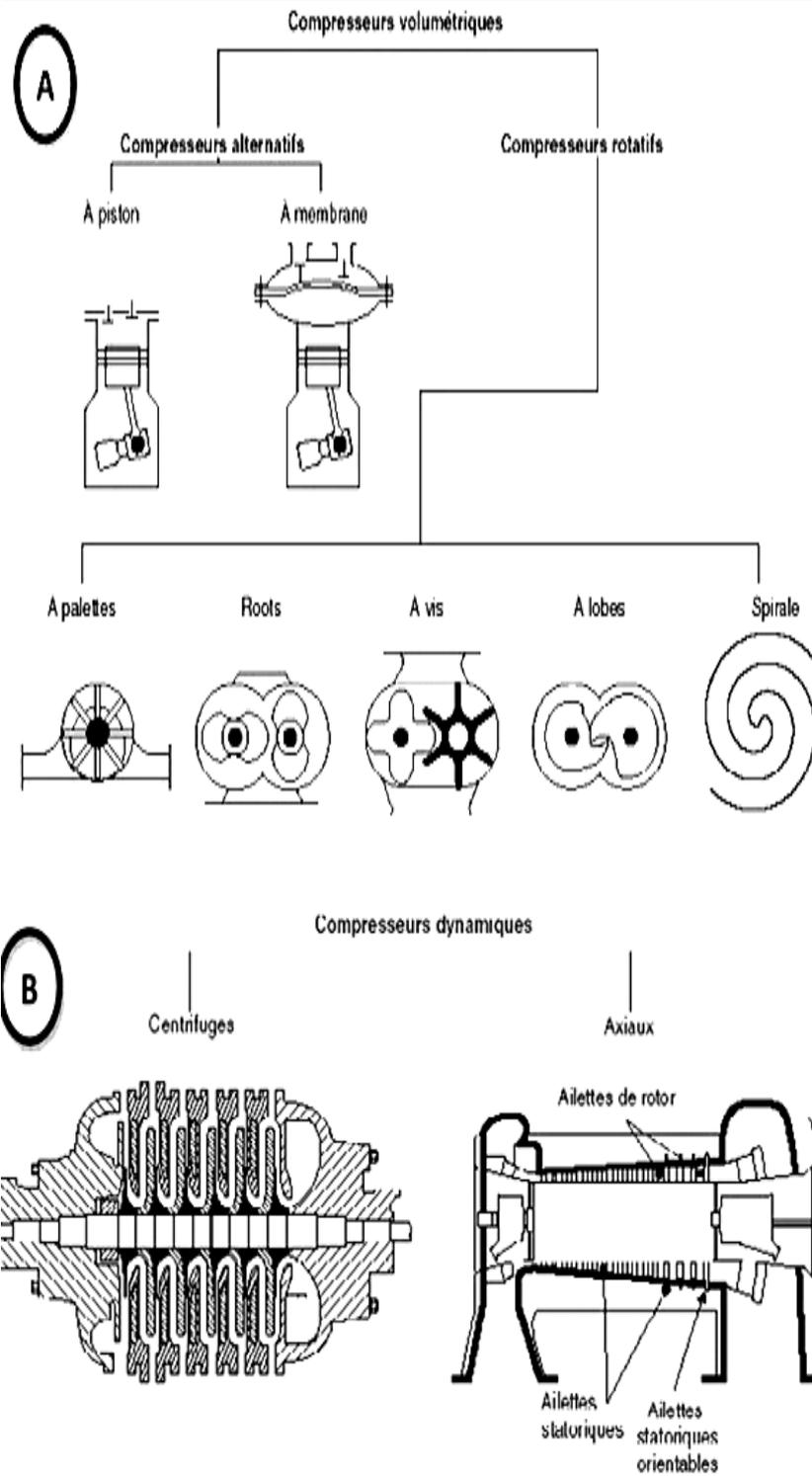


FIGURE 2.1 – Schéma des différents types de compresseur, A)- compresseurs volumétriques, B)- compresseurs dynamiques

La polyvalence des compresseurs à piston ne connaît virtuellement aucune limite. Ils compriment aussi bien l'air que le gaz avec de très faibles altérations.

La configuration d'un compresseur à piston peut être mono-cylindre pour de faibles pressions, de faibles volumes ou multi-étages pour comprimer un fluide à de très hautes pressions.

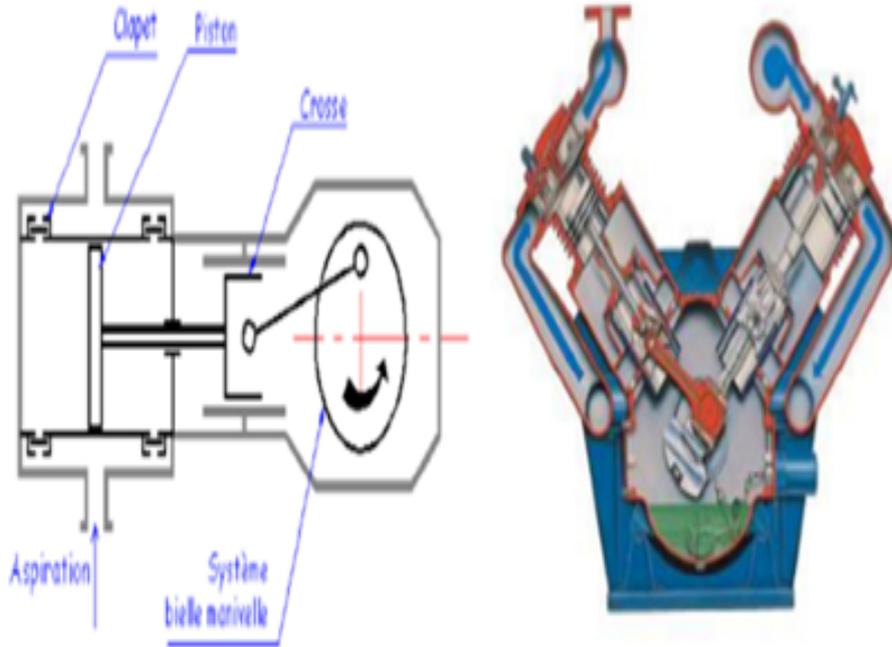


FIGURE 2.2 – Schema représente le compresseur à piston .

Dans ce type de compresseurs, le gaz est comprimé par paliers, sa pression augmentant palier après palier jusqu'à devenir très élevée. Les compresseurs à piston sont classés par différents indices :

Disposition, nombres des cylindres (horizontale, verticale), mono-cylindrique, ... méthode de refroidissement (air, eau) ou celle de graissage (barbotage, sous pression, ...)

— Compresseur à membrane :

Ce compresseur est caractérisé par une déformation élastique d'une membrane qui assure aspiration et la compression du gaz. Un système hydraulique permet d'assurer la flexion de la membrane ; un piston se déplace dans le cylindre et agit sur le fluide hydraulique qui ans mettra son mouvement oscillatoire à la membrane.

rôle du plateau à trous est d'assurer ne bonne répartition du fluide sous la membrane. Celle-ci est souvent constituée de trois isques métalliques ; ce système a l'avantage de permettre la détection de la rupture de la membrane par une mesure de pression.

La membrane assure une étanchéité statique sur le côté gaz procédé. De ce fait, les Compresseurs à membrane sont utilisés pour des gaz dangereux, nocifs et corrosifs. La membrane permet également de réaliser l'étanchéité vis à vis de la partie mécanique.

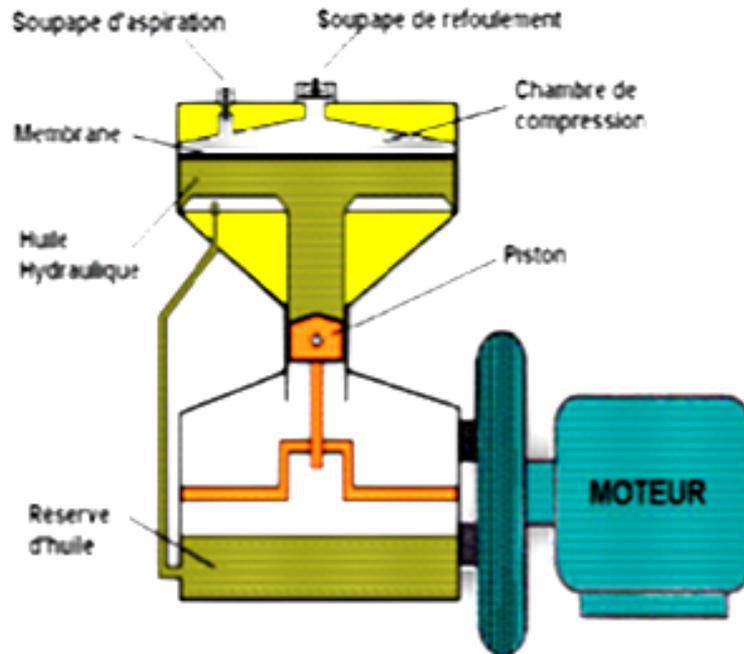


FIGURE 2.3 – Schema represente le compresseur à membrane.

2.2.3.2 Compresseurs volumétriques rotatifs

Parmi ces appareils on à :

— Compresseur à vis :

Le compresseur à vis est un compresseur volumétrique dont les pistons se présentent sous forme de vis (2.4). C'est le modèle de compresseur le plus utilisé de nos jours. Les Principales pièces de l'élément de compression à vis comprennent un rotor mâle et un rotor Femelle qui tourne l'un vers l'autre tandis que le volume situé entre eux et le carter diminue.

Le rapport de pression d'une vis dépend de la longueur et du profil de la vis d'une part, et de la forme de l'orifice de refoulement, d'autre part.

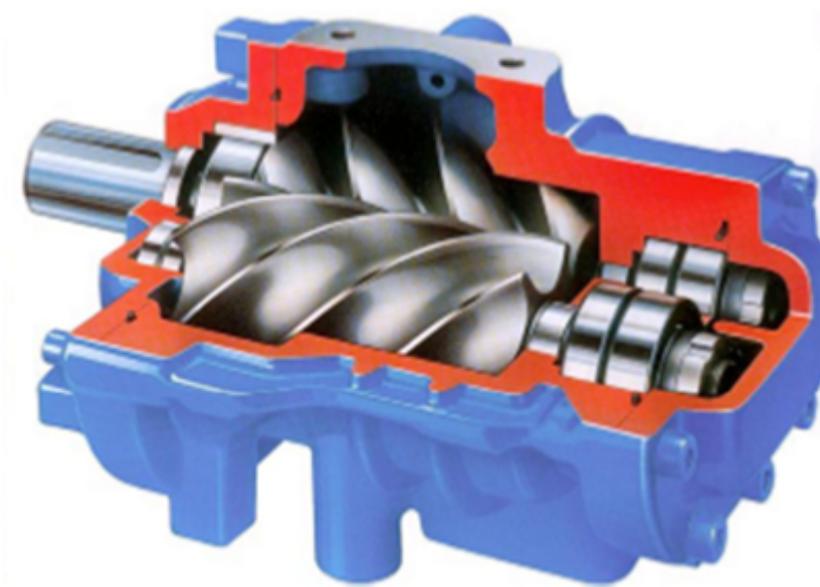


FIGURE 2.4 – Schema représente le compresseur à vis.

L'élément de compression à vis n'est équipé d'aucune soupape et il n'existe aucune force mécanique susceptible de créer un quelconque déséquilibre.

Il peut par conséquent fonctionner à une vitesse d'arbre élevée et combiner un débit important et de faibles dimensions extérieures.

2.2.3.3 Compresseur à palettes

Conçu à partir d'une technologie approuvée le compresseur à palettes à entraînement direct fonctionne à très faible vitesse ($1450tr/min$) et offre ainsi une fiabilité incomparable. Le rotor, la seule pièce mobile continuellement mobile, comporte un certain nombre de fentes sur toute sa longueur où se logent des palettes coulissantes qui glissent sur un film d'huile.

Le rotor tourne dans un stator cylindrique. Lors de la rotation, la force centrifuge fait sortir les palettes de leur emplacement (2.5) : elles forment alors des cellules de compression individuelles. La capacité comprise entre deux palettes est variable. Devant la tubulure d'aspiration, le volume croît : il y a donc aspiration du

gaz. Ce gaz est ensuite emprisonné entre deux palettes et transporté vers la tubulure de refoulement. Dans cette zone, le volume décroît et le gaz comprimé s'échappe dans la tuyauterie de refoulement.

La chaleur générée par la compression est contrôlée grâce à une injection d'huile sous pression.

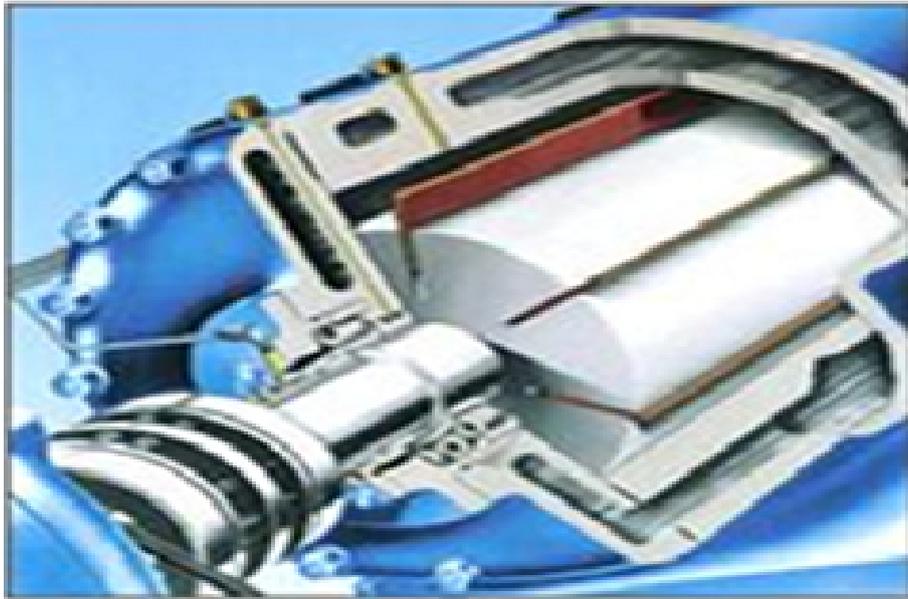


FIGURE 2.5 – Schema représente le compresseur à palettes .

2.3 Les turbocompresseurs (compresseurs dynamiques)

Dans les turbocompresseurs, l'élévation de la pression résulte précisément d'une action sur la vitesse de fluide.

Ici encore, l'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur est dépensée sous forme de travail, celui-ci est transformé sous forme d'énergie cinétique au fluide à compresser, et cette dernière à son tour est transformée en énergie de pression.

La mise en vitesse est obtenue en soumettant le fluide à l'action des roues à aubes ayant une grande vitesse rotative.

Ces machines assurent la compression grâce à la force centrifuge, due au mouvement de rotation des roues munies d'aubes ou d'ailettes. Les turbocompresseurs sont divisés en deux types :

2.3.1 Compresseurs centrifuges

Les turbocompresseurs peuvent être des compresseurs centrifuges, dans lesquels le parcours du gaz dans les roues est dirigé du centre vers la périphérie ; donc l'énergie de gaz comprimé augmente grâce à la force centrifuge. Les compresseurs centrifuges sont employés pour des hauteurs manométriques élevées (2.6)



FIGURE 2.6 – Schema represente le compresseur centrifuge .

2.3.2 Compresseurs axiaux

Les compresseurs axiaux (2.7) comme les compresseurs centrifuges, sont des turbocompresseurs, dont l'accroissement de la pression résulte d'une action sur la vitesse de fluide.

Le travail fourni par la turbine sous forme d'énergie mécanique transmise aux aubes du compresseur puis en énergie cinétique du gaz à comprimer grâce à la rotation des aubes ; celle-ci est à son tour transformé en énergie de pression dans le diffuseur.

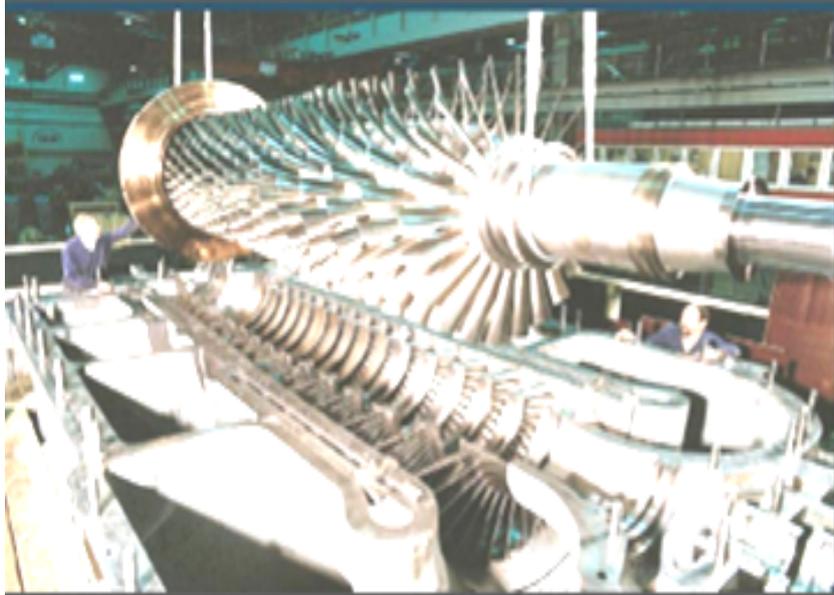


FIGURE 2.7 – Schema represente le compresseur axia.

2.4 Comparaison entre le compresseur axial et centrifuge

- Le compresseur centrifuge est plus compact dans le sens axial que le compresseur axial pour la même performance, mais il a un diamètre plus grand.
- Le compresseur centrifuge a un rapport de pression par étage plus élevé
- Le compresseur centrifuge est plus robuste et il est constitué de beaucoup moins de pièces (avantage de maintenabilité).
- Le compresseur centrifuge est plus stable vis-à-vis de pompage. Il a une plage de débit beaucoup plus vaste.

Différents types de compresseurs peuvent être utilisés pour l'alimentation en air de la (P à C), deux types parmi eux existent à la plate peuvent être couplés avec la pile : compresseur centrifuge et à double vis.

Type de compresseur	Compresseurs volumétriques		Compresseurs dynamiques	
Avantages	Alternatifs	Rotatifs	Centrifuge	Axiaux
	<ul style="list-style-type: none"> – Bien adaptés aux petits débits. – Peuvent véhiculer du gaz à toutes les pressions. – Relativement souple à exploiter. 	<ul style="list-style-type: none"> Peuvent véhiculer du gaz dans une large plage de débit. – Débit régulier. – Fiabilité Satisfaisante. – Débit plus régulier que les compresseurs Alternatifs. 	<ul style="list-style-type: none"> – Bien adaptés aux moyens et grands débits de gaz – Relativement Souple à exploiter – Excellent fiabilité 	<ul style="list-style-type: none"> – Très bon rendement. – Bien adaptés aux très grands débits et aux pressions modérées. – Excellent fiabilité
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> – Débit pulsé – Fiabilité moyenne au niveau des soupapes – Obligation d'avoir une machines secours 	<ul style="list-style-type: none"> – Pas appliqué Aux hautes pressions (maxi 50 Bars). 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas adapté aux faibles débits. – Pompage à faible débit rend l'exploitation délicate. – Prix élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> – Rotors de grande taille délicats à construire et couteux.

TABLE 2.1 – Les avantages et les inconvénients de chaque compresseur.

2.5 Modélisation du compresseur centrifuge

Le compresseur centrifuge est de la famille turbomachine. Le système d'alimentation en air est équipé d'un circuit de lubrification et un refroidisseur. Le moteur utilisé est le même que dans le cas du compresseur à double vis. La figure (2.8) est présenté La vitesse maximale de la roue à aube du compresseur peut atteindre 20.000 tr/min. Ainsi, la vitesse angulaire de l'arbre du compresseur est limitée 15.900tr/min. Celui-ci est calculé par le coefficient de réduction du compresseur, donné par le constructeur égal à 12,7. La rotation du compresseur est effectuée par le moteur, à l'aide d'une courroie et d'une poulie. Le compresseur possède une poulie d'un diamètre de 60mm. Sachant que la vitesse angulaire maximale du moteur est de 12.000tr/min, le diamètre de la poulie est de 90mm ce qui donne un rapport de réduction de 1,5. Cela limite le moteur à une vitesse angulaire de 10.600tr/min. La

relation entre la vitesse angulaire du compresseur ω_{cp} et du moteur ω_{cm} est donnée comme suit :[4]

$$\omega_{cp} = kr.\omega_{cm} \quad (2.1)$$

ou kr est le rapport de réduction de la vitesse,il est égal à 19,05.Deux grandeurs Sont

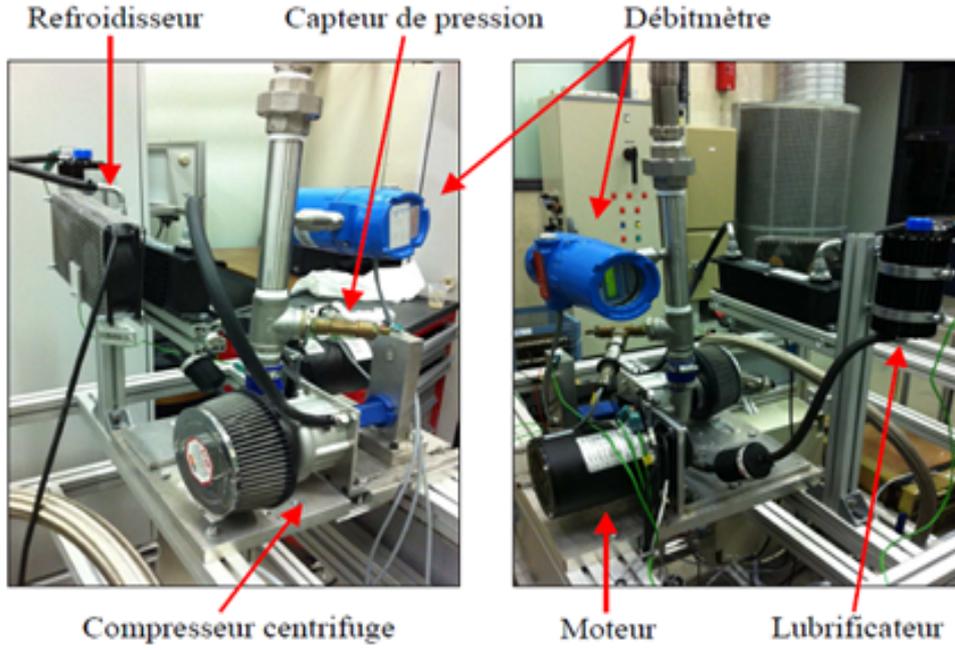


FIGURE 2.8 – Schema represente du compresseur centrifuge [12]

modélisées :le débit d'air du compresseur par la méthode d'adaptation non linéaire de Jensen et Kristensen et [13]. Il est fonction du rapport de pression p_{sm}/p_{atm} ,de la température d'entrée T_{atm} et de la vitesse angulaire ω_{cp} du compresseur. Du compresseur.Ce type de modélisation est dédié aux turbomachines,et plus spécifiquement pour les compresseurs centrifuges.An de standardiser le principe de modélisation Dans les mêmes conditions (température et pression),il est impératif de corriger les valeurs mesurées.D'après les valeurs corrigée sont la vitesse angulaire du compresseur (N_{cr}) en(tr/min) et le débit d'air (W_{cr}) en($enkg/s$).Ces valeurs corriges sont utilisées dans la cartographie du compresseur.Elles sont données par :

$$N_{cr} = N_{cp} / \sqrt{\theta} \quad (2.2)$$

$$W_{cr} = W_{cp} \sqrt{\theta} / \delta \quad (2.3)$$

Avec :

$$\theta = T_{cp,in}/288K \quad (2.4)$$

$$\delta = P_{cp,in}/1atm \quad (2.5)$$

N_{cr} est la vitesse angulaire du compresseur, W_{cp} est le débit d'air du compresseur, δ est le terme de correction de la pression et θ est le terme de correction de la température. En utilisant la méthode (2.6), un paramètre principal doit être défini, et il est donnée :

$$\psi = C_p T_{cp,in} \left[\left(\frac{p_{cp,out}}{p_{cp,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] / \left(\frac{U_c^2}{2} \right) \quad (2.6)$$

ou C_p est la chaleur spécifique, $T_{cp,in}$, est la température à l'entrée du compresseur et $p_{cp,in}$ et $p_{cp,out}$ sont les pressions en amont et en aval du compresseur respectivement. U_c est la vitesse linéaire ; Elle est calculée en fonction de la vitesse angulaire corrigée du compresseur N_{cr} :

$$U_c = \frac{\pi}{60} d_c N_{cr} \quad (2.7)$$

ou d_c est le diamètre de l'arbre du compresseur.

Le débit normalisé du compresseur est défini comme suit :

$$\phi = \frac{W_{cr}}{\rho_a \frac{\pi}{4} U_c d_c^2} \quad (2.8)$$

ou ρ_a est la masse volumique de l'air est aussi défini dans l'annexe(B) Les variables ψ et ϕ définies sont corrèllées par la relation suivante :

$$\phi = \phi_{max} \left\{ 1 - \exp \left[\beta \left(\frac{\psi}{\psi_{max}} - 1 \right) \right] \right\} \quad (2.9)$$

ou ϕ_{max} , β et ψ_{max} sont des fonctions polynomiales du nombre M ,

$$\phi_{max} = a_4 M^4 + a_3 M^3 + a_2 M^2 + a_1 M + a_0$$

$$\beta = b_2 M^2 + b_1 M + b_0 \quad (2.10)$$

$$\psi_{max} = c_5 M^5 + c_4 M^4 + c_3 M^3 + c_2 M^2 + c_1 M + c_0$$

Le nombre M spécifique de l'entrée est défini par :

$$M = \frac{U_c}{\gamma R_a T_{cp,in}} \quad (2.11)$$

ou R_a est la constante de l'air gaz ($2,86910^{-2} J/(kg.K)$). Dans l'équation (2.11), a_i , b_i et c_i sont des coefficients de régressions obtenus par adaptation de la courbe aux données du compresseur. Le débit massique d'air (kg/s) est alors calculée en utilisant l'équation (2.8) :

$$W_{cr} = \phi \rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_c \quad (2.12)$$

2.6 Moteur MSAP

Le moteur synchrone à aimants permanents s'impose dans les applications nécessitant des performances dynamiques et statiques très élevées, et plus particulièrement, dans les systèmes embarqués (par exemple en aéronautique et dans le domaine aérospatial) en raison de son rapport puissance/masse élevé. [4]

2.6.1 Modélisation de la machine

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation du moteur synchrone à aimants permanents, le modèle triphasé et le modèle obtenu à l'aide de la décomposition selon deux axes (transformation de Park). Les entrées pour le système (machine synchrone) sont les trois tensions de phase (qui sont contrôlées pour obtenir le courant désiré) et le couple résistant imposé par le compresseur d'air. En sortie, la grandeur utile est la vitesse de rotation du moteur. Les hypothèses usuelles données dans la majorité des références sont adoptées comme la modélisation de la machine, les hypothèses suivantes sont retenues :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le F.M.M créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée ainsi que les courants de Foucault et l'effet de peau.
- les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température. [9]

Mise en équation de la machine synchrone dans le repère (a-b-c) :

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ces courants, nous considérons que le modèle de la machine synchrone fig(2.9)suivant :

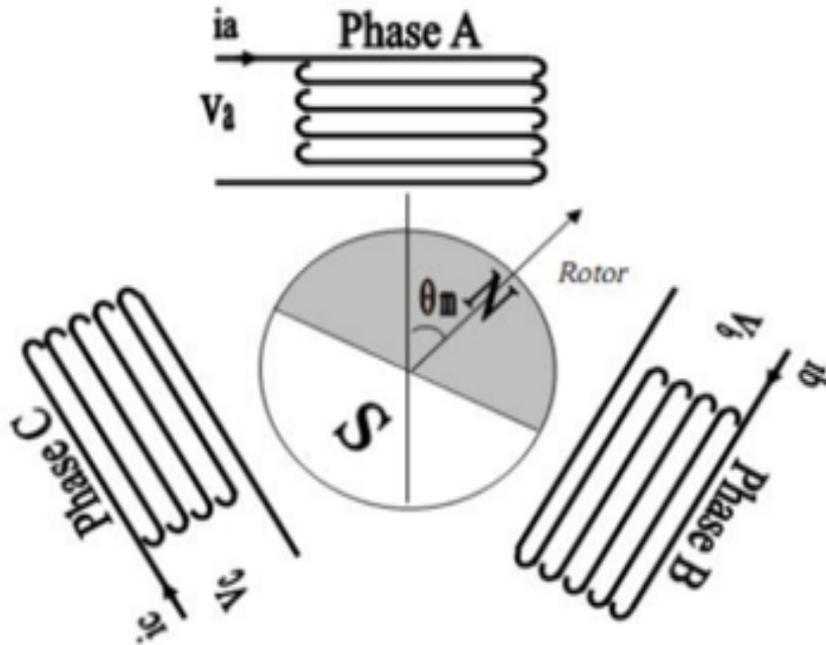


FIGURE 2.9 – Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère(a-b-c).

Equations électriques

Les équations électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec :

R_s :la résistance d'un enroulement statorique

$i_{a,b,c}$:les courant des phases statorique

$V_{a,b,c}$:les Tensions des phases statoriques

$\varphi_{a,b,c}$:les flux produit par les phases statorique respectivement a,b,c

sous forme matricielle ;

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Équations du flux :

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction, les flux induits par l'aimant dans les trois phases statoriques 'a, b, c' sont donnés par :

$$\varphi_{fa} = \varphi_{max} \cdot \cos(\theta)$$

$$\varphi_{fb} = \varphi_{max} \cdot \cos(\theta - 2Pi/3) \quad (2.15)$$

$$\varphi_{fc} = \varphi_{max} \cdot \cos(\theta - 4Pi/3)$$

L'expression du flux total dans la phase 'a' est donnée par :

$$\varphi_{aa} = \varphi_{aa} + \varphi_{ba} + \varphi_{ca} + \varphi_{fa} = L_s i_a + M_s (i_b + i_c) + \varphi_{fa} \quad (2.16)$$

Du fait que la machine est équilibrée à neutre isolé, on a ($i_a + i_b + i_c = 0$) d'où : L'expression du flux dans la phase 'a' se réduit à :

$$(L_s - M_s) i_a + \varphi_{fa} = L_{sc} i_a + \varphi_{fa} \quad (2.17)$$

L_{sc} : L'inductance cyclique d'un enroulement statorique

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique,

M_s : Mutuelle inductance entre phases du stator.

$$\begin{cases} \varphi_b = L_{sc}i_b + \varphi_{fb} \\ \varphi_c = L_{sc}i_c + \varphi_{fc} \end{cases} \quad (2.18)$$

En remplaçant les expressions des flux dans le système des tensions équation(2.19),on obtient :

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + L_{sc} \frac{di_a}{dt} + \frac{d\varphi_{fa}}{dt} \\ V_b = R_s i_b + L_{sc} \frac{di_b}{dt} + \frac{d\varphi_{fb}}{dt} \\ V_c = R_s i_c + L_{sc} \frac{di_c}{dt} + \frac{d\varphi_{fc}}{dt} \end{cases} \quad (2.19)$$

Equations mécaniques : L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f.\omega_r \quad (2.20)$$

Avec : ω_r :Vitesse de rotation de la machine.

J :Moment d'inertie.

C_{em} :Couple électromagnétique.

C_r :Couple résistant.

f :Coefficient de frottement.

p :Nombre de paires de pôles.

On remarque que les équations obtenues dans le repère (a-b-c) sont fortement non linéaires et couplées,elles sont en fonctions de la position du rotor θ .

Pour résoudre les équations,la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de Park.Cette transformation,appliquée aux variables réelles (tensions,courants et flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes (d-q) ou biphasé.Ceci peut être interprété comme étant une substitution des enroulements immobiles de phases du système réel (a, b, c)en enroulements orthogonaux d'axes(d-q)tournant à une vitesse ω_r par rapport au stator fig 2.10.Ce changement de repère rend l'équation dynamiques de la machine plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.

2.6.2 Transformation de Park

La transformation de Park consiste donc à transformer le système d'enroulements triphasés Statoriques d'axes en un système équivalent à deux enroulements biphasés sur les axes en raison la conservation de la F.m.m et de la puissance instantanée[14]

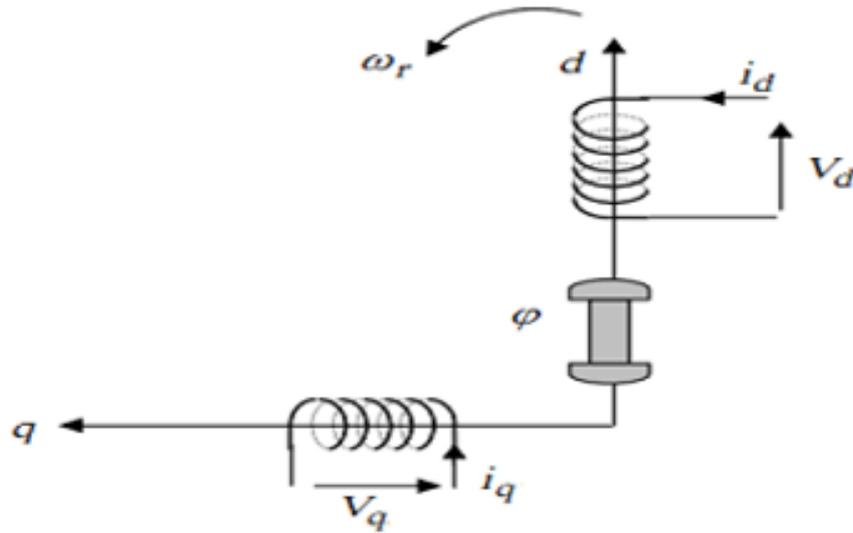


FIGURE 2.10 – Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (d-q).

Equations électriques :

Les équations des flux statorique s'écrivent dans le repère de Park comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2.21)$$

En remplaçant les expressions des flux φ et φ_q dans le système (2.22) nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_r (L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (2.22)$$

avec : v_d, v_q : les tension statorique dans le repère (d,q)

I_d, I_q : les courant statorique dans le repère (d,q)

φ_d, φ_q : les flux statorique dans le repère (d,q)

φ_f :flux induit par les aimants permanent

L_d, L_q :inductance cyclique statorique d'axe direct 'd' et d'axe quadratique 'q'

. **Expression de la puissance et du couple électromagnétique**

L'expression du couple est obtenue à partir de celle de la puissance instantanée absorbée par la machine :

$$P_a = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (2.23)$$

Dans le référentiel de PARK,cette puissance s'écrit :

$$P_e = \frac{3}{2}(V_d I_d \cdot V_q I_q) \quad (2.24)$$

En remplaçant,par leurs expressions on aura :

$$P_a(t) = \frac{3}{2}[P\Omega(L_d - L_q)I_d I_d + \varphi_f I_q + R_s(I_d^2 + I_q^2) + (I_d L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} + I_q L_q \cdot \frac{dI_q}{dt})] \quad (2.25)$$

Cette puissance est composée de :

- Puissance perdue par effet joule.
- Puissance électromagnétique.
- La variation d'énergie magnétique emmagasinée.

Le couple générée par la machine est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (2.26)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[(L_d - L_q)I_d I_q + \varphi_f I_q]$$

Equations mécaniques : La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est donnée par la relation suivante :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}[\frac{3}{2}P(L_d - L_q)I_d I_q - C_r - f_e \Omega] \quad (2.27)$$

La forme finale des équations du MSAP dans le référentiel (d-q) est :

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \Omega \\ \frac{dI_d}{dt} = \frac{V_d}{L_d} - R_s \frac{I_d}{L_d} + \omega_r L_q \frac{I_q}{L_d} - \frac{\omega_r}{L_d} \varphi_f \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{V_q}{L_q} - R_s \frac{I_q}{L_q} - \omega_r L_d \frac{I_d}{L_q} \\ C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + \varphi_f I_q] \end{cases} \quad (2.28)$$

L'inertie totale est donnée par l'association machine compresseur soit :

$$J = J_{machine} + J_{compresseur} \quad (2.29)$$

Le frottement visqueux total est donné par l'association machine compresseur :

$$f = f_{machine} + f_{compresseur} \quad (2.30)$$

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques types de compresseurs ramenés au modèle le plus utilisé dans les applications (P à C) qui sont de type centrifuge car ils permettent de modéliser facilement le débit d'air à la sortie du compresseur. Nous présentons aussi le modèle dynamique de moteur synchrone à aimants permanents. Le modèle triphasé est de nos jours rarement utilisé à cause de sa complexité et du fort couplage de ses équations. On y montre qu'à l'aide de la transformation de Park, le modèle devient plus simple et les non-linéarités sont réduites au nombre de trois. Les équations obtenues par la transformation de Park engendrent des phénomènes identiques aux phénomènes liés à la machine à courant continu, ce qui confirme l'analogie entre les deux modèles.

Chapitre 3

Modélisation des convertisseurs statiques (DC/DC,DC/AC)

3.1 Introduction

L'objectif de cette partie est de présenter une modélisation ainsi qu'une simulation des systèmes pile à combustibles en utilisant le logiciel matlab/simulink. Les composants essentiels considérés sont les convertisseurs (DC/DC, DC/AC) qui sont connectés au groupe moto-compresseur. Pour établir le modèle du système pile à combustible, on considère chaque élément de façon séparée.

3.2 Convertisseur continu/alternatif (DC/AC)

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglables par la commande MLI. La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par la (P à C) en courant alternatif monophasé ou triphasé.[9]

3.2.1 Modélisation de l'onduleur de tension

Dans l'étude de l'ensemble commande onduleur-machine-charge, nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant l'onduleur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Cette méthode est la plus couramment utilisée dans l'étude de l'ensemble onduleur-machine. Pour modéliser l'onduleur de tension fig (3.1), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être composée de deux générateurs de *F.E.M* égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 . [15]

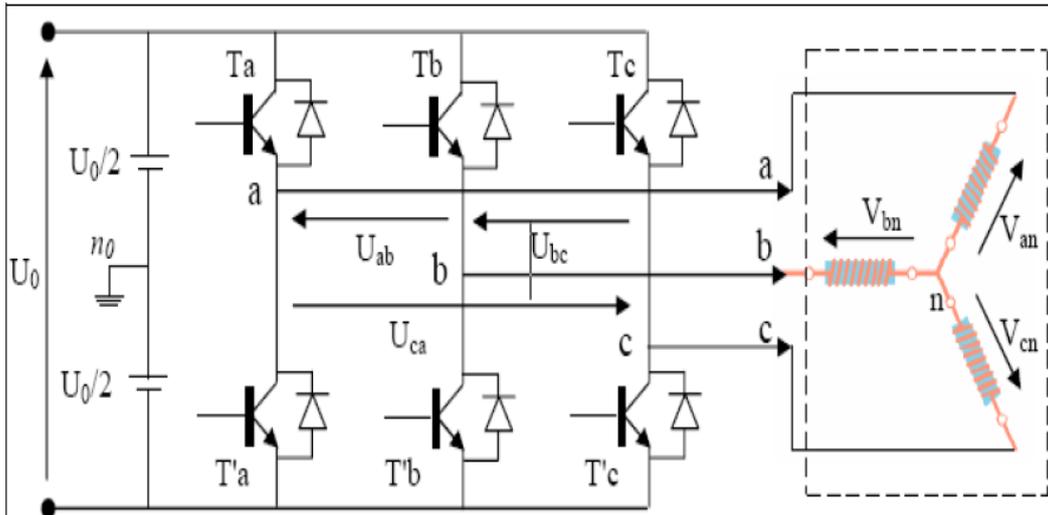


FIGURE 3.1 – Schéma de l'onduleur triphasé

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an}, V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T'_i les transistors (supposés parfaits), on a

- si $S_i = 1$, Alors T_i est passant et T'_i , est ouvert
- si $S_i = 0$, Alors T_i est ouvert et T'_i , est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :[9]

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (3.1)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn0} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (3.2)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (3.3)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}(V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}) \quad (3.4)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits Si ($i = a, b, c$), on a :

$$V_{in} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (3.5)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

En remplaçant (3.6) dans (3.4), on obtient

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn} \end{cases} \quad (3.7)$$

En remplaçant (3.6) dans (3.7), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Il existe huit combinaisons possibles pour commander les interrupteurs de l'onduleur dont six sont des séquences actives alimentant la charge. Celles-ci définissent six vecteurs de tension à la sortie de l'onduleur : $V_I = 1, \dots, 6$. Les deux séquences restantes sont des séquences de roue libre et définissent deux vecteurs de tensions nuls V_0 et V_7 .

3.2.2 Principe de la commande MLI

La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est un signal numérique à période constante mais à rapport cyclique réglable, la tension peut prendre deux valeurs seulement. Dans certains cas très spécifiques (onduleurs à MLI par exemple) on fabrique un troisième niveau en inversant la tension du niveau haut. [16] Les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par l'intersection du signal de référence appelé 'modulatrice' avec un signal triangulaire de haute fréquence appelé 'porteuse'. Dans le cas de la MLI triphasée la porteuse est commune pour les trois phases et la modulatrice est propre à chaque phase. On définit deux paramètres caractérisant cette commande.

— L'indice de modulation m , égal au rapport fp/fr des fréquences de la por-

teuse et de la référence.

- Le coefficient de réglage en tension égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à valeur crête de l'onde de modulation.

La modulation est dite synchrone si fp est multiple entier de fr , elle est asynchrone dans le cas contraire. Si le rapport des fréquences fp à fr est multiple de trois les signaux de commande pour les trois phases seront les mêmes mais décalés d'un tiers de période.

La commande MLI est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde.

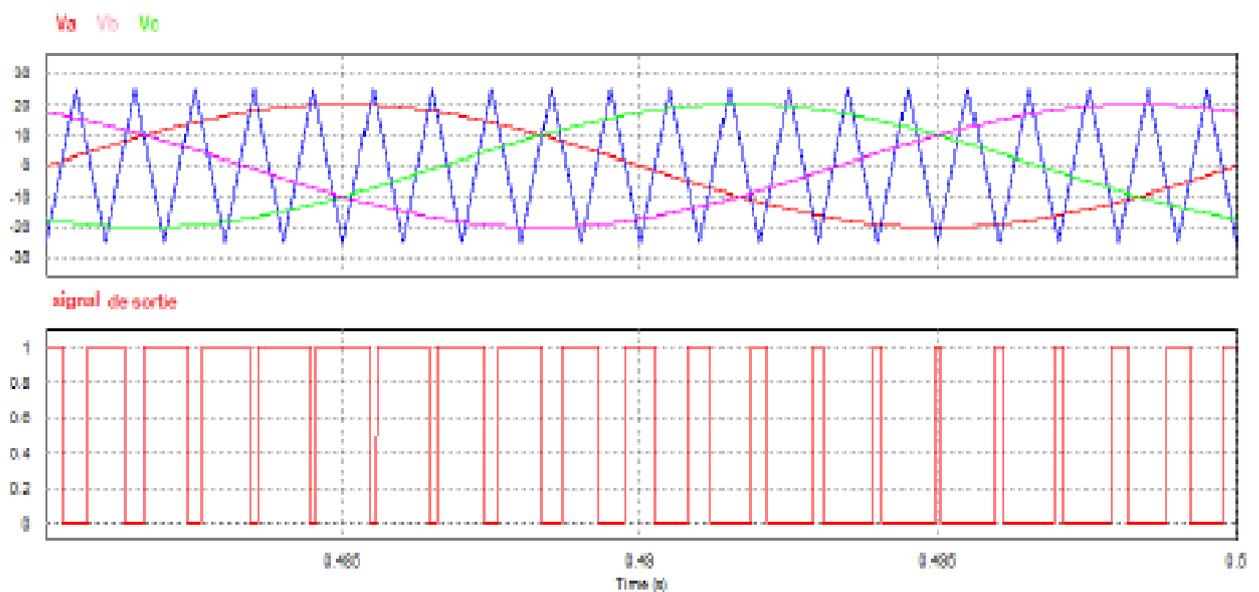


FIGURE 3.2 – Principe de la commande MLI naturel.

3.3 Convertisseur continu/continu (DC/DC)

L'hacheur est un convertisseur statique continu/continu (DC/DC) qui nous permet d'obtenir à partir d'une source de tension continue fixe, une source de tension continue de valeur moyenne réglable de plus forte ou faible valeur (élevateur ou abaisseur de tension). Il est essentiellement constitué d'interrupteurs de puissance (transistors, diodes...) et de composants passifs (inductances, condensateurs...). On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue de système pile à combustible. [17] et [18]

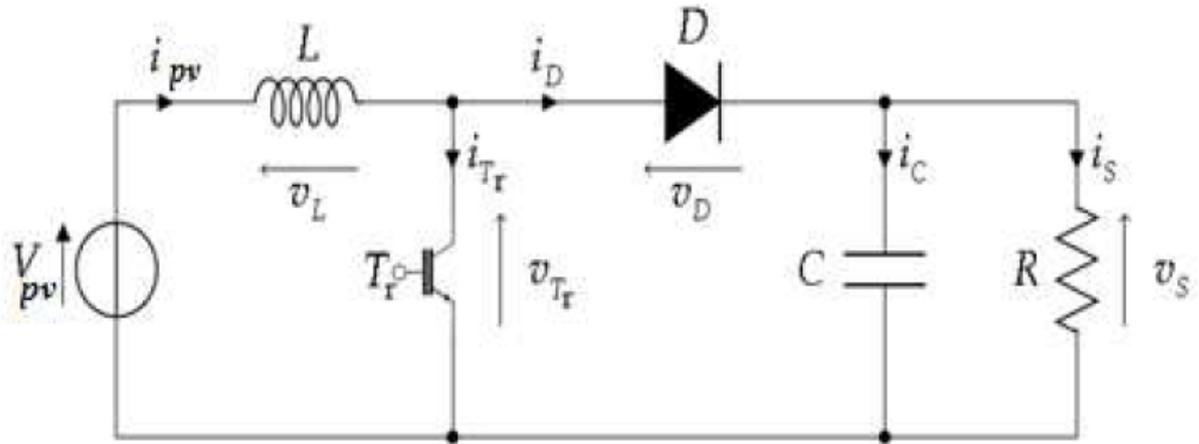


FIGURE 3.3 – Schema bloc de l’hacheur élévateur boost de tension.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l’interrupteur est passant figure(3.5) L’interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué-saturé), habituellement un transistor IGBT. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l’état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l’inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$v_e = (1 - \alpha)v_s \tag{3.9}$$

$$v_s = (1 - \alpha)/v_e$$

3.3.1 Les avantages et des inconvénients de convertisseur hacheur Boost

3.3.1.1 Les avantages

- augmenté la tension (survolteur).

- amélioration d'énergie (DC/DC).
- rendement très élevé.

3.3.1.2 Les inconvénients

- Le couteux.
- maintenance difficile.

modèle d'état de l'hacheur boost

$$\dot{x} = AX + BV_{in}; Y = CX \quad (3.10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -(1-\alpha)/L \\ (1-\alpha)/L & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$X = \begin{bmatrix} I_2 \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

avec :

α :rapport cyclique.

V_{in} :tension entree.

$V_s=V_C$:tension de sortie.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons examiné les équations qui permettent sa modélisation du compresseur centrifuge qui ne sont compatibles qu'avec le Système pile à combustible, et nous mentionnons spécifiquement onduleur 3 phrasée ,l'hacheur élévateur de tension (Boost), ainsi que la commande de chaque convertisseur.

Chapitre 4

Simulation et resultats de systeme pile à combistuble(PEMFC) liée par le groupe moto-compresseur

4.1 Introduction

L'objectif de notre travail dans ce chapitre c'est d'établir une simulation de système pile à combustible est liée par le compresseur centrifuge .Cette système permettra par la suite,d'étudier l'optimisation du système de production d'électricité à partir du PEMFC et aussi étudier tous ces caractéristiques et tous les paramètres la pression et le debit qui influent sur le système afin de rendre ce système plus compétitif sur tous les technologiques.

4.2 Simulation du systemes pile à combustible rac- cord avec le compresseur

Après obtention des modèles mathématiques décrivant le comportement du sys-
teme (P à C)dans le chapitre précédent. En à réalisée le systeme globale,dans Mat-

lab/Simulink voire Annex(C) et nous déterminerons donc tous les caractéristiques du système et tous ce qui change comme paramètres voire les annexes (A),(B) La méthode utilisée dans le système pile à combustible PEMFC est compose 3 partie : Le premier partie est le groupe Moto-compresseur, ce dernier est constitue 2 partie : le motor (MSAP) et le compresseur qui associé avec certains. Le compresseur qui utilise la vitesse de rotation du motor pour fonctionner.

Le deuxième partie est la pile à combustible. Elle est utilisé l'hydrogène qui stocke dans réservoir et l'air pressé qui vient de compresseur pour produise l'électricité avec la forme CC(43V).

Le dernier partie c'est les convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC) : L'utilisation du convertisseur élévateur (Boost) permet d'augmenter la tension de sortie de PEMFC délivrée à l'entrée de l'onduleur. et le (DC-AC) est un onduleur qui transformer le courant produit par la (P à C) en courant alternatif monophasé ou triphasé (220/380V)

4.2.1 Caractéristique de (P à C)

La figure(4.1) représente la variation de la tension de sortie en fonction de la densité de courant (courbe de polarisation). On remarque d'après cette courbe que les caractéristiques de la pile sont non linéaires ; à chaque fois que le courant augmente la tension diminue.

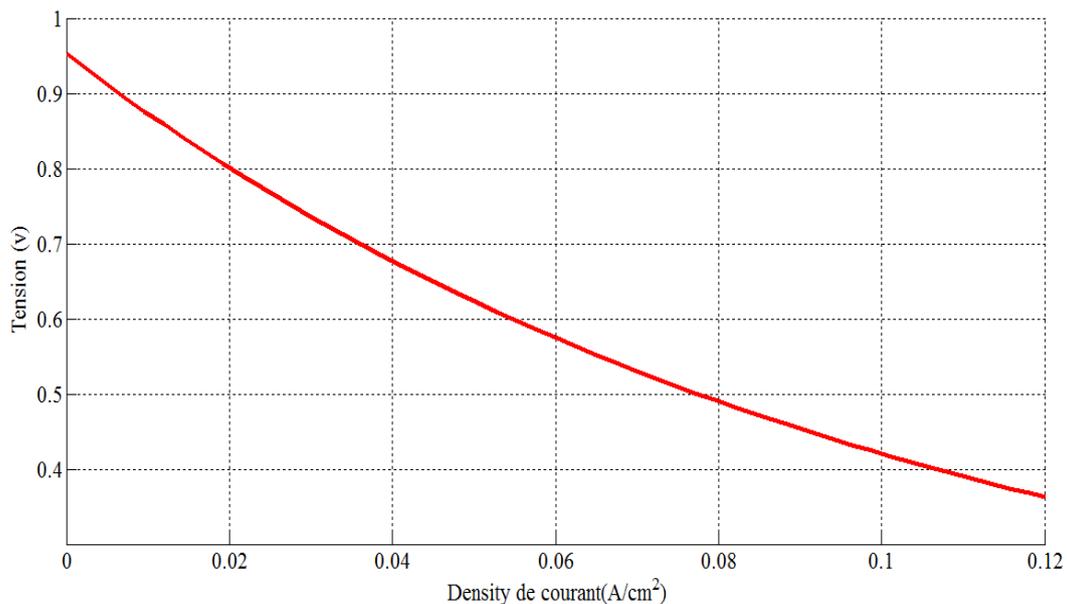


FIGURE 4.1 – Caractéristique tension de sortie de (PEMFC).

Pour qu'une réaction électrochimique puisse se produire, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. La polarisation d'activation correspond aux pertes liées à l'activation catalytique. Elle est en fonction de la nature et de la surface du catalyseur

On remarque dans la figure(4.2) que la puissance d'une pile à combustible augmente progressivement pour passer par un maximum à un certain temps puis elle diminue de nouveau

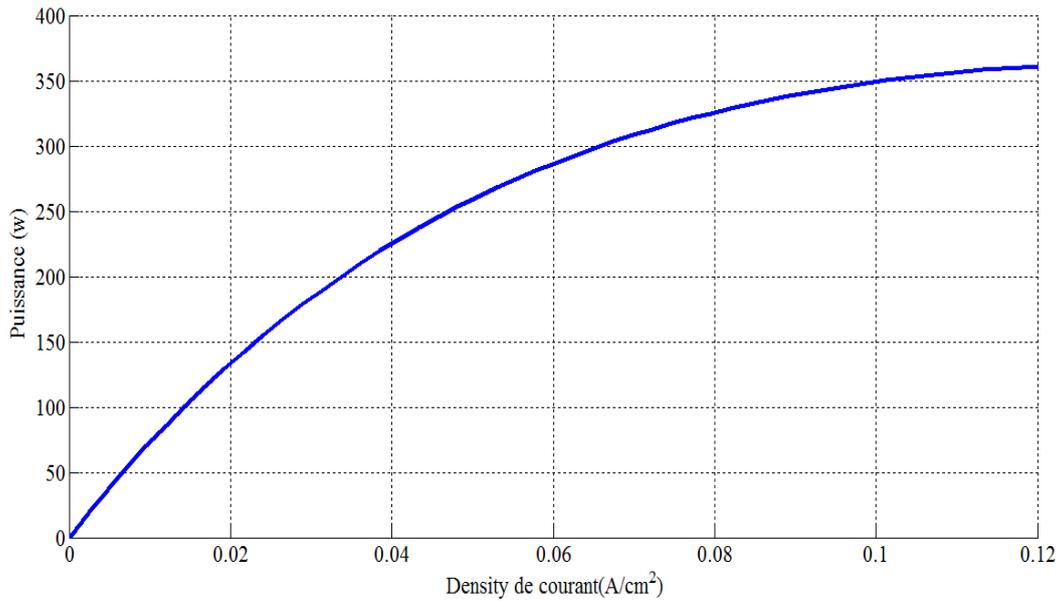


FIGURE 4.2 – Caractéristique de puissance de la PEMFC PEMFC.

4.2.2 Simulations des convertisseurs (DC/DC),(DC/AC)

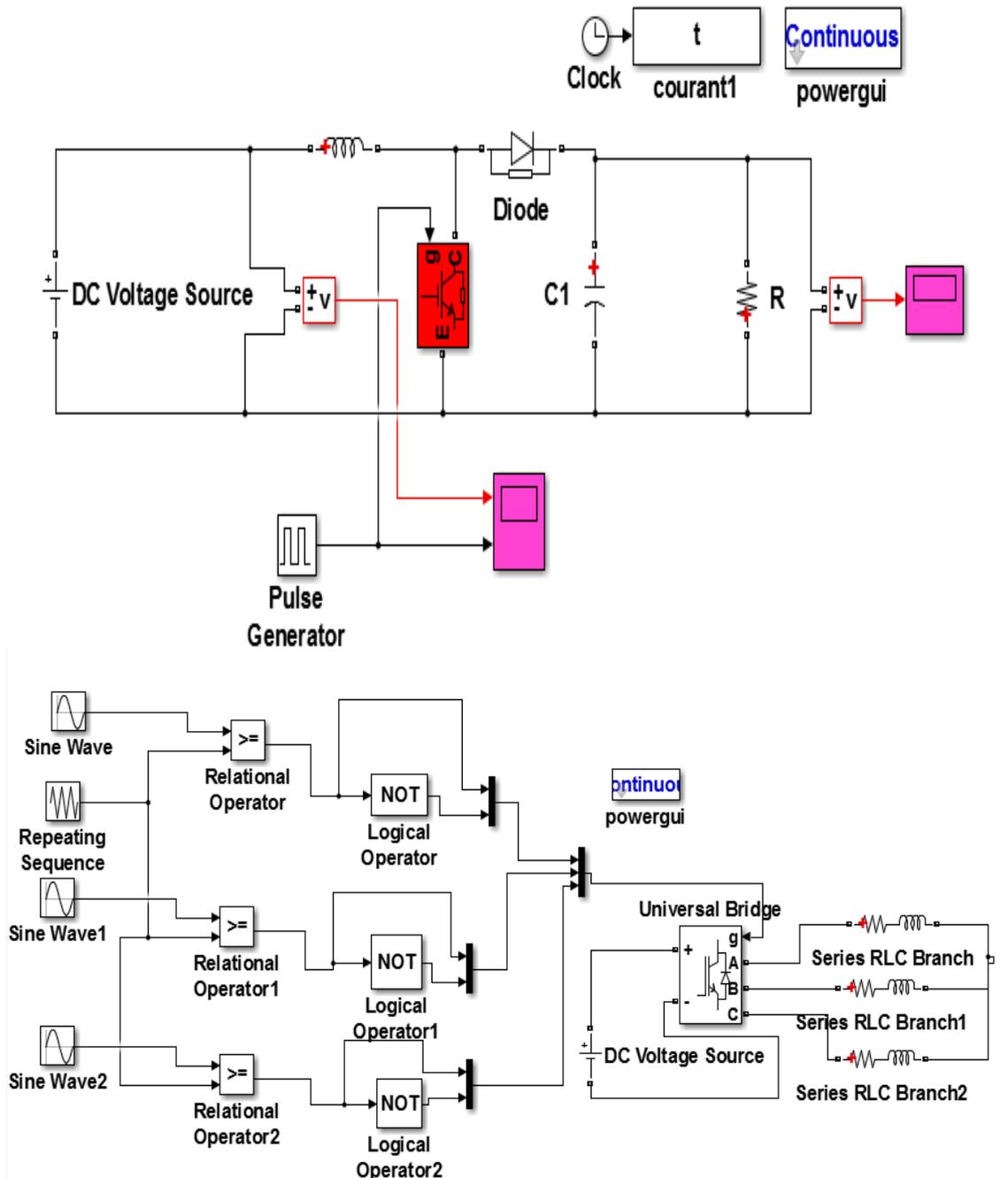


FIGURE 4.3 – Schéma de simulation types des convertisseur, A)-Schema de simulation l'hacheur éleveur de tension(Boost) , B)-Schema de simulation onduleur triphasé avec la commende MLI

4.2.3 Caractéristiques de (P à C) en fonction de temps

La variation du tension et la puissance de la pile à combustible pour trois différentes températures $50C^0$, $65C^0$, $80C^0$ respectivement est illustrée figures(4.4),(4.5). On peut voir l'effet de la température sur la tension et la puissance stacks du cellules, cette tension,puissance augment pour une faible température ($T = 50C^0$). $A = 500cm^2$.

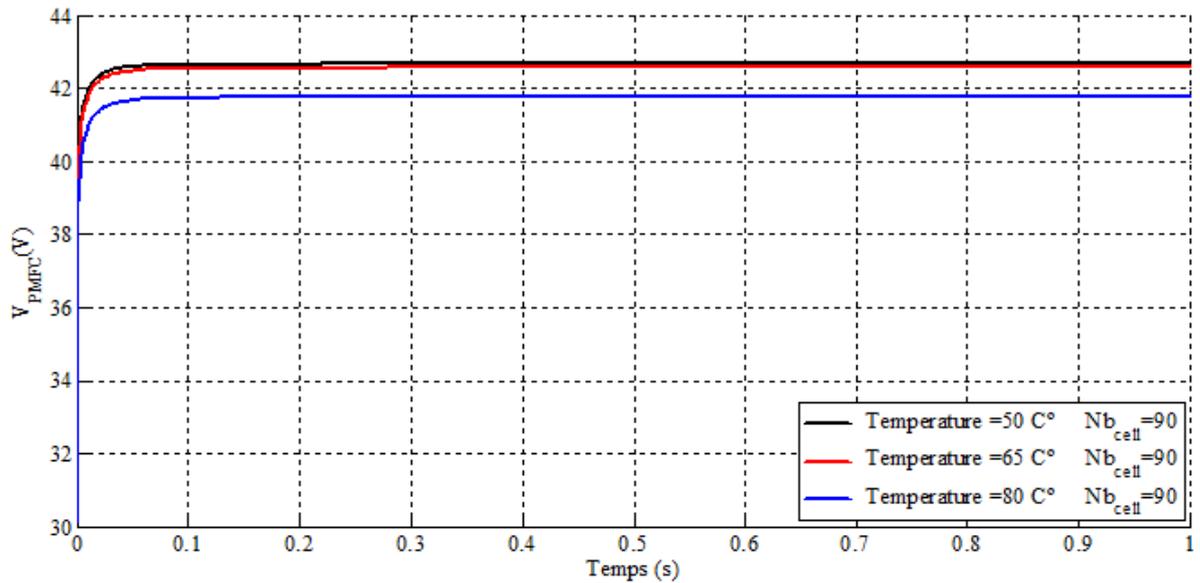


FIGURE 4.4 – L'effet de la température sur la tension des stacks du cellules pile à Combustible PEMFC.

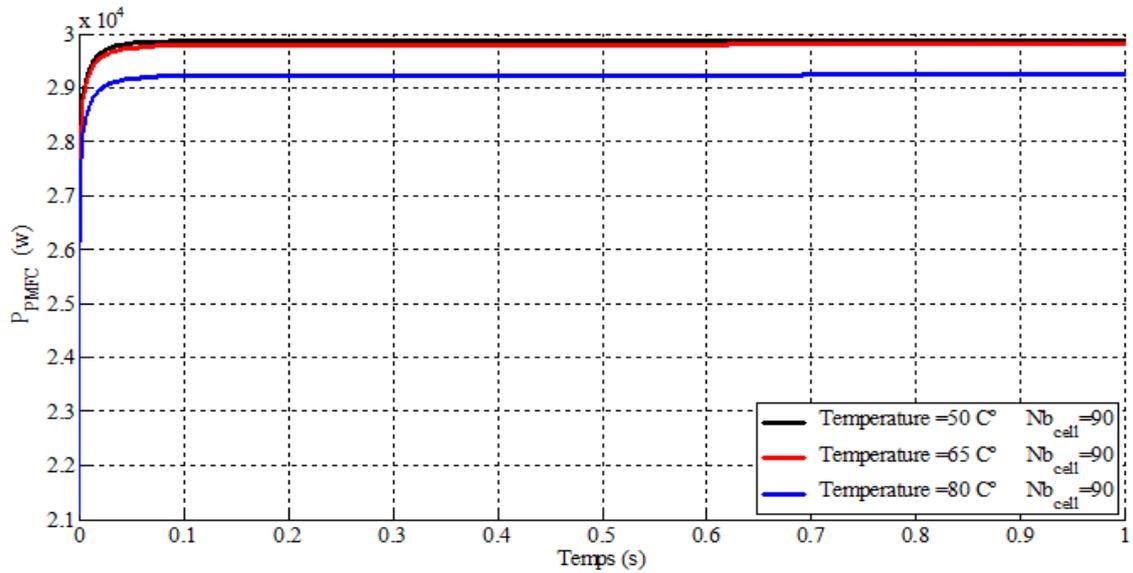


FIGURE 4.5 – L'effet de la température sur la puissance des stacks du cellules pile à Combustible PEMFC.

On peut constater dans la figure (4.6) l'augmentation de la tension par apport la surface du membrane (P à C)

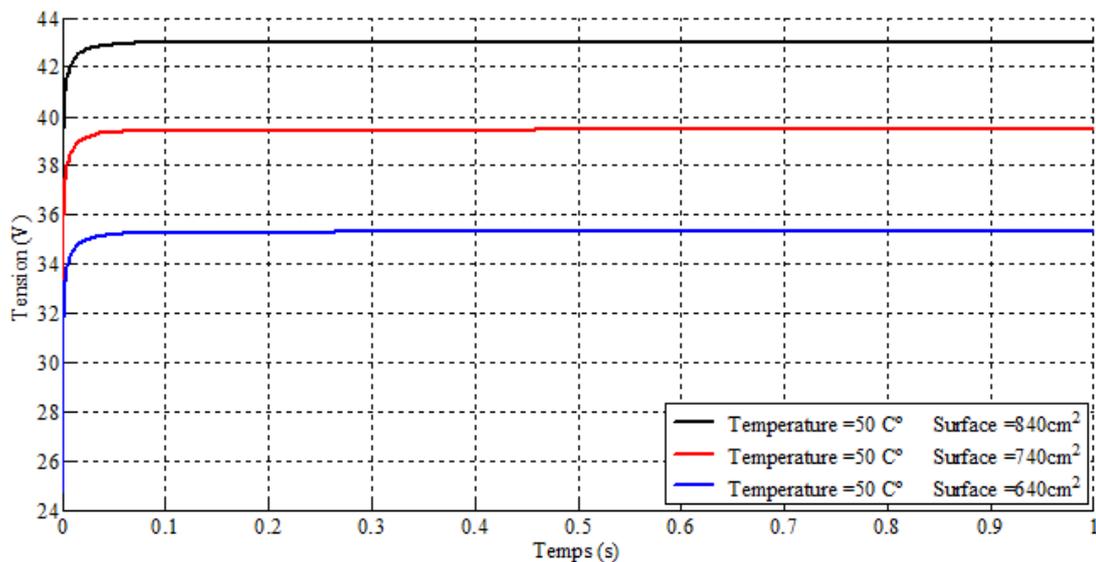


FIGURE 4.6 – L'effet de la surface sur la tension des stacks du cellules pile à Combustible PEMFC .

4.2.4 Caractéristiques de moteur MSAP

En a utilisée l'équation (2.26) du couple électromagnétique en fonction de temps fig.(4.7) suivants : On a observé dans le figure deux périodes :

(0 à 0.1)(s), le couple est diminué a partir,(1400 à 30 $N.ms^{-1}$).

Après (0.1)(s),le couple est stabilisée dans les valeur (30 $N.ms^{-1}$).

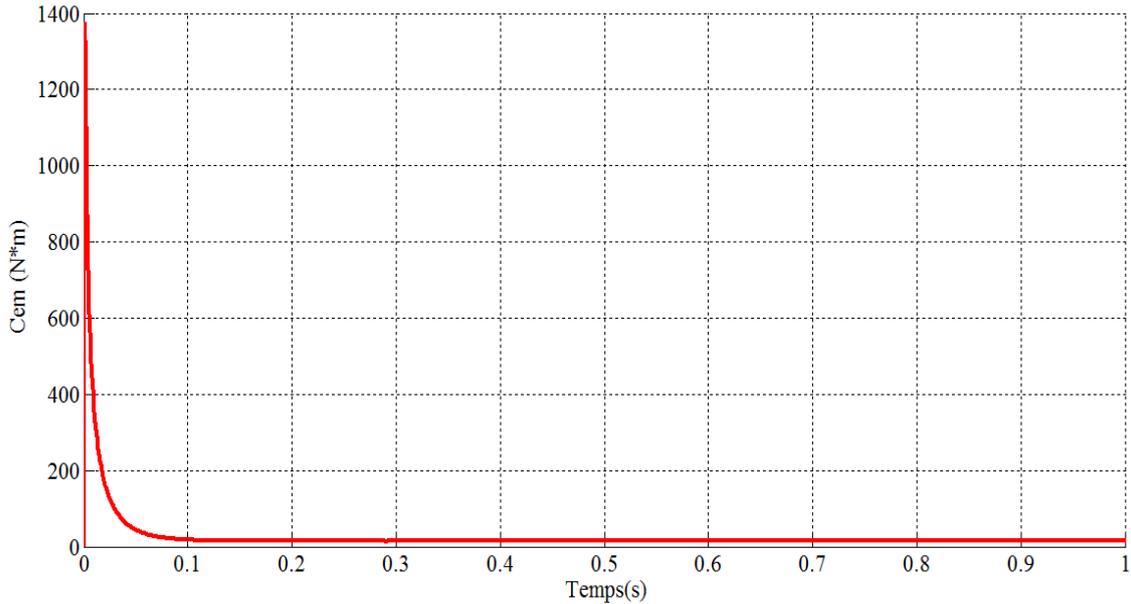


FIGURE 4.7 – Variation couple électromagnétique en fonction de temps.

dans cette figure (4.8) qui est présentée la variation de la puissance, en effet représentent la puissance consommée par le moteur (P_{mot}) lors d'une simulation effectuée avec la pile combustible PEMFC. La simulation est effectuée avec la vanne d'hydrogène ouverte totalement et ne montre pas encore l'apport d'une pile du point de vue énergétique. Avec la pile, le moteur consomme jusqu'à 4400W tandis que sans la pile, le moteur ne consomme plus que 13.5kw. La pile apporte une charge supplémentaire à l'arbre du moteur. Il faut plus de couple au moteur pour démarrer, d'où cette augmentation de la consommation énergétique.

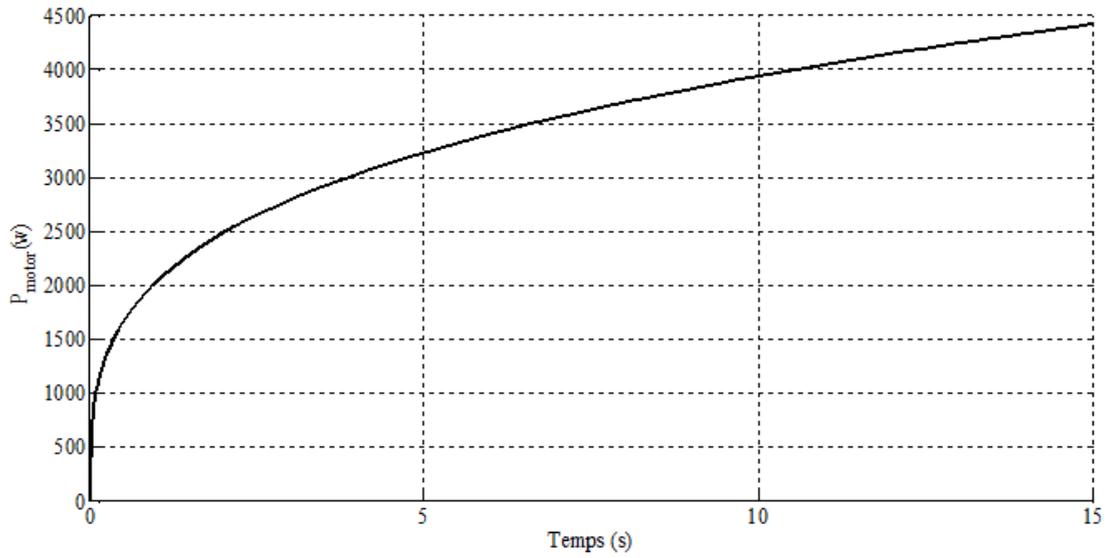


FIGURE 4.8 – Variation de la puissance en fonction de temps.

La figure (4.9); on représente l'effet de la variation de la vitesse en fonction de temps se signale compose deux partie :

(0 à 0.2)(s) la vitesse augmentée une fonction exponentielle.

Après(0.2)(s) :le signale stabiliser 12500tr/ min

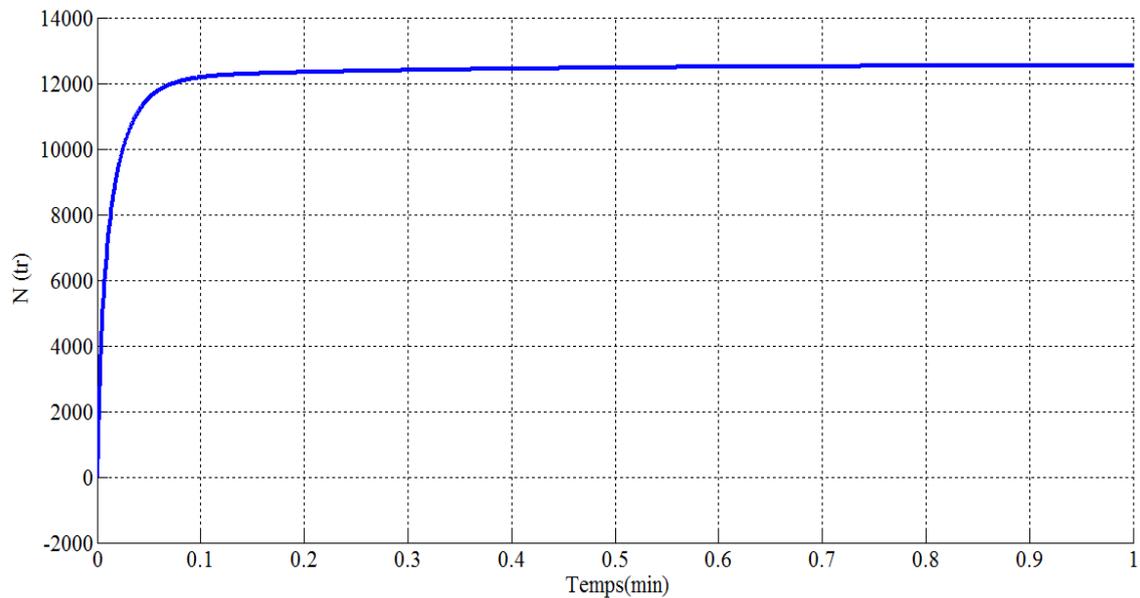


FIGURE 4.9 – Variation de la vitesse en fonction de temps.

4.2.5 Caractéristiques du groupe moto-compresseur

la figure (4.10) représente la température de sortie à partir de l'équation (2.4), (2.6) du compresseur (T_{comp}) lors d'une simulation effectuée avec la pile, la température seules atteint jusqu'à $43C^0$.

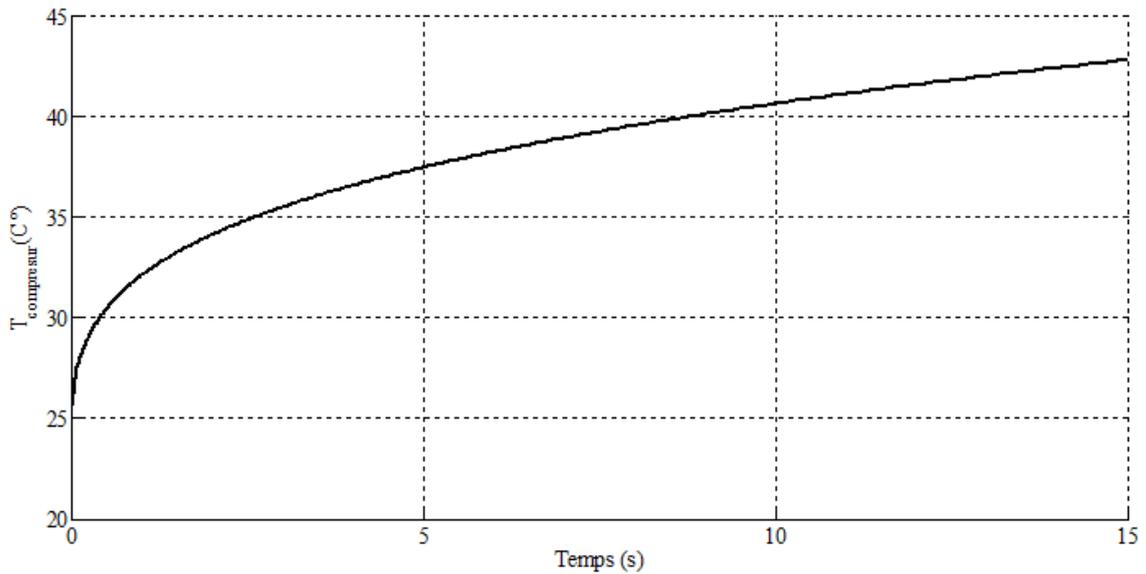


FIGURE 4.10 – l'Effet de la température du compresseur en fonction de temps.

Chaque point de mesure a été relevé après quelques minutes (Le système a pu se stabiliser pour chacune des points de fonctionnement voulu). Le compresseur nécessite un refroidissement supplémentaire, afin de ne pas dépasser la valeur maximale de température de $130C^0$ sur la tête de compression.[9] Nous voyons sur la figure (4.11) le débit massique monte à maximum de $0.19kg s^{-1}$ avec l'équation (2.8) et l'équation (2.12). La commande du moteur nous permet que de monter à $12000tr/min$. le débit est quasiment proportionnel à la vitesse de rotation du moteur.

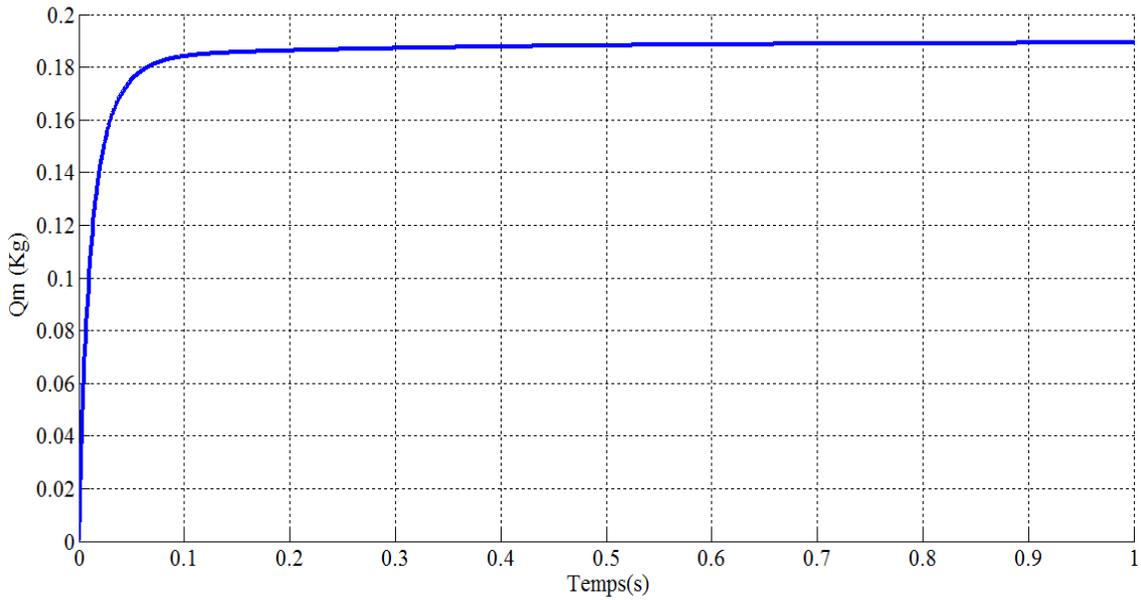


FIGURE 4.11 – Caractéristique de debit en fonction de temps.

On voit sur la figure(4.12) la forme du signale d'une puissance en fonction de temps qui ce compose 3 partie principale : (0 à 5)(s) :dans cette partie la puissance augmente en une fonction exponentielle $(2.3) \cdot 10^4 W$. Et immédiatement après le temps(10s), elle se manifeste sous forme linéaire Et dans la dernière partie la forme du signale de la puissance se présente sous forme non linéaire et elle tendance à l'infini $(3) \cdot 10^4 w$.

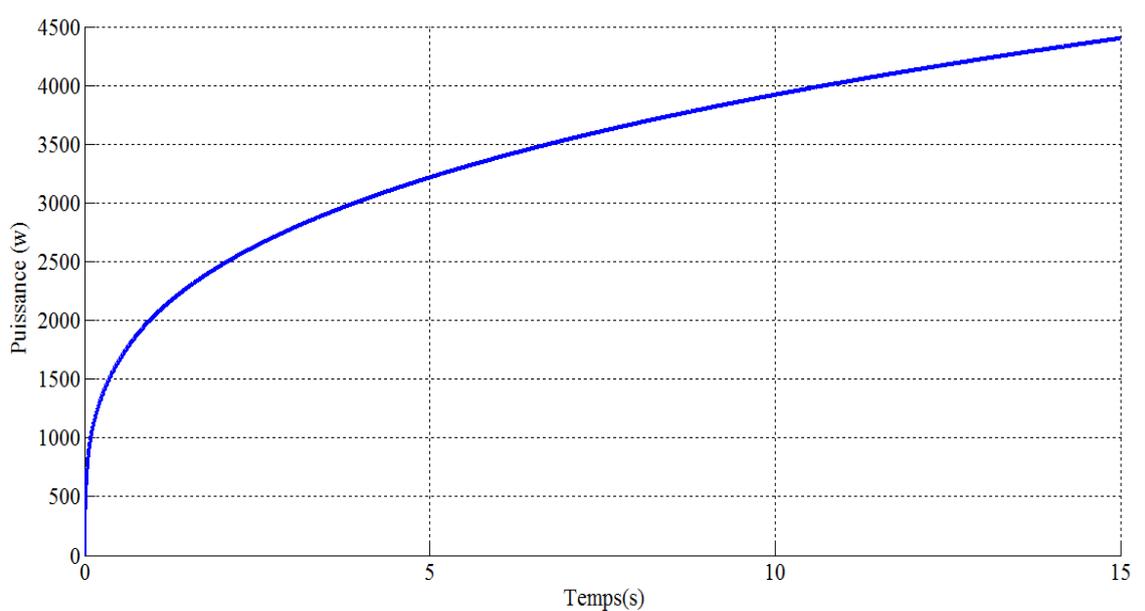


FIGURE 4.12 – Caractéristique de la puissance en fonction de temps.

On observe dans la figure(4.13)pression l'air avec la relation eq(2.5)en fonction de temps la pression d'entrée peut s'élever jus'qua 0.8 bar absolu en entrée comme le compresseur fournit une pression de sortie jus'qu'à 1.8 bar absolu

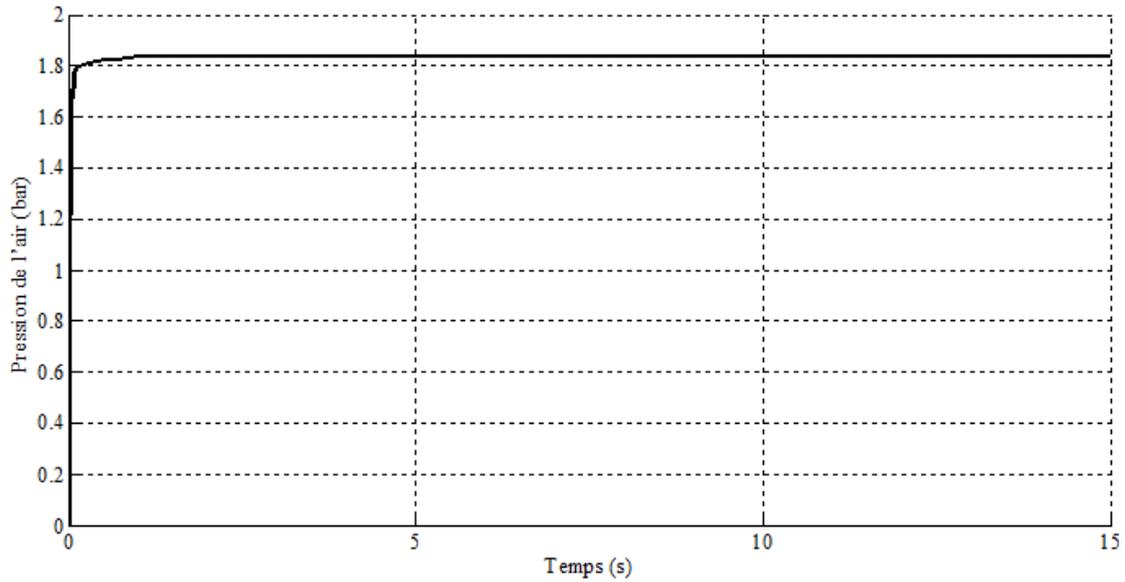


FIGURE 4.13 – Caractéristique la pression de sortie en fonction de temps.

4.2.6 Resultats simulations des convertisseurs (DC/DC),(DC,AC)

Les résultats de la simulation l'hacheur boost de tension eq(3.9)apartir (3.14) utilisé sont présentés sur la la figure(4.11) ,La tention de convertisseur. L'utilisation du convertisseur élévateur (Boost) permet d'augmenter la tension délivrée à l'entrée de l'onduleur.Fig(4.14),qui représente la tension d'entrée de pile et la tension de sortie, en observe bien que la tension augmente de la valeur (45 V) jusqu'à 333V pour l'utilisation à l'intérieur de l'onduleur.

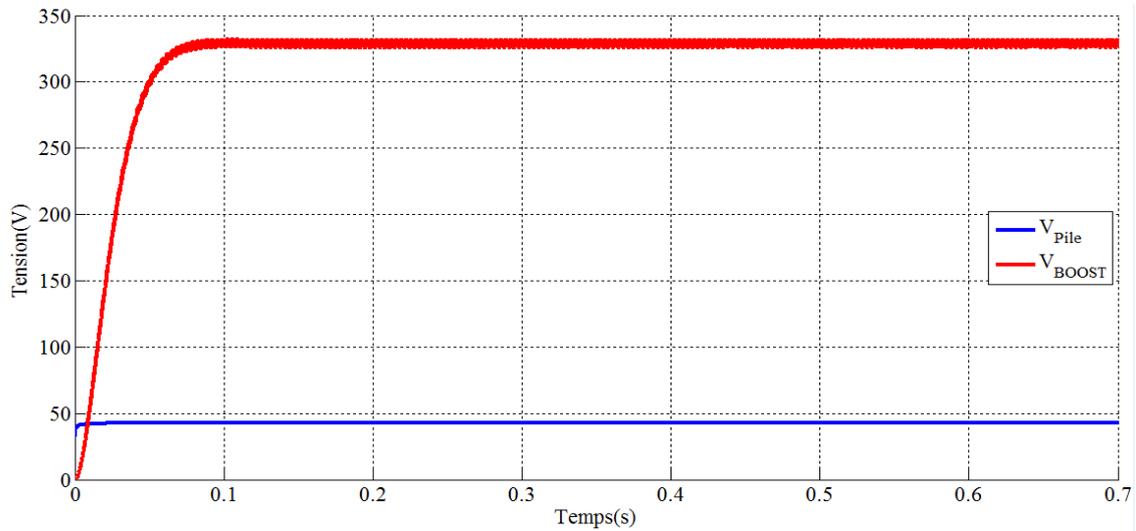


FIGURE 4.14 – L’allure de tension a la sortie de l’hacheur.

A partir des relations des equations (3.1)à(3.8)La figure (4.15)représente la tension d’entrée continu et la tension simple d’une phase de d’onduleur où la valeur maximale est 220V. Celui-ci commandé par la commande MLI et délivre une tension alternative 333V pour l’alimentation du moteur asynchrone

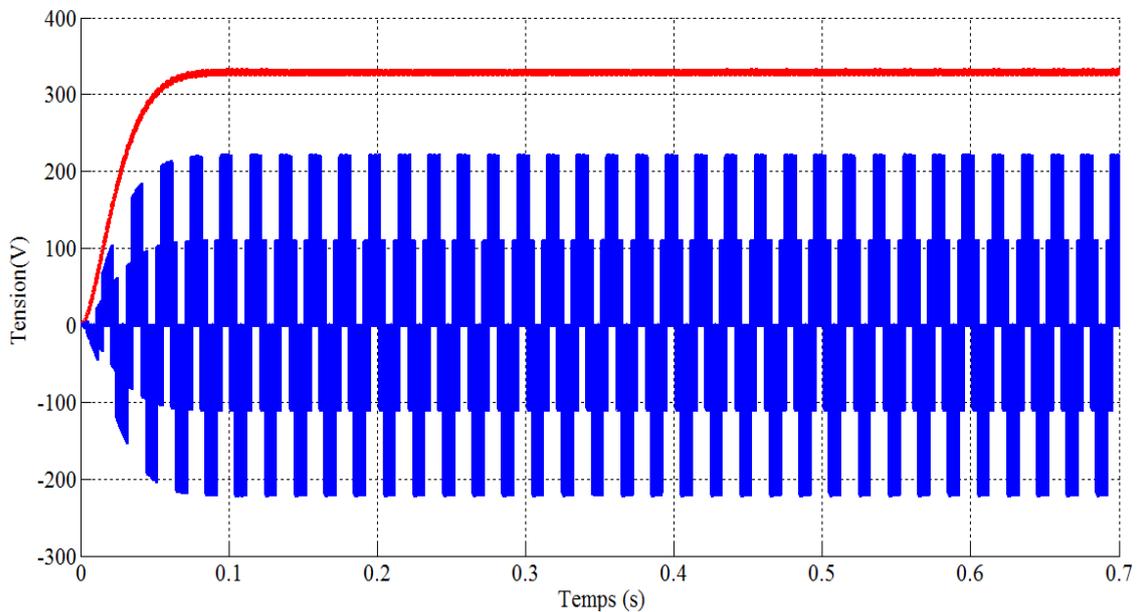


FIGURE 4.15 – L’allure de tension a la sortie de l’onduleur.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation complète de notre système (P à C et groupe moto-compresseur) a été réalisée, et une décomposée en une structure de boucle Interne et boucle externe. La première partie de ce chapitre est consacrée à la description de simulation d'un modèle de la pile à combustible et obtenues les différentes courbes de paramètres (tension courant ; puissance ...). La deuxième partie on 0 simulation de groupe moto-compresseur et obtenues différentes courbes de paramètres (pression d'air ; débit d'air...) pour alimentant la pile combustible 30kw. Les résultats pratiques obtenus ouvrent ainsi l'horizon pour la conception de nouvelles lois de commande appliquées au système d'alimentation en air de type (PEMF)

Conclusion générale

Dans la première partie, nous avons réalisé une description générale d'une pile à combustible de type PEMFC, de son fonctionnement et de son système pile à combustible. Ce dernier est composé de la pile à combustible elle-même et de différents circuits auxiliaires destinés à conditionner et à assurer l'approvisionnement en réactifs (hydrogène et air), l'évacuation des produits et de la chaleur. Cependant, ces circuits auxiliaires altèrent de manière importante le rendement global du générateur à pile à combustible, en consommant à eux seuls près de 25 à 35% de l'énergie électrique disponible en sortie de la pile. Dans le bilan énergétique de ces circuits auxiliaires, nous avons souligné que la consommation du circuit d'air composé d'un groupe moto-compresseur représente à lui seul environ 80% de la consommation intrinsèque du système pile à combustible. Il s'avère donc judicieux d'agir sur le groupe moto-compresseur, afin d'optimiser énergétiquement ce dernier. Ensuite, nous avons présenté les différentes technologies de compresseurs. Nous partons par la présentation des différents moteurs électriques en détaillant les machines synchrones à aimants permanents.

Après avoir fixé le cahier des charges en fonction des données de la pile à combustible de 30 kW. Dans une deuxième partie, on étudie un groupe moto-compresseur constitué d'un compresseur centrifuge, entraîné par un moteur synchrone à aimants permanents, relié au compresseur. Par la suite, nous avons fait l'étude détaillée de chaque composant à savoir la machine synchrone à aimants permanents, le compresseur.

Dans une troisième partie on présente les convertisseurs statiques qui sont connectés au groupe moto-compresseur, et on a utilisé le convertisseur élévateur (Boost) pour augmenter la tension délivrée à l'entrée de l'onduleur. Nous avons ensuite dans la quatrième partie proposé un modèle pour ce groupe moto-compresseur, développés sous

le logiciel Matlab/Simulink. Compte tenu des coûts très importants que représente la réalisation de ce genre de dispositifs, la modélisation et la simulation sont des passages obligatoires pour notre étude. Le modèle du groupe moto-compresseur proposé dans cette partie du mémoire présente des performances, en terme de comportement dynamique, de plus, les équations symboliques du modèle analytique permettent de faire des liens explicites entre tous les paramètres et les phénomènes physiques qui interviennent dans le système.

Annexe

Annexe A

Le cahier de charge pour le systeme piles à combustible

cette étude , en fait l'acquisition d'un groupe moto-compresseur. Ce système a été développé spécialement pour applications pile à combustible type PEM. Le compresseur est capables de fournir un débit maximal de 100 g/s pour une pression de 2 bars (absolu). Le compresseur est capable de délivrer 0,5 litre d'air par tour. La vitesse de rotation du groupe moto-compresseur est de 12000 tr/min pour un débit massique de 100 g/s. La pile à combustible sera seulement émulée pour de simulation par une vanne de régulation de pression qui sera pilotée afin de réaliser les pertes de pression en sortie du compartiment d'air d'une pile.[9]

- Le nombre N de cellules : Elle est composée de 90 cellules élémentaires mises en série qui fixe la tension du stack.
- La surface A : d'une surface de membrane de 770 cm² d'une cellule qui fixe le courant du stack.
- La puissance : il s'agit d'un pile de type PEMFC de puissance nominale de 30kW fournie par la société Héliion.
- La tension de sortie 43.65v qui fournit avec la pile.
- une charge électronique de 25kW, qui permet de faire débiter un courant à la pile jusqu'à 710A.
- des filtres sur les circuits d'entrée d'hydrogène et d'air du stack.

Le tableau 3 indique les limites des conditionnements des gaz et du fonctionnement de la pile qui ont été définis par le constructeur du stack. A partir de ces don-

Courant fourni par la pile	$0 < I_{PAC} < 400A$	
Température des cellules " stack"	$60 < T_{PAC} < 70^{\circ}C$	
Pression des gaz	$1.4 < P_{H_2} < 1.6Bars(abs)$	$1.4 < P_{Q_2} < 1.6Bars(abs)$
Facteur de stoechiométrie des gaz	$1.4 < FSA < 2$	$2 < FSA < 2.5$
Humidité relative des gaz	$HR_{H_2} = 0\%$	$70 < HR_{Q_2} < 100\%$
Mode de fonctionnement	H_2 : bouché + purge périodique , ouvert	Q_2 : ouvert
Pureté des gaz	H_2 : $CO < 1ppm$ $S < 1ppm$ $NH_3 < 1ppm$	Q_2 : $CO < 5ppm$ $S < 1ppm$ $NH_3 < 1ppm$

TABLE 4.1 – Limites de fonctionnement et pureté des gaz de la (P à C)30kW en mode Hydrogène/Air.

nées,notamment concernant celles de l'air,nous allons définir un cahier des charges pour le groupe moto-compresseur que l'on va choisir.Pour les applications à base de (P à C),la première caractéristique importante du compresseur est sans doute la qualité de l'air comprimé qu'il produit.Comme on peut le constater dans le tableau 3,les quantités des particules néfastes à la durée de vie de la pile,comme les composés soufres,l'ammoniac ou les gouttelettes d'huile, sont strictement limitées (<1 ppm - nombre de particules par million). La deuxième caractéristique recherchée pour le groupe moto-compresseur est la pression maximale de l'air comprimé.D'après les données du constructeur de (P à C),un compresseur produisant de l'air jusqu'à 1.9 bars est suffisant. La troisième caractéristique, que l'on peut définir à partir de ces données,est le débit maximal que le compresseur doit fournir en entrée de (P à C) mais aussi le débit maximal sortie de (P à C) q. La plage de débit peut être facilement calculée à partir des valeurs maximales du courant (I P à C) et du facteur de stoechiométrie du compartiment cathodique (FSC) de la pile. D'après la loi de Faraday,le débit molaire d'oxygène (QO2) nécessaire est exprimé en fonction du courant de la pile (I P à C).

Voici les caractéristiques du compresseur :

- * débit maximal :100 g/s.
- * débit minimal :5 g/s.
- * gamme de pression : 200 kPa (abs).
- * vitesse :12500 tr/min (à 100 g/s).
- * déplacement :0,5 litre/tr.

* rapport de pression :1,44.

* température maximale :130C⁰ (à ne pas dépasser pour raison de sécurité).

Le moteur est un moteur synchrone à aimants permanents dont voici ces caractéristiques :

* puissance : 13,5 kW.

* fréquence : 1000 Hz (Fondamental)

* nombre de phases : 3.

* température ambiante maximale : 40 C⁰ .

* température maximale collecteur : 180C⁰ (Thermocouple type K).

* rendement : 93 %

* courant/ phase : 40A(*RMS*).

* constante de couple :0,31Nm/A(*RMS*).

* résistance par phase : 0,074 Ohms.

* inductance par phase : 92 µH.

* tension : 340-400 Vdc.

* nombre de pôles : 10.

Index des notations et valeur nominale des paramètres du système.

Annexe B

Symbole	Paramètre	Valeur
A	Surface active des cellules	$770(cm^2)$
B	Constante déterminée par l'échange de protons	0.016
C	Capacité équivalente.	$2.5(F)$
C_{H^+}	Concentration en phase liquide de H^+	$(J = Kg : K)$
C_{H_2}	Concentration d'hydrogène en phase liquide	$(J = Kg : K)$
C_{H_2O}	Concentration en phase liquide de l'eau	$(J = Kg : K)$
C_{O_2}	Concentration en oxygène	
J_{max}	Densité de courant maximale	$(1.5/Cm^2)$
K_a^0	Constante de vitesse de l'anode	
K_c^0	Constante de vitesse de cathode	
E_{Nernst}	la force électromotrice théorique d'une cellule	(V)
l	épaisseur de la membrane	$(51\mu m)$
N	Nombre de cellules de l'empilement	$1.275 * 10^{-4}(m)$
$P_{consumed}$	Puissance consommée par la pile.	(W)
ζ_2	Coefficients du modèle obtenus par expérimental.	0.00312
ζ_3	Coefficients du modèle .	$7.14 * 10^{-5}$,
ζ_4	Coefficients du modèle	$-1.87 * 10^{-4}$

R_{act}	Résistance équivalente à l'activation.	Ω
R_c	Résistances de membrane et electrode	Ω
R_{con}	Résistance équivalente à la concentration	Ω
R_{stack}	Résistance équivalente de la pile à combustible	Ωcm^2
i	Courant du circuit équivalent.	(A)
i_C	Courant de la capacité équivalente C..	(A)
J	Densité de courant.	(A/m ²)
Δ_G	Changement d'énergie gratuit de Gibbs.	237180(J/mol)
Δ_{Gc}	Changement d'énergie Gibbs.	
F	Constante de Faraday	96485.3415(C/mol)
Δ_S	Variation d'enthalpie libre	-163.15molK
P_{H_2}	Pression d'hydrogène	(bars)
P_{O_2}	Pression D'oxygène	(bars)
P_{stack}	Puissance de sortie de la pile.	(Pa)
r_M	Résistivité de l'échange de membrane	(Ωcm^2)
R	Constant universelle des gas	8.314(J/(mol.K))
R_a	Résistance équivalente.	$3 * 10^{-45}$
t	le temps	(s)
T	le temperature	333(K)
T_{ref}	le temperature de referance	298.15K
v_d	Chute de tension	(v)
V_{act}	Pertes d'activation	
V_{con}	Pertes de concentration.	

V_{Ohm}	Pertes de ohmic.	
V_{stack}	Tension de sortie de la pile..	(V)
α_c	Coefficient d'activation.	1004(J/Kg.K)
γ	Teneur en eau de la membrane.	20(m)
τ	Constante de temps du circuit équivalent..	(s)
$\zeta_{1,2}$	Coefficients du modèle obtenus par expérimental.	-0.9514, 0.00312

Annexe C

Modelisation analytique du systemes(P à C) sous matlab/simulink

Nous avons presentée les schema bloc sous matlab /simulink suivant :

- Bloc de compresseur centrifuge .
- Bloc de la pile combistuble (PEMFC).
- Bloc de motor (MSAP).
- Bloc Découplage.
- Bloc de transformée de Park des tensions ($V_{d,q}$, $V_{a,b,c}$)
- Bloc Transformée de Park inverse des tensions ($V_{a,b,c}$, $V_{d,q}$)
- (DC/DC).
- (DC/AC)

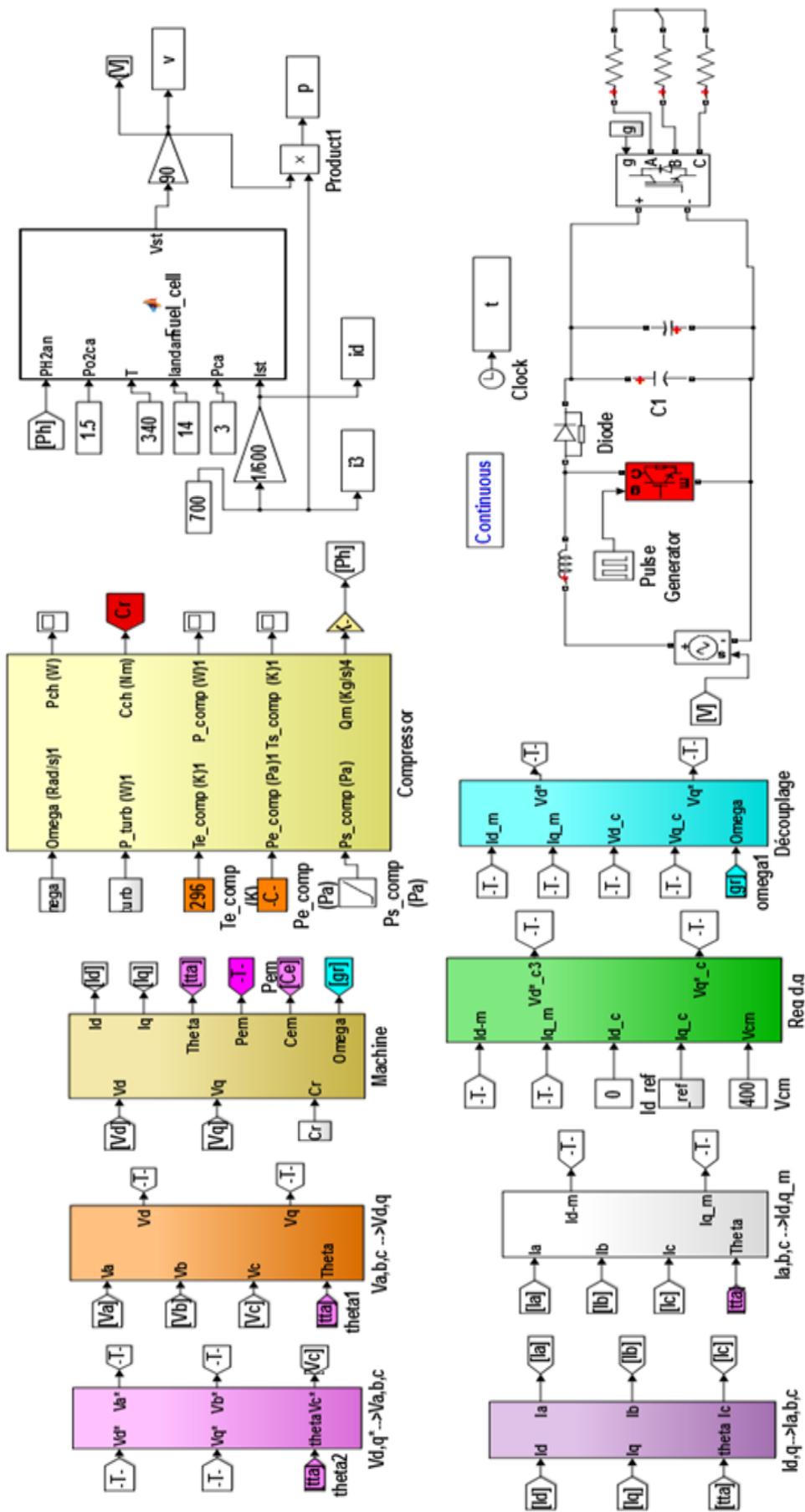


FIGURE 4.16 – Modele globale des systeme pile à combustible (PEMFC).

Bibliographie

- [1] I Valero Exposito. " Infrfacage et controle commande de Pile à combustible pour application stationnaire et transport". Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2004.
- [2] R Saisset. "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire". Thèse de doctorat,Agrégé de Génie Electrique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan,2 Avril 2004.
- [3] J Lachaize. "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction". Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse,20 septembre 2004 .
- [4] A Saadi. " Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC ". Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider - Biskra,2014.
- [5] J Ramousse. "Transferts couple masse-charge-chaleur dans une cellule pile a combustible a membrane polymere". Thèse de doctorat, institut national polytechnique de lorraine,21 november 2005.
- [6] F Barbir. "PEM Fuel Cells : Theory and Practice". Elsevier Academic Press, New York, 2005.
- [7] J Larminie and A. Dicks. "Fuel Cell Systems Explained". John Wiley Sons, 2003.
- [8] P.O. Rayan,S.-W. Cha, C. Whitney, and B. Fritz. "Fuel cell fundamentals.". John Wiley Sons New York, 2006.
- [9] G GRANDPIERRE Raphaël. "Alimentation en air d'une pile a cmbustible : conceptio du systeme, caracterisation, modelisation". memoire d'ingenieur cnam, centre regional france-compte, 4 Décembre 2008.

- [10] J Jia, Member, IEEE, Q. Li, Y. Wang, Senior Member, IEEE, Y. T. Cham, Senior Member, IEEE, and M. Han. "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell". IEEE transactions on energy conversion, VOL. 24, NO. 1, MARCH 2009
- [11]
- [12] I Matraji. "Contribution à la commande non-linéaire robuste des systèmes d'alimentation en air des piles à combustible de type PEM". Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013
- [13] J.T Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng.. "Control of fuel cell breathing". IEEE, Control Systems, Vol. 24, No. 2, 2004..
- [14] H Azzi. "Etude et modélisation d'une pile à combustible". Thèse de magister, Université A.MIRA-BEJAIA , 09/05/2016.
- [15] S Merzoug Med. "Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une machine synchrone à aimants permanents",". Mémoire d'ingénieur, Université de Batna, 2008. conception du système, caractérisation, modélisation".
- [16] S.S ZAOUZAOU.MEZIANI. "Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique". Mémoire d'ingénieur , Université Abderahmane Mira, Bejaia-Alger, 2016-2017.
- [17] S.E NAFFOUTI. "Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque". Mémoire d'ingénieur , Université de Monastir-Tunis, 02/07/2012.
- [18] S.S ZAOUZAOU.MEZIANI. "Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique". Mémoire d'ingénieur , Université Abderahmane Mira, Bejaia-Alger, 2016-2017.