



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Energies Renouvelables
Énergies solaires photovoltaïques

Réf. :

Présenté et soutenu par:
ADROUCHE Mohamed Elhacen
BAALI CHERIF Sahraoui

Le : 30 septembre 2020

Connexion au réseau d'un système pile à combustible (commande et modélisation)

Jury :

Dr. Messaoud MOHAMMEDI	MCB	Université de biskra	Président
Dr. SAADI Aicha	MCA	Université de biskra	Encadreur
Dr. Rabhi BOUALAGA	Professeur	Université de biskra	Examineur

Année universitaire: 2019 – 2020



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Energies Renouvelable
Énergies solaires photovoltaïque

Présenté et soutenu par :
ADROUCHE Mohamed Elhacen
BAALI CHERIF Sahraoui

Le : 30 septembre 2020

Connexion au réseau d'un système pile à combustible (commande et modélisation)

Présenté par :

ADROUCHE Mohamed Elhacen
BAALI CHERIF Sahraoui

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SAADI Aicha

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Messaoud MOHAMMEDI

Cachet et signature



Remerciement

Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il ma données durant toutes ces années d'étude. La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au soutient de plusieurs personnes à qui nous voudrons témoigner toute ma reconnaissance. Nous voudrons tout d'abord adresser toute nos gratitude au directeur de ce mémoire, Dr. SAADI AICHA, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexion.

Mes remerciements particuliers s'adressent au docteur Dr. MESSAOUD MOHAMMEDI pour ses informations et monsieur Pr. RABHI BOUALAGA pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptons d'être les membres de jury de ma soutenance. Nous désirons aussi remercier les enseignants qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires. Nous voudrons exprimer nos reconnaissance envers les amis et collègues qui nous avons apportés leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Enfin, je tienne à témoigner toute mes gratitudes à mes parents pour leur confiance et leur support inestimable.



Dédicaces

*Je dédions ce modeste travail
Aux êtres les plus chères mères
à nos cœur*

*Notre parents, qui nous ont
beaucoup*

*soutenu durant nos cursus
d'étude et à qui nous
serons éternellement*

Reconnaissant

- A nos chères sœurs

- A nos frères

- A nos amis

الملخص:

تُصنف الخلية الوقودية ضمن الطاقات المتجددة و النظيفة ، فهي تعتمد على غاز الهيدروجين كمصدر وقود أساسي لها حيث تقوم بدورها بتحويله الى طاقة كهربائية يُمكن استغلالها في شتى مجالات الحياة ؛ و الخلية لها أنواع عديدة من بينها خلية ذات غشاء تبادل البروتونات(PEMFC). الهدف في هذا الموضوع هو ربط الخلية ذات النوع PEMFC مع الشبكة الكهربائية ذات الجهد المنخفض BT، ولفهم افضل للموضوع فإننا نلجأ الى استخدام النمذجة في MATLAB/SIMULINK ، حيث استخدمنا النموذج الساكن LARMINIE-DICKS للخلية PEMFC و الحصول على جهد ثم نستخدم محولات الجهد من نوع DC/DC و DC/AC، و متحكمات MLI و MPPT و منظم PI و محول كهربائي لتوزيع الكهرباء في الشبكة . اما بالنسبة الى النتائج المُتحصّل في مخرج DC/AC فكانت كالتالي: موجة جيبية دورية، تردد 50Hz، جهد 220V/380 اذن المحول DC/AC وفر لنا موجة جيبية نقية في التيار و الجهد و THD منخفض ، و بالتالي اصبح بالإمكان ربط النظام في الشبكة الكهربائية لتغذية حمولة.

الكلمات المفتاحية: الخلية الوقودية PEMFC، النموذج LARMINIE-DICKS، محول جهد DC/DC ، محول جهد DC/AC، نمذجة الخلية، ربط الخلية بالشبكة الكهربائية BT ، تغذية حمولة RL .

Résumé :

La pile à combustible est classée dans les énergies renouvelables et propres, car elle dépend de l'hydrogène gazeux comme principale source de carburant, qui à son tour la convertit en énergie électrique qui peut être utilisée dans divers domaines de la vie. La cellule a de nombreux types, y compris la cellule à membrane échangeuse de protons (PEMFC). L'objectif de cette rubrique est de connecter la pile PEMFC au réseau électrique basse tension BT, et pour une meilleure compréhension du sujet, nous avons recours à la modélisation dans MATLAB / SIMULINK, où nous avons utilisé le modèle statique LARMINIE-DICKS pour la pile PEMFC et obtenir une tension puis utiliser des convertisseurs de tension de type convertisseurs DC / DC et DC / AC avec la commande MLI et Hystérésis, régulateur PI pour la distribution électrique dans le réseau. Quant aux résultats obtenus dans la sortie DC / AC, ils étaient les suivants: onde sinusoïdale périodique, fréquence 50Hz, tension 220V / 380V, le transformateur DC / AC nous a donc fourni une onde sinusoïdale pure en courant et en tension et le THD était faible, et il est donc devenu possible de connecter le système au réseau électrique.

Les mots clés : Pile à combustible PEMFC, Le modele Larminie et Dicks, Convertisseur DC/DC, Convertisseur DC/AC, Modelisation de la cellule, Injection la cellule au réseau électrique BT, Alimentation une charge RL.

Sommaire :

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux :	III
INTRODUCTION GENERALE :	5
I. CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA PILE A COMBUSTIBLE	8
I.1 Introduction :.....	8
I.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PILE A COMBUSTIBLE :	8
I.2.1 Réactions de base :	9
I.3 LES DIFFERENTS TYPES DES PILES A COMBUSTIBLE :	11
I.4 HYDROGENE (H) :	12
I.5 LES APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES :	13
I.5.1 Applications portables :	13
I.5.2 Applications stationnaires :	14
I.5.3 Applications dans le transport :	14
I.6 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES PILE A COMBUSTIBLE :	15
I.6.1 Les avantages sont les suivants :.....	15
I.6.2 Cependant il y a aussi des inconvénients qui sont les suivants :.....	16
I.7 PILE A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS PEMFC :.....	16
I.7.1 Principe de fonctionnement :	16
I.7.2 Constitution d'une pile à combustible de type PEM:.....	17
I.7.3 L'alimentation des piles en combustible :.....	22
I.7.4 Système pile à combustible embarquée :	23
I.8 MODELE ELECTROCHIMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC :	26
I.8.1 Le modèle statique de Larminie et Dicks :.....	27
I.8.2 Pertes d'activation :.....	27
I.8.3 Pertes ohmique :.....	28
I.8.4 Pertes de concentration :	28
I.9 CONCLUSION :.....	28

II. Chapitre II : LES CONVERTISSEURS STATIQUES	31
II.1 Introduction :.....	31
II.2 Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs DC/DC et DC/AC :.....	31
II.3 Les Hacheurs :	31
II.4 Rôle des convertisseurs DC-DC :.....	32
II.5 Applications des convertisseurs DC/DC :	33
II.6 Différents types des hacheurs :.....	33
II.6.1 Hacheurs réversibles :.....	33
II.6.2 Hacheurs non réversibles :.....	34
II.6.3 LES TYPES DES HACHEURS NON REVERSIBLES :	34
II.6.3.1 Convertisseur Buck :.....	34
II.6.3.2 Hacheur survolteur (Boost) :.....	35
II.6.3.3 Le convertisseur Buck-Boost :.....	35
II.7 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur :	36
II.8 Comparaison des montages :	36
II.9 CHRONOGRAMMES DE COURANT ET DE TENSION POUR L'HACHEUR BOOST:	38
II.9.1 Hacheur Boost :.....	38
II.10 CONTROLE DES CONVERTISSEURS DC/DC :	39
II.10.1 Contrôle linéaire des convertisseurs DC/DC :.....	39
II.10.1.1 Commande par Hystérésis :	39
II.10.2 CONTROLE NON-LINEAIRE DES CONVERTISSEURS DC/DC:.....	40
II.10.2.1 Technique des modes glissants :.....	40
II.10.1.2 Linéarisation entrée/sortie :.....	40
II.11 LES ONDULEURS :	40
II.12 PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT :.....	41
II.13 LES APPLICATIONS DES ONDULEURS :.....	42
II.13.1 Alimentation de secours	42
II.13.2 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	43

II.14	TYPES D'ONDULEURS :	43
II.14.1	Les onduleurs non autonomes :	43
II.14.2	Les Onduleurs autonome :	43
II.14.2.1	Les onduleurs de tension :	44
II.14.2.2	Les onduleurs de courant :	44
II.14.3	TYPES D'ONDULEURS DE TENSION :	44
II.14.3.1	Les onduleurs triphasés :	44
II.15	STRATEGIES DE COMMANDE :	47
II.15.1	Commande d'onduleur de tension triphasé :	47
II.15.1.1	Commande pleine onde (dite 180°) :	48
II.15.1.2	Commande 120° :	48
II.15.2	Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) :	48
II.15.2.1	Modulation sinusoïdale (MLIS) :	49
II.15.2.2	Modulation vectorielle (SVM) :	50
II.16	CONCLUSION.....	51
III.	CHAPITRE III : SIMULATION DE SYSTEME PILE PEMFC - RESEAU	53
III.1	Introduction :	53
III.2	LE SYSTEME DE PILE A COMBUSTIBLE PROPOSEE :	53
III.3	SIMULATION DU GENERATEUR PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC :	54
III.3.1	Modèle statique de Larminie-Dicks :	54
III.3.2	Simulation d'une cellule de la pile par le modèle Larminie et Dicks :	55
III.3.3	Simulation du PEMFC (stack) :	57
III.3.4	Résultat de simulation :	58
III.4	MODELISATION DU SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE AVEC HACHEUR COMMANDE :	59
III.4.1	Commande par Hystérésis :	59
III.4.2	Schéma de simulation :	60
III.4.3	Résultat de simulation :	61
III.5	MODELISATION GLOBAL DE SYSTEME PAC RACCORDE AU RESEAU :	62

III.5.1	Schéma de simulation :.....	63
III.5.2	La commande MLI :.....	63
III.5.3	Résultat de simulation de schéma globale :.....	64
III.6	CONCLUSION :.....	68
	CONCLUSION GENERALE :.....	70
	LES REFERENCES :.....	73

Liste des figures

Figure I-1 : Schéma de principe de Fonctionnement d'une pile à combustible.	9
Figure I-2: Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide.....	10
Figure I-3: Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique.....	10
Figure I-4 Réactions chimiques de différentes piles.	12
Figure I-5: Application de Pile à combustible sur le téléphone mobile et le PC.....	13
Figure I-6 : Unité de pile combustible.....	14
Figure I-7:Station hydrogène.....	15
Figure I-8: Pile Ballard Mark 90véhicule Ford FCV.	15
Figure I-9: Schéma de principe d'une pile à combustible PEM.....	17
Figure I-10: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC.	18
Figure I-11 Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro Encyclo).	18
Figure I-12: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène.	23
Figure I-13: Schéma illustrant les différents éléments d'un système PaC.	24
Figure I-14: Caractéristique Tension-courant d'une pile PEM.	27
Figure II-1 Convertisseur DC/DC.	32
Figure II-2: Différents types de hacheurs.	33
Figure II-3 Schéma réel du Convertisseur Buck.	35
Figure II-4: Convertisseur survolteur (Boost).	35
Figure II-5: Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.	36
Figure II-6: Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.	37
Figure II-7: Chronogrammes de courant (gauche) et tension (droite) d'un hacheur Boost.	38
Figure II-8:Principe de la conversion continue - alternative (DC/AC).	41
Figure II-9:Principe de fonctionnement de l'onduleur.	41
Figure II-10:K en position (1)	42
Figure II-11:La tension avec K en position (1) et (2).....	42
Figure II-12: Alimentation de secours.....	43
Figure II-13: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.....	43
Figure II-14:Onduleur triphasé	44
Figure II-15 : Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge RL montée en étoile (commande 180°)	47
Figure II-16:Commande pleine onde.....	48
Figure II-17: Commande 120°	48
Figure II-18: Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur	50

Figure II-19: Schéma de simulation d'une commande MLI.....	50
Figure III-1: Schéma synoptique d'un système PEMFC relié au réseau électrique.....	54
Figure III-2: Schéma de simulation de cellules par le modèle Larminie-dicks.....	56
Figure III-3: Caractéristique de tension en fonction de courant pour une cellule.....	56
Figure III-4 : Caractéristique de puissance en fonction de courant pour une cellule.....	57
Figure III-5: Simulation de la pile par le modèle Larminie-dicks.....	57
Figure III-6: Caractéristique de tension en fonction de courant (stack).....	58
Figure III-7: Caractéristique de puissance en fonction de courant (stack).....	58
Figure III-8: Schéma de simulation d'une PàC avec un hacheur boost et sa commande.....	60
Figure III-9: Caractéristique $V_{pile}=f(t)$	61
Figure III-10: Caractéristique $V_{hacheur} V_s=f(t)$ du hacheur Boost.....	61
Figure III-11: Rapport cyclique du hacheur.....	62
Figure III-12: Schéma de simulation globale PAC- hacheur Boost-onduleur MLI Réseau.....	63
Figure III-13 :Signal de commande MLI pour les interrupteurs.....	63
Figure III-14 : Tension d'entrée d'onduleur.....	64
Figure III-15 : Courant d'entrée onduleur.....	64
Figure III-16: Tension simple V_{AN} de la sortie d'onduleur.....	65
Figure III-17: Tension composée V_{AB}	65
Figure III-18: Les courants de sortie d'onduleur i_a, i_b, i_c	66
Figure III-19:Analyse spectrale de tension V_{AN}	66
Figure III-20:Analyse spectrale de courant i_a	67
Figure III-21: analyse spectrale de tension V_{AN} après l'augmentation de F_p	68
Figure III-22: analyse spectrale du courant i_a après l'augmentation de F_p	68

Liste des tableaux :

Les principales caractéristiques et propriétés de ces différentes piles sont rappelées dans le tableau)I-1).....	11
Tableau I-1: Différents types de piles à combustible.	11
Tableau I-2: Les réactions chimiques sur les électrodes de PEMFC.	17
Tableau II-1: Caractéristique des montages en mode conduction continu.	37
Tableau II-2 : Les tensions et les courants correspondants à chaque état de commutation de l'onduleur.	46



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie pour de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation) et un facteur essentiel pour le développement économique.

L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de deux milliards d'êtres humains n'ont pas accès à l'électricité en raison de la fragilité de l'économie, du manque de moyens, d'infrastructures lourdes, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé [1].

Les énergies renouvelables représentent actuellement un pourcentage très limité de l'énergie employée. Actuellement, seule l'énergie hydraulique et la biomasse sont exploitées massivement, cette dernière l'est davantage dans les pays en voie de développement. Les autres types d'énergie renouvelable ne représentent que des espoirs pour l'avenir, puisque leur exploitation n'est pas encore mûre techniquement et leur rentabilité économique dépend toujours des subventions étatiques. De plus, la nature aléatoire de ces sources constitue aussi un handicap à surmonter avant de pouvoir être utilisées comme source d'énergie principale dans nos sociétés. Compte tenu de cette situation, L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie apparaît actuellement comme une solution très prometteuse pour l'avenir car les ressources potentielles en hydrogène sont très importantes. L'hydrogène conduirait à des rendements élevés, permettrait de résoudre le problème de stockage en grande quantité de l'électricité, De plus, on pourrait avoir recours aux énergies renouvelables comme source d'énergie principale en utilisant conjointement une Pile A Combustible (PAC) et l'électrolyse pour fabriquer son combustible d'hydrogène. A tout cela, il faut ajouter qu'une correcte utilisation de l'hydrogène permettrait de réduire ostensiblement les émissions globales des gaz à effet de serre [2].

La pile à combustible, élément électrochimique permettant de convertir l'énergie de l'hydrogène en électricité, est le moyen par excellence pour utiliser ce vecteur énergétique afin d'alimenter des charges électriques, notamment dans le cadre du transport. Les piles à combustibles sont encore à ce jour des sources à fort courant et à faible niveau de tension. Leur utilisation dans les systèmes statiques et dynamiques passe souvent par une élévation de la tension en utilisant des convertisseurs statiques adaptés.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en trois chapitres : Le premier se propose de définir la pile à combustible, nous y aborderons brièvement les différents types de cette dernière spécifiquement PEMFC étant celle que nous utilisons dans notre travail.

Le deuxième chapitre, concerne les convertisseurs électriques, leurs principes de fonctionnement avec la spécificité des convertisseurs DC/DC et AC-AC utilisés dans les systèmes de production d'énergie, outre ses techniques de commande et son domaine d'application.

Dans le troisième chapitre nous présentons la simulation d'un système pile à combustible raccordé au réseau sous l'environnement Matlab Simulink. Pour obtenir une bonne qualité d'énergie injectée au réseau, Ce but sera mis en évidence par l'observation des courbes de simulation de chaque étape.

Enfin, nous clorons ce mémoire par une conclusion générale qui donnera compte de nos résultats en faisant la somme de notre travail.

CHAPITRE I

I. CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA PILE A COMBUSTIBLE

I.1 Introduction :

Actuellement, la crise énergétique et l'augmentation du niveau de pollution sont des problèmes majeurs à travers le monde. Des sources d'énergies nouvelles, renouvelables et propres doivent donc être considérées. Une nouvelle source d'énergies renouvelables et propres connaît un grand intérêt c'est la pile à combustible. Elle convertit l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité sans pollution. Il y a 150 ans, en 1839, la première pile à combustible a été inventée par Sir William Robert Grove, un professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres. Depuis, il est connu comme « le Père de la pile à combustible ». Ses expériences sur l'électrolyse - l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène – ont mené à la première mention d'un dispositif qui plus tard se nommera pile à combustible. Il a pensé qu'il était possible de renverser le procédé d'électrolyse et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène.

Pour vérifier cette théorie il a enfermé deux bandes de platines dans des bouteilles séparées, l'une contenant de l'hydrogène l'autre de l'oxygène. Quand ces récipients ont été immergés dans de l'acide sulfurique dilué un courant a commencé à s'établir entre les deux électrodes et de l'eau s'est formée dans les bouteilles de gaz. Pour augmenter la tension produite, il a placé plusieurs de ces dispositifs en série et a produit ce qu'il a appelé une « batterie à gaz », le précurseur de la pile à combustible moderne. [3] Par ce présent travail, nous présentons un modèle de pile à combustible (PAC) tend à mieux comprendre les phénomènes qui se produisent à l'intérieur de la pile à combustible et ces types. Nous nous intéressons à un des types de pile à combustible : PEM (pile à membrane échangeuse de protons).

I.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA PILE A COMBUSTIBLE :

Par définition, la PAC, produit de l'électricité à partir d'une réaction chimique. Cette dernière est due au passage d'un gaz riche en hydrogène à travers une anode et d'oxygène ou d'air à travers une cathode. Un électrolyte, présent entre l'anode et la cathode, permet l'échange de charges électriques portées par des ions. Le flux d'ions à travers l'électrolyte produit un courant électrique dans un circuit externe vers une charge. [4]

Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte. Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène. En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

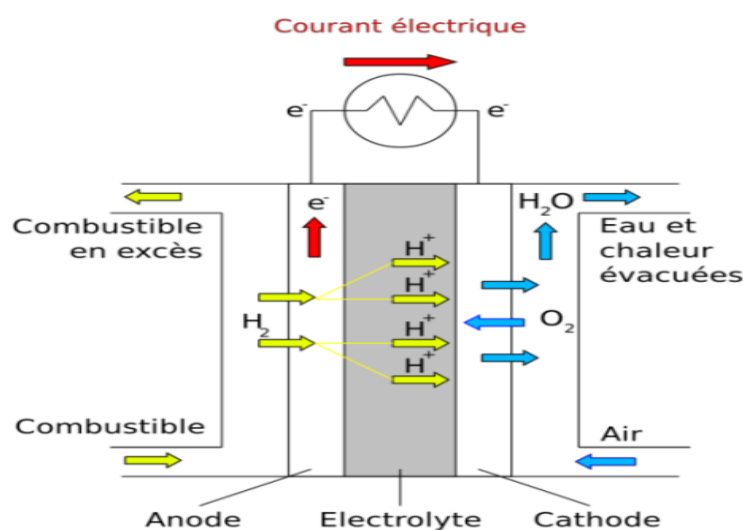


Figure I-1 : Schéma de principe de Fonctionnement d'une pile à combustible.

I.2.1 Réactions de base :

Le combustible utilisé dans la plupart des piles à combustible est l'hydrogène. Le méthanol peut aussi être utilisé directement dans certaines piles à combustible [5].

Le principe de base de la technologie de la pile à combustible repose sur la séparation de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène. Pour cela, la cellule de base d'une pile à combustible est constituée de deux électrodes (anode, cathode) séparées par un électrolyte. Selon le type d'électrolyte acide ou basique (alcalin), la réaction chimique conduisant à la

production d'électricité et de chaleur diffère. Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) qui se déplacent de l'anode à la cathode (figure I-2). L'eau est produite à la cathode. Par contre, dans un électrolyte basique (alcalin), ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode à l'anode (figure I-3). L'eau est produite à l'anode, mais de l'eau est aussi nécessaire à la cathode pour créer les ions. [6]

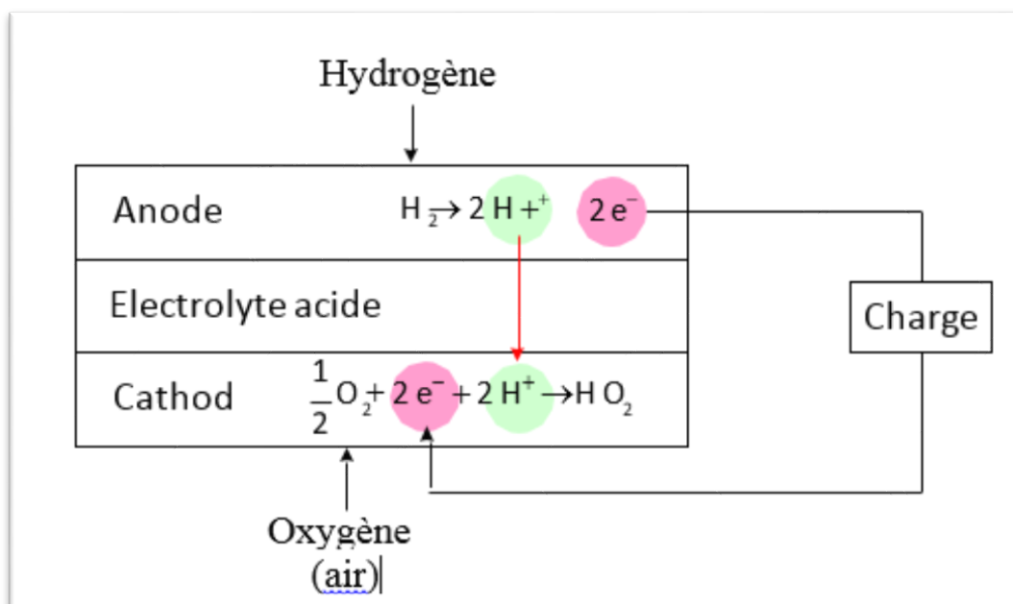


Figure I-2: Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide.

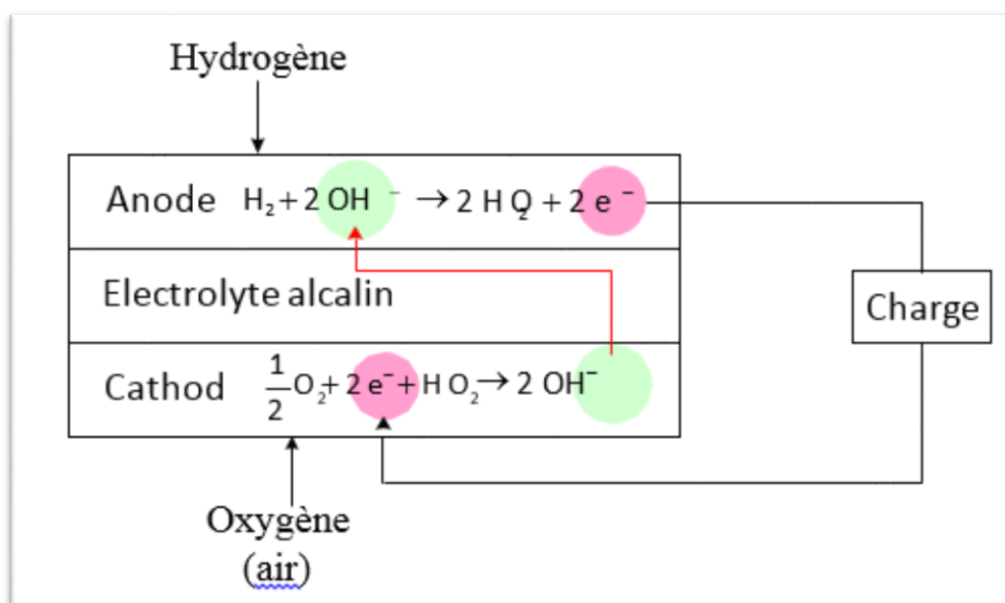


Figure I-3: Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique.

I.3 LES DIFFERENTS TYPES DES PILES A COMBUSTIBLE : [7]

Cette partie a pour objectif de présenter succinctement tous les types de piles qui ont pu être répertoriés à l'heure actuelle. Le tableau I-1 désigne les différents types de piles, les types de pile soient identifiés par la nature de leur électrolyte et par le niveau de leur température de fonctionnement et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé et leur carburant, Il existe six types de piles à combustible :

- les piles à membrane échangeuse de protons PEMFC (en Anglais Proton Exchange Membrane Fuel Cell).
- les piles directes au méthanol DMFC (en Anglais Direct Methanol Fuel Cell).
- les piles alcalines AFC (en Anglais Alkaline fuel Cell).
- les piles à oxyde solide SOFC (en Anglais Solid Oxid Fuel Cell).
- les piles à carbonate fondu MCFC (en Anglais Molten carbonate Fuel Cell).
- les piles à acide phosphorique PAFC (en Anglais Phosphoric Acid Fuel Cell).

Les principales caractéristiques et propriétés de ces différentes piles sont rappelées dans le tableau I-1).

Tableau I-2: Différents types de piles à combustible.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	polymère conducteur de protons	solution alcaline	acide phosphorique	carbonate fondu	céramique	polymère conducteur de protons
Catalyseur	platine	platine	platine	nickel et l'oxyde de nickel	cermet nickel-zircone	platine
Charge mobile	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
Température de fonctionnement en (°C)	40 - 90	65 - 220	205	650	600 - 1000	50 - 130
Rendement électrique pile en (%)	35 - 40	60 - 70	50	65	45 - 65	20 - 30
Champs d'applications	automobile, cogénération	applications spatiales	cogénération	cogénération	cogénération	applications mobiles

La figure (I-4) présente la réaction chimique anode/cathode ou cathode/anode, selon le type de pile à combustible.

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\Rightarrow H^+ \Rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	600-1000 °C

Figure I-4 Réactions chimiques de différentes piles.

I.4 HYDROGENE (H) : [8]

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz (H₂) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H₂O). Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH₄), le charbon ou le pétrole. La plupart de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui vient des carburants fossiles. Seulement sept pour cent viennent des sources d'énergie renouvelable. Dans une optique de raréfaction des carburants fossiles, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Puisque le gaz d'hydrogène n'existe pas naturellement sur terre, il faut le produire. Il y a plusieurs manières de faire cela. Si l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau, l'électrolyseur étant alimenté à partir d'une source d'énergie renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique), il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. Le développement des piles à combustible conduira à différents modes de production liés aux méthodes locales de production énergétique. En raison de l'abondance de gaz naturel, de la disponibilité du méthanol et du propane, et du manque d'une infrastructure de production et de distribution de l'hydrogène, on prévoit que les carburants hydrocarbures seront les carburants dominants pour les applications stationnaires de piles à combustible. Tant que

ces carburants sont disponibles à faible coût, le reformage hydrocarbure est la méthode la plus simple et la plus efficace pour produire de l'hydrogène.

I.5 LES APPLICATIONS DES PILES A COMBUSTIBLES : [7]

On a trois types d'applications distingue :

- portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts).
- stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt).
- transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts).

I.5.1 Applications portables : [9]

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C).



Figure I-5: Application de Pile à combustible sur le téléphone mobile et le PC.

I.5.2 Applications stationnaires : [10]

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). la méthode de production de l'électricité de l'avenir. Toutefois, actuellement, la commercialisation de la PAC ne vise que des utilisations finales et non des grands systèmes pour la vente au réseau de distribution. Il y a plusieurs raisons à cela : d'une part, le coût reste encore élevé par rapport à d'autres moyens de production d'énergie électrique qui demandent souvent de grandes puissances.



Figure I-6 : Unité de pile combustible.

I.5.3 Applications dans le transport : [11]

Le secteur du transport est un marché à fort potentiel pour la PAC grâce à ses caractéristiques intéressantes et au développement rapide de la technologie hybride dans les véhicules. En utilisant l'hydrogène comme combustible, le rendement du moteur électrique à PAC est bien meilleur que les moteurs à l'essence. D'autre part, la faible émission des gaz de la PAC lui apporte une position très concurrente alors que la pollution de l'air est devenue un problème important, surtout dans les grandes villes. De plus, les moteurs silencieux sont un argument supplémentaire pour le transport urbain. D'après les experts de l'industrie automobile, on espère qu'un million de voitures à PAC seront commercialisées en 2025.



Figure I-7: Station hydrogène.

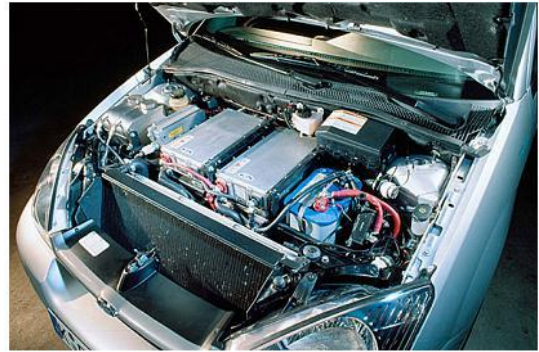


Figure I-8: Pile Ballard Mark 90 véhicule Ford FCV.

I.6 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES PILE A COMBUSTIBLE [11] :

Les avantages et les inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré, SOFC ou MCFC par exemple, mais aussi du type d'application visé, portable ou stationnaire par exemple. Toutefois, des avantages et inconvénients généraux ressortent souvent

I.6.1 Les avantages sont les suivants :

- Rendement de la conversion énergétique important Grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées.
- Propre : les piles à combustible rejettent moins de gaz nocifs (CO₂, NO_x).
- Flexibilité : les piles à combustible pouvant avoir différentes tailles, elles peuvent aussi par conséquent être disposées en différents endroits avec un minimum de place. Ne comportant pas de parties mobiles, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores. De ce fait, les piles à combustible peuvent très bien être à Proximité de quartiers résidentiels.
- Utilisées en production décentralisée d'électricité les piles à combustible présentent un double avantage.
- une réduction significative de la consommation d'énergie par rapport à des solutions plus traditionnelles.
- des rendements énergétiques élevés même à charge partielle : de 40 à 70% électrique, plus de 85% en tout (électricité et chaleur).

- pas de parties rotatives (donc pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile).
- Modulable Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes. La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de la taille de la pile.

I.6.2 Cependant il y a aussi des inconvénients qui sont les suivants :

- Coûts importants liés aux matériaux Les piles à combustible hautes températures sont schématiquement de deux types, cylindrique ou planaire. Pour les cylindriques, les coûts de fabrication sont élevés mais il y a moins de problèmes pour les systèmes car les empilements se font avec des cellules indépendantes mécaniquement les unes des autres, et parce que l'étanchéité se fait en zone froide. Pour les piles planaires, les coûts de fabrication sont moins importants, mais les problèmes apparaissent pour la réalisation des systèmes car les empilements se font en reliant mécaniquement les cellules et les étanchéités se font en zone chaude.
- le carburant : idéalement, le meilleur carburant est l'hydrogène, mais comme aucune infrastructure adéquate (production, transport, distribution et stockage) n'existe actuellement, on pense à d'autres carburants pour obtenir ensuite l'hydrogène par reformage.
- la durée de vie : elles doivent durer plus de 40000h dans les applications stationnaires, et quelques milliers d'heures pour les applications automobiles.

I.7 PILE A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS PEMFC :

I.7.1 Principe de fonctionnement [10] :

La pile à membrane échangeuse de protons contient comme électrolyte acide une membrane (figure I.9). A l'anode, l'hydrogène se décompose en électrons et en protons. La membrane, qui est imperméable aux gaz, ne laisse passer que les protons. Les électrons sont conduits de l'anode à la cathode par un circuit extérieur à travers une charge électrique. A la cathode, l'oxygène se combine avec les protons et les électrons pour produire de l'eau.

Le tableau suivant résume les réactions qui se déroulent respectivement à l'anode et à la cathode puis la réaction finale dans la pile

Tableau I-3: Les réactions chimiques sur les électrodes de PEMFC.

	La réaction chimique
L'anode	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
La cathode	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
La réaction chimique globale sur PEMFC	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{Electricité} + \text{chaleur}$

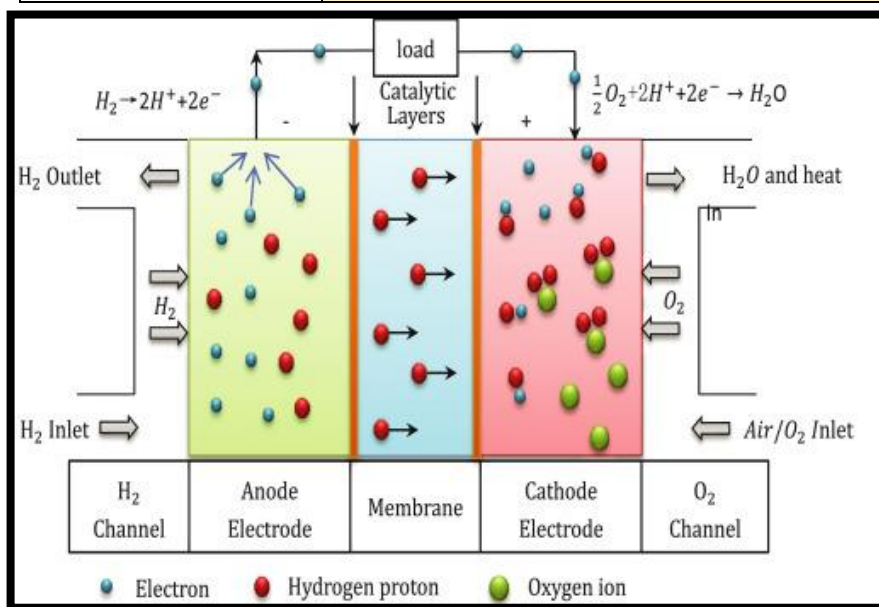


Figure I-9: Schéma de principe d'une pile à combustible PEM

I.7.2 Constitution d'une pile à combustible de type PEM:

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME) figure (I-10) [17]

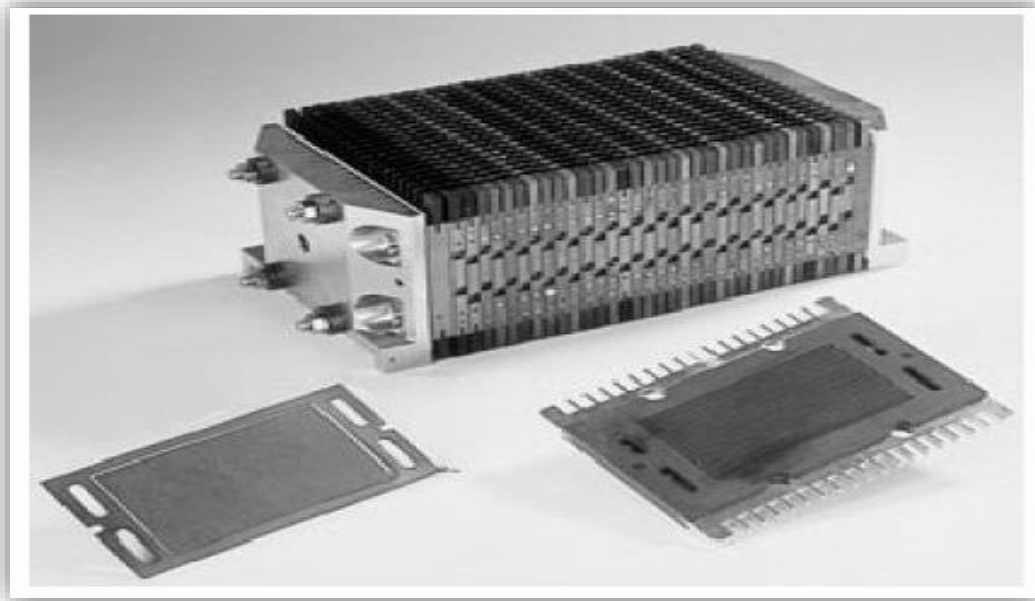


Figure I-10: 'Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC.

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

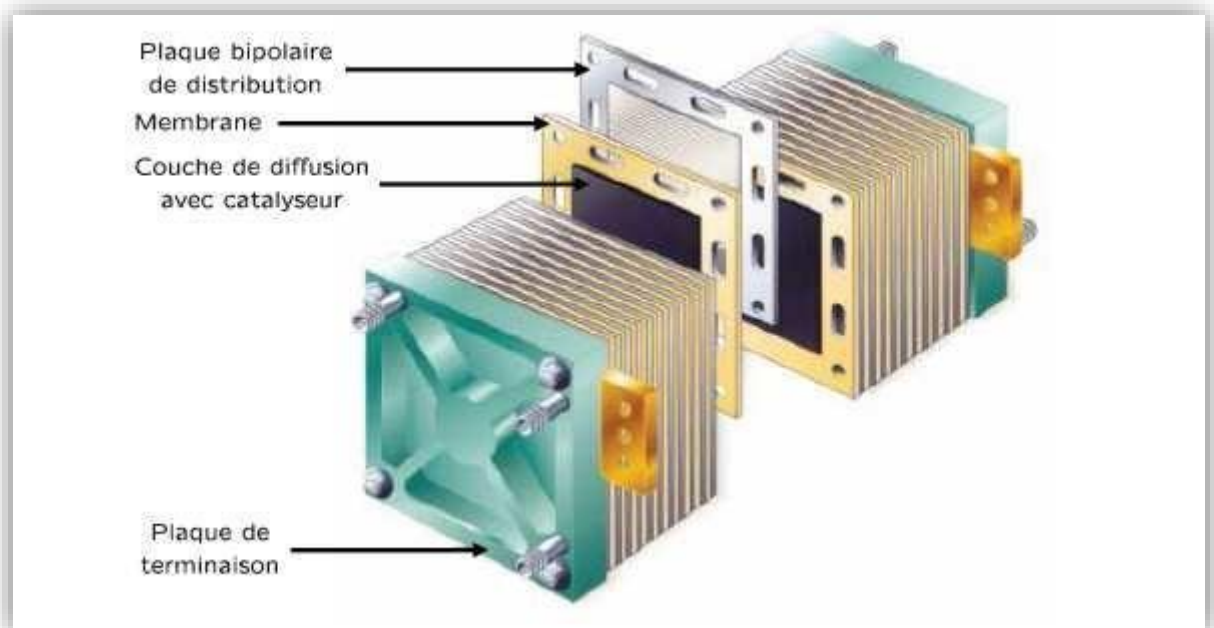


Figure I-11 Structure d'un empilement des cellules PEMFC (Electro Encyclo).

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule: L'électrolyte (la membrane dans le cas de la PEMFC), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques. [12]

❖ Les électrodes :

Les électrodes sont le siège des réactions chimiques mettant en jeu des réactifs (hydrogène ou oxygène par exemple) qui sont consommés au fur et à mesure qu'ils diffusent dans l'électrode, ils ont plusieurs fonctions:

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz. □
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques. [12].

❖ Electrolyte :

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une fine membrane d'une épaisseur de 50 à 175 μ m. Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène, les ions d'hydrogène se déplaçant ainsi que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. Le proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour 1. Pour cette raison, les gaz en contact avec une membrane doivent être saturés en eau pour assurer un fonctionnement efficace. Les membranes doivent être conductrices pour les protons, isolantes pour les électrons et imperméables aux gaz. De plus elles doivent avoir une bonne tenue mécanique et être stables. L'intégration dans un assemblage membrane-électrodes leur apporte une structure facilitant leur intégration dans les cellules. Un certain nombre de membranes commerciales sont disponibles comme le Nafion, produit par Dupont.

❖ Catalyseur :

Le catalyseur est un métal utilisé pour accélérer la réaction électrochimique au niveau des électrodes et aussi pour résister d'une façon continue la corrosion dans cet environnement chimique très acide. C'est pour cela, le catalyseur le plus utilisé est le platine (métal noble). [12]

➤ **Les catalyseurs du côté anode:**

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux: platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme des particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe. Ces électrodes sont très sensibles au CO (elles ne supportent pas plus de 100 ppm) et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage: on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance. De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher ou la diminution de la quantité nécessaire: alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), terres rares... Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO. [12]

➤ **Les catalyseurs du côté cathode: ***

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe. Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires. [15] (en anglais Membrane Electrode Assembly, MEA).

❖ **Plaque bipolaire :**

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Leurs rôles:

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

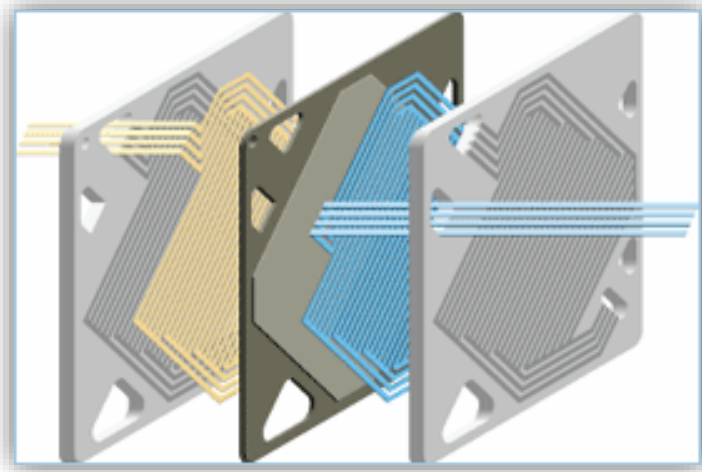


Figure I-12 : Plaque bipolaire.

- Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant (supérieur à 10 siemens/cm), une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de pile (eau, acide, oxygène...).
- Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point.
- Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation de charges (carbone, graphite...) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des matières de base et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieure d'usinage.
- Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables. Celles-ci présentent un ensemble de propriétés (tenue

mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés avec précision par circulation d'un fluide de refroidissement interne. [12]

I.7.3 L'alimentation des piles en combustible :

Les piles fonctionnent essentiellement par l'hydrogène comme combustible, ou dans certains cas avec un mélange hydrogène monoxyde de carbone. L'intégration d'une unité de reformage dans le système, permettrait l'utilisation d'autres combustibles, tels que le gaz naturel et des hydrocarbures légers. L'unité de reformage permet de produire un gaz riche en hydrogène à partir d'un composé hydrocarboné (méthanol, éthanol, méthane, essence) et d'air et/ou d'eau. On distingue deux systèmes de production de l'hydrogène au sein d'une pile, soit le reformage interne pour les piles fonctionnant à haute température, MCFC et SOFC, soit le reformage externe pour les piles fonctionnant à des basses et moyennes températures, PEMFC et PAFC. [13]

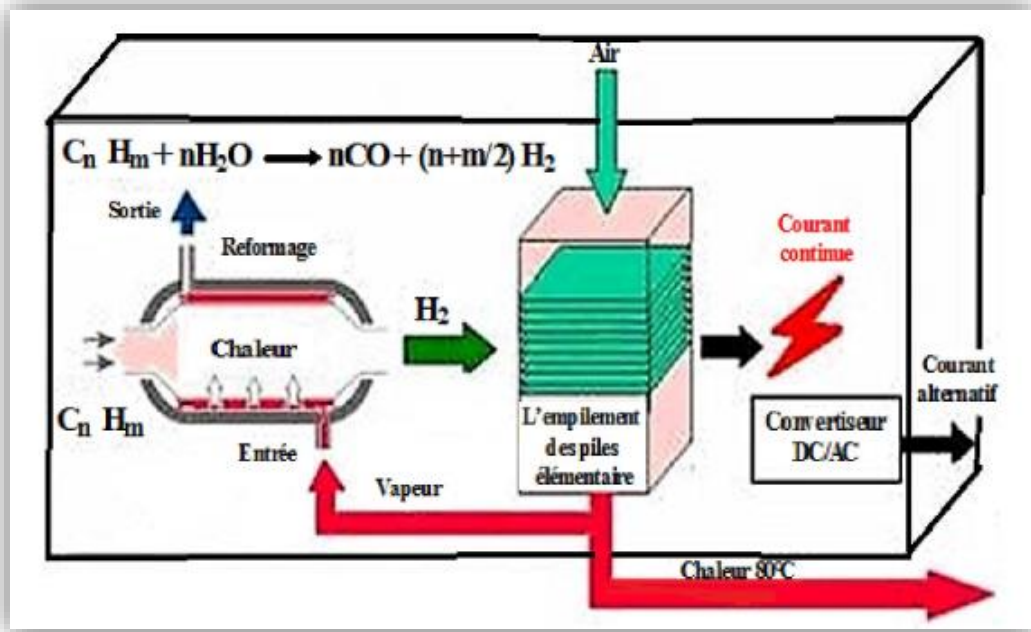


Figure I-12: Schéma des PAC fonctionnant à haute température et à reformage interne de l'hydrogène.

I.7.4 Système pile à combustible embarquée :

Le système ou générateur PAC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué. [14]

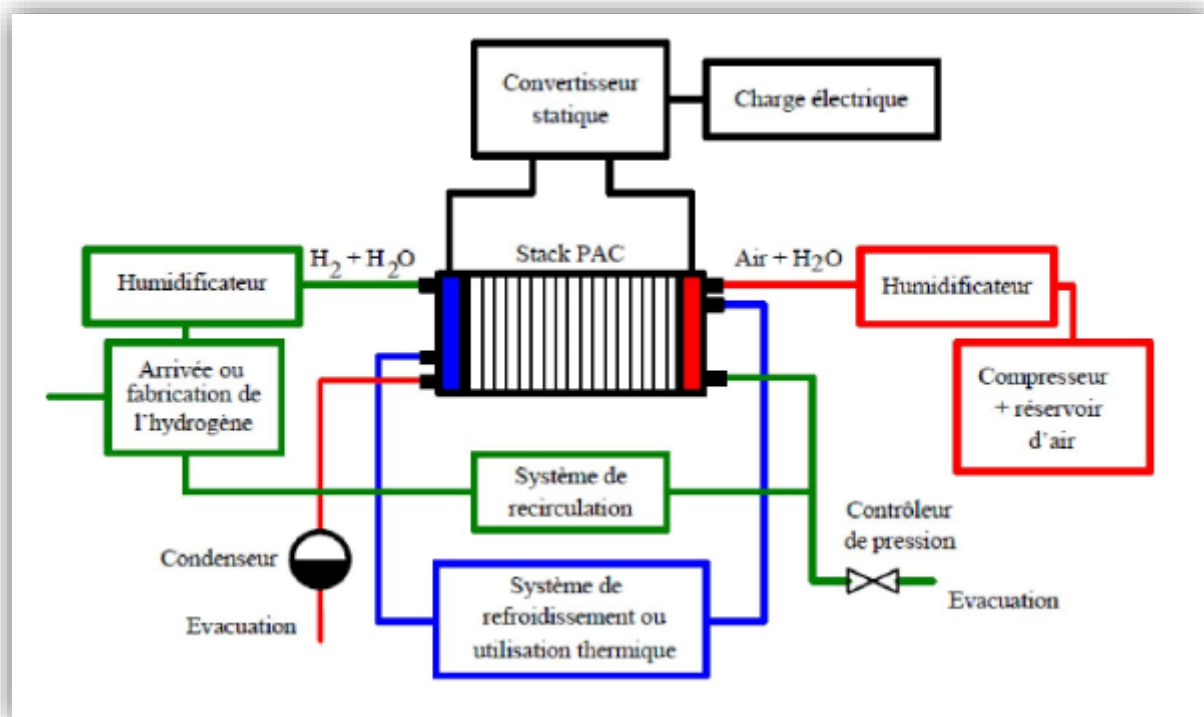


Figure I-13: Schéma illustrant les différents éléments d'un système PàC.

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique. Il est ainsi possible de décomposer le système PàC en plusieurs sous-systèmes assurant ces fonctions de base au sein d'un véhicule. [15]

❖ **Le conditionnement entrée-sortie cathode :**

La PàC peut être alimentée soit directement en oxygène pur stocké sous pression dans un réservoir, soit en air. Dans ce cas, l'air est fourni au moyen d'un compresseur ou d'une soufflante. Le choix de la pression de fonctionnement a une influence sur le rendement de la conversion électrochimique, sur le procédé d'humidification des réactifs et sur la consommation en énergie du compresseur. Un fonctionnement à haute pression permet d'obtenir de plus fortes densités de puissance pour la pile ; il facilite aussi la gestion hydrique et thermique. L'utilisation d'une turbine de détente en sortie cathode peut éventuellement permettre de récupérer une partie de l'énergie de compression. Un fonctionnement à basse pression conduit au niveau de la pile à un rendement en tension moins bon et oblige à augmenter la capacité de l'ensemble humidification / condensation. Par

contre, à basse pression, la consommation du compresseur est réduite. L'air sort de la cathode généralement saturé d'humidité et en présence d'un flux d'eau liquid [14].

❖ **Le conditionnement entrée-sortie anode :**

Le combustible utilisé au sein de la pile PEM est l'hydrogène. Il peut être stocké dans un réservoir ou bien produit à partir d'un hydrocarbure, généralement du méthanol, au moyen d'un reformeur. Une alimentation en hydrogène pur permet l'optimisation de la quantité d'énergie embarquée: il est ainsi possible de faire réagir au moins 90 % de l'hydrogène embarqué, l'hydrogène non consommé correspondant à des purges. Le circuit hydrogène peut intégrer une boucle de recirculation (avec pompe). Des humidificateurs et condenseurs peuvent aussi être mis en œuvre. [6]

❖ **Le refroidissement et l'humidification :**

Dans un générateur PàC, les sources de chaleur sont nombreuses : pertes thermiques de la réaction électrochimique, échauffement de l'air lors du travail de compression, échauffement des organes électriques tels que les moteurs de pompes et les convertisseurs, chaleur libérée par les réactions exothermiques liées au processus de reformage. A contrario, des apports de chaleur sont nécessaires à l'humidification des gaz, aux réactions endothermiques dans le cas du reformage (vapo-reformage). Dans une pile PEM, il n'est guère envisageable d'effectuer des échanges de chaleur entre les sources et les puits de chaleur : ainsi, la chaleur due à la réaction dans la pile, maintenue à une température souvent inférieure à 80 °C environ, ne permet-elle pas d'humidifier les réactifs. Le circuit de refroidissement d'un système PàC destiné à une application automobile est souvent complexe; il peut être scindé en plusieurs circuits. La stratégie de refroidissement des stacks est beaucoup discutée et aucune solution universelle n'a encore été trouvée. Bien que la PàC soit un générateur à haut rendement, l'énergie thermique à évacuer n'est pas négligeable. La contribution des flux des gaz à l'évacuation de la chaleur étant très faible, un système de refroidissement doit dans la plupart des cas être intégré au stack. Le problème du refroidissement de la pile peut cependant être envisagé en fonction du niveau de puissance. Pour des piles dont la puissance maximale est environ 1 kW, un refroidissement par air (convection) peut être effectué. Pour des piles dont la puissance est supérieure à 1 kW, le refroidissement est généralement réalisé par un fluide. Nous avons vu qu'il était impératif de préserver la charge en

eau dans la membrane de la pile. Il convient donc souvent d'humidifier les gaz avant leur entrée dans le stack. [6]

❖ La conversion et l'exploitation de l'énergie électrique :

L'énergie électrique issue du stack doit en général être conditionnée (adaptation de la tension à l'aide d'un convertisseur électronique élévateur) de manière à pouvoir être utilisée au niveau du groupe motopropulseur. De plus, la supervision du système PàC doit être assurée par des dispositifs de contrôle électroniques.

Tous les auxiliaires, s'ils sont indispensables au fonctionnement de la pile, n'en sont pas moins des consommateurs d'énergie parasitant directement la production de la pile. Ces organes peuvent représenter jusqu'à 60% en masse et en volume du système et une dépense énergétique de l'ordre de 20%. [6]

I.8 MODELE ELECTROCHIMIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE PEMFC :

[13]

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Deux approches principales de modélisation se présentent dans la littérature. La première approche inclut les modèles structuraux, qui visent à simuler le transfert de chaleur, le transport de masse et les phénomènes électrochimiques produits dans les piles à combustible. Certains de ces modèles se concentrent sur la modélisation des éléments spécifiques de comportement de la pile, telle que l'anode, la cathode et la membrane, alors que d'autres visent à présenter une simulation complète de la pile à combustible. Tous ces modèles prévoient d'expliquer les processus fondamentaux se produisant dans les systèmes de piles à combustible et en conséquence servir d'outil pour la conception et l'optimisation des différents composants de cellules. La deuxième approche inclut les modèles basés sur les équations empiriques ou semi empiriques, appliqués afin de prévoir l'effet de différents paramètres opératoires sur les caractéristiques courant-tension de la pile à combustible, sans examiner en détail les phénomènes physiques et électrochimiques impliqués dans l'opération. Amphlett et al. ont présenté un modèle phénoménologique en développement depuis l'année 1994.

Dans notre travail, nous avons utilisé des piles à combustible PEMFC, le modèle électrochimique (Amphlett et al.) le plus utilisé dans la littérature qui décrit la courbe de tension d'une pile PEMFC et prévoit ces polarisations. Ainsi le model de Larminie et dick.

I.8.1 Le modèle statique de Larminie et Dicks [16] :

La tension de la cellule élémentaire de la pile à combustible de type PEMFC est donnée par la relation suivant :

$$V_{FC} = E + V_{act} + V_{ohm} + V_{conc} \quad \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec :

- E : la tension théorique de la pile à vide (V).
- V_{act} : la surtension d'activation (ou chute d'activation de la région 1) (V).
- V_{ohm} : ,la surtension ohmique (ou chute ohmique de la région 2) (V).
- V_{conc} : la surtension de concentration (ou chute de concentration de la région 3) (V).
- V_{FC} : la tension totale de la cellule (V) .

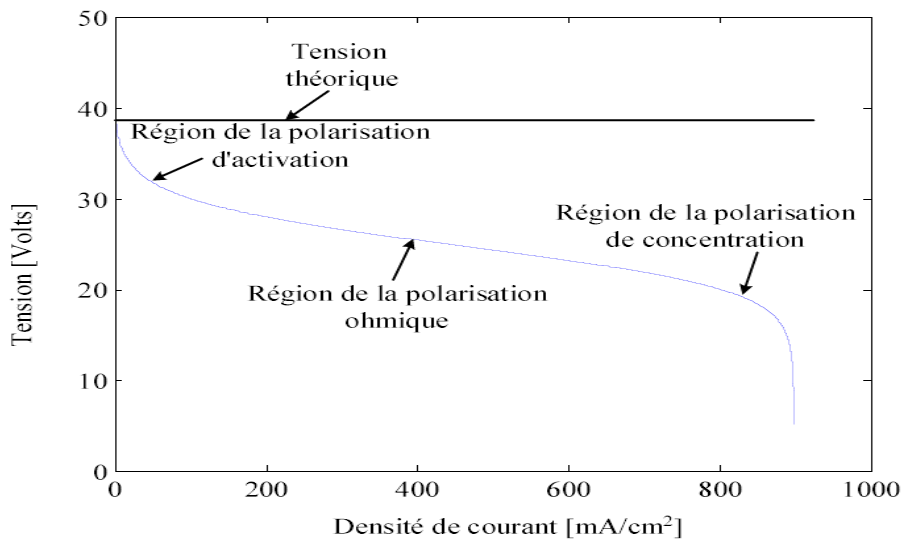


Figure I-14: Caractéristique Tension-courant d'une pile PEM.

I.8.2 Pertes d'activation :

Les pertes sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'oxygène et l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La réaction entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$V_{act} = A * \ln\left(\frac{i_n + I_{FC}}{i_0}\right) \dots\dots\dots(I.2)$$

Où :

- I_{FC} : est le courant délivré par la pile à combustible (A).
- i_0 : Le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte (A).
- i_n : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte (A).
- A : La pente de la droite de Tafel.

I.8.3 Pertes ohmique :

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

$$V_{ohm} = R_m(I_{FC} + i_n) \dots\dots\dots(I.3)$$

Où :

- R_m est la résistance totale de la pile à combustible

I.8.4 Pertes de concentration :

La consommation des gaz .appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivrée et des caractéristiques des circuits de gaz.

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéros, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse :

$$V_{conc} = -B * \ln\left(1 - \frac{i_n + I_{FC}}{i_L}\right) \dots\dots\dots(I.4)$$

I.9 CONCLUSION :

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEMFC. On a abordés l'historique du développement des piles à combustible, leur

principe de fonctionnement et leur combustible (H_2) et aussi les applications de la pile et les avantages et les inconvénients de la pile.

Un intérêt majeur sur les composants de la cellule de PEMFC et leur système embarqués puisque ils sont très importants et perfectibles. Finalement on a présenté de modèles statique de la pile et notre choix est orienté sur le modèle de «Larminie-Dicks». ça c'est le modèle qu'on va utiliser dans notre travail.

Chapitre II

II. Chapitre II : LES CONVERTISSEURS STATIQUES

II.1 Introduction :

De puissance maximum du PEMFC et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et il soit en phase avec la tension de réseau. Cette partie décrit certains interrupteurs L'utilisation des convertisseurs de puissance et plus généralement des systèmes d'électronique de puissance pour des applications, devient de plus en plus importante.

D'un point de vue un peu plus technique, les convertisseurs de puissance sont organisés en grandes familles fondées sur des principes de conversion : continu-continu (Hacheurs), continu-alternatif (Onduleurs), alternatif-continu (Redresseurs) et alternatif-alternatif (Gradateurs). Les systèmes de conversion de pile à combustible reliés au réseau se composent de convertisseur électrique statique. Le convertisseur DC-DC est contrôlé pour la poursuite du point utilisé dans les convertisseurs statiques. Ensuite, nous présentons les convertisseurs hacheurs et onduleurs avec leurs types et leurs principes de fonctionnement et leurs techniques de conversion et de commande.

II.2 Les interrupteurs utilisés dans les convertisseurs DC/DC et DC/AC :

Les convertisseurs statiques utilisent des interrupteurs à base de semi-conducteurs de puissance fonctionnant en commutation. L'utilisation de ces interrupteurs permet à adapter un bon rendement grâce à la fermeture et l'ouverture rapide des interrupteurs. On distingue plusieurs types des interrupteurs :

- Les interrupteurs commandables seulement à la fermeture : le thyristor.

Les interrupteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture :

- Le thyristor à ouverture commandée (GTO).
- Le transistor bipolaire (BJT).
- Le transistor (MOSFET) de puissance.
- Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT). [17]

II.3 Les Hacheurs :

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très

grande souplesse et un rendement élevé. En effet, on trouve ces convertisseurs dans de nombreuses applications à différents niveaux de puissance.

- Les convertisseurs DC-DC en général réalisent deux fonctions : modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension.
- Convertisseurs DC-DC non isolés : appelés *hacheurs*, qu'ils soient réversibles ou bien non réversibles, le type réversible permet l'inversion du courant ou de la tension, par contre le type non réversible permet le transfert de l'énergie électrique dans un sens unidirectionnel (de la source vers la charge).
- Convertisseurs DC-DC isolés : appelés alimentations à découpage, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC-DC. Ces alimentations comportent, au sein des cellules de commutation, des transformateurs qui permettent d'assurer un isolement galvanique, et d'élever ou abaisser les niveaux de tension et de courant [18].

II.4 Rôle des convertisseurs DC-DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance. La figure II.1 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [19].

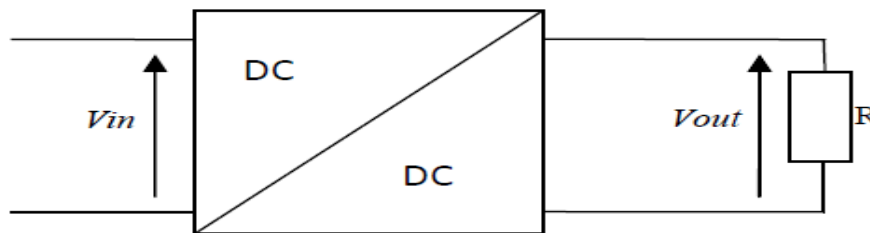


Figure II-1 Convertisseur DC/DC.

II.5 Applications des convertisseurs DC/DC :

Les niveaux de puissance que l'on trouve dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs des équipements portables, à une dizaine ou centaine de watts dans les alimentations des ordinateurs de bureau, aux kilowatts ou mégawatts dans la commande des moteurs à vitesse variable, et jusqu'aux térawatts dans les centrales électriques du secteur. Nous intéressons dans ce travail à la moyenne puissance avec des kilowatts avec une application où le rendement et le volume du convertisseur sont critiques. Les convertisseurs DC-DC en général réalisent deux fonctions: modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré [20].

II.6 Différents types des hacheurs :

Selon le parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux catégories de hacheurs : réversibles et non réversibles (Figure II-2) :

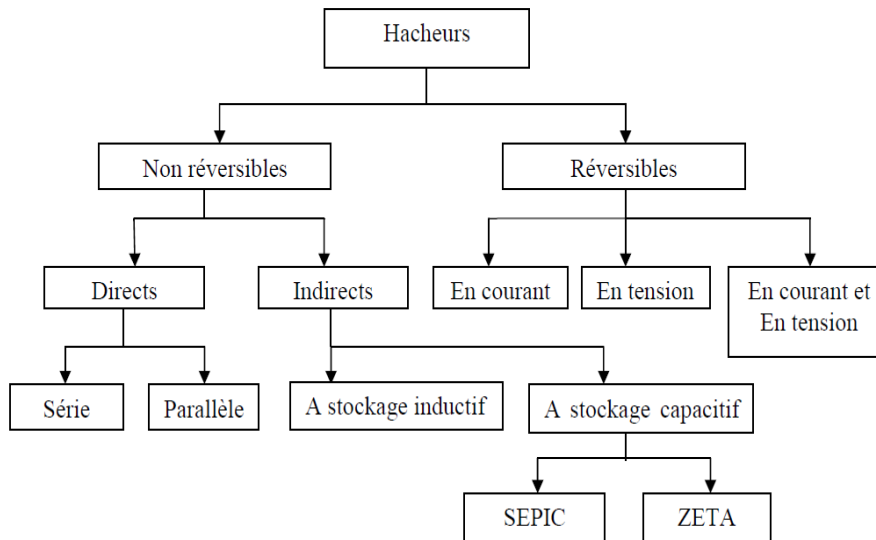


Figure II-2: Différents types de hacheurs.

II.6.1 Hacheurs réversibles :

Ce sont des structures qui assurent une réversibilité en tension et/ou en courant. Ainsi, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Alors, une source peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînement électrique. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir un

générateur, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique). Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- Hacheur réversible en tension,
- Hacheur réversible en courant,
- Hacheur réversible en courant et en tension.

On peut caractériser un convertisseur DC-DC par l'indication de sa ou de ses réversibilités communes à la source de tension et à la source de courant :

- Un convertisseur réversible en tension relie deux sources réversibles.
- Un convertisseur réversible en tension relie deux sources réversibles en tension.
- Un convertisseur réversible en courant relie deux sources réversibles en courant.
- Un convertisseur réversible en courant et en tension relie deux sources toutes deux réversibles en courant et en tension [21].

II.6.2 Hacheurs non réversibles :

Nous traitons dans cette partie les convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer :

- des sources de tension unidirectionnelles en courant, dont la tension qu'elles imposent ne peut être que d'un seul signe.
- des sources de courant unidirectionnelles en tension, dont le courant qu'elles imposent ne peut être que d'un seul signe.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de hacheurs :

- Hacheur série ou abaisseur (ou Buck),
- Hacheur parallèle ou élévateur (ou Boost),
- Hacheur série-parallèle ou abaisseur-élévateur (Buck–Boost) [21].

II.6.3 LES TYPES DES HACHEURS NON REVERSIBLES :

II.6.3.1 Convertisseur Buck :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure II.3 présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure [19].

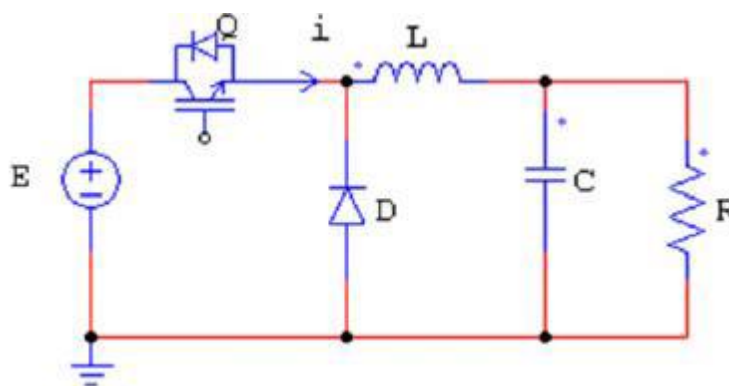


Figure II-3 Schéma réel du Convertisseur Buck.

II.6.3.2 Hacheur survolteur (Boost) :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure II.4. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [22].

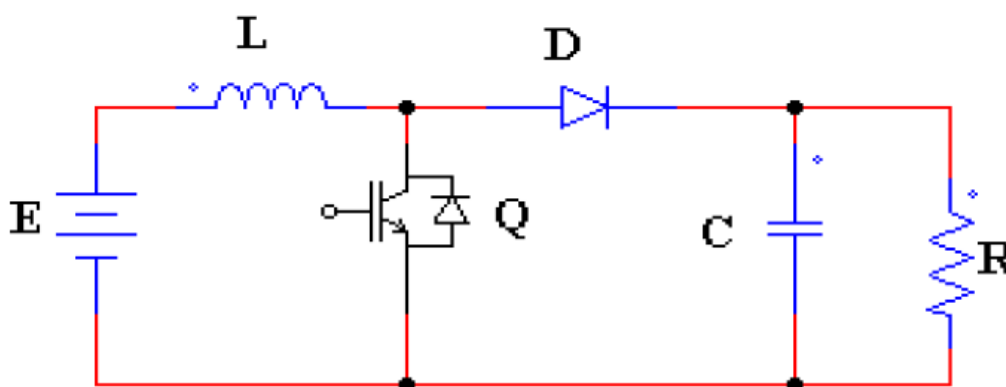


Figure II-4: Convertisseur survolteur (Boost).

II.6.3.3 Le convertisseur Buck-Boost :

La deuxième topologie de base du DC/DC est donnée par la figure II.5. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le thyristor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur se met sur la position (off) l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans les bornes de la charge décrivant le fonctionnement par l'équation suivante [23].

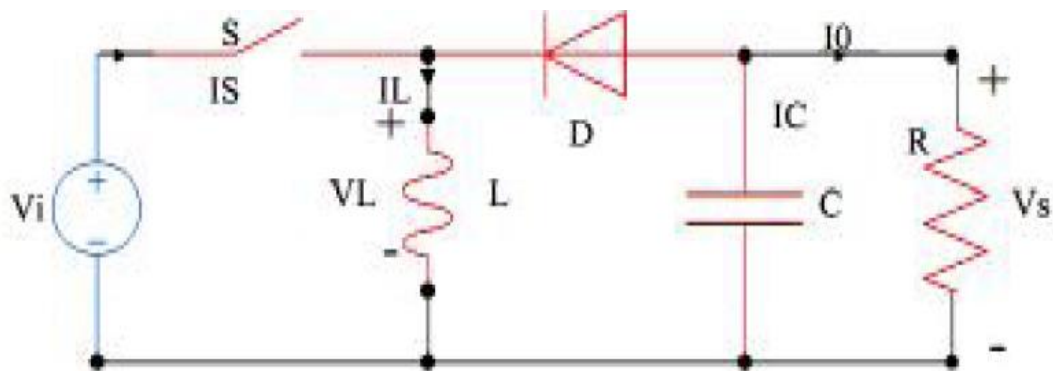


Figure II-5: Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.

II.7 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur :

Pour une pile à combustible. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, les structures Buck-Boost sont élévatrices pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices [24].

II.8 Comparaison des montages :

Le tableau II-1 résume les gains en tension et les contraintes sur les interrupteurs des différents montages. Pour ces convertisseurs, l'évolution des gains en tension en fonction du rapport cyclique est présentée sur la figure II.6.

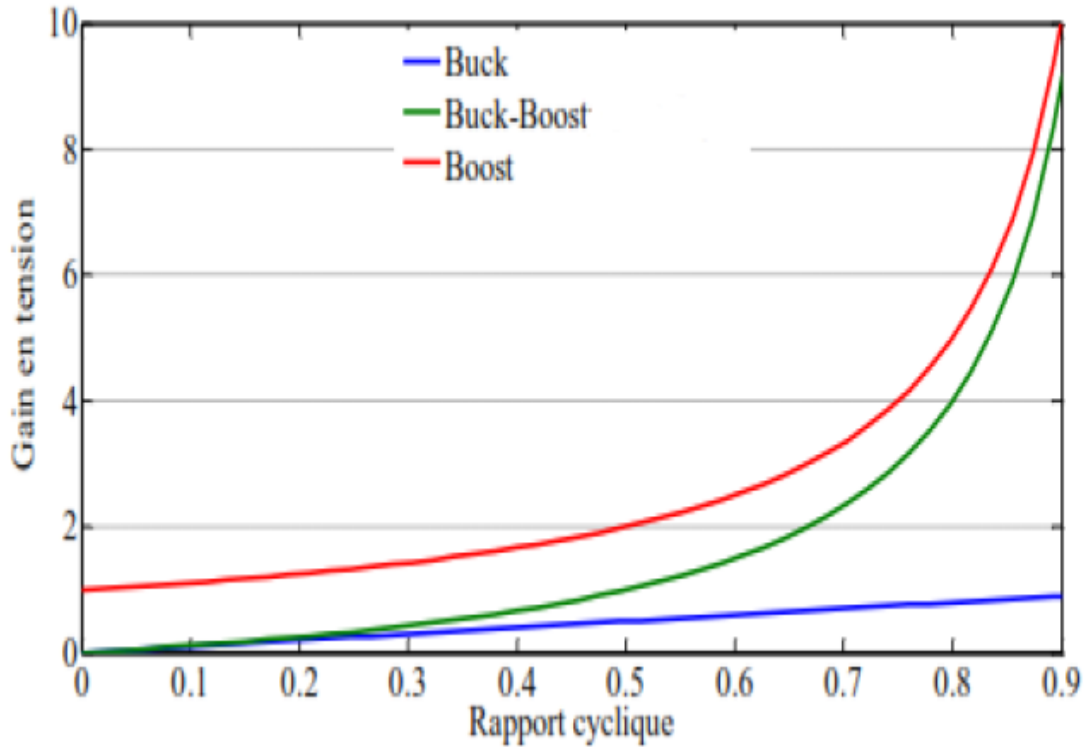


Figure II-6: Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

Si plusieurs montages peuvent être considérés comme élévateurs, en particulier si le rapport cyclique est supérieur à 0,5, seul le montage Boost est élévateur sur toute la plage de réglage des rapports cycliques. Pour un rapport cyclique de 0,5 par exemple, le Boost possède une tension de sortie double de la tension d'entrée. Alors que pour l'autre montage élévateur (Buck-Boost), la tension de sortie est pour cette valeur du rapport cyclique égale à la tension d'entrée. Ce n'est que lorsque le rapport cyclique se rapproche de 1 que l'autre montage élévateur tendent à ressembler au montage Boost [24].

Tableau II-1: Caractéristique des montages en mode conduction continu.

	Boost	Buck	Buck-Boost
Gain en tension	$\frac{1}{1-\alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$
$v_{k,max}$ $ v_{d,max} $	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta v_s}{2}$	V_e	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta v_s}{2}$
$i_{k,max}$ $i_{d,max}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$	$I_s + \frac{\alpha \cdot (1-\alpha) \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinu

II.9 CHRONOGRAMMES DE COURANT ET DE TENSION POUR L'HACHEUR BOOST:

II.9.1 Hacheur Boost :

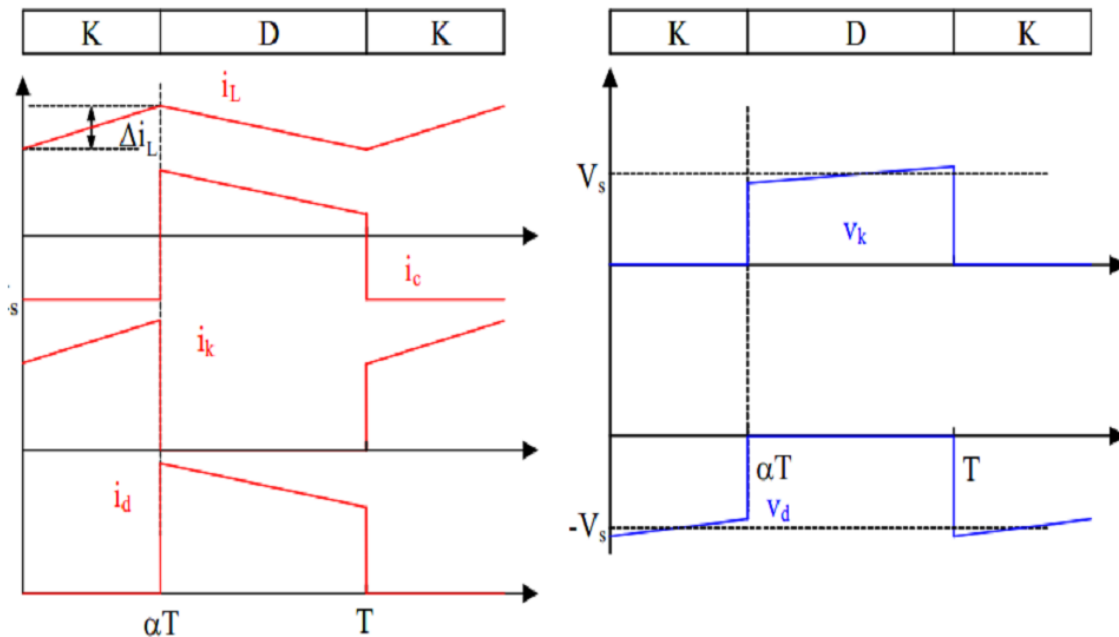


Figure II-7: Chronogrammes de courant (gauche) et tension (droite) d'un hacheur Boost.

α le rapport cyclique du signal de commande, et f la fréquence de découpage, on en déduit la tension de sortie en valeur moyenne :

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \dots \dots \dots (II.1)$$

α : Le rapport cyclique alpha.

V_e :Tension d'entrée.

V_s :Tension de sortie

L'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \cdot V_e}{L \cdot f} \dots \dots \dots (II.2)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \cdot V_e}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C \cdot f} \dots \dots \dots (II.3)$$

Par définition, α est compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_s est toujours supérieure à la tension d'entrée V_e , le montage est élévateur en tension. Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique

$$IL = \frac{Is}{(1-\alpha)} \dots\dots\dots (II.4)$$

Les formules qui utilise pour calculer la valeur maximal de tension et de courant de l'interrupteur K commandé et la diode D sont les mêmes [29]. En tension, on a :

$$V_{KMAX} = V_{DMAX} = \frac{Ve}{(1-\alpha)} + \frac{\Delta Vs}{2} \dots\dots\dots (II.5)$$

En courant :

$$I_{KMAX} = = \frac{Ie}{(1-\alpha)} + \frac{\Delta IL}{2} \dots\dots\dots(II.6).$$

II.10 CONTROLE DES CONVERTISSEURS DC/DC :

II.10.1 Contrôle linéaire des convertisseurs DC/DC :

Différentes techniques sont couramment utilisées pour asservir un signal électrique à un signal de référence pour la commande des convertisseurs DC/DC. La technique dite MLI (Modulation par Largeur d'Impulsion) utilise des régulateurs linéaires (PI, PID...) ou non linéaires (glissant, entrée/sortie...) dont la sortie est une grandeur de commande continue. Cette sortie est alors comparée à un signal porteur ; on obtient alors les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence du signal porteur fixe la fréquence de découpage à condition que les grandeurs de sorties des régulateurs évoluent lentement sur une période du signal porteur. Cette technique, facile d'utilisation, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe, un contenu harmonique parfaitement identifié mais possède aussi de par sa structure, des propriétés dynamiques limitées .En général, la façon la plus répandue pour commander des convertisseurs DC-DC est d'utiliser des correcteurs linéaires (PI ou PID). Ces contrôleurs sont conçus en utilisant un modèle petit signal autour d'un point d'équilibre nominal. Dans de nombreuses applications, cette approche de contrôle donne des résultats satisfaisants. Toutefois, il existe aussi des situations où cette approche offre des performances limitées (propriétés dynamiques dépendant du point de fonctionnement, robustesse, performances dynamiques insuffisantes..) [25].

II.10.1.1 Commande par Hystérésis :

Le principe de contrôle des tensions par hystérésis consiste à maintenir chacun des tensions générés dans une bande enveloppant les tensions référence chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation, la différence entre la tension de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande d'interrupteur [25].

II.10.2 CONTROLE NON-LINEAIRE DES CONVERTISSEURS DC/DC:

II.10.2.1 Technique des modes glissants :

La technique par mode de glissement (TMG) est un mécanisme de contrôle non-linéaire largement utilisé dans les convertisseurs de puissance de par ses propriétés de stabilité, de robustesse, et de bande passante élevée. Son principal inconvénient est de générer des signaux de commande à fréquence variable. Cette technique consiste à amener la trajectoire d'état du système considéré vers une surface de commutation où une logique de commutation adaptée la fera osciller de part et d'autre de celle-ci jusqu'à convergence vers le point d'équilibre situé sur cette surface [25].

II.10.1.2 Linéarisation entrée/sortie :

C'est une technique qui utilise une transformation en boucle ouverte permettant d'exprimer les variables de sortie du système en fonction des grandeurs d'entrée. Le système obtenu après la transformation entrée/sortie, est un système linéaire découplé à m entrées possédant tous ses pôles à l'origine. Cette technique a pour principal intérêt (en plus de la linéarité) de découpler complètement le système à contrôler et donc de faciliter la conception de sa commande. Cette méthode possède un certain nombre d'inconvénients qui limitent son champ d'application. Elle n'est applicable qu'aux systèmes dynamiques ne possédant pas de zéro dynamique instable et reste très sensible aux variations paramétriques. Pour assurer un bon contrôle du système obtenu après linéarisation entrée/sortie, il est donc nécessaire d'utiliser des contrôles robustes vis-à-vis des variations paramétriques comme le contrôle à structures variables ou la commande par mode de glissement [25].

II.11 LES ONDULEURS :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est assurée à l'aide d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée [26]. Il existe plusieurs types d'onduleurs, lesquels sont classés selon le nombre de phases, l'utilisation de dispositifs semi-conducteurs de puissance, les principes de commutation et les formes d'ondes de sortie. Figure II.9 représente schéma de principe de l'onduleur :

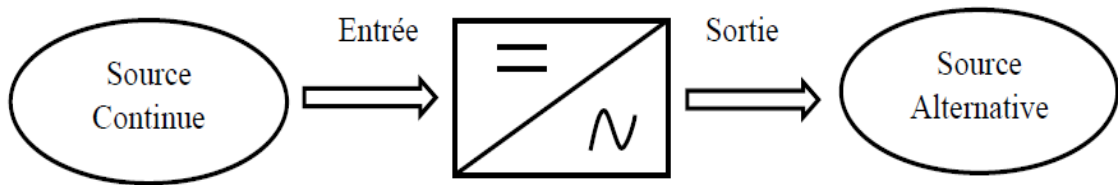


Figure II-8: Principe de la conversion continue - alternative (DC/AC).

Une installation d'une pile à combustible peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité reliée à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance de la pile

II.12 PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT :

Pour réaliser un onduleur, il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur K et d'une source de tension continue (U_{dc}) comme le montre la figure II.10 :

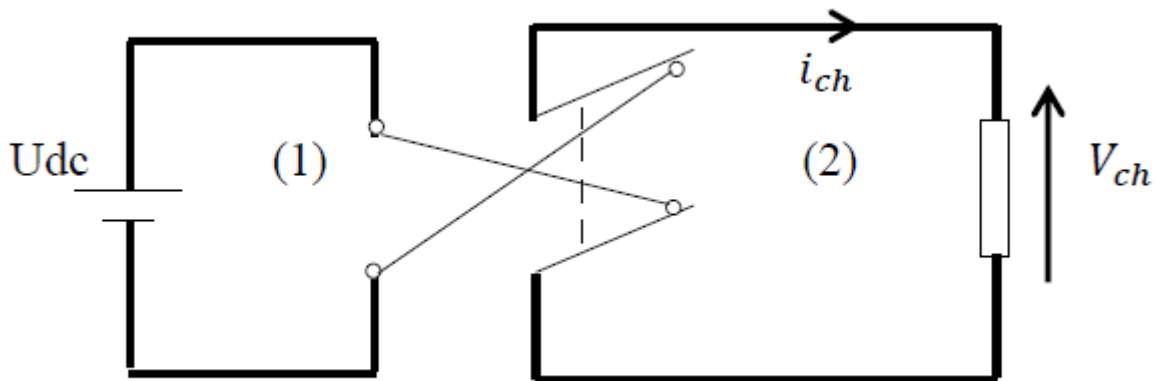


Figure II-9: Principe de fonctionnement de l'onduleur.

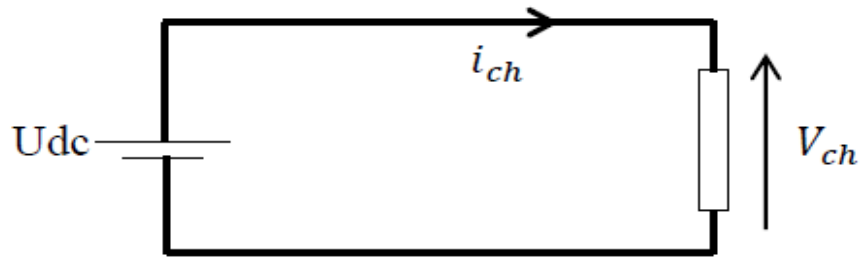


Figure II-10:K en position (1) .

Lorsque K est en position (1), on obtient : $V_{ch} = U_{dc}$

Lorsque K est en position (2), on obtient : $V_{ch} = -U_{dc}$

La figure II.9 donne la forme de $V_{ch}(t)$ sur une période complète de fonctionnement :

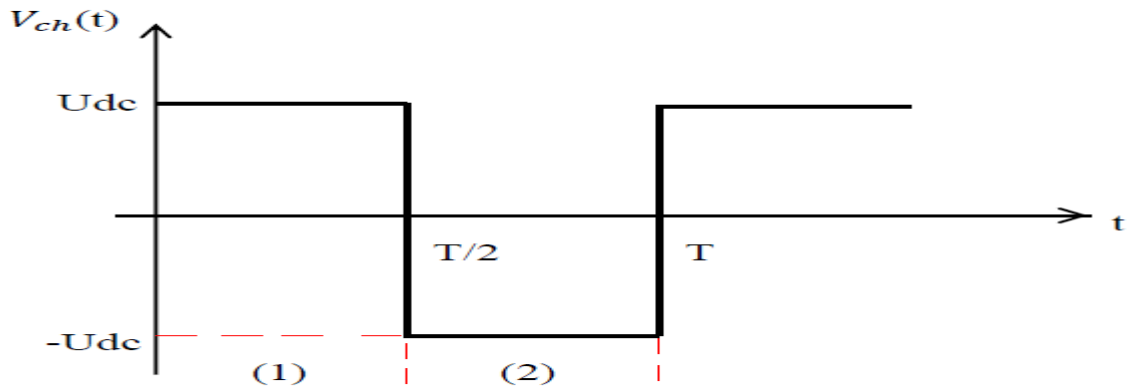


Figure II-11:La tension avec K en position (1) et (2).

II.13 LES APPLICATIONS DES ONDULEURS :

II.13.1 Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [27]

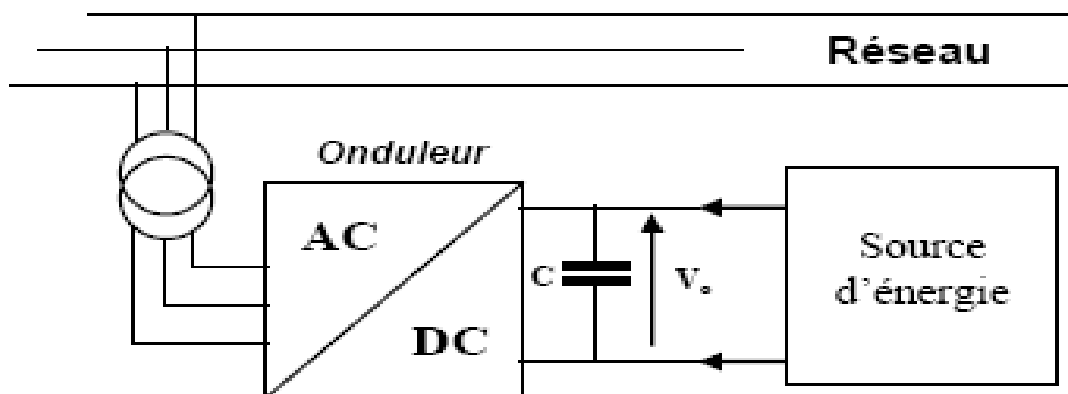


Figure II-12: Alimentation de secours.

II.13.2 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

Par exemple La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence [28].

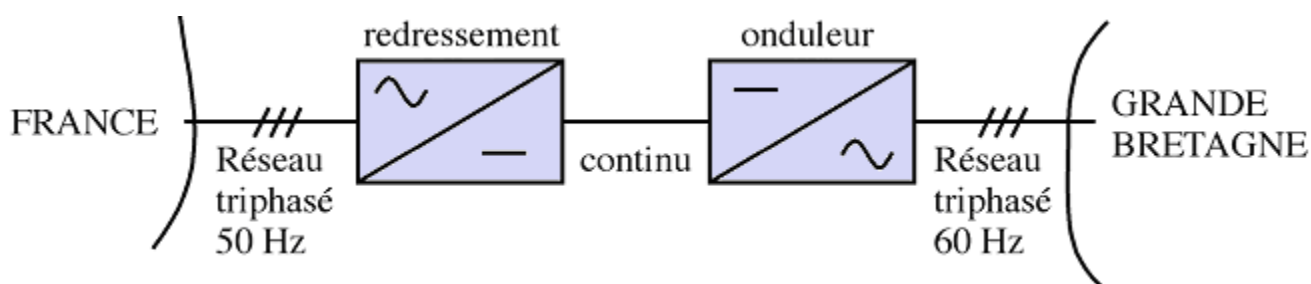


Figure II-13: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

II.14 TYPES D'ONDULEURS :

II.14.1 Les onduleurs non autonomes :

Les composants utilisés sont des simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle". L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les composants utilisables sont les thyristors.

II.14.2 Les Onduleurs autonome :

C'est un système qui utilise des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. Cet onduleur n'est pas réversible. On représente deux types d'onduleurs autonomes :

- Les onduleurs de tension.
- Les onduleurs de courant.

II.14.2.1 Les onduleurs de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, la tension n'est pas affectée par les variations du courant qui la traverse.

II.14.2.2 Les onduleurs de courant

Un onduleur de courant (commutateur de courant) est alimenté par une source d'inductance interne, le courant qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension à ses bornes.

II.14.3 TYPES D'ONDULEURS DE TENSION :

II.14.3.1 Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi-pont monophasés, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (figure II.15), chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_a , i_b et i_c , les interrupteurs K_1 , $K'1$ et K_2 , $K'2$, K_3 et $K'3$ doivent être complémentaires deux à deux [27].

$K_i = (T_i, D_i)$.

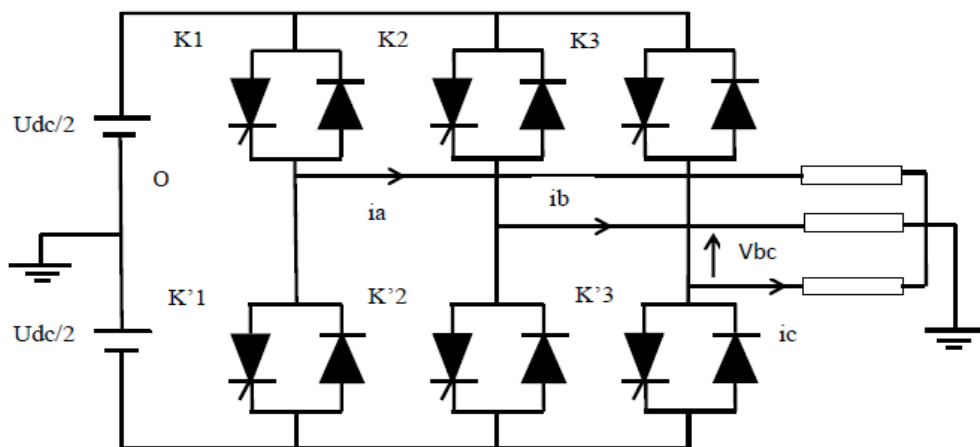


Figure II-14: Onduleur triphasé .

On peut commander l'onduleur de manière que :

- Chaque interrupteur conduit durant 120° .
- Chaque interrupteur conduit durant 180° .

La commande en pleine onde (180°), dont, les intervalles de commande de fermeture de chaque interrupteur sont définis comme suit:

- K_1 est fermé pour : $0 < \omega t < \pi$
- K_2 est fermé pour : $2\pi / 3 < \omega t < 2\pi / 3 + \pi$
- K_3 est fermé pour : $4\pi / 3 < \omega t < \pi / 3 + \pi$

- K1' est fermé pour : $\pi < \omega t < 2\pi$
- K2' est fermé pour : $2\pi / 3 + \pi < \omega t < 2\pi / 3 + 2\pi$
- K3' est fermé pour : $4\pi / 3 + \pi < \omega t < \pi / 3 + 2\pi$

Les courants i_a , i_b et i_c sont sinusoïdaux et forment un système triphasé équilibré,

$$i_a = I_m \sin(\omega t - \phi) \dots\dots\dots (II.7)$$

$$i_b = I_m \sin(\omega t - \phi - 2\pi/3) \dots\dots\dots (II.8)$$

$$i_c = I_m \sin(\omega t - \phi - 4\pi/3) \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec I : la valeur efficace du courant de sortie de l'onduleur.

Si la charge est équilibrée et couplée en étoile, la somme des courants de ligne est nulle et la somme des tensions simples est égale à zéro.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \dots\dots\dots (II.10)$$

Alors on a :

$$V_{an} = \frac{1}{3} [2(V_a - V_0) - (V_b - V_0) - (V_c - V_0)] \dots\dots\dots (II.11)$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3} [2(V_b - V_0) - (V_a - V_0) - (V_c - V_0)] \dots\dots\dots (II.12)$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3} [2(V_c - V_0) - (V_a - V_0) - (V_b - V_0)] \dots\dots\dots (II.13)$$

$$V_n - V_0 = \frac{1}{3} [2(V_a - V_0) + (V_b - V_0) + (V_c - V_0)] \dots\dots\dots (II.14)$$

De ces tensions simples, on déduit les tensions composées entre les bornes de sortie de l'onduleur. on tire

$$V_{an} = \frac{1}{3} (V_{ab} - V_{ca}) = \frac{1}{3} (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \dots\dots\dots (II.15)$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3} (V_{bc} - V_{ab}) = \frac{1}{3} (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \dots\dots\dots (II.16)$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3} (V_{ca} - V_{bc}) = \frac{1}{3} (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \dots\dots\dots (II.17)$$

Et le courant fourni par la source i est donnée par :

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_{k1} + \mathbf{i}_{k2} + \mathbf{i}_{k3} \dots\dots\dots (II.18)$$

En considérant alors, les états possibles des interrupteurs, on peut établir le tableau suivant décrivant ainsi; les tensions simples et composés, les courants dans les interrupteurs et le courant d'entrée i correspondant à chaque état de commutation [30].

CHAPITRE II : LES CONVERTISSEURS STATIQUES

Tableau II-2 : Les tensions et les courants correspondants à chaque état de commutation de l'onduleur.

K_1	K_2	K_3	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	I_{K1}	I_{K2}	I_{K3}	I
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	F	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	0	-U	U	0	0	i_c	i_c
0	F	0	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	-U	U	0	0	i_b	0	i_b
0	F	F	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	-U	0	U	0	i_b	i_c	$-i_a$
F	0	0	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	U	0	-U	i_a	0	0	i_a
F	0	F	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	U	-U	0	i_a	0	i_c	$-i_b$
F	F	0	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	0	U	-U	i_a	i_b	0	$-i_c$
F	F	F	0	0	0	0	0	0	i_a	i_b	i_c	0

En tenant compte du Tableau II.2, La Figure II.14 donne un exemple du tracé des formes d'ondes des tensions et des courants obtenus pour une charge RL :

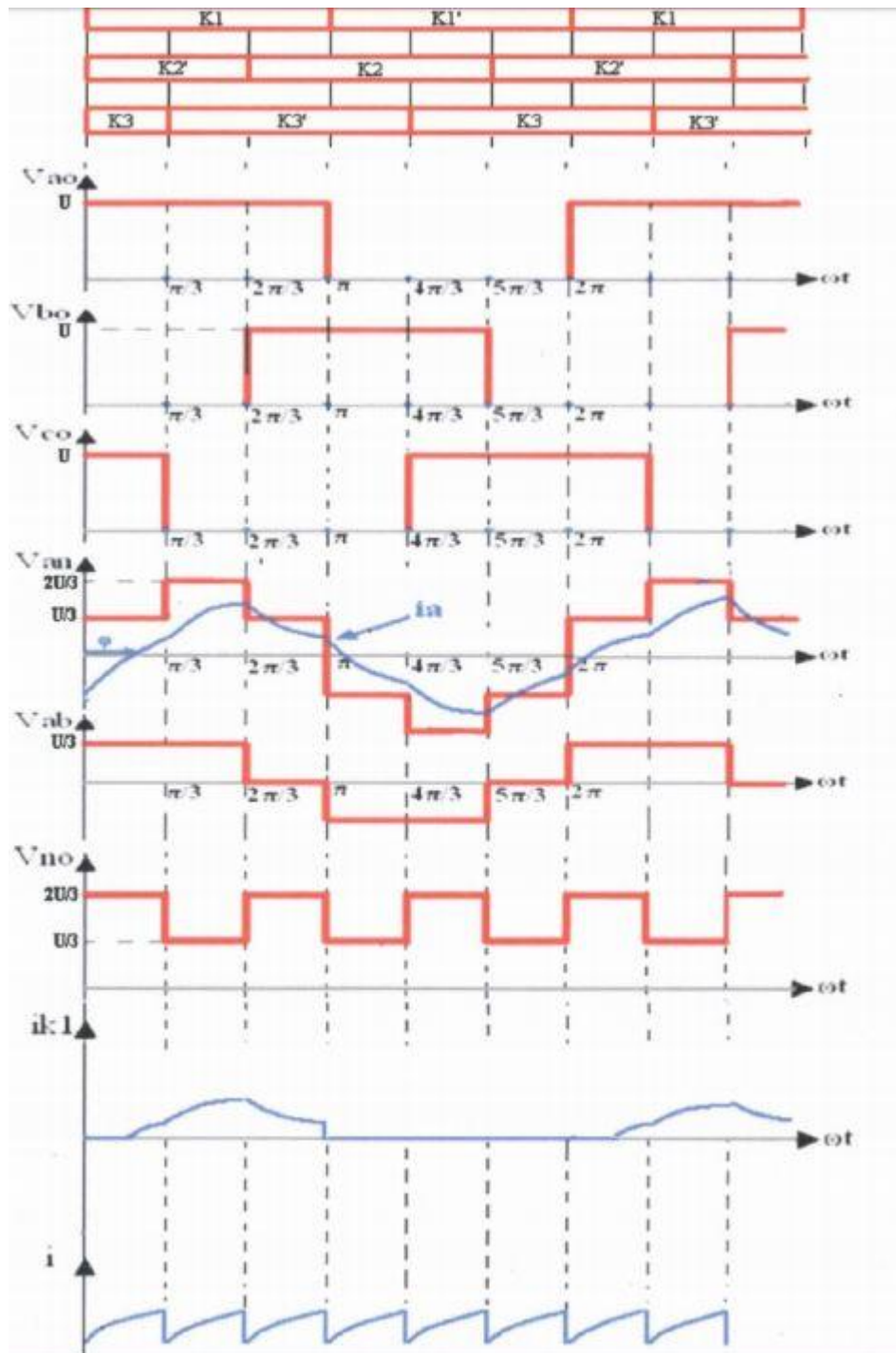


Figure II-15 : Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge RL montée en étoile (commande 180°).

II.15 STRATEGIES DE COMMANDE :

II.15.1 Commande d'onduleur de tension triphasé :

Pour découper la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur, il faut intervenir à la commande des interrupteurs qui constituent l'onduleur. Donc on distingue plusieurs stratégies de commande des onduleurs [29].

II.15.1.1 Commande pleine onde (dite 180°) :

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180° Figure II.17. Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport au premier bras [27].

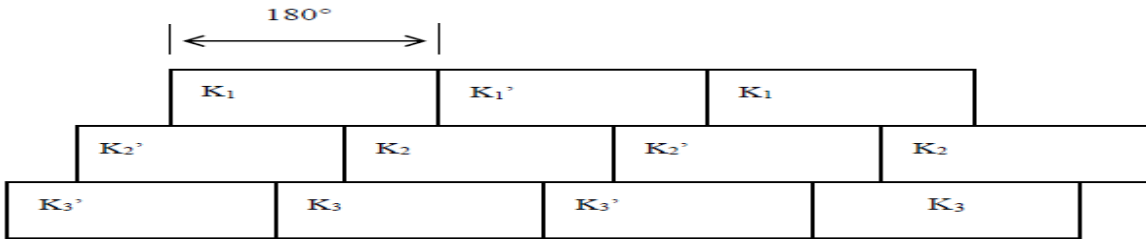


Figure II-16: Commande pleine onde.

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques.

II.15.1.2 Commande 120° :

Dans ce cas la figure II.18, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°.

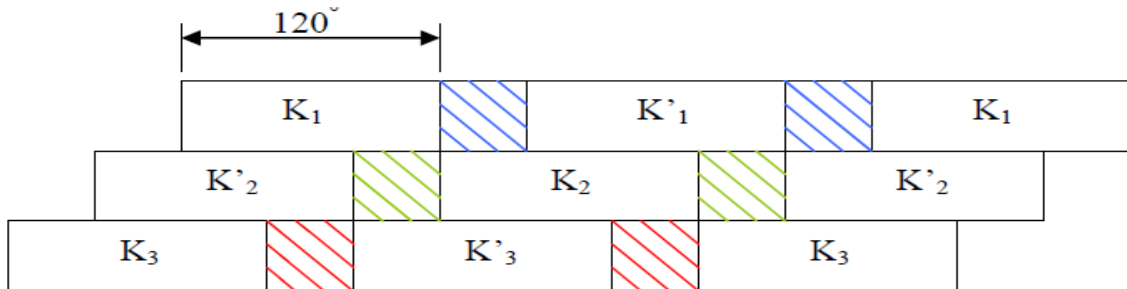


Figure II-17: Commande 120°

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant 120°, telle que la séquence est K1, K2 puis K3 successivement. De même pour les interrupteurs K'1, K'2 et K'3 avec un décalage de 60° par rapport à K1, K2, K3.

II.15.2 Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce-là on fait appel à la

technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple [28]. En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir [28] :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie.
- facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle :

II.15.2.1 Modulation sinusoïdale (MLIS) :

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes ; la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée ; appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie ; appelée référence les figure II.18 donne les résultats de comparaison et la figure II.19 représente la simulation de la commande MLI. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [28].

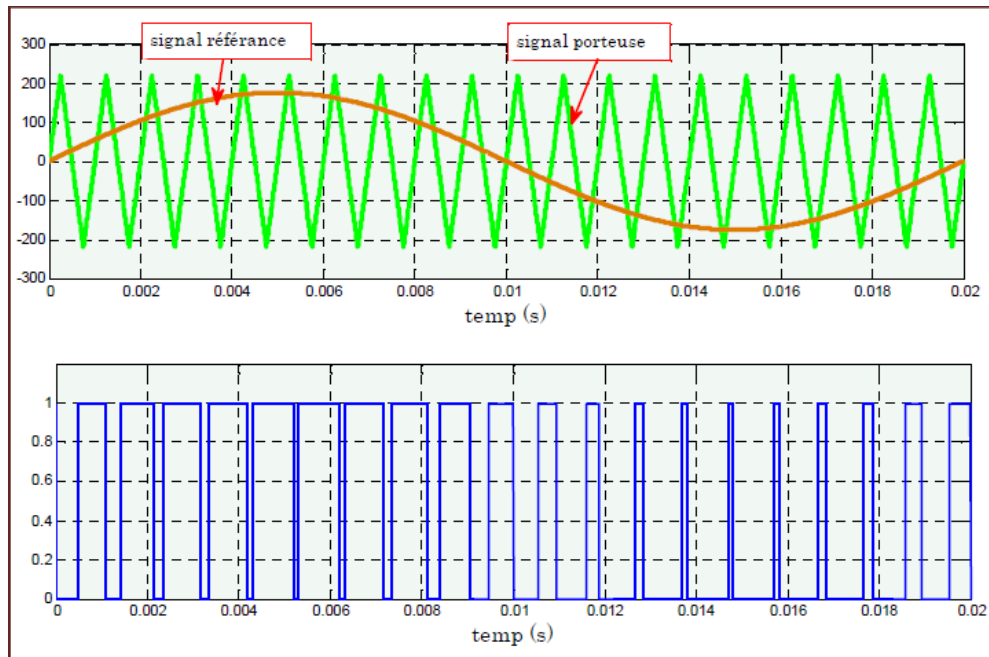


Figure II-18: Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

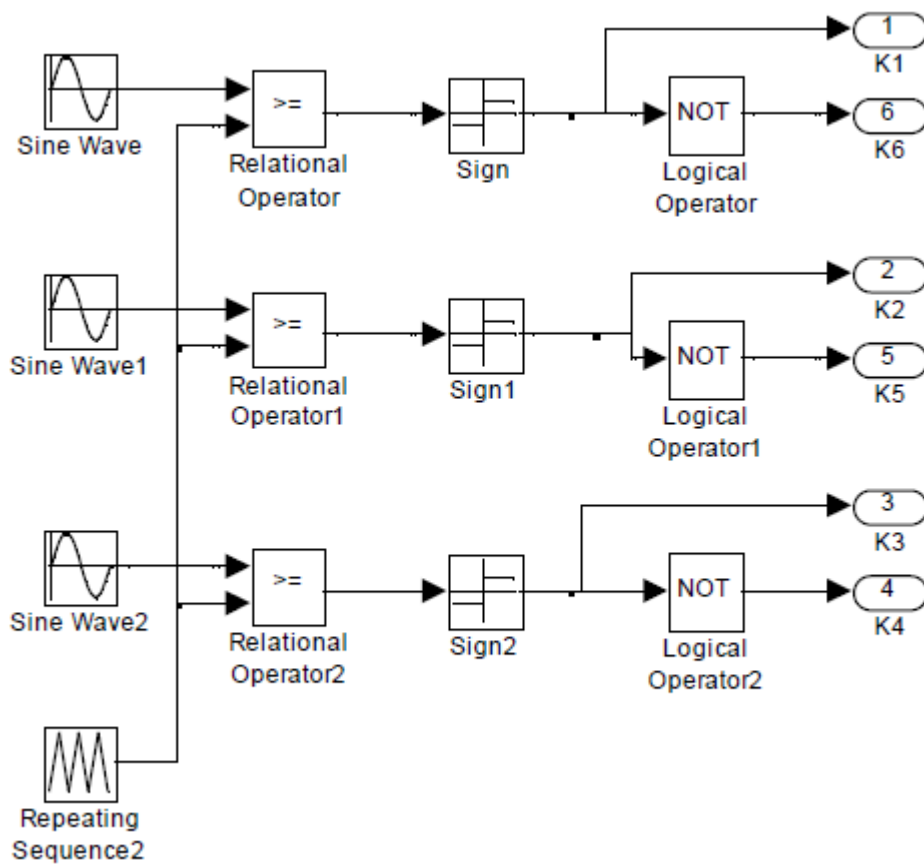


Figure II-19: Schéma de simulation d'une commande MLI.

II.15.2.2 Modulation vectorielle (SVM) :

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement

conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones. En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension [30].

II.16 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives sur l'hacheur et l'onduleur. Nous avons commencé par une présentation de l'élément de base utilisé dans le fonctionnement des convertisseurs statiques qui est l'interrupteur semi-conducteur. Ensuite nous avons présenté la théorie sur les hacheurs, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement, sa commande, leurs principales applications et nous avons présenté les différentes structures des hacheurs. Puis nous avons donné l'état de l'art des onduleurs définition, son principe de fonctionnement, les types des onduleurs, leurs principales applications et leurs différentes commandes. Enfin nous avons consacré notre étude aux onduleurs de tension et principalement ceux en pont triphasé et les différentes stratégies de commande d'un onduleur triphasé.

Chapitre III

III. CHAPITRE III : SIMULATION DE SYSTEME PILE PEMFC - RESEAU

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter la PEMFC avec le modèle statique de Larminie-Dicks et effectuer la simulation d'un générateur pile à combustible raccordé au réseau. Nous allons montrer les courbes de la tension, du courant et de la puissance seront présentées à chaque étage du système depuis le générateur pile à combustible passant par le hacheur Boost vers l'onduleur et finalement arrivant à la charge électrique avec le problème des perturbations des harmoniques liées aux composants non linéaires sur la qualité de l'énergie fourni au réseau

On sait que la PàC se présente sous la forme d'un empilement de cellules, communément appelé Stack. Chaque cellule comporte une anode, une membrane électrolytique et une cathode. Et elle peut être représentée par un schéma électrique équivalent plus ou moins complexe. Pour notre étude, on se contente dans un premier temps d'un modèle statique.

III.2 LE SYSTEME DE PILE A COMBUSTIBLE PROPOSEE :

Dans notre travaille on a donné le modèle de la PAC de type PEMFC de 6.8KW à travers l'équation de Larminie-Dicks qui nous allons présenter et simuler sur logiciel Matlab comme suivant : Le système PAC proposé contient un générateur pile à combustible de type PEMFC, un convertisseur survolteur « Boost », une commande MLI, l'onduleur de tension (DC-AC) commandé par MLI, et le réseau électrique basse tension BT figure (III.1).

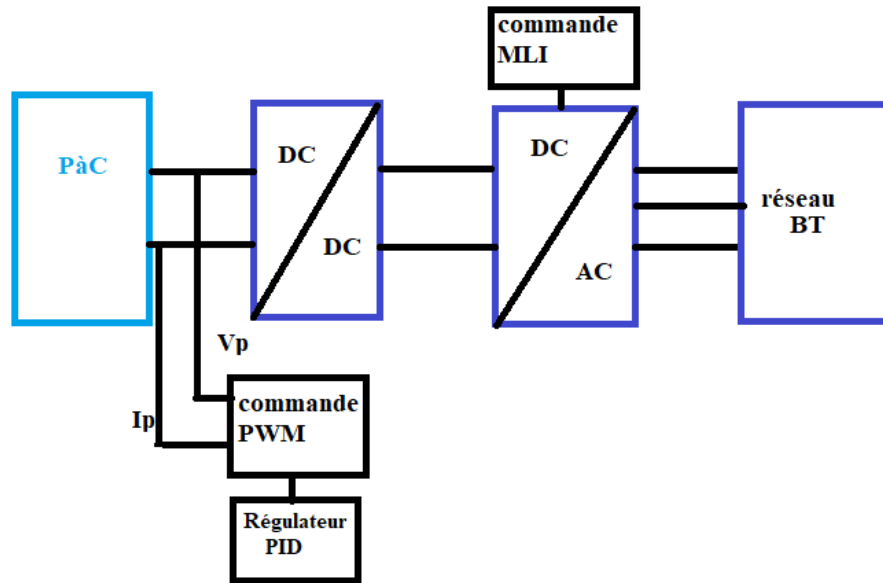


Figure III-1:Schéma synoptique d'un système PEMFC relié au réseau électrique

En générale le hacheur élévateur permet d'élever la tension de pile et ainsi de contrôler la tension du bus continu. L'onduleur triphasé permet quant à lui de générer des courants sinusoïdaux triphasés.

III.3 SIMULATION DU GENERATEUR PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC :

III.3.1 Modèle statique de Larminie-Dicks :

Ce type de modèle ne permet de représenter que l'allure de la tension en fonction du courant débité en régime stationnaire, mais il tient compte du courant limite pour lequel la tension PAC s'effondre. Larminie et Dicks utilisent des équations empiriques pour décrire la caractéristique tension-courant de PAC. Donc l'expression de la tension de la cellule pile à combustible est la suivant :

$$V = E_0 - A \log \frac{i + i_0}{i_0} - R_m(i + i_0) + B \log \left(1 - \frac{i + i_0}{i_L} \right) \dots \dots \dots (III.1)$$

L'identification des paramètres de l'expression :

V : la tension de la pile (V).

E₀ : la tension à vide de la pile c'est-à-dire i=0A (V).

A : le coefficient des pertes d'activation.

i : Le courant délivré par la pile (A).

i_n : Le courant interne (la membrane) (A).

i_0 : Le courant de l'échange à laquelle la surtension commence à se déplacer à partir de zéro (A).

R_m : Résistance de la membrane et de contact.

B : La constante de transfert de masse.

i_L : le courant limite de la pile (A).

III.3.2 Simulation d'une cellule de la pile par le modèle Larminie et Dicks :

Les paramètres de la cellule sont suivant :

$$E=0.98$$

$$R_m: 0.001$$

$$A=0.05$$

$$B=0.205$$

$$i_L = 100$$

$$i_0 = 0.36$$

$$i_n = 0.5$$

Dans cette simulation nous avons choisi le courant de la pile comme un ramp pour obtenir les caractéristiques tension-courant et puissance-courant.

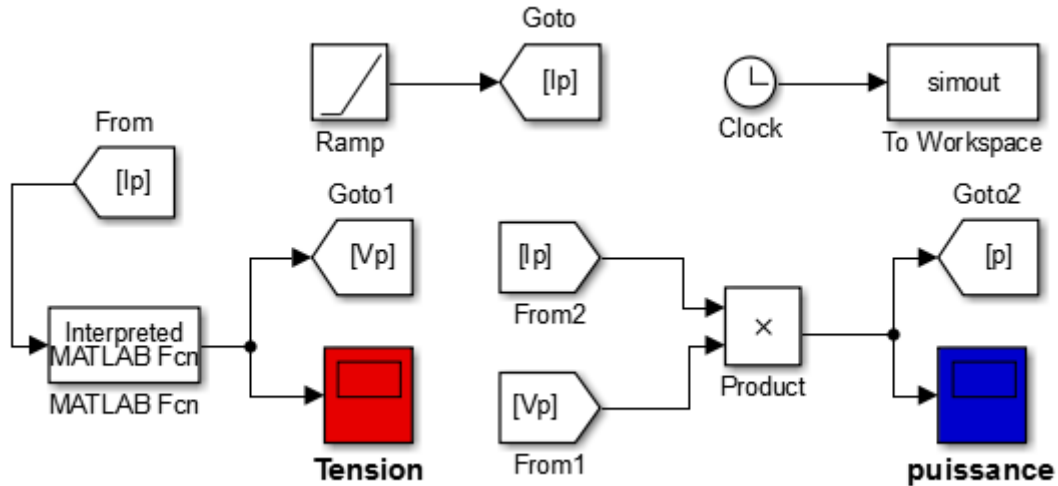


Figure III-2: Schéma de simulation de cellules par le modèle Larminie-dicks.

La figure III.3 représente la caractéristique (V-I) d'une cellule PEMFC au départ la tension est maximale, puis elle se stabilise à la valeur désirée (tension optimale de PAC) ensuite la tension diminue. La tension d'une cellule, lorsque le courant est nul la tension est maximale, a la première zone où l'effet d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant. Puis dans la deuxième zone caractérise le comportement ohmiques la pile fonctionne dans bon état mais si le courant est supérieure de 90A (zone de concentration) on a obtenu de chute de tension jusqu'à zéro (court-circuit) c'est la zone de limitation.

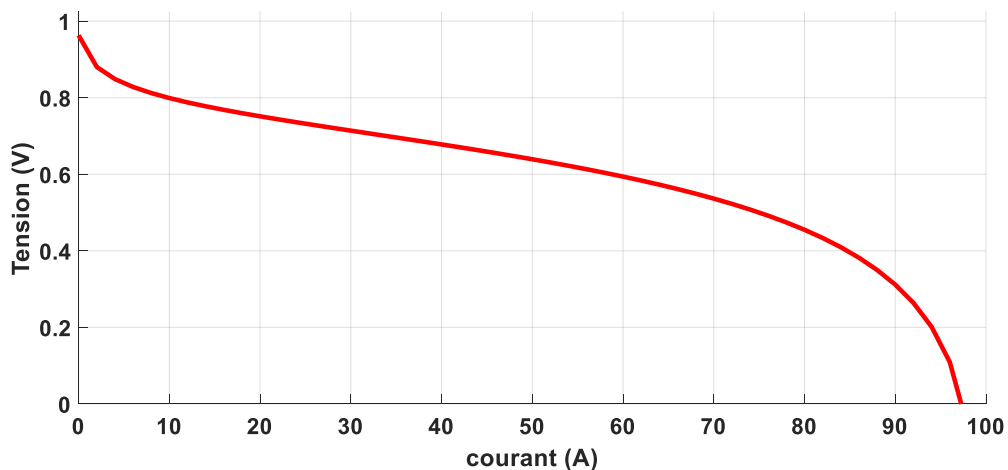


Figure III-3: Caractéristique de tension en fonction de courant pour une cellule.

Dans la figure III.4 on remarque la puissance est augmenté jusqu'à presque 40W maximum, avec la supériorité du courant 80A puis la puissance diminue et le courant prend la valeur de court-circuit.

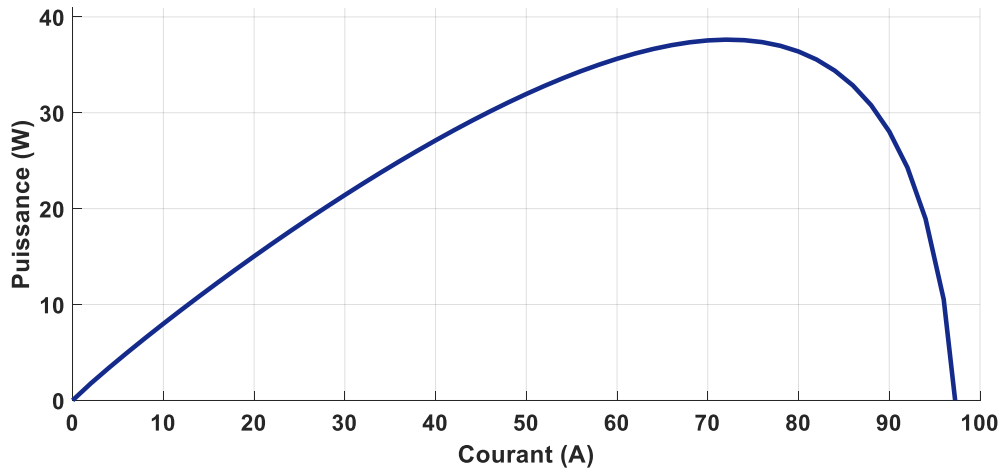


Figure III-4 : Caractéristique de puissance en fonction de courant pour une cellule.

III.3.3 Simulation du PEMFC (stack) :

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de pile à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte la puissance nominale de la pile et la densité de courant que nous souhaitons avoir. Pour obtenir une PàC avec une tension nominale admissible et courant efficace on ajout une 99 cellules,voici la figure :

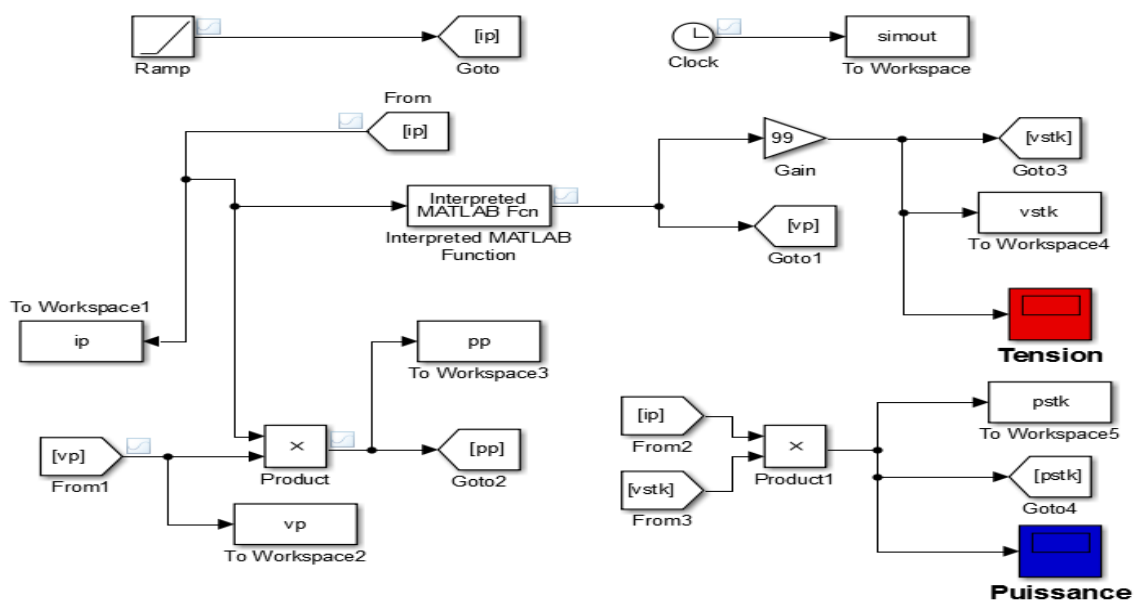


Figure III-5: Simulation de la pile par le modèle Larminie-dicks.

III.3.4 Résultat de simulation :

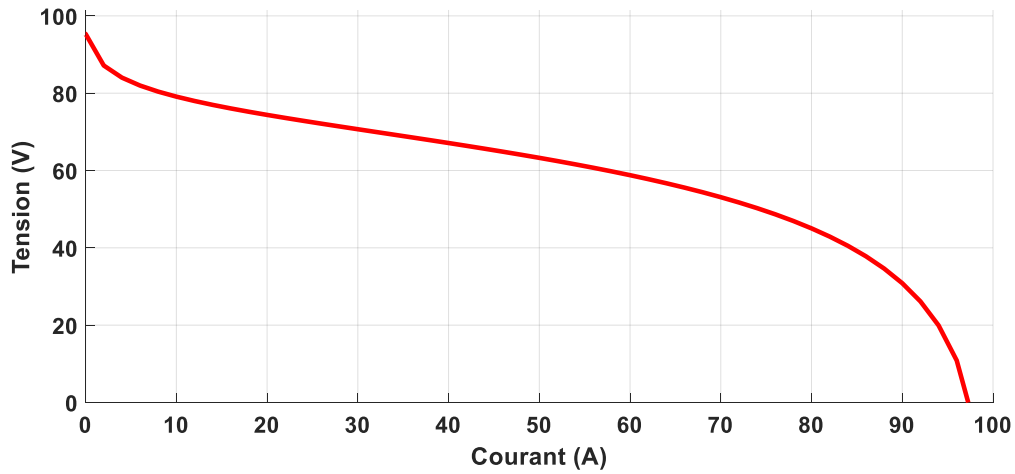


Figure III-6: Caractéristique de tension en fonction de courant (stack).

D'après la figure III.6 On peut remarquer sur cette caractéristique que l'on a, à vide, une tension augmentée que la valeur de la tension d'une cellule, puis une chute de tension rapide à faible valeur de courant, ensuite une zone de décroissance linéaire et enfin une chute rapide de la tension à fort courant.

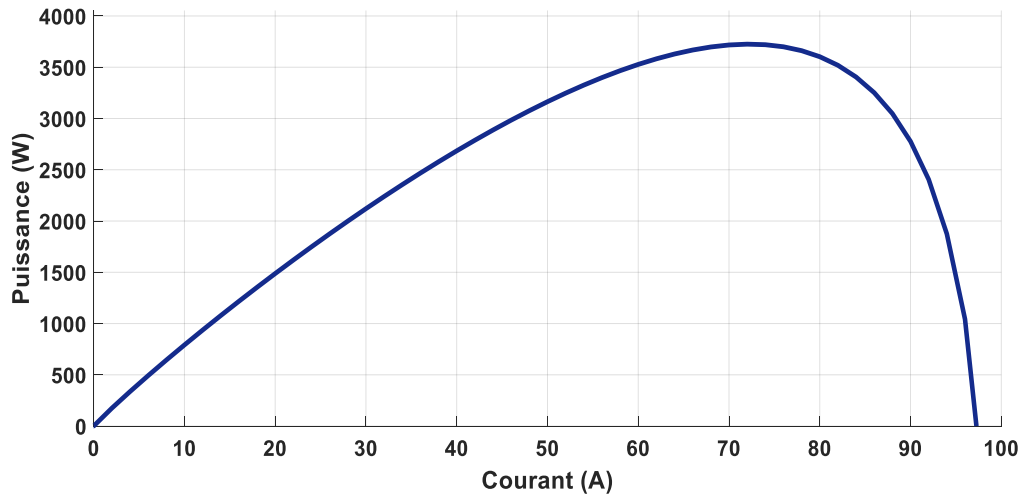


Figure III-7: Caractéristique de puissance en fonction de courant (stack).

D'après la figure III.7 on remarque que la puissance augmente avec l'augmentation du courant jusqu'à une valeur max 3.5KW mais ensuite elle diminue mais le courant fonctionne en court-circuit.

Nos résultats montrent que cette caractéristique peut être décomposée en trois phénomènes prépondérants en fonction de la valeur de la densité de courant d'après la figure III.6 :

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

La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension. Elle permet de décrire la courbe Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant

III.4 MODELISATION DU SYSTEM PILE A COMBUSTIBLE AVEC HACHEUR COMMANDE :

Dans cette simulation on a utilisé la pile à combustible modélisée par modèle Larminie-Dicks avec les paramètres modifier et elle comporte 99 cellules et un hacheur boost caractérisé par:

- Inductance d'entrée $l = 162 \mu H$
- Capacité de sortie $C = 2.2mF$
- IGBT et une diode de puissance

On a utilisé aussi une commande de PWM avec switching frequency de 100kHz block « saturation »(Hystérésis) pour le IGBT. On a utilisé un régulateur de type PI avec $P=0.0002$ et $I=5$.

III.4.1 Commande par Hystérésis :

Le principe de contrôle des tensions par hystérésis consiste à maintenir chacun des tensions générés dans une bande enveloppant les tensions référence chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation, la différence entre la tension de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande d'interrupteur.

Dans la modélisation de la pile on a changé le rompt qu'il se soit le courant de la pile par un constant pour un courant fixe cette valeur est spécifier par le courant de réseau alors nous l'avons trouvé avec une valeur de 35A.

$$I_{ch} = V_{ch}/R_{ch}.$$

I_{ch} est le courant de sortie de l'onduleur alors on le multiplie avec le rapport cyclique alpha de l'hacheur.

III.4.2 Schéma de simulation :

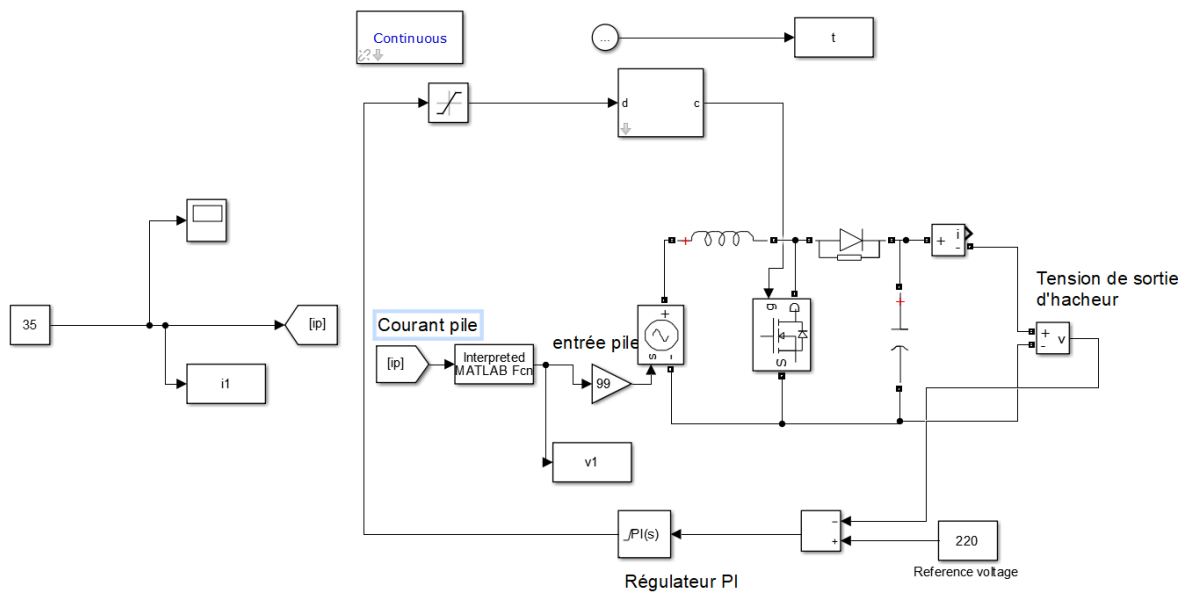


Figure III-8: Schéma de simulation d'une PàC avec un hacheur boost et sa commande.

L'objectif fixé dans ces simulations est d'atteindre une tension suffisamment grande à partir d'une tension relativement faible en sortie du PàC c.à.d. de faire fonctionner le hacheur comme un hacheur survolteur avec un rapport cyclique $\alpha > 0.5$.

III.4.3 Résultat de simulation :

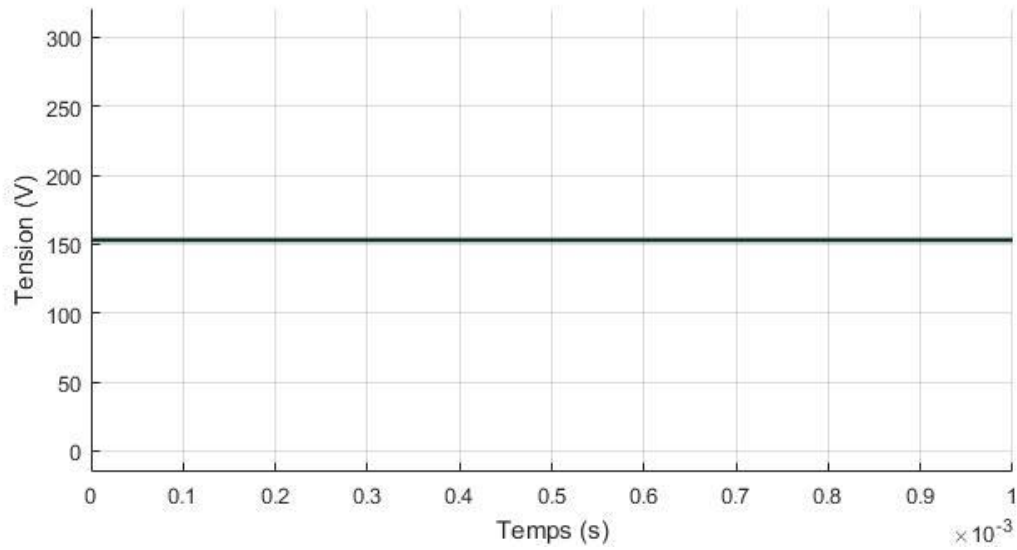


Figure III-9: Caractéristique $V_{pile}=f(t)$

La figure III.9 représente la tension de sortie fixe de la pile qui est presque 150V.

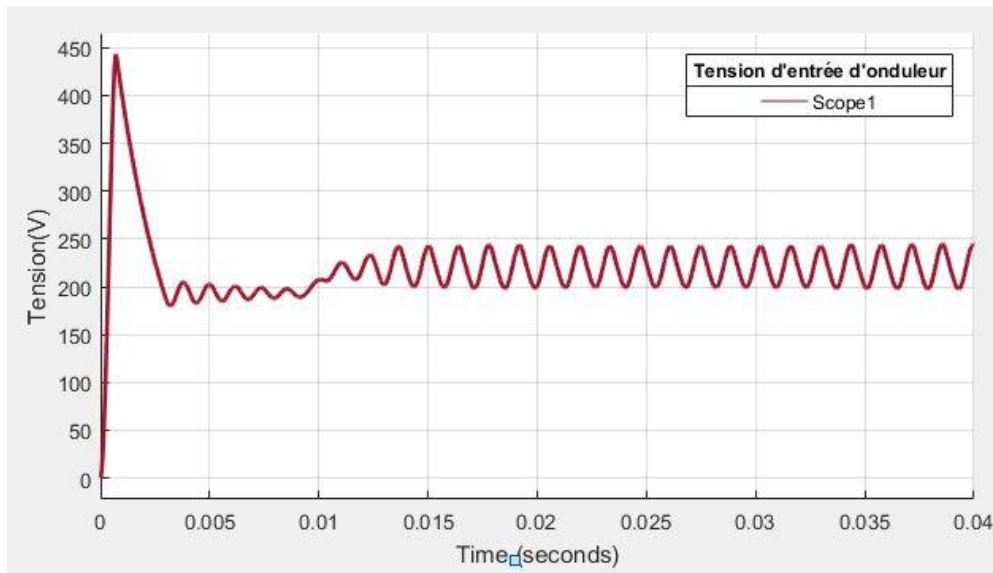


Figure III-10: Caractéristique $V_{hacheur} V_s=f(t)$ du hacheur Boost.

D'après la figure III.10 on remarque qu'au départ la tension de sortie augmente à une valeur maximale puis elle se stabilise à la valeur désirée avec des oscillations. la tension donné sur l'entrée du hacheur a augmenté et suivie la tension de référence. Car la

tension est augmenté et dépassée la référence cette passe à une relation avec les paramètres de correcteur PI pour avoir une grande tension pour l'entrée d'onduleur.

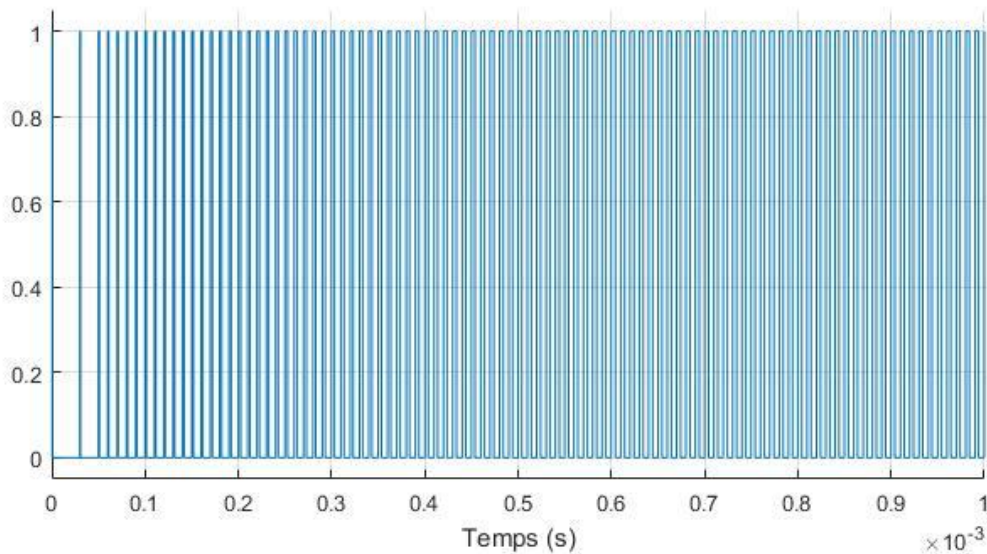


Figure III-11: Rapport cyclique du hacheur

La commande par hystérésis fournit directement u ; la commande par PI nous donne α (rapport cyclique), il faut ensuite « construire » la commande u par comparaison entre le signal de sortie (V_s d'hacheur) avec la tension référence 250V, et pour avoir une tension admissible et assez pour l'entrée d'onduleur on a choisi le rapport cyclique $\alpha = 0.7$.

Afin d'améliorer les performances de notre correcteur PI, on peut augmenter les valeurs des gains. Cela permet d'obtenir un système qui réagit plus rapidement,

III.5 MODELISATION GLOBAL DE SYSTEME PAC RACCORDE AU RESEAU :

Dans cette simulation on a utilisé Pile à combustible raccordé à un réseau de (220V/380V), un hacheur Boost caractérisé par $L=162\mu H$, $C1 = 5mF$, $C2 = 1mH$ commandé avec PWM et Hystérésis avec un régulateur PI et un onduleur triphasé commandé en MLI on a utilisé aussi une charge RL.

Le réseau triphasé a trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $\frac{2\pi}{3}$, et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré. Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que (V_a, V_b, V_c) est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}) .

III.5.1 Schéma de simulation :

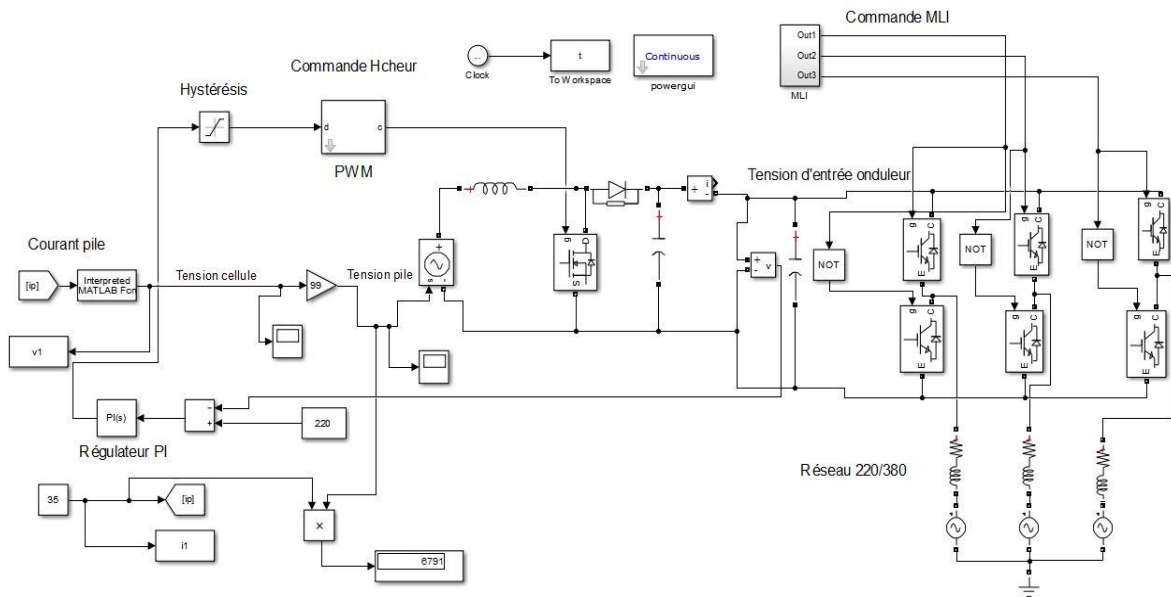


Figure III-12: Schéma de simulation globale PAC- hacheur Boost-onduleur MLI Réseau.

III.5.2 La commande MLI :

Le principe de MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur, voici les résultats :

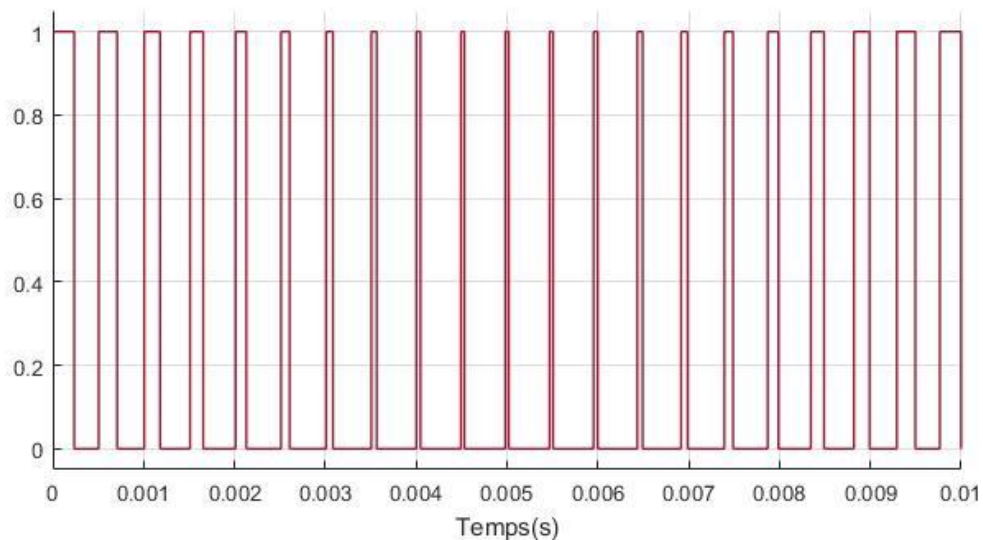


Figure III-13 :Signal de commande MLI pour les interrupteurs

III.5.3 Résultat de simulation de schéma globale :

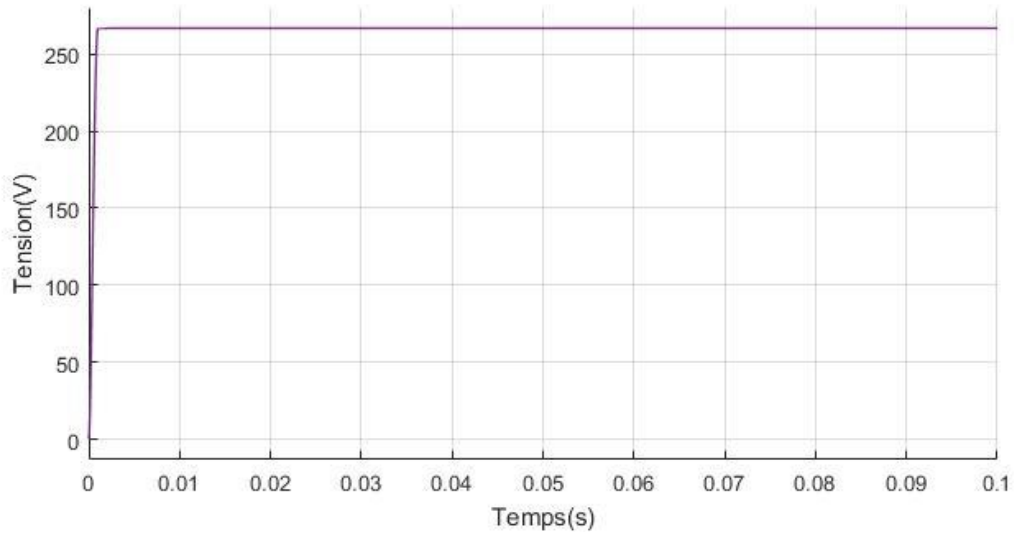


Figure III-14 : Tension d'entrée d'onduleur

D'après la figure III.14 on observe qu'au départ la tension de pile se stabilise à la valeur désirée et on observe que l'annule des oscillations lorsque le branchement d'onduleur.

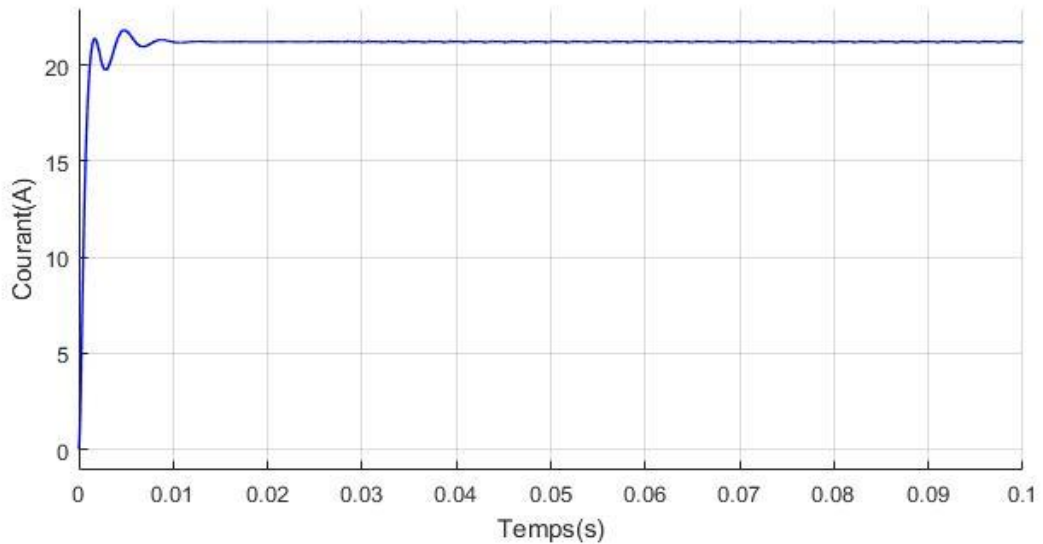


Figure III-15 : Courant d'entrée onduleur

On remarque dans la figure III.15 que le courant on remarque qu'au départ le courant n'est pas stable ensuite il revient la valeur nominale.

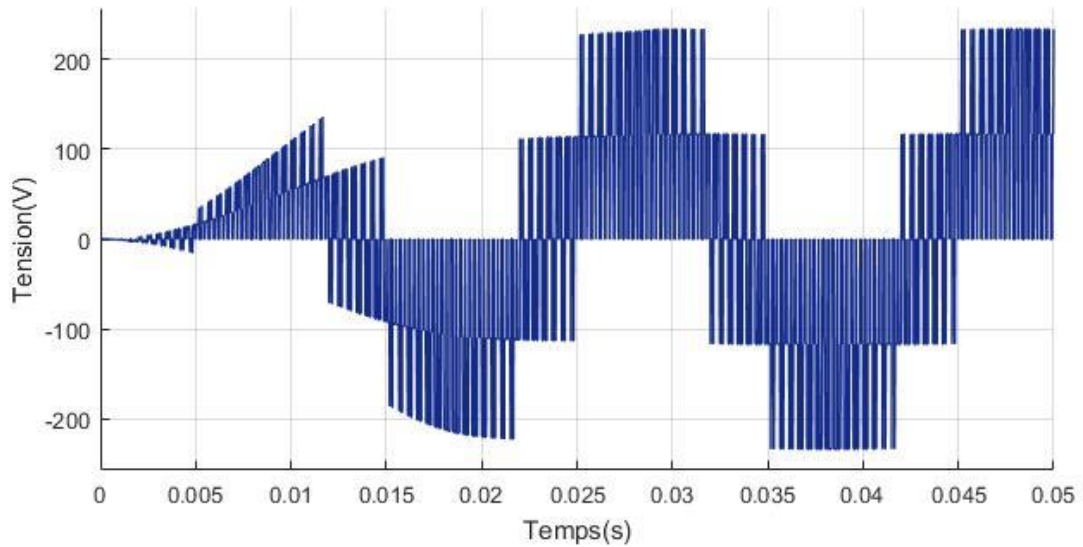


Figure III-16: Tension simple V_{AN} de la sortie d'onduleur

On remarque d'après La figure III.16 que la valeur maximale de la tension est égale à celle de la tension continu presque (230V) de l'entré ainsi que la forme de la tension simple est découpé.

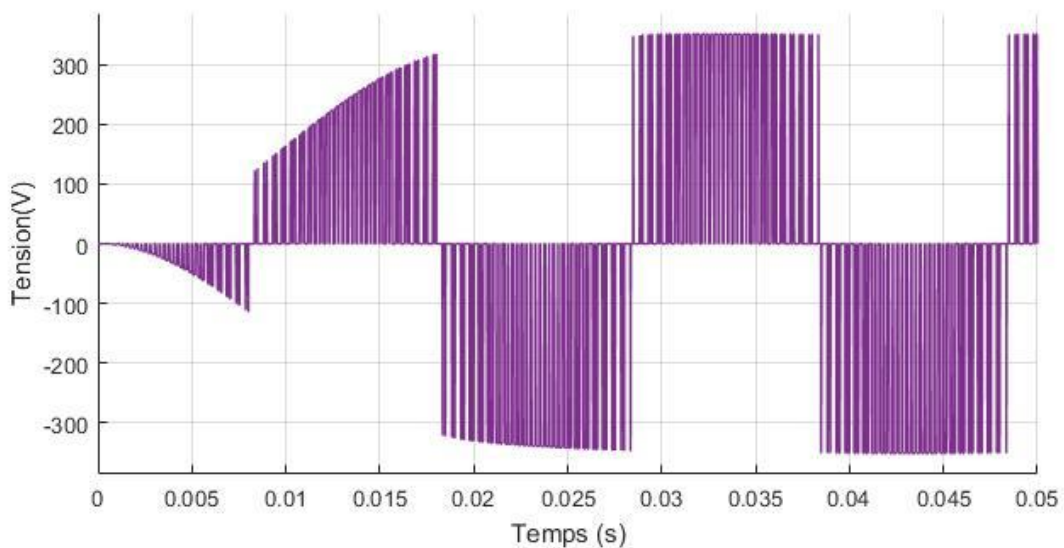


Figure III-17: Tension composée V_{AB}

On remarque que la valeur max de la tension composé est grande à celle de la tension continu de l'entré ainsi que la forme de la tension simple et la tension composé est découpé et la valeur maximale est presque 380V.

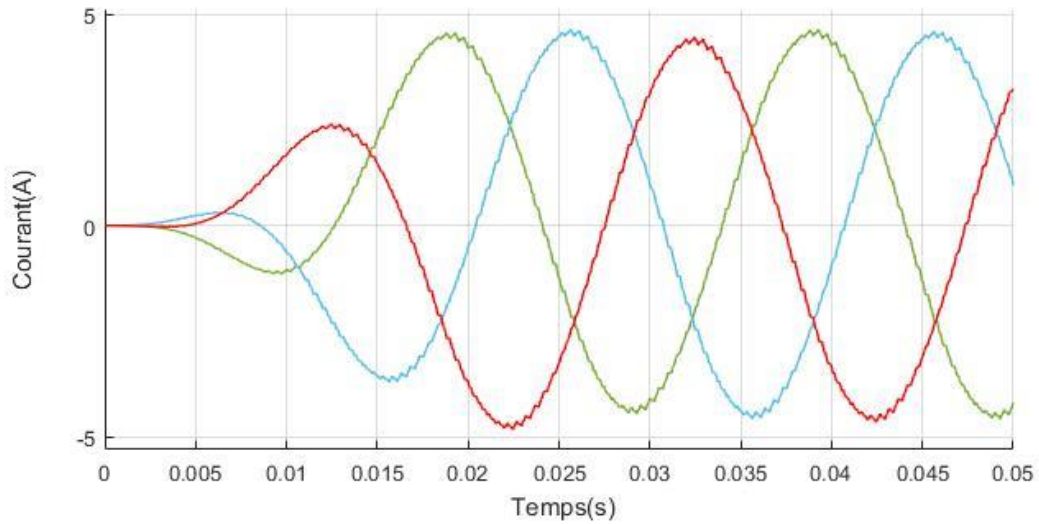


Figure III-18: Les courants de sortie d'onduleur ia,ib,ic

D'après la figure III.18 on remarque que le courant de sortie de l'onduleur prend la forme sinusoïdale à cause de la charge inductive et On a une oscillation haute fréquence sur le courant à cause des harmoniques.

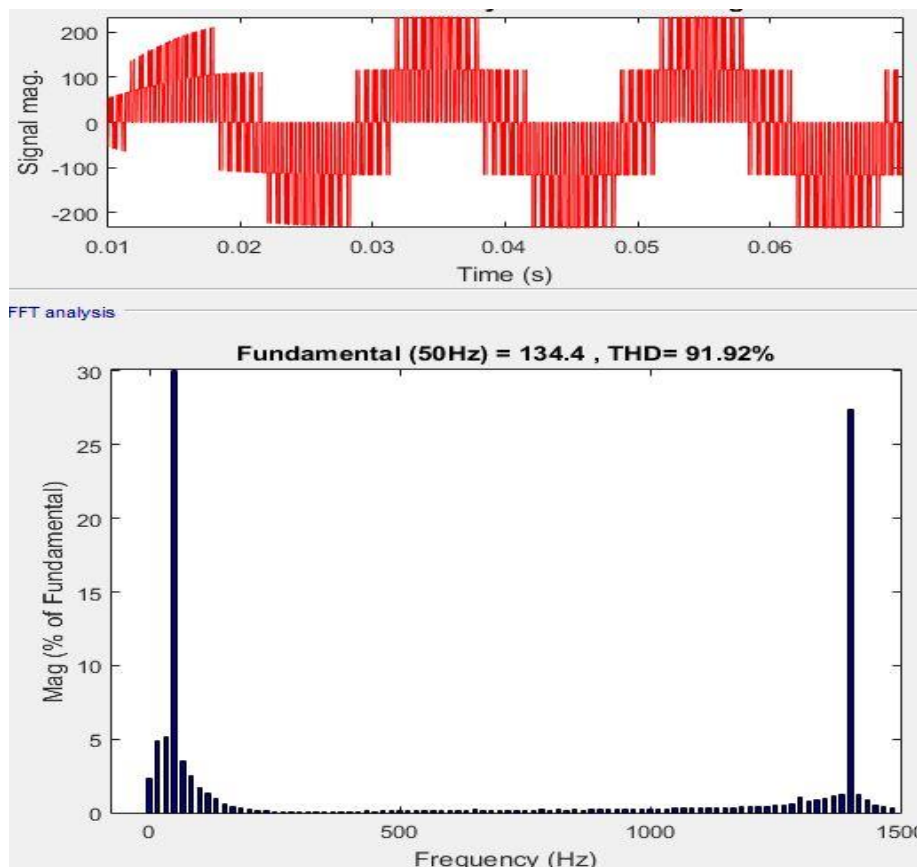


Figure III-19:Analyse spectrale de tension V_{AN}

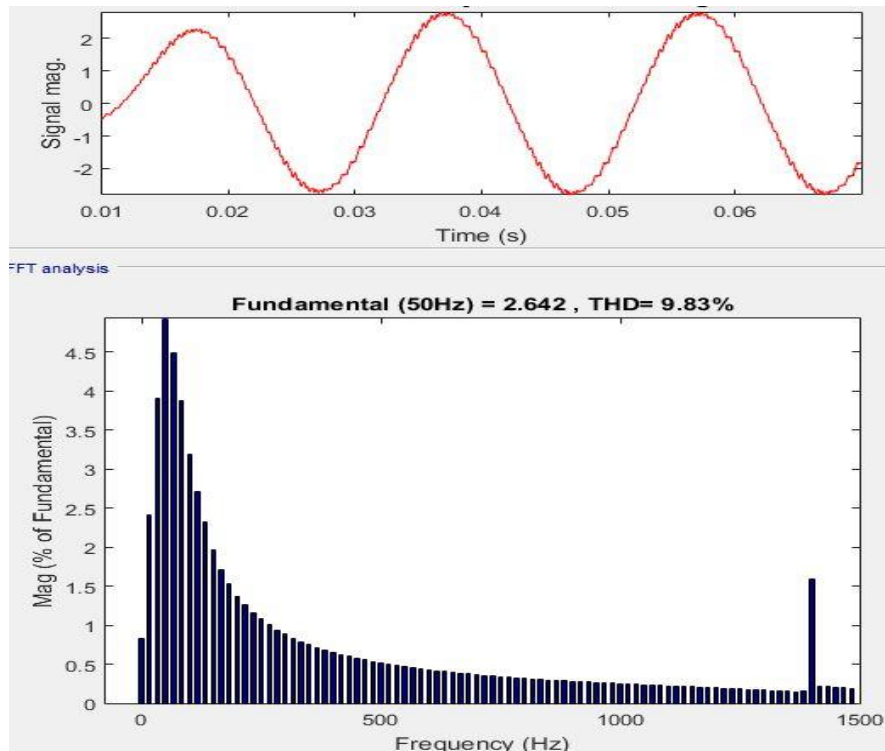


Figure III-20:Analyse spectrale de courant ia

D'après cette analyse spectrale du courant et tension on observe que la mesure du THD des deux gradeurs donne pour la tension 91.92% et pour le courant 9.93% ,ces résultats avec le choix de la fréquence de porteuse $F_p=1500H$. On augmente dans la fréquence du porteuse jusqu'à 2050H et voici les résultats :

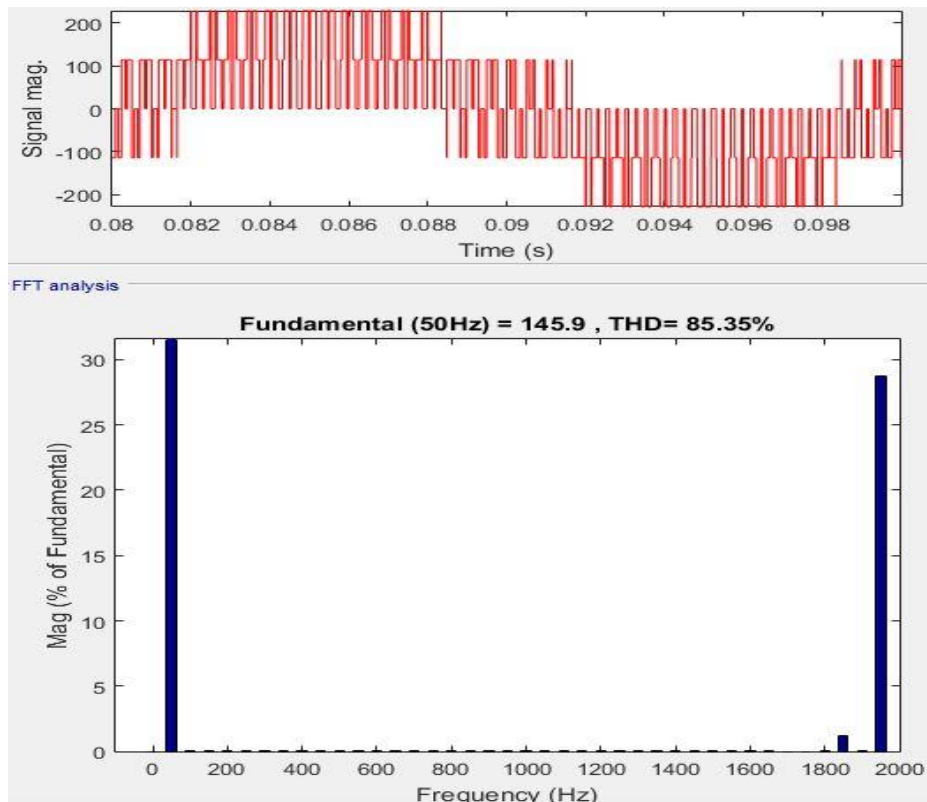


Figure III-21: analyse spectrale de tension V_{AN} après l'augmentation de F_p

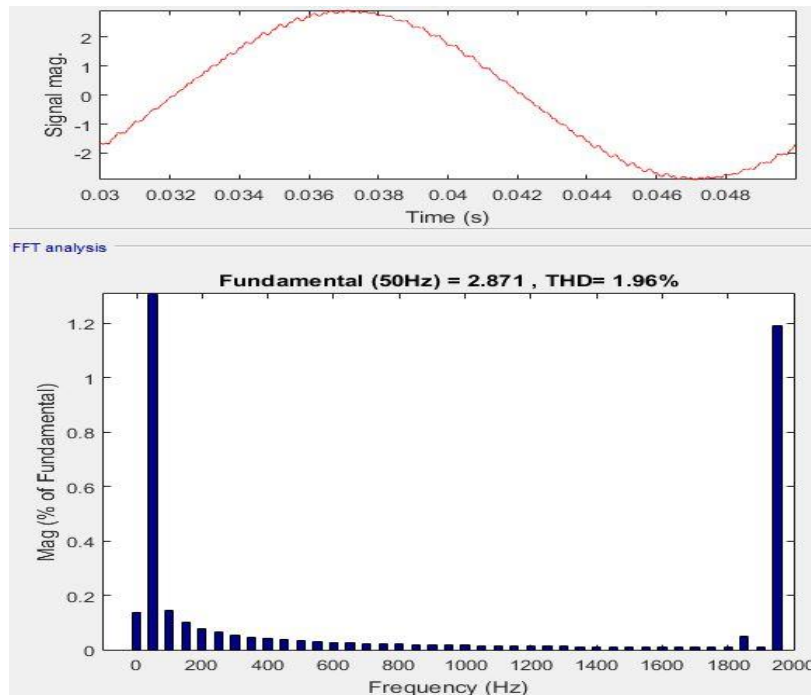


Figure III-22: analyse spectrale du courant i_a après l'augmentation de F_p

On observe d'après les figure 3.21 et 3.22 que lorsqu'on a augmenté dans la fréquence du porteuse le THD du tension est diminué au 85.35% et le THD du courant est presque éliminé est égale 1.96%.

III.6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système pile à combustible connecté au réseau avec l'illustration des différentes opérations comme les paramètres pour modéliser la pile, principe de fonctionnement de le hacheur avec sa commande même si l'onduleur qui subit la tension produite par le générateur pile à combustible à fin de satisfaire les besoins de la charge. Le problème des harmonique a été présenté, l'analyse spectrale du courant et de la tension de réseau ont montré l'effet de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournir par la pile à combustible et les résultats de simulation ont montré qu'il faut des techniques spéciaux pour éliminer ses harmoniques comme l'augmentation du fréquence de porteuse ou bien l'injection des filtres spécifiques à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE :

Les piles à combustible, plus généralement, la « filière hydrogène », est un moyen intéressant de valoriser l'énergie chimique contenue dans divers combustibles, avec un très bon rendement, sous la forme « noble » d'énergie électrique. Les réactions électrochimiques en jeu ne produisent pas d'émissions polluantes, et elles n'émettent ni bruit ni odeur. Déjà, de nombreuses installations fonctionnent, et des programmes de recherche ambitieux tentent de développer de nouvelles applications, notamment dans le domaine des transports et des applications statiques (production d'énergie électrique, cogénération).

Les travaux présentés dans ce mémoire consistent à la connexion de la pile à combustible dans le réseau électrique à basse tension. Dans la première partie Nous avons donné une description sur la pile à combustible et leur principe de fonctionnement, leurs applications, et leurs types. Nous avons détaillé sur le type PEMFC du côté la réaction chimique (anode/cathode) et la composition interne et aussi l'hydrogène c'est le combustible principale pour le démarrage de la pile, ensuite nous avons utilisé le modèle statique LARMINIE-DICK pour étudier les caractéristiques électriques de la pile (tension en fonction de courant et puissance en fonction courant) et il donne des résultats acceptable nous concluons les différentes pertes sont pertes d'activation, pertes ohmique, pertes de concentration. Enfin la pile à combustible est plus performance par apport à autre source d'énergie électrique. Comme Notre premier but est d'intégrer la pile à combustible au réseau, Le modèle simulé dans ce travail nous a permet de décrire : la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule de pile à combustible PEMFC, la courbe Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule). Ce qui nous admis à faire dimensionner la pile pour notre application résidentielle (réseau). Par la suite nous avons varié dans les paramètres de notre pile en tenant compte de les caractéristique Tension/Densité et de Puissance/Densité pour avoir une puissance de 6.8KW.

Pour connecté cette pile au réseau il nous faut des transformateurs spécifique pour relier cette pile. l'utilisation d'hacheur avec sa commande PWM et Hystérésis a donné arrive nous à survolter la tension de la pile même si la diminution du courant même si la commande d'onduleur avec MLI nous étions permis de gérer le transfert de la puissance vers la charge avec l'établissements d'une gestion optimale d'énergie prévenante de la pile à combustible.

Les différentes courbes de la tension et du courant et de la puissance fournis par la micro- centrale à chaque étage ont été établies pour illustrer toutes les transformations et nous avons remarqué que l'augmentation de la fréquence de porteuse a diminué la déformation des courbes et le THD.

Nos buts étaient d'assurer une tension et puissance constante, selon la demande de la charge. Nous avons pu délivrer la puissance avec maintenir une tension de 220V, donc Les problèmes évoqués dans ce travail ouvert à la recherche sont nombreux, nous évoquons ici les plus importantes :

Les paramètres de Modèle choisi de la pile PEMFC sont sensible pour les variés car à chaque fois en tenant compte à la théorie des caractéristiques Tension/Densité et Puissance/Densité.

Donc cette étude peut être complétée, il reste comme perspective de proposer des techniques fiable et des stratégies pour une commande et régulation robustes. Il serait intéressant d'ajouter des piles série et/ou parallèle pour augmenter la puissance délivré au réseau ou bien changer le type de pile à combustible PEMFC d'une façon générale la SOFC est plus efficace. Et pour améliorer les formes des tensions et courants pour la sortie d'onduleur nous suggestions des filtres passif pour éliminer les harmoniques.

RÉFÉRENCES

LES REFERENCES :

- [1] T. Ghennam. « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [2] I. V. Exposito. « Interfaçage et contrôle commande de piles a combustible pour applications stationnaires et transport». Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Le 13 Décembre 2004.
- [3] S. Thomas et M. Zalbowitz. « Fuel cells – Green power», Prepared for the U.S. Department of Energy, under contract W-7405- ENG-36.
- [4] J. F. Fauvarque. “Les Piles à combustibles et leurs applications”. Ann. Chim. Sci., 2001, 26 (4), Pages. 1-8.
- [5] J. Larminie et A. Dicks. “Fuel cell systems explained”. Chinchester, Wiley, 2000.
- [6] I. Sadli. "Modelisation par impedance d'une pile a combustible pem pour utilisation en electronique de puissance ". Thèse de doctorat de l'INPL, Soutenue le 07 décembre 2006.
- [7] L. H. Chaouki. "Commande d'un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible". Mémoire de master, Université de Biskra, Année universitaire 2017/2018.
- [8] P.Thonthong. « Conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs ». Thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de lorraine, 2005.
- [9] A. Lachichi. « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible ». Doctorat de l'université de Franche-Comté, 24 novembre 2005.
- [10] G. Lefevre. « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible ». Doctorat d'Université Joseph Fourier, 26 Novembre 2004.
- [11] Electric & Hybrid : Vehicle technology international Annual review 2005.
- [12] B. Wahdame. « Analyse et optimization du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences ». Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [13] M. Zandi. « Contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique ». Thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.

- [14] R. D. et A. Bennouna. "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité". International congress on the renewable energies and the environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
- [15] S. Saker. « Modélisation et contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur ». Magister electrotechnique .
- [16] I.Sadli, P.Thounthong, J.P. Martin, S. Raël, B. Davat. "Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter". Journal of power sources, Vol. 156, pp. 119-125, May 2006.
- [17] K. Sofiane. « Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs » Master universite Mhamed Bougara Boumerdes.
- [18] N. Abouchabana. « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT ».
- [19] F. Fateh. "Etude et simulation d'un étage MPPT pour un système à énergie renouvelable". Mémoire de master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.
- [20] S. Ghandour. " Conception de convertisseurs DC/DC à base de mems ", Thèse de doctorat, Université de Grenoble. 2011.
- [21] B. Imed. " Etude d'un hacheur à stockage capacitif " Mémoire de master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2014.
- [22] A. Ismail. " Etude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque", Mémoire de master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.
- [23] Y. Benyahia. "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt ", Mémoire de master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.
- [24] B. Abdelhakim, "Conception et implémentation d'une commande mppt de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome", Thèse de doctorat, Uuniversité Ferhat Abbas - Sétif 1 2015.
- [25] T. Mostefa. "Etude et simulation d'un convertisseur AC/DC type Buck (abaisseur de tension)", Mémoire de master 1616, Université Mohamed Khider Biskra. 2014.

- [26] B. Abdelkader « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph »
- [27] S. B. et L. Francis. « Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4) ». Edition tec&doc, 1995.
- [28] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [29] K. Sofiane. « Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs ».
- [30] C. Canudas de Wit. « Modélisation, contrôle vectoriel et DTC. commande des moteurs asynchrones ». 1 Editions Hermès.