

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



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

Réf:.....

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

**MASTER**

***Thème***

Etude et simulation d'une alimentation stabilisée  
à base d'une pile à combustible

Présenté par :  
**BEN AHMED Younesse**  
Soutenu le : 01 Juin 2015

Devant le jury composé de :

Mr. ABOUBOU Abdenaceur

Professeur

Président

Mr. RABHI Boualaga

M.C.A

Encadreur

Mr. BAHRI Mebarek

Professeur

Examineur

**Année universitaire : 2014 / 2015**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



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

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

**MASTER**

***Thème***

Etude et simulation d'une alimentation stabilisée à  
base d'une pile à combustible

**Présenté par :**

*BEN AHMED Younesse*

**Avis favorable de l'encadreur :**

*Mr. RABHI Boualaga*

*signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

**ABOUBOU Abdennacer**

*Signature*

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



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

## *Thème :*

Etude et simulation d'une alimentation stabilisée à  
base d'une pile à combustible

Proposé par : **BEN AHMED Younesse**

Dirigé par : **Mr. RABHI Boualaga**

### **RESUMES (Français et Arabe)**

#### الملخص

يشهد العالم اليوم تطورا كبيرا للتكنولوجيا الحديثة مما أدى الى تزايد استعمال الأجهزة الكهربائية والتي تتطلب تغذية ذات جودة عالية خالية من انقطاع التيار ولو كان ضئيلا في هذا الاطار نقوم بدراسة ومحاكاة تغذية مستقرة باستعمال الخلية الوقودية، وذلك بتصميم ملاءم الكتروني متكون من مطبر رافع للتوتر متبوع بمموج أحادي الطور مستقل مع مرشح للحصول على تغذية مستقرة.

#### **الكلمات المفتاحية**

الخلية الوقودية ، مطبر رافع للتوتر ، المموج الأحادي الطور ، تغذية مستقرة

## **Résumé**

Face à l'évolution galopante des nouvelles technologies et des installations sensibles en électricité de qualité sans la moindre coupure. Dans ce cadre nous avons étudié et simulé une alimentation stabilisée à base d'une pile à combustible ; cette tension est composée d'un hacheur élévateur et un onduleur monophasé avec un filtre de sortie pour obtenir une tension stabilisée.

### **Les mots clé :**

Pile PEMFC, hacheur élévateur de tension, régulation de tension, onduleur monophasé, alimentation stabilisée.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma belle-mère....**NADJIA BEN AHMED**,*

*A mon très chère Père....**ALI**,*

*A mes très chers frères et sœurs chacun à son  
nom,*

*A tous la famille de **BEN AHMED**,*

*A tous mes amis et collègues de*

*l'électrotechnique de l'université de Biskra,*

*A tos les enseignants de l'Electrotechnique de  
l'université de Biskra.*

# Remerciements

Je remercie **ALLAH**, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage pour poursuivre mes études.

Je remercie mon adorable enseignant **RABHI Boualaga** d'avoir accepté d'encadrer ce mémoire. Sans ses orientations et ses suggestions les plus inestimables, ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour.

Je tiens également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Un grand merci à tous mes collègues et amis de la l'Electrotechnique à l'université de Biskra pour leurs précieuses aides et orientations.

Je suis reconnaissant à mes proches, parents et amis, qui ont su rester à mes côtés pendant toute cette période de formation. Ainsi que l'ensemble des enseignants de qui a contribué à mon formation.

**YOUNESSE.**

## Liste des tableaux

---

<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Chapitre I : la pile combustible</b>	
<i>Tableau I.1</i> Description des cinq grandes catégories de piles à combustible	08
<b>Chapitre VI : Association à la pile combustible avec les convertisseurs</b>	
<i>Tableau IV.1</i> Paramètres du système	50

# Liste de figures

## Liste des figures

<b>Chapitre I : la pile combustible</b>	
<b>Fig.I.1</b> L'expérience de Sir William Grove	02
<b>Fig. I.2</b> Pile à combustible 75 kW des voitures et des UTC pour auto bus	04
<b>Fig.I.3</b> Utilisation de la Pile à combustibles pour charger les portables	05
<b>Fig.I.4</b> Utilisations les piles à combustibles pour les voitures	06
<b>Fig.I.5</b> Utilisations les piles combustibles pour les véhicules lourds	07
<b>Fig. I.6</b> Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC	09
<b>Fig. I.7</b> Schéma de principe d'une cellule PEMFC	09
<b>Fig.I.8</b> schéma équivalent du modèle réduit de la P.A.C	12
<b>Fig.I.9</b> Bloc de pile à combustible de MATLAB	13
<b>Chapitre II : Convertisseur continu-continu survolteur «boost»</b>	
<b>Fig.II.1</b> Schéma de principe d'un hacheur élévateur	14
<b>Fig.II.2</b> Séquence actif	16
<b>Fig.II.3</b> Courant de l'inductance	17
<b>Fig.II.4</b> Fonctionnement pendant ( $\alpha T < t < T$ )	17
<b>Fig.II.5</b> L'ondulation du courant dans l'inductance	18
<b>Fig.II.6</b> Formes d'ondes	20
<b>Fig.II.7</b> Forme du courant d'entrée en conduction discontinue	23
<b>Fig.II.8</b> Caractéristique de sortie d'un convertisseur Boost	24
<b>Fig.II.9</b> Ondulation de la tension de sortie	24
<b>Fig.II.10</b> L'ondulation du courant dans l'inductance	26
<b>Fig.II.11</b> Schéma synoptique de la commande par MLI à Bande d'hystérésis	27
<b>Fig.II.12</b> Trajectoire d'un système de deuxième ordre à VSC	28
<b>Fig.II.13</b> Commande $U_n$ adoucie (sat)	29

## Liste de figures

<b>Chapitre III : Généralité sur le convertisseur mono phase DC/AC</b>	
<i>Fig.III.1</i> onduleur monophasé en demi pont	32
<i>Fig.III.2</i> Les formes idéal d'onde de VSI en demi pont pour MLI	33
<i>Fig.III.3</i> les formes idéal d'onde de la technique de modulation des ondes carrées pour VSI en demi pont	35
<i>Fig.III.4</i> schéma de principe de l'ondeur monophasé on pont (VSI)	36
<i>Fig.III.5</i> les formes idéales d'onde pour VSI en pont avec technique unipolaire SMLI	38
<i>Fig.III.6</i> Le schéma du filtre passe-bas	38
<b>Chapitre IV: Association de la pile à combustible avec les convertisseurs</b>	
<i>Fig.IV.1</i> Le schéma de simulation du hacheur élévateur	42
<i>Fig.IV.2</i> Tension et courant de sortie de le hacheur élévateur	42
<i>Fig.IV.3</i> le courant de l'inductance L	42
<i>Fig.IV.4</i> Tension de l'inductance L	43
<i>Fig.IV.5</i> Schéma de simulation du hacheur commandé par l'hystérésis	43
<i>Fig.IV.6</i> Tensions de sortie et de référence avec le courant de la charge	43
<i>Fig.IV.7</i> Schéma de simulation du hacheur commandé par mode glissant	44
<i>Fig.IV.8</i> Tensions de référence et de sortie de le hacheur	44
<i>Fig.IV.9</i> courants de l'inductance L et de la charge	45
<i>Fig.IV.10</i> Schéma de simulation de la pile associe a le hacheur en BO	46
<i>Fig.IV.11</i> Tensions de la pile et de sortie de le hacheur avec le courant de la charge pour $R=2\Omega$	47
<i>Fig.IV.12</i> Tensions de la pile et de sortie de le hacheur avec le courant de la charge pour $R=20\Omega$ .	47
<i>Fig.IV.13</i> Schéma de simulation de la pile associe à le hacheur en BF	48

## Liste de figures

---

<b>Fig.IV.14.a</b> Tensions de la pile et de sortie de le hacheur de la charge pour $R=2\Omega$ .	47
<b>Fig.IV.14.b</b> courbe de courant de charge	49
<b>Fig.IV.15.a</b> Tensions de la pile et de sortie de le hacheur de la charge pour $R=20\Omega$	49
<b>Fig.IV.15.b</b> Courbe de courant de charge	49
<b>Fig.IV.16</b> Schéma de simulation de l'onduleur monophasé	50
<b>Fig.IV.17</b> Tension et courant de sortie de l'onduleur	50
<b>Fig.IV.18</b> Spectre d'harmonique de la tension de la charge	51
<b>Fig.IV.19</b> Schéma de simulation de l'alimentation proposée	51
<b>Fig.IV.20</b> Tension de la pile combustible PEMFC	52
<b>Fig.IV.21</b> Tension du bus continu	53
<b>Fig.IV.22</b> Tension et courant de la charge	53
<b>Fig.IV.23</b> Spectre d'harmonique de la tension de la charge	53
<b>Fig.IV.24</b> La tension de la pile combustible PEMFC	54
<b>Fig.IV.25</b> Courant délivré par la pile	54
<b>Fig.IV.26</b> Tension du bus continu	54
<b>Fig.IV.27</b> Tension et courant de la charge	55
<b>Fig.IV.28</b> spectre d'harmonique de la tension de la charge	55
<b>Fig.IV.29</b> La tension de la pile combustible PEMFC	56
<b>Fig.IV.30</b> Tension du bus continu	56
<b>Fig.IV.31</b> Tension et courant de la charge. $R=20\Omega$ à $2\Omega$	57
<b>Fig.IV.32</b> spectre d'harmonique de la tension de la charge $R=20\Omega$ à $2\Omega$	57

## Liste des abréviations et nomenclatures

<b><math>V_{FC}</math>:</b>	Tension total de la pile à combustible (V)
<b><math>I_{fc}</math>:</b>	Courant d'une cellule de la pile à combustible (A)
<b><math>I_0</math>:</b>	Courant des échanges électrode-électrolyte (A)
<b><math>R_g</math>:</b>	Constante des gaz parfait
<b><math>P_{H2}</math>:</b>	Pression partielle de l'hydrogène (bar)
<b><math>P_{O2}</math>:</b>	Pression partielle de l'oxygène (bar)
<b><math>P_{H2O}</math>:</b>	Pression partielle de l'eau (bar)
<b>P A C:</b>	Pile à combustible
<b>PEM:</b>	Proton Exchange Membrane
<b>AFC:</b>	pile alcaline
<b>PEMFC:</b>	pile à membrane échangeuse de protons
<b>PAFC:</b>	pile à acide phosphorique
<b>SOFC:</b>	pile à oxydes solides
<b>MCFC:</b>	pile à carbonates fondus
<b><math>V_{ohm}</math>:</b>	Tension ohmique de la pile combustible (V)
<b><math>V_{act}</math>:</b>	Tension d'activation de la pile combustible (V)
<b>AC:</b>	Alternative courant
<b>VSI:</b>	voltage source inverter
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsion
<b>a:</b>	Rapport cyclique
<b>T:</b>	Période (s)
<b>MCC:</b>	Mode de conduction continu
<b>MCD:</b>	Mode de conduction discontinu
<b><math>\Delta I</math>:</b>	Ondulation du courant (A)
<b><math>V_e</math>:</b>	Tension d'entrée de l'hacheur
<b><math>V_s</math>:</b>	Tension de sortie de l'hacheur
<b>L:</b>	Inductance (H)
<b>f:</b>	Fréquence de commutation (HZ)
<b>R:</b>	Resistance ( $\Omega$ )
<b>C:</b>	Capacité (F)

Introduction générale	1
-----------------------	---

## **Chapitre I**

### **La pile combustible PMFC**

I.1. Introduction	2
I.2. Historique à piles à combustible	2
I.3 Application des piles à combustibles	4
I.3.1 Applications dans les portables	4
I.3.2 Applications stationnaires	5
I.3.3 Applications embarquées	6
I.3.4 Véhicules légers	6
I.3.5 Véhicules lourds	7
I.4 Différentes technologies	7
I.5 Pile à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	8
I.5.1 Principe de fonctionnement d'une Piles à combustible	9
I.5.2 Modèle de pile combustible PEMFC	10
I.5.2.1. les modèles locaux	10
I.5.2.2. les modèles globaux	10
I.5.3 Modélisation de la P.A.C de type PEM	11
I.5.3.1 La tension d'activation	11
I.5.3.2 La tension ohmique ou pertes ohmiques	11
I.5.3.3 La tension d'Ernest	12
I.5.4 Caractéristiques de la P.A.C	12
I.6 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEMFC	13
I.6.1 Avantages des piles à combustible de type PEMFC	13
I.6.2 Inconvénients des piles à combustible de type PEMFC	13
I.7 Conclusion	14

## **Chapitre II**

### **Etude du convertisseur continu- continu «boost»**

II.1 Introduction	15
II.2 convertisseur continu-continu (boost)	15
II.2.1 Hypothèses simplificatrices	16
II.3 Etude du fonctionnement	16

II.3.1 Etude du mode conduction continue	17
II.3.2 Ondulation de la tension $V_s$	20
II.3.2.1 l'organigramme des tensions et des courants	21
II.3.2.2 Limite de fonctionnement en conduction continue	21
II.4 Etude de la conduction discontinue	21
II.4.1 Phase 1	22
II.4.2 Phase 2	22
II.4.3 L'organigramme des tensions et des courant	24
II.5 Etude théorique en conduction critique	24
II.5.1 L'organigramme des tensions et des courant	25
II.5.2 Ondulation du courant dans l'inductance en fonction de $\alpha$	27
II.6 Commande de le hacheur élévateur en boucle fermé	28
II.6.1 Commande à hystérésis	28
II.6.2 Commande par mode glissant	28
II.6.2.1 principe du contrôleur à mode glissant	28
II.6.2.2 Bases théoriques de la commande par mode glissant	29
II.6.2.3 Détermination de loi de commande	29
II.8 Conclusion	31

## **Chapitre III**

### **Généralité sur le convertisseur monophasé DC/AC**

III.1 Introduction	32
III.2 Les onduleurs	32
III.2.1 Les onduleurs autonomes	32
III.2.1.1 Les onduleurs à fréquence variable :	32
III.2.1.2 Les onduleurs à fréquence fixe	32
III.2.2 les onduleurs non autonomes	32
III.3 Etude des onduleurs	33
III.3.1 Onduleurs monophasé de tension	33
III.3.1.1 Onduleur monophasé on demi pont	33
III.3.1.2 Onduleur de tension en pont	34

III.4 Technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI)	35
III.4.1 Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale	37
III.4.2 Technique MLI bipolaire	37
III.4.3 Technique MLI unipolaire	38
III.5 filtre passe-bas	39
III.6 Conclusion	41

## **Chapitre IV**

### **Association à la pile combustible avec les convertisseurs**

IV.1 Introduction	42
IV.2.1 Hacheur élévateur fonctionne en boucle ouverte	42
IV.2.2 Hacheur élévateur commandé par la commande à hystérésis	44
IV.2.3 Hacheur élévateur commandé par la commande par mode glissant	45
IV.3.1 La pile combustible associée à un hacheur élévateur fonctionne en boucle ouverte	46
IV.3.2 La pile associée à un hacheur commandé par la commande par mode glissant	47
IV.4 L'onduleur mon phase	50
IV.5 Association de la pile combustible PEMFC- hacheur- onduleur	51
IV.6 Conclusion	57
Conclusion générale	58

# Introduction Générale

---

## Introduction Générale

La pile à combustible (PAC), quant à elle, est une technologie maintenant maîtrisée qui permet de convertir efficacement le combustible hydrogène en énergie électrique et thermique. Elle est intéressante non seulement par son rendement plus élevé par rapport à des conversions thermiques traditionnelles (moteur, turbine) mais encore par son faible impact environnemental. Sa diversité technologique (température de fonctionnement, nature de l'électrolyte) facilite ses applications.. Nous pouvons distinguer trois grands domaines d'applications : portable, stationnaire et transport. Ceci a attiré la participation de nombreux acteurs dans le monde entier [1].

Malgré les caractéristiques énergétiques et environnementales intéressantes ainsi que la diversité de technologie, la PAC, comme les autres sources d'énergie non conventionnelles, n'est pas une bonne source électrique. En effet, ses caractéristiques électriques, en général, ne répondent pas aux besoins de l'utilisateur. L'extension de son utilisation dépend par conséquent fortement de la qualité de l'interface électronique de puissance. Il existe de nombreuses topologies d'interfaçage de puissance qui peuvent être choisies pour répondre aux exigences demandées par la charge

Le choix de la topologie dépend du coût, de la performance désirée et de l'application du système. La topologie choisie dans cette étude est constituée d'une PEMFC (6 KW, 45V), un hacheur élévateur, un onduleur MLI monophasé et un filtre de sortie.

Ce mémoire est structuré en une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré aux piles à combustible, spécialement la pile PEMFC, une modélisation de la pile, basé sur le modèle de la bibliothèque du Simulink.

Dans Le deuxième chapitre, nous présentons les différents modes de fonctionnement du hacheur élévateur et les techniques de commande.

Le troisième chapitre contiendra l'onduleur monophasé avec le filtre de sortie.

Le quatrième et dernier chapitre expose le schéma en Simulink de l'alimentation proposée et les différents résultats obtenus. Enfin on termine par une conclusion générale.

# Introduction Générale

---

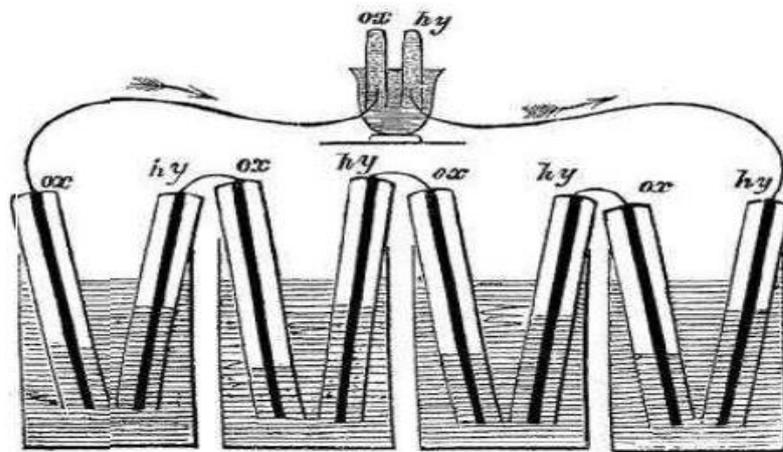


## I.1 Introduction

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement obligé des ressources fossiles attendues vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers une source, ou méthode de production d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Pour cela, entreprises, centres de recherche et universités s'orientent actuellement vers des solutions autour des piles à combustible et ceci dans différents secteurs (électronique, téléphones portables, véhicules, avionique, production stationnaire d'électricité, chauffage...) et investissent dans le développement de cette technologie qui présente un faible taux d'émission de gaz polluant..[2]

## I.2 Historique à piles à combustible

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 150 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (Fig.I.1), rebaptisée plus tard pile à combustible.



*Fig.I.1* L'expérience de Sir William Grove [3].

La découverte de W. Grove ne fut cependant pas exploitée et fut reléguée au rang de curiosité scientifique, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor. En 1932, le docteur Francis Bacon reprend les recherches initiées par W. Grove et parvient à réaliser une pile à combustible de 5kW en 1959.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux.

La pile à combustible apparut comme un système idéal du fait de la présence d'oxygène et d'hydrogène disponible dans les systèmes de propulsion. Des piles à combustible furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964 et l'eau produite par la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène était consommée par les astronautes.

La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire les coûts de fabrication des systèmes pile à combustible, pour augmenter leur fiabilité et pour améliorer leur compacité.

En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz. L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol. Depuis les années 1990, les piles à combustibles et l'hydrogène sont considérés comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires. Parmi les différents types de pile à combustible, la Pile de type PEM « Proton Exchange Membrane », également appelée PEMFC [« Polymère Electrolyte Fuel Cell »], est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile [2].

❖ Densité de puissance :

La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

❖ Température de fonctionnement :

La pile de type PEM a une température de fonctionnement comprise entre 50°C et 80°C, ce qui est adapté à un usage automobile.

### ❖ Organisation solide

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement appliqué [4,5].

Aujourd'hui et après le développement quotidien et la technologie moderne, la pile combustible devient développée plus qu'un temps passé et la figure I.3 donne un aperçu sur la pile combustible et leur développement.



*Fig.I.2* Pile à combustible 75 kW des voitures et des UTC pour auto bus [6]

### **I.3 Applications des piles à combustibles:**

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées.

#### **I.3.1 Applications dans les portables :**

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 qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol [2]



**Fig.I.3** Utilisation de la Pile à combustibles pour charger les portables [6]

### I.3.2 Applications stationnaires :

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels.

La vitalité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 000W).

Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude).

Ils sont alimentés par des combustibles classiques :

Un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène.

Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible [2].

### I.3.3 Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 1990. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000hde fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [2,5].

### I.3.4 Véhicules légers

Tous les constructeurs américains, japonais ou européens ont déjà sorti des prototypes et prévoient des préséries dont l'échéance a tendance à reculer d'une année tous les ans. Les constructeurs vendront probablement à perte pour ouvrir le marché et acquérir de l'expérience.

A perspectives de 2030, ce sera le marché mondial qui sera conçu avec une production annuelle pourrait arriver 10 à 20 % du marché. La technologie utilisée dans ces applications de type principalement PEMFC, même si quelques expériences utilisant l'AFC ou la PAFC. Le coût objectif de cette filière est d'environ 130 €/kW pour ensemble de la chaîne de traction dont un tiers pour la pile seule [2,5].

Les voitures est chargé par la hydrogène deux c-t-d  $H_2$  comme suivant figure I.4



**Fig.I.4** Utilisations les piles à combustibles pour les voitures [6]

### I.3.5 Véhicules lourds

Plusieurs modèles des autobus construits à partir de 1993. Société canadienne Ballard Power Systems a fait office de pionnier avec 6 autobus (pile PEM), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago. La compagnie allemande Daimler-Chrysler, sur la base de la même technologie que Ballard a annoncé le lancement d'une présérie de 30 bus, en vue d'une mise en service dans plusieurs villes européennes. Compte tenu de l'espérance de vie pour ce type de véhicule, Les systèmes avancés abordé les systèmes fixes. A côté de ces applications routières, certains constructeurs pensent à un tramway propre et sans caténaire, En utilisant une pile à combustible.

Enfin, il est à noter l'intérêt croissant de la construction navale pour SOFC, au niveau du MW ou plus, essentiellement comme source d'appoint ou de secours [2].

Par la suite, il y a quelques photos de bus et camionne au Canada ; allemande et U.S. American à Chicago; utilisant la pile combustible.



*Fig.1.5*Utilisations les piles combustibles pour les véhicules lourds [6]

### I.4 Différentes technologies

Il existe plusieurs technologies de pile à combustible, se caractérisant par la nature de l'électrolyte, la température de fonctionnement, les gaz consommés... Le Tableau (I-1) décrit les cinq grandes catégories qui sont :

- ❖ AFC (pile alcaline)
- ❖ PEMFC (pile à membrane échangeuse de protons)
- ❖ PAFC (pile à acide phosphorique)
- ❖ SOFC (pile à oxydes solides)
- ❖ MCFC (pile à carbonates fondus)

Type	AFC	PEMFC	PAFC	SOFC	MCFC	
Carburant	Hydrogène, gaz naturel, méthanol, bio gaz...					
Comburant	Oxygène (généralement oxygène de l'air)					
Electrolyte	KOH	Nafion	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Céramique	Sels fondus, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	
Electrodes	Pt, Ag	Pt	Pt	Ni, céramique	Ni	
Température	80°C	80°C	200°C	1000°C	650°C	
Reactions	Anode	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$
	Cathode	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Puissance	100 mW/cm <sup>2</sup>	350 mW/cm <sup>2</sup>	300 mW/cm <sup>2</sup>	500 mW/cm <sup>2</sup>	300 mW/cm <sup>2</sup>	
Applications	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Spatiale.</li> <li>➤ Militaire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cogénération.</li> <li>➤ Téléphone portable.</li> <li>➤ Sous-marin.</li> <li>➤ Automobile.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cogénération.</li> <li>➤ Bus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Cogénération.</li> <li>➤ Production d'électricité décentralisée.</li> </ul>		
Points faibles	Sensibilité au CO <sub>2</sub> .	Membrane et catalyseur onéreux. Empoisonnement par le CO.	Catalyseur onéreux. Empoisonnement par le CO.	Etanchéité.	Etanchéité. Corrosion.	

**Tableau I.1** Description des cinq grandes catégories de piles à combustible [3]

### I.5 Pile à combustible de type PEM (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

La pile à combustible de type PEM il est aujourd'hui la forme la plus promettant de piles à combustible dans de nombreuses applications, et a été employé dans majorité des modèles qui ont été construites.

Dans cette étude, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible.

Stack structure de piles à combustible PEMFC affiche dans la figure I.3. Se déplaçant dans la direction de  $x$ , les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane [7]

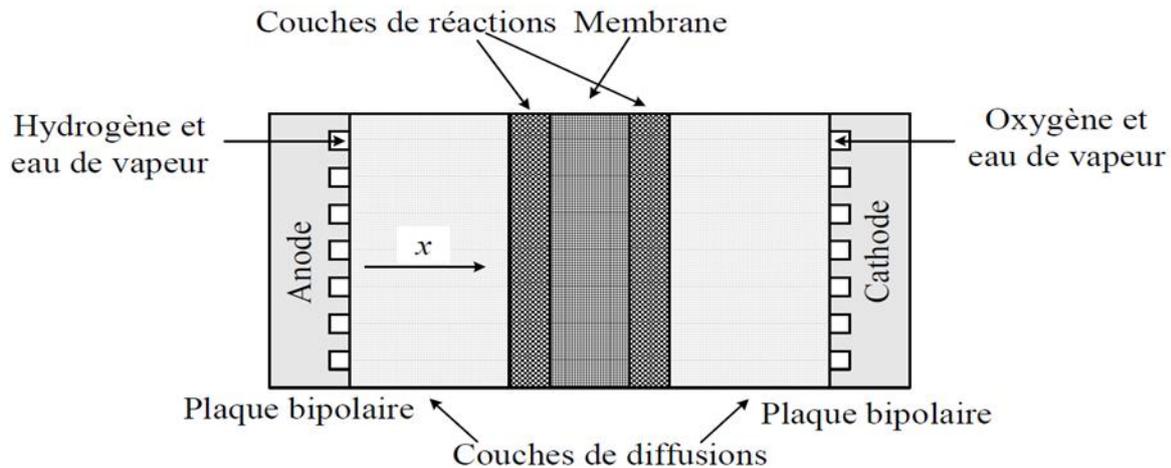


Fig. 1.6 : Différentes couches d'une cellule élémentaire de PEMFC [8]

### I.5.1 Principe de fonctionnement d'une Piles à combustible

Une pile à combustible produit de l'énergie électrique provenant de la formation de l'eau par recombinaison d'hydrogène et d'oxygène (Figure 1-8). Elle est composée de cellules électrochimiques, constituées de 2 électrodes où se déroulent les réactions électrochimiques, d'un électrolyte assurant le transfert des ions et d'une membrane séparant la partie cathodique de la partie anodique de la cellule [8]

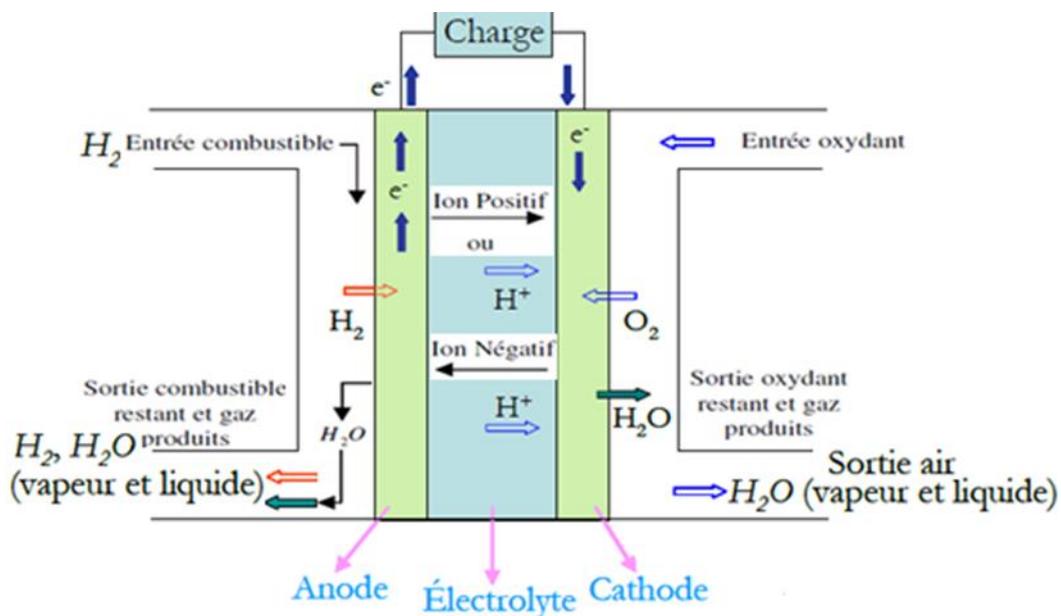
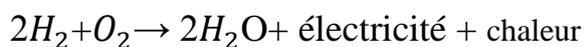


Fig. 1.7 Schéma de principe d'une cellule PEMFC [6]

Les résultats des deux demi-réactions d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène Correspondent à la combustion de l'hydrogène :



I.1

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



De couverture Soyez séparées (20-200 micromètres) qui canal les protons de l'anode à la cathode et qui est imperméable aux électrons. Cet écoulement de protons entraîne des molécules d'eau alors que remontée de l'humidité conduit à des la diffusion d'eau dans l'humidité locale de la membrane. Les molécules d'eau peuvent donc aller dans les deux vies à l'intérieur de la membrane selon le côté où les gaz sont humidifiés et selon la densité de courant qui est directement liée aux protons qui traversent la membrane et à l'eau produite du côté de la cathode. Les électrons, qui apparaissent du côté de l'anode, ne peuvent pas traverser la membrane et sont employés dans le circuit électrique externe avant leur retour à la cathode [8].

### **I.5.2 Modèle de pile PEM**

Dans la littérature, de nombreux modèles de piles à combustible ont été établis. Ces modèles se déclinent en deux grandes familles [9]

#### **I.5.2.1 les modèles locaux**

Ces modèles sont destinés à étudier la piles proprement dite, ils sont plus ou moins complexes, on les a développés afin de prédire et améliorer les performances de la pile selon les conditions opératoires et/ou en fonction de la structure de la pile (forme et taille des canaux, type de membrane....) [9]. Selon à quoi l'on destine le modèle, la granularité diffère, on peut citer par exemple le cas des modèles qui mettent l'accent sur la membrane, sur la réparation de densité de courant ou sur les canaux de distribution de gaz. [9]

#### **I.5.2.2 les modèles globaux**

Ces modèles sont généralement orientés à l'étude des systèmes pile à combustible.

Parmi ces modèles, dans la littérature, on peut citer à titre d'exemple ceux qui utilisent l'approche énergétique par représentation macroscopique énergétique (REM) ou ceux qui mettent en évidence une variété de circuits équivalents de la pile. C'est ce dernier exemple que nous adopterons pour notre étude [9]

### I.5.3 Modélisation de la P..A.C de type PEM

Le modèle qui sera utilisé dans notre travail sera celui de la bibliothèque Sim Power Systems de MATLAB/Simulink dont le bloc.

Ce modèle a été validé et utilisé dans de nombreux travaux. Sa boîte de dialogue nous permet d'accéder au choix, au modèle simplifié ou détaillé. Le premier opère dans les conditions nominales de température et de pression. Pour le second, la température, la pression et le débit des gaz sont variables. Notons aussi que le type de la P.A.C est choisi via la même boîte de dialogue.

Dans notre travail, on utilisera le modèle simplifié développé par Njoya Motapon Souleman. [09] qui a souligné que la tension d'une cellule exprimée par l'équation I.4 est déduite par la combinaison de trois éléments [9].

$$V_{fc} = E - V_{ohm} - V_{act} \quad I.4$$

Notons que pour une pile à N cellules en série, la tension est donnée par :

$$V_{FC} = N \times V_{fc} \quad I.5$$

On peut définir les trois éléments de l'équation I.4 comme suit :

#### I.5.3.1 La tension d'activation

Dite aussi pertes d'activation, elle est exprimée par l'équation de Tafel équation I.6. Elle est due aux réactions chimiques à l'anode et la cathode [9]

$$V_{act} = A \times \ln\left(\frac{I_{fc}}{i_o}\right) \quad I.6$$

Dans cette équation nous avons :

La pente de la droite de Tafel.

$$A = \frac{R_g T}{\theta_{SF}}$$

$i_{fc}$  C'est le courant délivré par une cellule de la pile.

Le courant qui caractérise à vide les échanges électrode-électrolyte.

$$i_o = \frac{sFK(P_{H_2} + P_{O_2})}{R_g h} e^{\frac{\Delta G}{R_g T}}$$

#### I.5.3.2 La tension ohmique ou pertes ohmiques

Elle est donnée par l'égalité suivante:

$$V_{ohm} = r \times i_{fc} \quad I.7$$

Ces pertes sont dues à la résistance des électrodes et de l'électrolyte respectivement pendant le déplacement des électrons et au passage des protons [4]

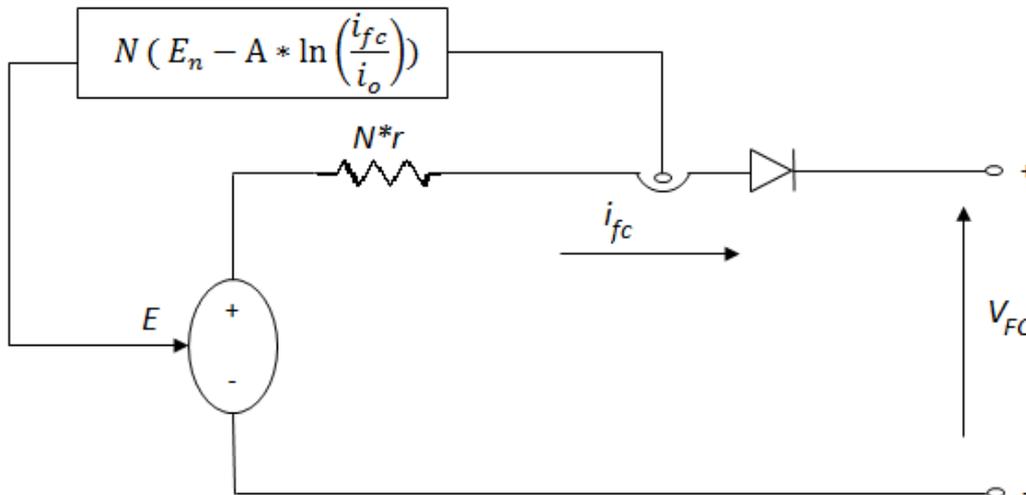
**I.5.3.3 La tension d'Ernest**

Elle reflète la tension à vide produite par l'effet thermodynamique de la cellule est écrite comme le montre l'équation (I.8)

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + \frac{(T - 298) * -44.43}{S * F} + \frac{(R_g * T)}{S * F} \ln \left( P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) & T \leq 100^\circ C \\ 1.229 + \frac{(T - 298) * -44.43}{SF} + \frac{(R_g * T)}{SF} \ln \left( \left( P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) / P_{H_2O} \right) & T > 100^\circ C \end{cases} \quad I.8$$

Les équations précédentes sont en fonction des plusieurs paramètres et constantes qui ont été présentés dans la liste des symboles.

A partir des équations I.4, I.5 et I.6, on peut établir, le schéma équivalent du modèle réduit de la pile à combustible, figure I.8. Les paramètres :  $E_n$ ,  $A$ ,  $N$ ,  $i_o$  et  $r$  sont constante [9]



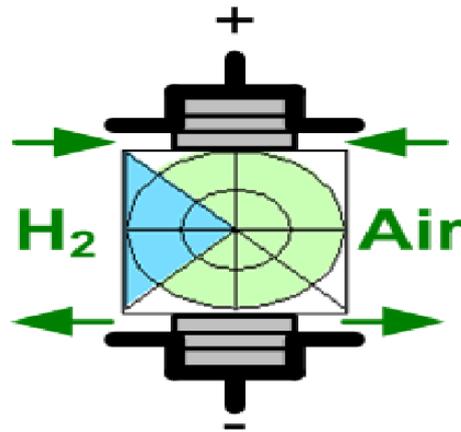
**Fig.I.8** schéma équivalent du modèle réduit de la P.A.C.

Ce modèle fonction dans les conditions nominales de température et de pression (298°K et 1bar) et avec un ensemble de contraintes dont la principale est la pureté des gaz.

La diode protège la pile d'éventuel retour de courant (courant négatif) [9]

**I.5.4 Caractéristiques de la P.A.C**

Les deux caractéristiques Courant-Tension et Courant-Puissance s'obtiennent via la boite de dialogue du bloc de la P.A.C de simpowers. La figure I.9, à titre d'exemple présente les caractéristiques d'une pile de type PEM de puissance nominale 6KW. Dès ces caractéristiques on peut localiser le point nominal de fonctionnement (133.3A, 45V) [4].



*Fig.I.9* Bloc de pile à combustible de MATLAB [10]

## I.6 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEMFC [11]

### I.6.1 Avantages des piles à combustible de type PEMFC

Les avantages généralement cités sont :

Un rendement de conversion important : grâce à la conversion de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes 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 .

Un générateur propre : les piles à combustible ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs ( $CO_2$ ,  $NO_x$ ) au niveau du cœur de pile.

Un système modulable : les piles à combustible sont modulables dans le sens où la taille d'une pile à combustibles peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.

Un système relativement silencieux ; comme elle ne comporte pas la partie mobile au niveau du cœur, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores importantes. De ce fait, les piles à combustible peuvent être placées à proximité de quartiers résidentiels.

### I.6.2 Inconvénients des piles à combustible de type PEMFC

Elles présentent aussi quelques inconvénients :

Un fonctionnement à basse température imposé par la membrane actuellement utilisée. Il s'ensuit la nécessité d'utiliser d'une part comme catalyseur de platine et d'autre part d'alimenter le cœur de la pile par de l'hydrogène par ce qui nécessite soit l'utilisation de bouteille soit un mode de reformage performant.

Une technologie qui est encore au stade artisanal ce qui induit des coûts de fabrications élevés. Bien que la structure du cœur de pile soit assez simple.

Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

## **I.7 conclusion**

Le premier chapitre a été consacré sur l'étude de la pile combustible telle que l'utilisation et l'application de la pile combustible comme le portable les véhicules, les applications stationnaires et embarqués..., après on vu les différents types de la pile combustible ainsi que leur modélisation et le chapitre ont été finalisé par les caractéristiques de la pile combustible.

## II.1 Introduction

Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible. Une seule cellule produit environ une tension de 1v. Afin d'augmenter cette tension à la sortie de la pile, plusieurs cellules sont empilées. Le Fc stack a une durée de vie et une fiabilité réduite et dépend de la cellule la plus faible.

Afin de maintenir la fiabilité et la durée de vie à une limite raisonnable, la tension de sortie de l'empilement de piles à combustible est limitée à environ 100 V. Pour beaucoup d'applications, cette tension est insuffisante. On est alors amené à placer un convertisseur DC/DC entre la pile et la charge électrique dont le rôle est d'élever la tension délivrée par la pile. Cet étage de conversion est, en outre, indispensable en raison de la variation de la tension délivrée en fonction de la charge qui peut atteindre au moins 20 % de la tension nominale.

## II.2 Convertisseur continu-continu survolteur «boost»

Le hacheur survolteur dit aussi parallèle, avec ses paires: les hacheurs dévolteur et survolteur-dévolteur sont fréquemment utilisés dans les systèmes d'énergies renouvelables (piles à combustible, photovoltaïques...etc..). Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [12].

Le hacheur survolteur comme son nom l'indique, permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de plus grande valeur. Il va, de ce fait, dans notre application, élever la tension générée par la pile au niveau de la tension désirée du bus continu. Le schéma électrique du hacheur élévateur présenté sur la figure II.1.

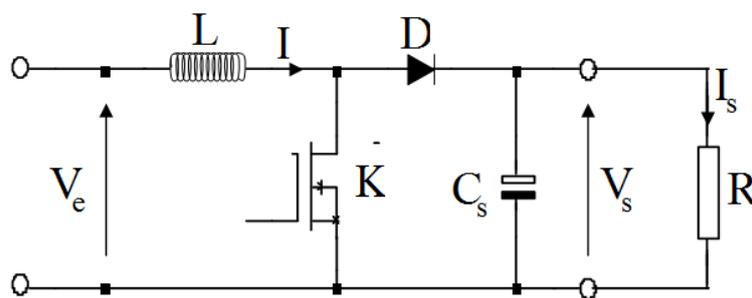


Fig.II.1 Schéma électrique d'un hacheur élévateur [12]

L'interrupteur K fonctionnant en commutation, lorsque K est passant, le courant de l'inductance I augmente linéairement et une énergie E est stockée dans L. La diode D est bloquée. Puis, au blocage du transistor, l'inductance se décharge linéairement dans le

condensateur et la charge R (supposée résistive) à travers la diode. Cette décharge n'est possible que si ( $V_s > V_e$ ).

La tension de sortie  $V_s$  est quasiment continue. Sa valeur dépend de  $V_e$  et du rapport cyclique

#### ✓ Le rapport cyclique $\alpha$

Le rapport cyclique est défini comme le temps  $t$  pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T, soit :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T}$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé par :

$$t_{off} = T - t_{on}$$

Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur

### II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Comme lors de l'étude des structures du convertisseur continu – continu.

Nous supposons dans cette étude théorique, les hypothèses suivantes :

- 1-tension de sortie continue (ondulation résiduelle négligeable).
- 2-tension d'alimentation à l'entrée continue et constante.
- 3-intercepteurs (semi-conducteurs) idéaux (état ON :  $V_K = 0$  ; état OFF :  $i_K = 0$ ).
- 4-puissance délivrée à la sortie égale à la puissance fournie à l'entrée (pertes négligeables).
- 5- Le régime sera supposé établi
- 6- La capacité du condensateur de sortie sera supposée suffisamment grande pour que la tension à ses bornes puisse être considérée comme constante au cours de la période

### II.3 Etude du fonctionnement :

Comme tous Les convertisseurs continu-continu, Le hacheur survolteur peut avoir deux modes de fonctionnement, mode de conduction continu (**MCC**) et mode de conduction discontinu (**MCD**) chaque mode de conduction est déterminé par des séquences de fonctionnement.

- **Mode de conduction continu** : dans ce mode, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement et donc le courant ne s'annule jamais.
- **Mode de conduction discontinu** : dans ce mode, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement et donc le courant s'annule un laps de temps.

II.3.1-Etude du mode de conduction continue

a) Phase actif ( $0 < t < \alpha T$ )

Dans ce mode de fonctionnement, le courant dans l'inductance ne s'annule jamais.

A  $t=0$ , on ferme l'interrupteur K, la diode D est bloquée. Le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie  $W_L$  est stockée dans la bobine. Le condensateur C fournit de l'énergie à la charge. On obtient alors le schéma équivalent de la figure II.1.

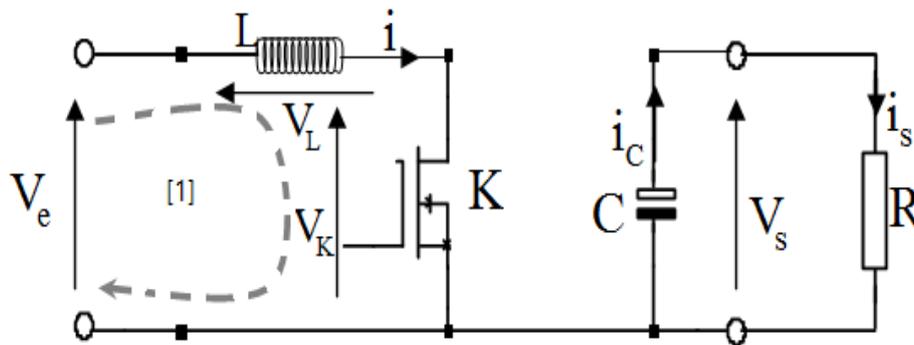


Fig.II.2 Séquence actif.

Dans cette phase, la variation du courant dans l'inductance est donnée par l'équation de la maille suivante:

$$V_e = V_K + V_L \tag{II.1}$$

Avec  $V_K = 0$

Et

$$V_e = L \frac{di}{dt} \tag{II.2}$$

$$\int_0^t di = \int_0^t \frac{V_e}{L} dt \tag{II.3}$$

$$i(t) - i(0) = \frac{V_e}{L} t \tag{II.4}$$

Nous avons :  $i(0) = I_m$

Avec  $I_m$ : courant minimale

En remplaçant  $i(0)$  par sa valeur on aura

$$i(t) = \frac{V_e}{L} t + I_m \tag{II.5}$$

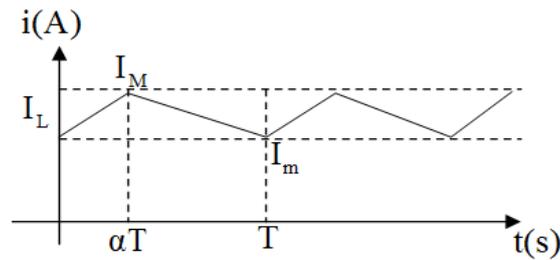


Fig.II.3 courant de l'inductance

Pour :  $t = \alpha T$

$$I_M = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_m \tag{II.6}$$

**b) Phase 2 ( $\alpha T < t < T$ )**

Lorsque l'interrupteur K est ouvert et la diode est passante. Dans cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restitué au condensateur et à la charge R. Lors de cette phase, le fait que l'inductance soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

A l'instant  $t = \alpha T$ , on ouvre l'interrupteur K pendant la durée  $(1-\alpha)*T$ . La diode D devient conductrice ce qui donne le circuit équivalent de la figure II.3.

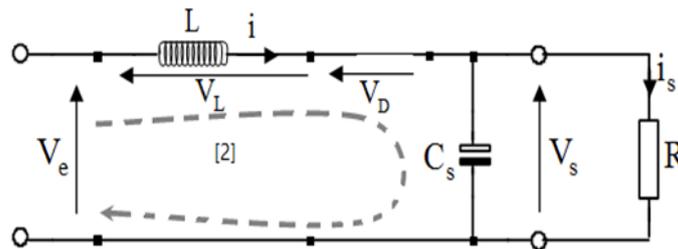


Fig.II.4 fonctionnement pendant ( $\alpha T < t < T$ )

Pendant l'état bloqué, la tension aux bornes de l'interrupteur est égale à la tension de sortie (on considère que la diode n'engendre pas de chute de tension) :

D'après la maille (2) :

$$V_e - V_L - V_D - V_s = 0 \tag{II.7}$$

Avec  $V_D = 0$

$$V_L = V_e - V_s \tag{II.8}$$

$$\Rightarrow L \frac{di}{dt} = V_e - V_s \tag{II.9}$$

$$\int_{\alpha T}^t di = \frac{V_e - V_s}{L} \int_{\alpha T}^t dt \tag{II.10}$$

$$i(t) - i(\alpha t) = \frac{V_e - V_s}{L}(t - \alpha t) \quad \text{II. 11}$$

$$i(t) = \frac{V_e - V_s}{L}(t - \alpha t) + I_M \quad \text{II. 12}$$

Pour :  $t = T$

$$i(T) = \frac{V_e - V_s}{L}(T - \alpha T) + I_M \quad \text{II. 13}$$

Pour  $i(T) = I_m$

$$\Rightarrow I_m = \frac{V_e - V_s}{L}(1 - \alpha)T + I_M \quad \text{II. 14}$$

Soit  $\Delta I$  l'ondulation du courant dans l'inductance :  $\Delta I = I_M - I_m$  De l'équation (II.14) on tire:

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_e}{L}\alpha T \quad \text{II. 15}$$

Et de l'équation (II.14) :

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_s - V_e}{L}(1 - \alpha)T$$

En combinant ces deux relations de  $\Delta I$ , on peut établir l'expression de la tension de sortie:

$$\begin{cases} \Delta I = I_M - I_m = \frac{V_e}{L}\alpha T & \text{II. 15} \\ \Delta I = I_M - I_m = \frac{V_s - V_e}{L}(1 - \alpha)T & \text{II. 16} \end{cases}$$

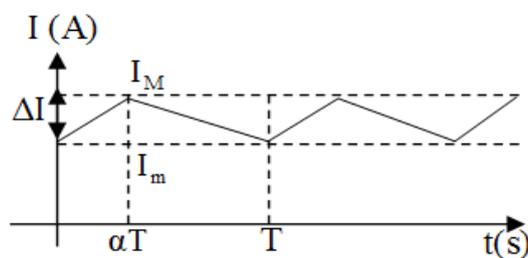


Fig.II.5 l'ondulation du courant dans l'inductance

$$\frac{V_e}{L}\alpha T = \frac{V_s - V_e}{L}(1 - \alpha)T \quad \text{II. 17}$$

Alors la tension de sortie sera :

$$\Rightarrow V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \quad \text{II. 18}$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que la tension d'entrée et du rapport cyclique  $\alpha$ . Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours **élevateur de tension**.

On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge.

Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels.

La stratégie de régulation qui semble la plus évidente est la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à fréquence fixe et rapport cyclique  $\alpha$  variable.

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1.

C.-à-d. :

- on néglige les pertes

$$\Delta P = 0 \implies P_e = P_s$$

On peut donc écrire:

$$V_e I_e = V_s I_s \quad \text{II.19}$$

On a:

$$V_e = V_s(1 - \alpha) \quad \text{II.20}$$

$$\Rightarrow V_s(1 - \alpha)I_e = V_s I_s \quad \text{II.21}$$

$$(1 - \alpha)I_e = I_s \quad \text{II.22}$$

$$I_e = \frac{1}{(1 - \alpha)} I_s \quad \text{II.23}$$

Alors en fin obtenir que :

$$\frac{I_e}{I_s} = \frac{1}{(1 - \alpha)} \quad \text{II.24}$$

On notera que cette relation est duale à celle définissant la tension moyenne en sortie du convertisseur relation (II.18).

Si le convertisseur est élévateur de tension, il est également abaisseur de courant.

### II.3.2 Ondulation de la tension $V_s$

Les hypothèses adoptées conduisent à négliger l'ondulation de la tension  $V_s$ , considérée minime devant les grandeurs continues. Nous devons cependant définir une relation qui permette de lier cette ondulation aux paramètres du convertisseur, afin d'être en mesure de dimensionner le condensateur pour justifier notre hypothèse de travail.[13]

Pour définir l'ondulation de la tension de sortie  $V_s$ , nous nous référons au formes d'ondes de la tension et du courant du l'inductance dans figure II.6

### II.3.2.1 l'organigramme de la tension et de courant

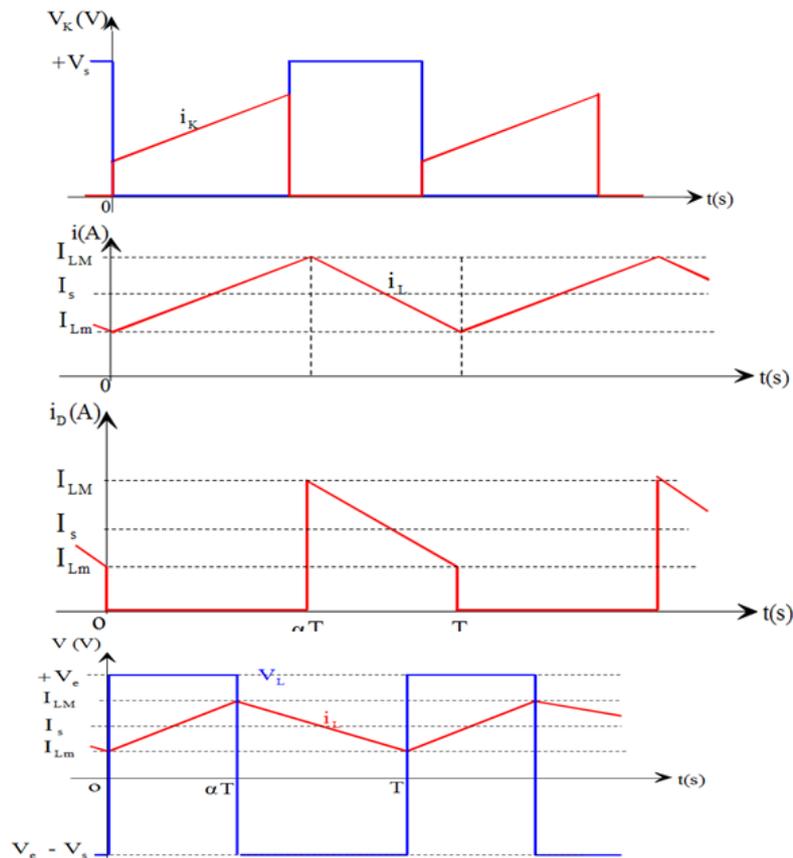


Fig.II.6 Formes d'ondes [13]

### II.3.2.2 Limite de fonctionnement en conduction continue

Lorsque le courant de sortie  $I_S$  diminue, par exemple par augmentation de la résistance  $R$ , le circuit peut passer en conduction discontinue (le courant s'annule au cours de la période). On remarque que la tension de sortie n'est plus indépendante de la charge et de la fréquence. Il est donc important de connaître la limite de fonctionnement en conduction continue.

La valeur moyenne du courant traversant la diode (donc transitant vers la charge durant la phase 2) est égale au courant de sortie  $I_S$ .

## II.4 Etude de la conduction discontinue

Dans certains cas, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment, est que l'inductance est complètement déchargée en début de chaque cycle (voir les formes d'ondes figure II.7)

**II.4.1 Phase 1 ( $0 < t < \alpha T$ )** (voir la figure II.2)

$$V_e = V_k + V_L \quad \text{II.25}$$

avec ( $V_K = 0$ )

$$\Rightarrow V_e = L \frac{di}{dt} \quad \text{II.26}$$

$$\int_0^t di = \int_0^t \frac{V_e}{L} dt \quad \text{II.27}$$

$$i(t) - i(0) = \frac{V_e}{L} t \quad \text{II.28}$$

Nous souhaitons  $i(0) = 0$

$$i(t) = \frac{V_e}{L} t \quad \text{II.29}$$

Pour :  $t = \alpha T$

$$i(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad \text{II.30}$$

$$i(\alpha T) = I_M$$

Alors qu'obtenir le courant maximum est :

$$\Rightarrow I_M = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad \text{II.31}$$

**II.4.2 Phase 2 ( $\alpha T < t < \beta T$ )** (voir la figure II.4)

$$V_e - V_L - V_D - V_s = 0 \quad \text{II.32}$$

( $V_D = 0$ )

$$\Rightarrow L \frac{di}{dt} = V_e - V_s \quad \text{II.33}$$

$$\int_{\alpha T}^t di = \frac{V_e - V_s}{L} \int_{\alpha T}^t dt \quad \text{II.34}$$

$$i(t) - i(\alpha T) = \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad \text{II.35}$$

$$\Rightarrow i(t) = \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) + I_M \quad \text{II.36}$$

Pour :  $t = \alpha T + \beta T$

$$i(\alpha T + \beta T) = 0 = \frac{V_e - V_s}{L} (\alpha T + \beta T - \alpha T) + I_M \quad \text{II.37}$$

Alors que obtenir la courant maximum de phase 1 ( $\alpha T < t < \beta T$ ) est :

$$\Rightarrow I_M = \frac{V_s - V_e}{L} \beta T \quad \text{II.38}$$

$$\frac{V_e}{L} \alpha T = \frac{(V_s - V_e)}{L} \beta T \quad \text{II. 39}$$

$$(V_s - V_e) \beta = V_e \alpha \quad \text{II. 40}$$

$$\Rightarrow \frac{(V_s - V_e)}{V_e} = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{II. 41}$$

Alors que la valeur de  $\beta$  est :

$$\beta = \frac{V_e}{V_s - V_e} \alpha \quad \text{II. 42}$$

Lorsque le courant moyen dans la charge est égal à la moitié de l'ondulation de courant dans l'inductance, on se trouve à la limite entre la conduction continue et la conduction discontinue.

$i_s + i_c = i_D$  ; En régime permanent le courant moyen du condensateur est nul :  $I_s = I_{D \text{ moy}}$

$$I_{Dis.moy} = \frac{I_M}{2} \beta = \frac{V_e}{2L} \alpha T \left( \frac{V_e}{V_s - V_e} \right) \alpha \quad \text{II. 43}$$

$$I_s = \frac{V_e^2 \alpha^2}{2Lf(V_s - V_e)} \quad \text{II. 44}$$

$$\Rightarrow V_s = V_e + \frac{\alpha^2 V_e^2}{2Lf I_s} \quad \text{II. 45}$$

On peut diviser par  $V_e$  en trouvant :

$$\frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{V_e \alpha^2}{2Lf I_s} \quad \text{II. 46}$$

$$I_s = \frac{I_M}{2} \beta = \frac{V_e \alpha}{2Lf} (1 - \alpha) \quad \text{II. 47}$$

On a :

$$(1 - \alpha) = \frac{V_e}{V_e} \Rightarrow \alpha = \frac{V_e - V_s}{V_e} \quad \text{II. 48}$$

$$I_s = \frac{V_e \alpha}{2Lf} \beta = \frac{V_e^2 \alpha^2}{2Lf} \left( \frac{1}{V_s - V_e} \right) \quad \text{II. 49}$$

II.4.3 l'organigramme de la tension et du courant

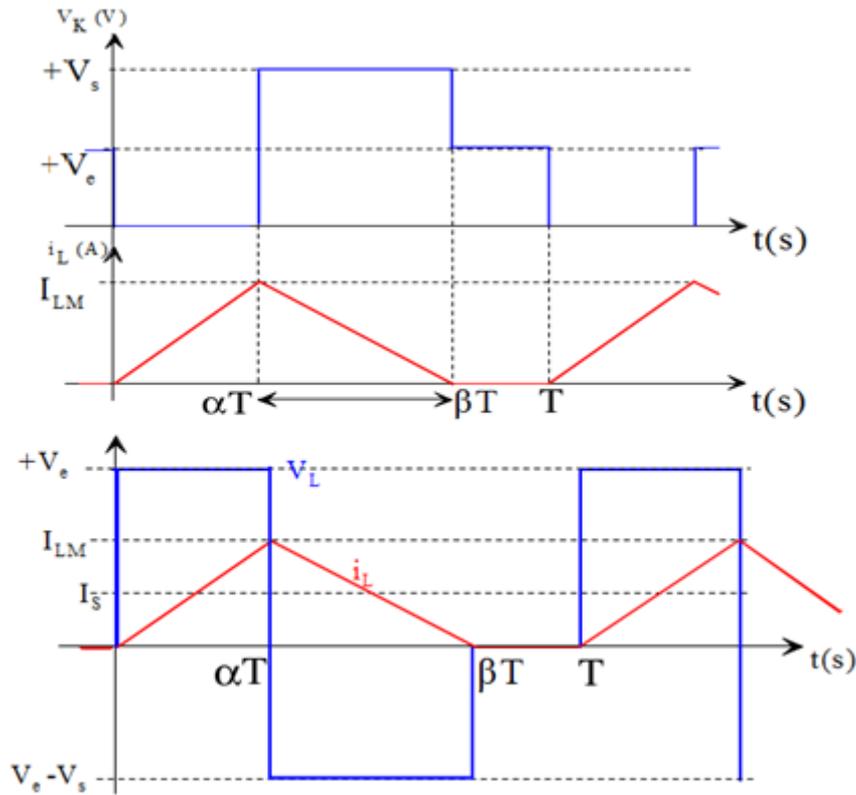


Fig.II.7 Forme du courant d'entrée en conduction discontinue [13]

- pendant  $\alpha T$  : le transistor est amorcé. La tension appliquée aux bornes de l'inductance L vaut  $V_e$ . Cette phase correspond à la croissance du courant dans L.
- pendant  $\beta T$  : le transistor est bloqué, et la diode est amorcée. La tension appliquée aux bornes de l'inductance L vaut  $(V_e - V_s)$ . Comme  $V_s > V_e$ , cette tension est négative. Cette phase correspond donc à la décroissance du courant dans L.
- pendant  $[(1 - \alpha).T - \beta T]$  : le courant s'est annulé dans l'inductance L. Il s'est donc également annulé dans la diode D. Ceci est une condition de blocage pour la diode.

Tous les interrupteurs étant bloqués, la tension  $V_L$  aux bornes de "L" est également nulle.

La relation (II.14) liant  $V_s$  et  $V_e$  n'est donc plus applicable, et doit être réévaluée

II.5 Etude théorique en conduction critique

Ce mode marque la frontière entre les régimes discontinu et continu, les relations (II.18) et(II.44) sont alors valable simultanément et il vient :

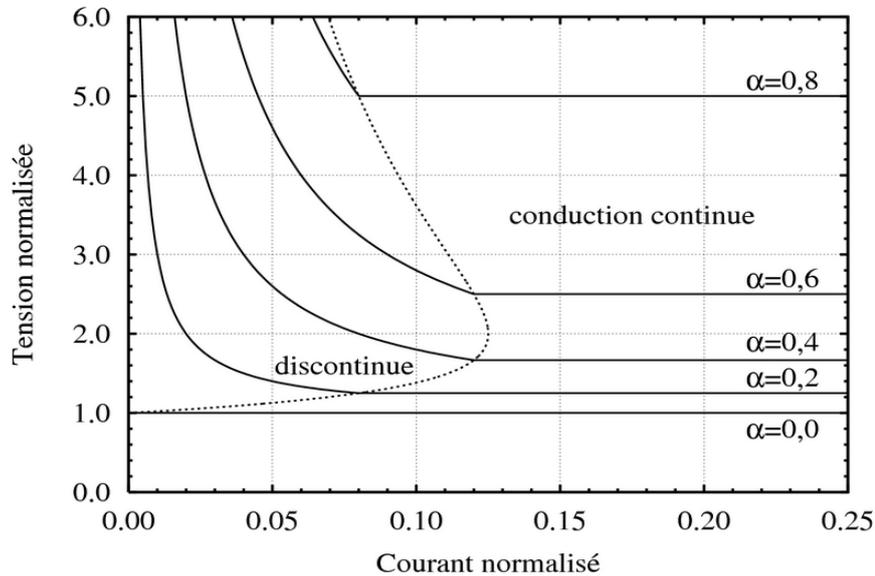
$$I_s = \frac{V_e^2}{2Lf} \frac{V_s - V_e}{V_s^2}$$

II. 50

De l'équation (II.45) on aura :

$$I_s = \frac{V_s}{2Lf} (1 - \alpha) \alpha \tag{II.51}$$

La fig.II.8 montre la différence de comportement entre conduction entere conduction contenu et discontinu est très nette .Cela peut engendrer des problèmes d'asservissement de la tension de sortie :



FigII.8 caractéristique de sortie d'un convertisseur Boost [14]

**II.5.3 l'organigramme de la tension et du courant**

L'ondulation de la tension de sortie (tension aux bornes du condensateur) peut être calculée en considérant que le courant dans la charge est constant et égal au courant moyen dans la diode  $I_D$ . Il est donc possible de tracer la forme du courant  $i_c$  circulant dans le condensateur. La forme du courant circulant dans le condensateur et de la tension à ses bornes sont illustrés à la figure II.9

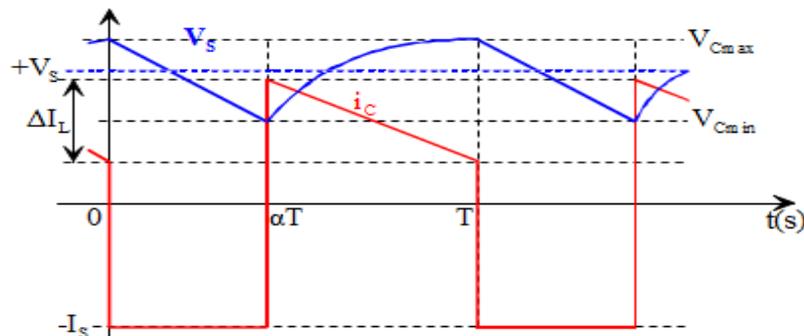


Fig.II.9 Ondulation de la tension de sortie

$$i_D = i_C + i_S = I_{Dmoy} + \partial i_D(t) \quad \text{II. 52}$$

$$i_C = -i_S$$

$$\text{et } V_{CMax} = \frac{1}{C} i(0) \quad \text{II. 53}$$

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt \quad \text{II. 54}$$

$$V_C(t) = \frac{1}{C} (i_C(t) - i_C(0)) \quad \text{II. 55}$$

$$V_C(t) = \left( V_{CMax} - \frac{1}{C} i_S t \right) \quad \text{II. 56}$$

Si :  $t = \alpha T$

$$V_C(t) = V_{Cmin}$$

$$V_{Cmin} = V_{CMax} - \frac{1}{C} i_S \alpha T \quad \text{II. 57}$$

$$\frac{1}{C} i_C \alpha T = V_{CMax} - V_{Cmin} \quad \text{II. 58}$$

On a :  $\Delta V_S = V_{CMax} - V_{Cmin}$

$$\Rightarrow \Delta V_S = \frac{1}{C} i_S \alpha T = \frac{I_S}{Cf} \cdot \alpha \quad \text{II. 59}$$

Maies il y a cet relation pour trouver la valeur de  $I_S$  comme suivant :

$$V_S = R I_S \quad \text{II. 60}$$

$$\Rightarrow I_S = \frac{V_S}{R} \quad \text{II. 61}$$

Pour obtenir la variation de tension de sorte  $\Delta V_S$  en peut remplacée l'equ II.54 à l'equ II.53:

$$\Delta V_S = \frac{V_S}{R C f} \alpha \quad \text{II. 62}$$

$$\Rightarrow \Delta V_S = \frac{V_e}{R C f} \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad \text{II. 63}$$

Ces ondulations sont bien évidemment fonction des paramètres du système, mais également du rapport cyclique  $\alpha$ . Nous représentant dans la figure. II.10, les variations de la relation  $\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)$  en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .

On pose que

$$Z = \frac{V_e}{R C f} \quad \text{II. 64}$$

Et on trouve que

$$\Delta V_s = Z \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad \text{II. 65}$$

Lorsque les paramètres  $R$ ,  $C$ ,  $f$  et  $V_e$  sont fixés, l'amplitude des ondulations de  $V_s$  est d'autant plus grande que le rapport cyclique est élevé.

Pour fixer la valeur de  $\Delta V_s$  au moyen de  $C$  en considérant la valeur maximale que peut prendre  $\alpha$ . Cela conduit cependant à « Surdimensionnement » la capacité de  $C$  si le fonctionnement du convertisseur se fait à une valeur de  $\alpha$  nettement en dessous de la valeur considérée lors du dimensionnement.

On notera cependant l'intérêt de choisir pour la fréquence de commutation  $f$  du convertisseur une valeur la plus élevée possible. Cela permet en effet de réduire d'autant la capacité du condensateur  $C$ .

### II.5.2 Ondulation du courant dans l'inductance en fonction de $\alpha$ :

Pour déterminer la valeur maximale de l'ondulation du courant dans l'inductance

$$\Delta I = \frac{V_e \alpha}{f L} \quad \text{II. 66}$$

Pour  $\alpha=1$  on trouve la valeur de l'ondulation du courant dans l'inductance d'après l'Equation II.66:

$$\Delta I_{max} = \frac{V_e}{f L} \quad \text{II. 67}$$

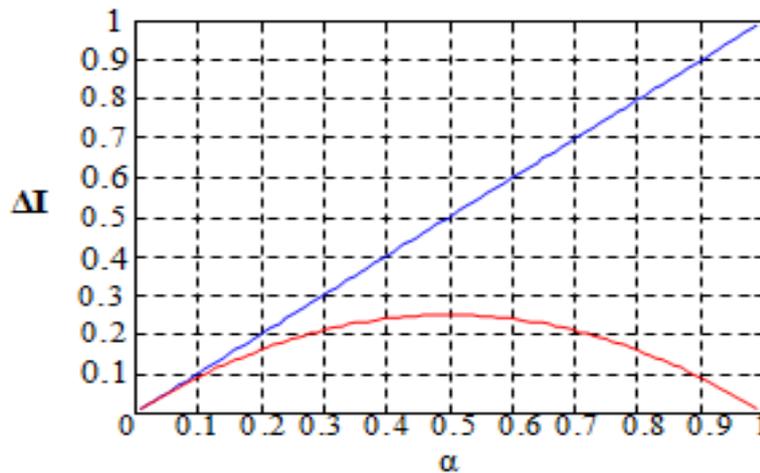


Fig.II.10 l'ondulation du courant dans l'inductance [13]

## II.6 Commande de le hacheur élévateur en boucle fermé

### II.6.1 Commande à hystérésis

Cette commande est très adaptée pour les organes ayant une action à deux positions comme c'est le cas ici, l'IGBT peut être soit ouvert soit fermé, cette commande consiste à changer la tension de sortie du Hacheur de telle sorte à maintenir le courant dans une bande centrée autour de la référence, la dimension de ce hacheur se résume à fixer la largeur de cette bande. Une règle pratique consiste à prendre la bande égale à 5% du courant nominal [15]. Cependant elle ne garantit pas d'une manière systématique le respect de la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs. La figure (II.11) montre le schéma synoptique de la commande du hacheur. Figure (II.11) : Schéma synoptique de la commande par MLI à Bande d'hystérésis.

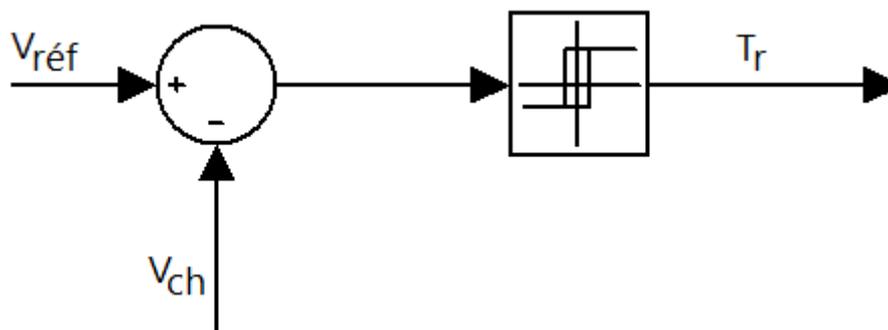


Fig.II.11 Schéma synoptique de la commande par MLI à Bande d'hystérésis

### II.6.2 Commande par mode glissant

#### II.6.2.1 principe du contrôleur à mode glissant

La commande par mode glissant est une classe de la commande à structure variable. Elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires. La tâche principale de la commande par mode glissant .la surface de commutation peut être atteinte par la trajectoire d'état grâce aux changements appropriés de la structure du système commandé.

Le but de la commande par mode glissant est que la trajectoire d'état soit attirée vers une surface de glissement défini  $S$  (Sliding Surface) et glisse autour d'elle. Une fois la surface de glissement est atteinte, la dynamique du système reste insensible à la variation des paramètres du processus, et aux perturbations externes.

Ainsi, la conception de contrôleur à mode glissant passe par deux étapes essentielle :

- ✓ déterminer le choix et le nombre des surfaces représentées par un vecteur  $S(x) = 0$ .
- ✓ déterminer la loi de commande par une nouvelle entrée discontinue  $u(x)$ , pour attirer la trajectoire d'état vers la surface.

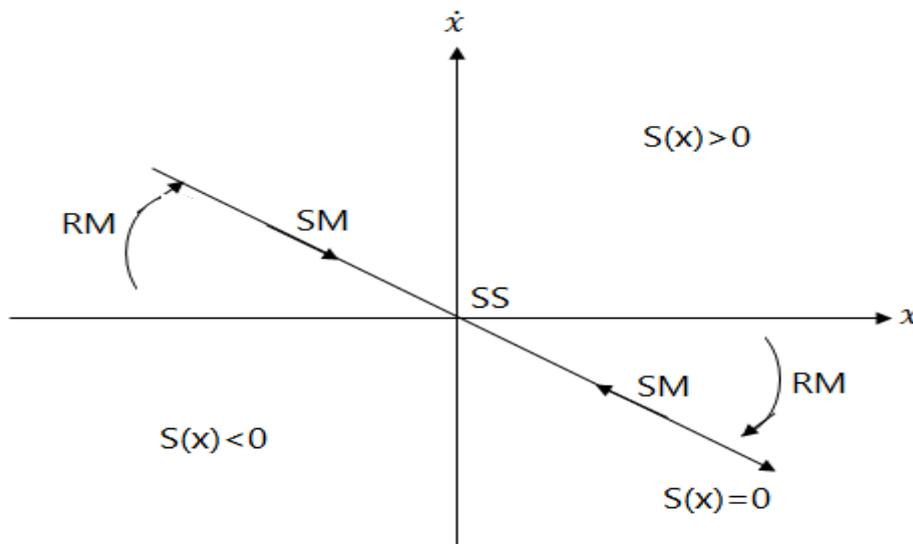
### II.6.2.2 Bases théoriques de la commande par mode glissant

Soit un système de commande continue, représenté par le système d'état

$$\dot{x} = A(x,t) + B(x,t)u \quad \text{II. 68}$$

Où :  $x \in R^m$  est le vecteur d'état du système,  $u \in R^m$  est le vecteur de commande.

Dans la commande à structure variable; la réponse d'un tel système passe en général par trois phases ou modes appelés, mode d'atteinte (Reaching Mode, RM), mode de glissement (Sliding Mode, SM), et le mode du régime permanent (steady-state mode, SS) ces modes sont illustrés dans le plan de phase sur la figure II.12 [15].



*Fig.II.12* Trajectoire d'un système de deuxième ordre à VSC [16]

### II.6.2.3 Détermination de loi de commande

Dans la théorie de VSC, il y a de différentes manières de choisir les paramètres pour définir une logique de commutation, dans la littérature il y a trois types de structures très répandues, la commande par contre-réaction linéaire à gains commutés, la commande par relais, et la commande équivalente. Les deux dernières approches, sont les préférences dans la commande des machines électriques parce qu'elles sont plus appropriées.

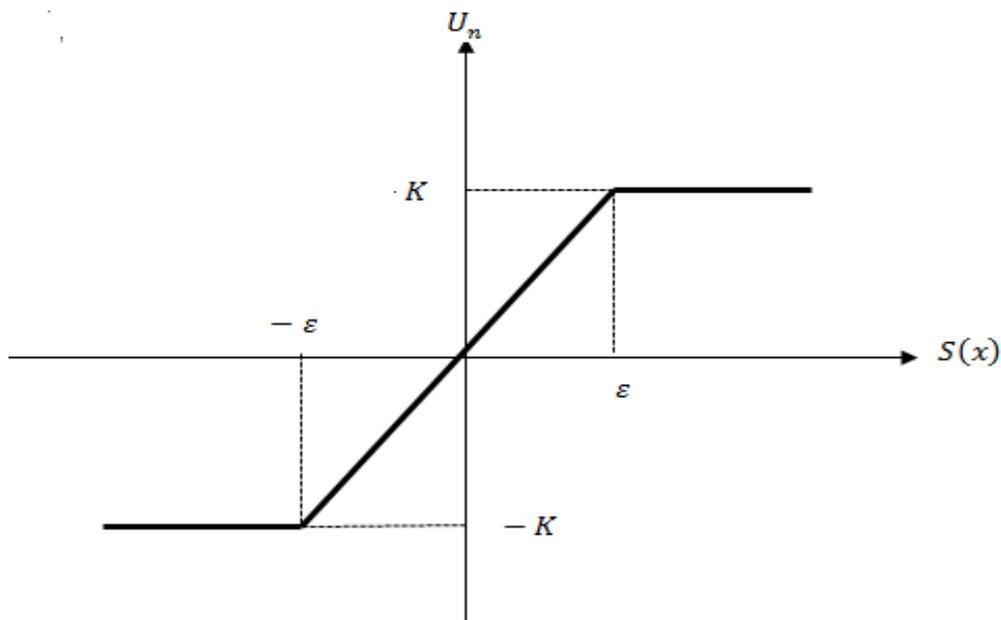
Dans notre cas la méthode choisie est celle de la commande Un adoucie (sat).

La phase de glissement correspond à celui d'un relais commutant avec une fréquence infinie. Une fréquence d'oscillation infinie suppose des éléments idéaux de commutation (relais sans seuil, ni hystérésis, ni retard de commutation), ce qui n'est pas le cas en pratique. En présence de ces imperfections la fréquence de commutation devient alors finie, et se manifeste par des oscillations autour de la surface de glissement  $S$ , ces derniers auront une amplitude d'autant plus grande et une fréquence d'autant plus basse que les imperfections sont importantes.

Ce phénomène est appelé phénomène de broutement (chattering en anglais). Pour remédier à ce problème qui peut aller jusqu'au détruire les équipements des systèmes, la fonction discontinue (sign), est remplacée par des fonctions continues, en créant une bande autour de la surface de glissement  $S$ . les équations de cette commande sont comme suivant:

$$U_n \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} S(x) & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \\ K \operatorname{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad \text{II.69}$$

Cette fonction est connue aussi par, la fonction saturation (sat)



**Fig.II.13** Commande  $U_n$  adoucie (sign) [16]

**II.7 Conclusion**

Dans le présent chapitre on a étudié le convertisseur DC/DC (hacheur) à travers les deux modes de conduction continue et discontinue chaque un avec l'organigramme (les allures) de tension et de courant correspondant ainsi que les équations de chaque mode. En effet, on vu les techniques de commande ; deux techniques sont vu, la commande par hystérésis ainsi que la commande par mode glissant.

### **III.1 Introduction**

Le convertisseur statique de puissance, est un élément très important dans ce qui concerne la conversion d'énergie. Il transforme la tension d'entrée en une tension variable selon l'application demandée

### **III.2 les onduleurs [15]**

Un onduleur est un convertisseur continu-alternatif conçu pour la transformation de l'énergie continue en énergie alternative.

De tel appareil doivent délivrer une tension à fréquence déterminée et le signal généré doit être le plus sinusoïdal possible.

Les onduleurs sont classés selon le type d'application et les performances désirées actuellement il existe deux types d'onduleurs

#### **III.2.1 Les onduleurs autonomes :**

Un onduleur pour lequel les interrupteurs qui le constitue sont commandés par des circuits auxiliaires indépendant du réseau alternatif est dit autonome.

Il impose aux bornes de la charge une tension alternative quel que soit le signe de courant dans la charge.

Les onduleurs autonomes sont utilisés dans de nombreux domaines en deux types :

##### **III.2.1.1 Les onduleurs à fréquence variable**

Ils sont alimentés par le réseau au moyen d'un redresseur, ils délivrent à la charge une tension de fréquence variable utilisée surtout pour faire fonctionner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

L'inconvénient majeur d'un tel onduleur réside dans le fait qu'il présente des pertes à vide ou à faible charge.

##### **III.2.1.2 Les onduleurs à fréquence fixe**

Ils sont alimentés le plus souvent par des accumulateurs utilisés généralement comme alimentation de secours.

#### **III.2.2 les onduleurs non autonomes**

Il est caractérisé par le fait que la fréquence et la forme d'onde (tension) de sortie sont imposées par le réseau alternatif auquel il est lié [15].

### III.3 Etude des onduleurs [17]

#### III.3.1 Onduleurs monophasé de tension:

Les onduleurs monophasé peut être trouvée on demi pont ou de pont complet. Bien que le pouvoir ils vont couvrir le bas, ils sont largement utilisés dans les centrales électriques. Fournitures, onduleurs monophasés, et actuellement à élaborer forme Haute puissance topologies de puissance statique, Principales caractéristiques des deux approches sont présentées dans la suite :

##### III.3.1.1 Onduleur monophasé on demi pont :

Figure III.1 montre là le schéma de principe d'un onduleur en demi pont (VSI : voltage source inverters en anglais) où deux gros condensateurs sont tenus de fournir une neutre point N, telle que chaque condensateur maintient une tension constante  $v_i/2$ . Parce que les harmoniques de courant injecté par l'opération de l'onduleur est d'ordre faible de harmoniques, un ensemble des grandes condensateurs ( $C_+$  et  $C_-$ ) est requise. Il est clair que les deux interrupteurs  $S_+$  et  $S_-$  et ne peuvent pas être simultanément car produites un court-circuit à travers la source de tension CC serait  $v_i$ . Il existe deux sens (états 1 et 2) et un indéfini (état 3) état de l'interrupteur comme le montre dans le tableau a.2. Dans afin la condition d'éviter le court-circuit à travers le bus et le CC ne pas identifier de tension de sortie, la technique de modulation de devrait toujours enrue à tout instant que ce soit le haut ou bas interrupteur de l'onduleur est ouvert.

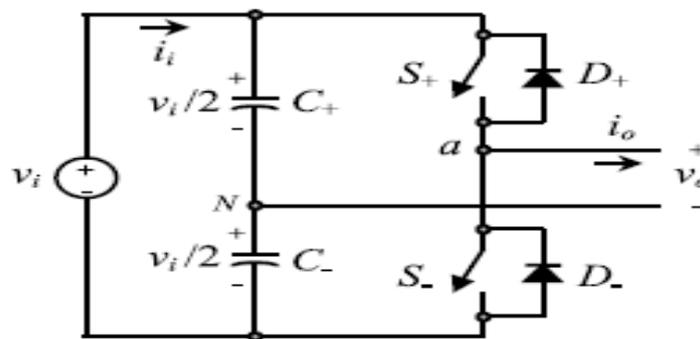


Fig.III.1 Onduleur monophasé en demi-pont

Etat	Etat	$v$	Conductions des interrupteurs
est O et - est F	1	$v/2$	+ si $> 0$ + si $< 0$
- est O et + est F	2	$-v/2$	- si $> 0$ - si $< 0$
+ et - tout F	3	$-v/2$	- si $> 0$
		$v/2$	+ si $< 0$

Tableau III.1 Etats des interrupteurs pour un demi-pont monophasé

**Remarque :** le symbole F indique l'état fermé et le symbole O indique l'état ouvert.

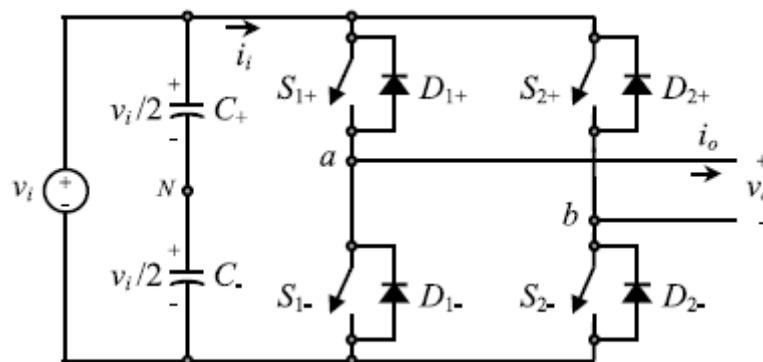
Figure III.2 a montré l'onde idéale associée à l'onduleur en demi-pont de la Fig.III.1. Les états de les interrupteurs  $S_+$  et  $S_-$  et sont définis par la modulation de la technique, Qui dans ce cas utilisé MLI [15]

### III.3.1.2 Onduleur monophasé en pont

Figure b.1 montre le schéma de principe d'un onduleur en pont VSI. Cet onduleur est comme l'onduleur en demi-pont, mais une deuxième étape prévoit le point neutre à la charge. Comme prévu, les deux interrupteurs  $S_{1+}$  et  $S_{1-}$  (ou  $S_{2+}$  et  $S_{2-}$ ) ne peut pas être sur simultanément, car un court-circuit à travers la source de tension AC  $v_i$  serait produite. Il ya quatre états définie (États 1, 2, 3 et 4) et un état indéfini (état 5) cette états montre sur le tableau III.2.

L'état indéfini doit être évité, afin d'être toujours capable de définir la tension de sortie de courant alternatif. Afin d'éviter la condition de court-circuit dans l'ensemble du bus et DC l'indéfini de tension de sortie AC, la technique veillé devrait modulant à ce que ce soit l'ouverture ou la fermeture des interrupteurs de chaque commutateur est à tout instant. On peut observer que la tension de sortie AC peut prendre les valeurs jusqu'à la valeur DC correspond de  $v_i$ , qui est le double de celui obtenu avec VSI en demi-pont.

Il y a plusieurs techniques modulant ont été développées qui sont applicables pour VSI en pont. Parmi eux se trouvent les techniques MLI (Bipolaires et unipolaires) [17]



**Figure III.2** schéma de principe de l'onduleur monophasé on pont (VSI)

Etat	Etat	$v_a$	$v_b$	$v$	Conduction des interrupteurs
$S_{1+}$ et $S_{2-}$ est F $S_{1-}$ et $S_{2+}$ est O	1	$v/2$	$-v/2$	$v$	$S_{1+}$ et $S_{2-}$ si $> 0$ $S_{1+}$ et $S_{2-}$ si $< 0$
$S_{1-}$ et $S_{2+}$ est F $S_{1+}$ et $S_{2-}$ est O	2	$-v/2$	$v/2$	$-v$	$S_{1-}$ et $S_{2+}$ si $> 0$ $S_{1-}$ et $S_{2+}$ si $< 0$
$S_{1+}$ et $S_{2+}$ est F $S_{1-}$ et $S_{2-}$ est O	3	$v/2$	$v/2$	0	$S_{1+}$ et $S_{2+}$ si $> 0$ $S_{1+}$ et $S_{2+}$ si $< 0$
$S_{1-}$ et $S_{2-}$ est F $S_{1+}$ et $S_{2+}$ est O	4	$-v/2$	$-v/2$	0	$S_{1-}$ et $S_{2-}$ si $> 0$ $S_{1-}$ et $S_{2-}$ si $< 0$
$S_{1-}, S_{2-}, S_{1+}$ et $S_{2+}$ est O	5	$-v/2$ $v/2$	$v/2$ $-v/2$	$-v$ $v$	$S_{1-}$ et $S_{2+}$ si $> 0$ $S_{1+}$ et $S_{2-}$ si $< 0$

**Tableau.III.2** : les états des interrupteurs pour un onduleur monophasé en pont

### III.4 Technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) consiste à comparer deux signaux, dont, l'un est un signal de commande  $v_c$ , l'autre est un signal de référence  $v_\Delta$ , le but est de générer des impulsions dont le rapport cyclique est variable le long d'une période.

Pour les différents circuits d'onduleur, il est toujours souhaitable dans les circuits d'onduleur, nous voulons avoir une tension de d'obtenir une tension de sortie sinusoïdale. Pour produire une tension de sortie sinusoïdale de fréquence  $f$  est comparée avec un signal triangulaire comme l'indique la fig.III.3.a [17]

Un cas particulier est lorsque le signal de modulation est un  $v_c$  sinusoïdale à la fréquence  $f_c$  et de l'amplitude  $\hat{v}_c$ , et  $v_\Delta$  le signal triangulaire est à la fréquence  $f_\Delta$  et de l'amplitude  $\hat{v}_\Delta$ . C'est la technique sinusoïdale (SMLI). Dans ce cas, la modulation index de  $m_a$  (Aussi connue sous le nom de modulation d'amplitude Ratio) est défini comme

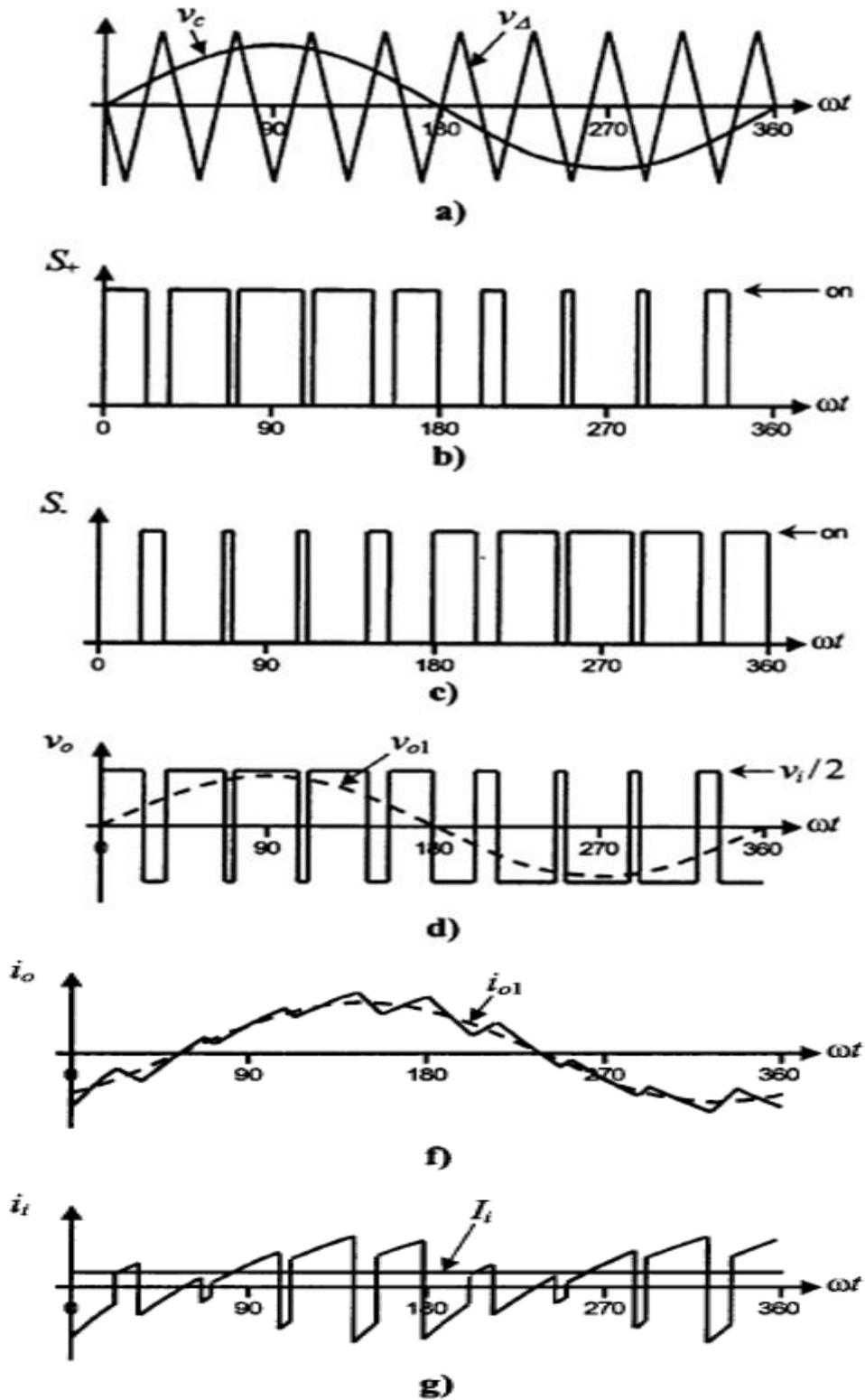
suit :

$$m_a = \frac{\hat{v}_c}{\hat{v}_\Delta}$$

Et de la fréquence porteuse normalisée  $m_f$  (aussi connu sous le nom de Ratio de modulation

de fréquence) est :

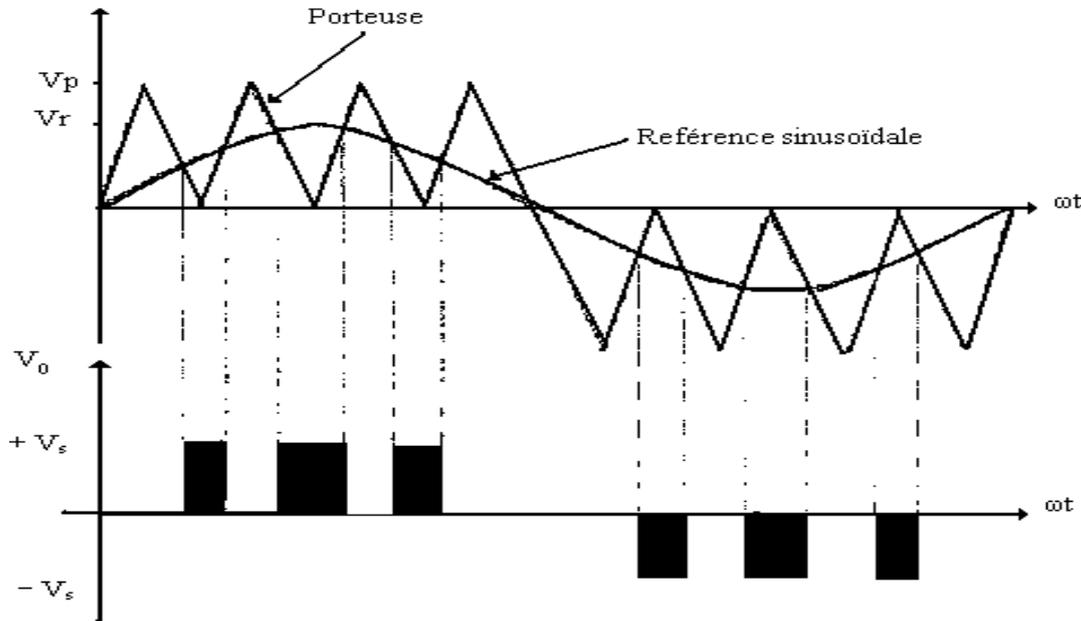
$$m_f = \frac{f_\Delta}{f_c}$$



**Fig.III.3** Les formes idéal d'onde de VSI en demi pont pour MLI ( $m_a = 0.8$ ,  $m_f = 9$ ):  
 (a) le porteuse et la modulation des signaux, (b) état de commutation de  $S_+$ , (c) état de l'interrupteur  $S_-$ , (d) tension de sortie AC, (e) courant de sortie AC. (f) courant DC [16]

### III.4.1 Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

Dans ce cas le signal de référence est un signal sinusoïdal d'amplitude  $V_e$



**Fig.III.4** Modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale [17]

Cette technique se caractérise par :

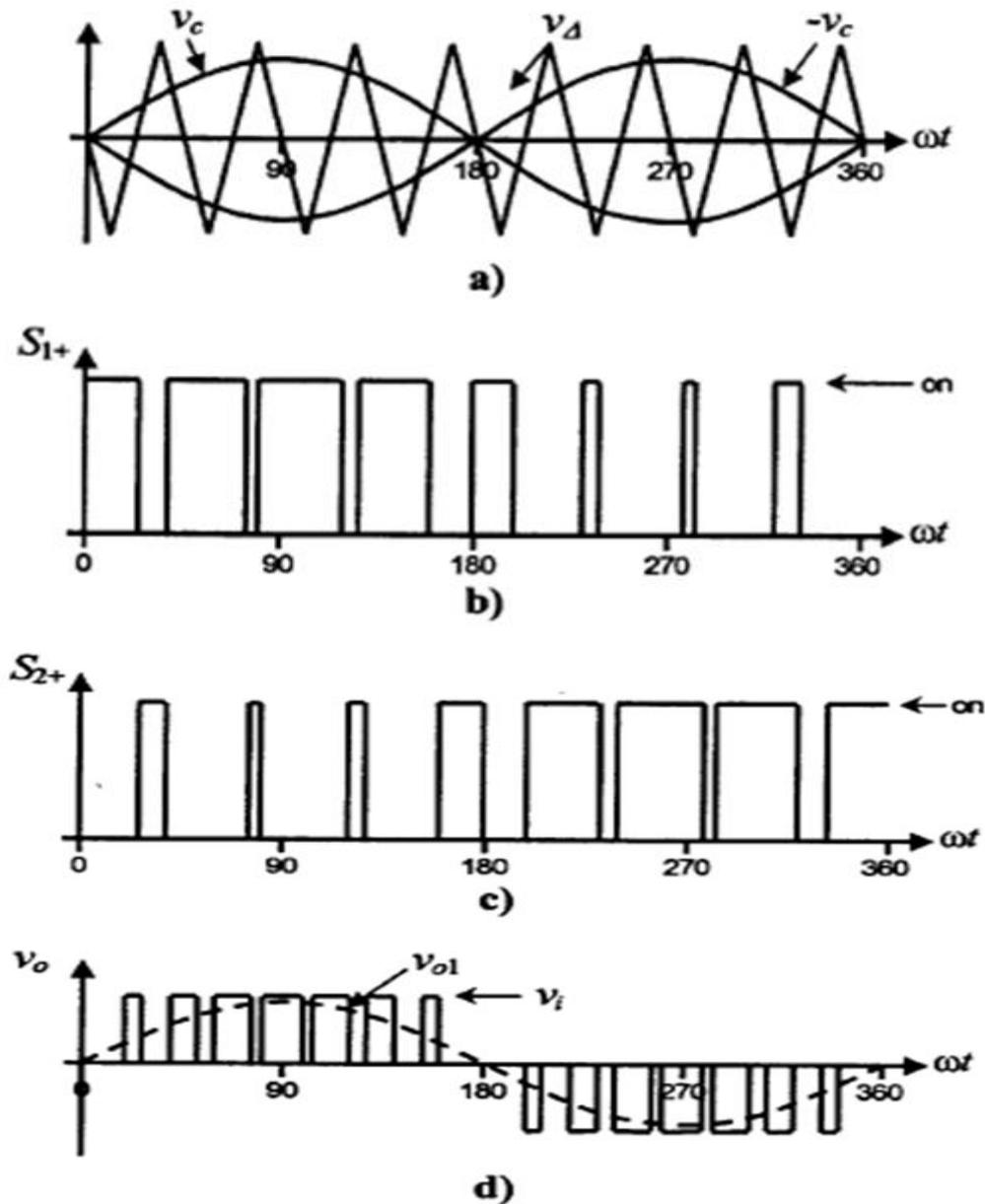
- Le fondamental est la même fréquence que signal sinusoïdale.
- Le nombre d'impulsion dépend du signal de  $V_p$  (particulièrement de sa fréquence).

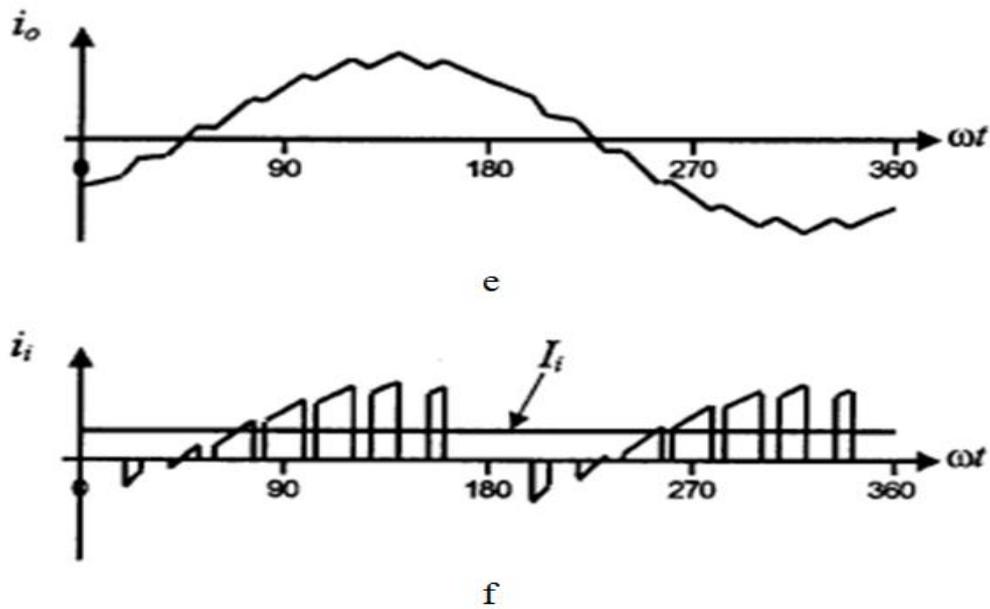
### III.4.2 Technique MLI bipolaire

États 1 et 2 (Tableau III.2) sont utilisés pour générer la tension de sortie AC dans cette approche. Ainsi, la tension de sortie de forme d'onde AC fonctionnalisées que deux valeurs, qui sont  $v_i$  et  $-v_i$  à générer les états, la technique qui base sur porteuse peut être utilisée comme onduleur en demipont configurations (Fig.III.3), où un seul sinusoïdale signal de modulation a été utilisé. Il devrait être à noter que l'état dans le commutateur  $S_+$  dans le demi-pont correspond à deux interrupteurs  $S_{1+}$  et  $S_{2-}$  être dans de configuration de l'état de l'ouverture dans le VSI en pont. De même,  $S_-$  dans le l'état de l'ouverture dans le demi-pont correspond à deux interrupteurs  $S_{1-}$  et  $S_{2+}$  étant dans l'état de l'ouverture dans la configuration de VSI en pont. Cette technique est appelé technique SMLI bipolaire. La forme d'onde de tension de sortie AC en pont de VSI est essentiellement une forme d'onde sinusoïdale avec de l'amplitude d'une composante fondamentale  $\hat{v}_{01}$  qui donnée par l'expression suivant :  $\hat{v}_{01} = \hat{v}_{ab1} = v_i m_a$

### III.4.3 Technique MLI unipolaire

Contrairement à l'approche bipolaire, la technique MLI unipolaire utilise l'état 1, 2, 3 et 4 (Tableau III.2) pour générer la tension de sortie AC. Ainsi, la tension de sortie de forme d'onde AC peut instantanément prendre une des trois valeurs, à savoir  $v_i$ ,  $-v_i$  et 0. Pour générer les états, la technique basée de porteuse peut être comme l'illustre la fig. b.3, où deux signaux sinusoidales modulantes ( $v_c \sin \omega t - v_c$ ) sont utilisés. Le signal  $v_c$  est utilisé pour générer  $v_{aN1}$  et  $-v_c$  est utilisé pour générer  $v_{bN1}$ ; donc  $v_{bN1} = -v_{aN1}$ . D'autre part,  $v_{o1} = v_{aN1} - v_{bN1} = 2 \cdot v_{aN1}$ , donc  $v_{o1} = 2 \cdot v_{aN1} = m_a \cdot v_i$ . C'est ce qu'on appelle technique SMLI unipolaire [14]

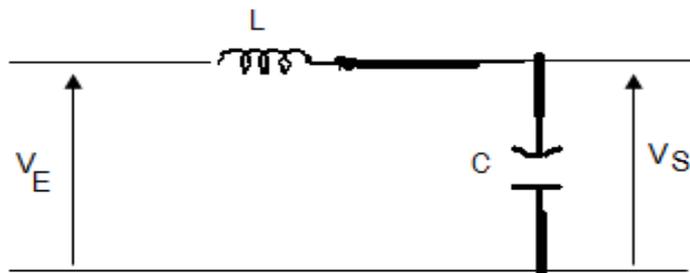




**Figure III.5 :** les formes idéal d'onde pour VSI en pont avec technique unipolaire SMLI ( $m_a = 0.8, m_f = 8$ ) (a) signaux porteuse et la modulation, (b) l'état de l'interrupteur  $S_{1+}$ , (c) l'état de l'interrupteur  $S_{2+}$ , (d) tension de sortie AC, (e) courant de sortie AC, (f) courant DC. [17]

### III.5 filtre passe-bas [18]

Le schéma du filtrer passe-bas utilisé est représenté sur la figure III.6.



**Fig.III.6** Le schéma du filtre passe-bas

R étant la résistance interne de l'inductance L, elle est de valeur très petite, est pourquoi on la néglige dans la suite des calculs ( $R=0$ ).

La fonction de transfert est :

$$V_s = \frac{V_e}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \tag{III.1}$$

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \omega^2 LC} \tag{III.2}$$

Alors que on trouver :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - w^2 LC} \quad \text{III. 3}$$

En posons

$$w_0 = \frac{1}{LC}$$

Et

$$\Omega = \frac{w^2}{w_0}$$

On a donc

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{|1 - \Omega^2|} \quad \text{III. 4}$$

Pour que le filtre fonctionne sans qu'il y ait diminution de l'amplitude du signal de sortie, c'est-à-dire que l'on n'aura pas besoin d'un circuit auxiliaire d'amplification, il faut que

$$\left| \frac{V_s}{V_e} \right| = 1 \quad \text{donc :}$$

$$\frac{1}{|1 - \Omega^2|} = 1 \quad \text{III. 5}$$

Ou

$$1 - \Omega^2 = \mp 1 \quad \text{III. 6}$$

a)

$$1 - \frac{w^2}{w_0^2} = 1 \quad \text{III. 7}$$

$$\text{Alors } \left( \frac{w}{w_0} \right)^2 = 0 \quad \Rightarrow w = 0 \quad \text{III. 8}$$

Ce qui est impossible

b)

$$1 - \frac{w^2}{w_0^2} = -1 \quad \text{III. 9}$$

Donc

$$\left( \frac{w}{w_0} \right)^2 = 2 \quad \text{D'où } w = w_0 \sqrt{2} \quad \text{III. 10}$$

La fréquence de coupure est donc :

$$f_c = \sqrt{\frac{2}{LC}} \quad \text{III.11}$$

### III.6 conclusion

Les onduleurs ces sont des convertisseurs d'énergie continue vers l'alternative. Ce chapitre est consacré à une présentation sur les onduleurs. En effet, on présente la classification des onduleurs selon l'imposition de la fréquence par le réseau ou non (non autonome et autonome respectivement). Ensuite, on fait l'étude de l'onduleur monophasé de tension en pont et demi pont ainsi que leur comportement pour la commande MLI et commande plein onde.

Dans ce chapitre on a proposé les types des filtres passe-bas pour les utiliser dans la chapitre suivant avec l'onduleur monophasé ainsi les méthodes de calcul les paramètres de ce filtre.

Le chapitre suivant est exposé des résultats de la simulation par l'environnement MATLAB/Simulink de l'association pile combustible, hacheur élévateur ainsi que l'onduleur de tension monophasé.

## IV.1 Introduction

Pour valider les performances de l'alimentation proposée, on a réalisé un certain nombre de simulations sous MATLAB SIMULINK. Les résultats de simulation sont repartis en quatre parties. La première partie concerne le hacheur élévateur commandé en boucle ouverte puis en boucle fermée avec deux techniques de commande à hystérésis et par mode glissant. La deuxième partie est consacrée aux résultats de simulation de l'association de la pile PEMFC avec le hacheur élévateur. Dans la troisième partie, on présente les résultats de simulation de l'étage de l'onduleur. En dernière partie on teste les performances de l'alimentation en cas de variation de la charge.

### IV.2.1 Hacheur élévateur fonctionne en boucle ouverte

La figure IV.1 présente le schéma électrique du hacheur élévateur fonctionne en boucle ouverte. Les paramètres du hacheur sont la tension de la source  $V_e = 100 \text{ v}$  ; l'inductance  $L = 9 \mu\text{H}$ ; le condensateur  $C = 5 \text{ mF}$  , la fréquence de fonctionnement  $F = 1000 \text{ Hz}$ , le rapport cyclique  $k = 0.5$  et la charge  $R = 2 \Omega$ .

La figure IV.2 présente la tension et courant de sortie de le hacheur élévateur. Le hacheur fonctionne avec un rapport cyclique  $k = 0.5$  ce qui donne une tension de sortie deux fois la tension de l'entrée comme montre la figure IV.2. avec une charge  $R = 2 \Omega$  le courant est de 100A.

La figure IV.3 présente la tension et le courant de l'inductance, il est clair que le hacheur fonctionne en mode continu. La tension de l'inductance bascule entre  $V_e = 100\text{V}$  et  $V_e - V_s = -100\text{V}$

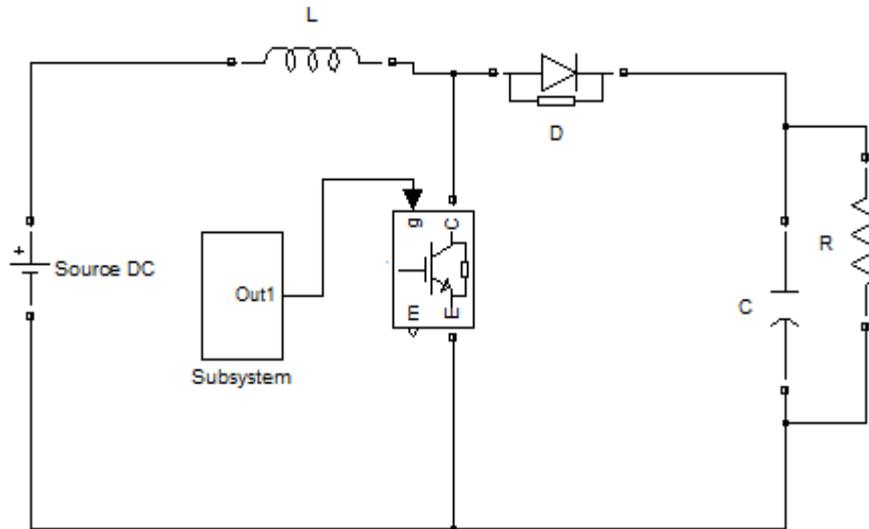


Fig.IV.1 Le schéma de simulation du hacheur élévateur

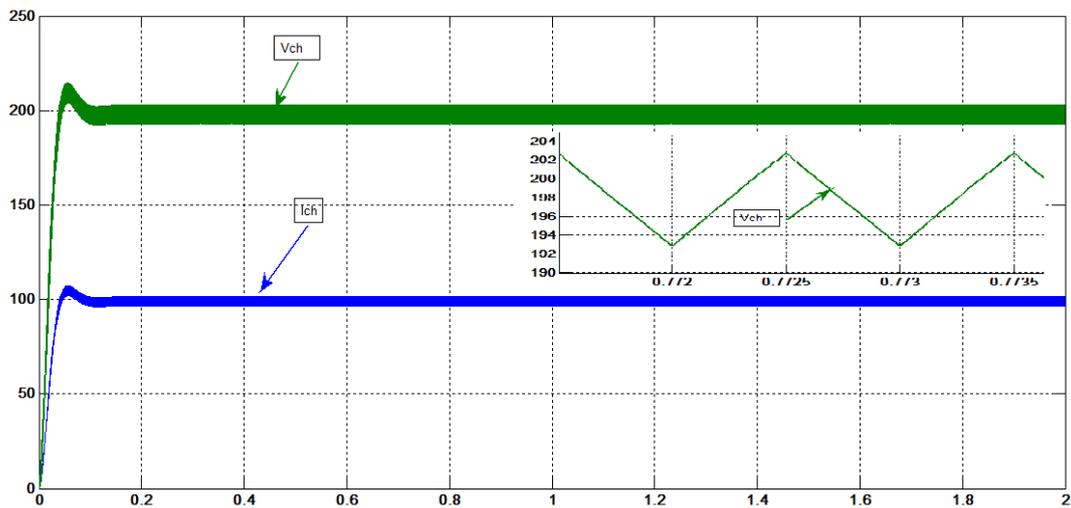


Fig.IV.2 Tension et courant de sortie de le hacheur élévateur.

Pour le courant et la tension de l'inductance L qui peut être représenté comme suivant :

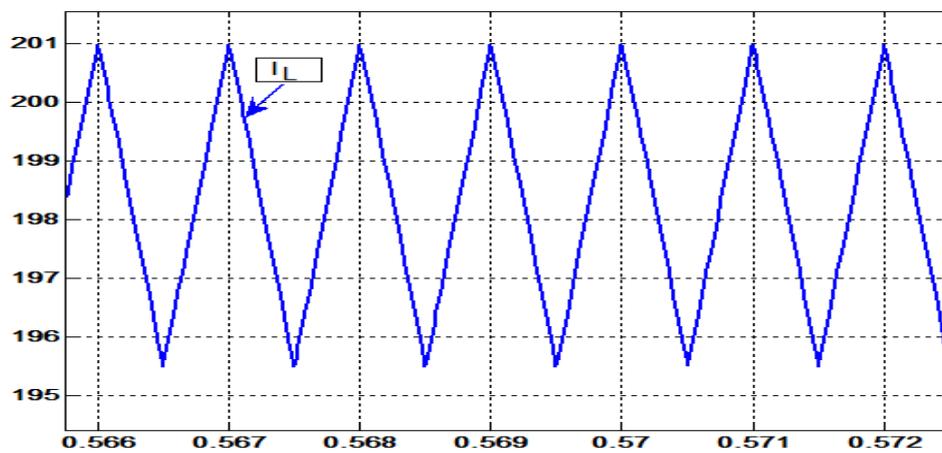


Fig.IV.3 le courant de l'inductance L

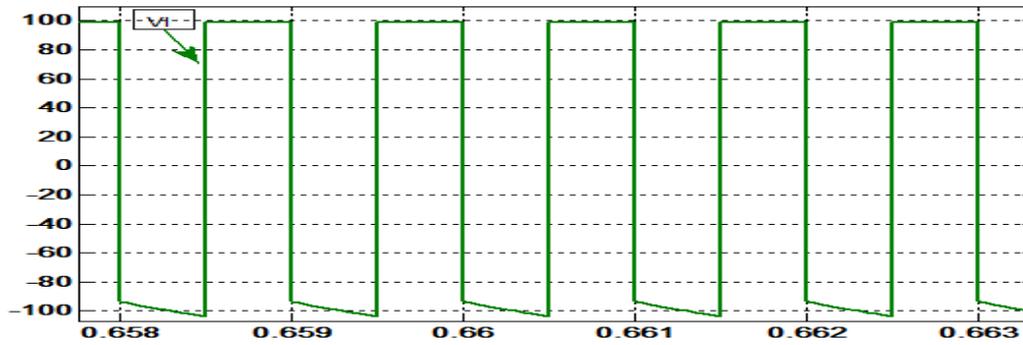


Fig.IV.4 Tension de l'inductance L

IV.2.2 Hacheur élévateur commandé par la commande à hystérésis

La figure IV.4 présente le schéma électrique du hacheur élévateur fonctionne en boucle fermée avec la commande a hystérésis. Les paramètres du hacheur sont  $V_e = 100\text{ V}$ ,  $V_{référence} = 200\text{ V}$ ,  $L = 9\mu\text{H}$ ;  $C = 0.005\text{ F}$ , une bande d'hystérésis  $\Delta V = \pm 0.05$  et la charge R est de  $20\Omega$ .

La figure IV.5 montre qu'après un régime transitoire de 0.1S, la tension de sortie de le hacheur suit parfaitement sa référence.

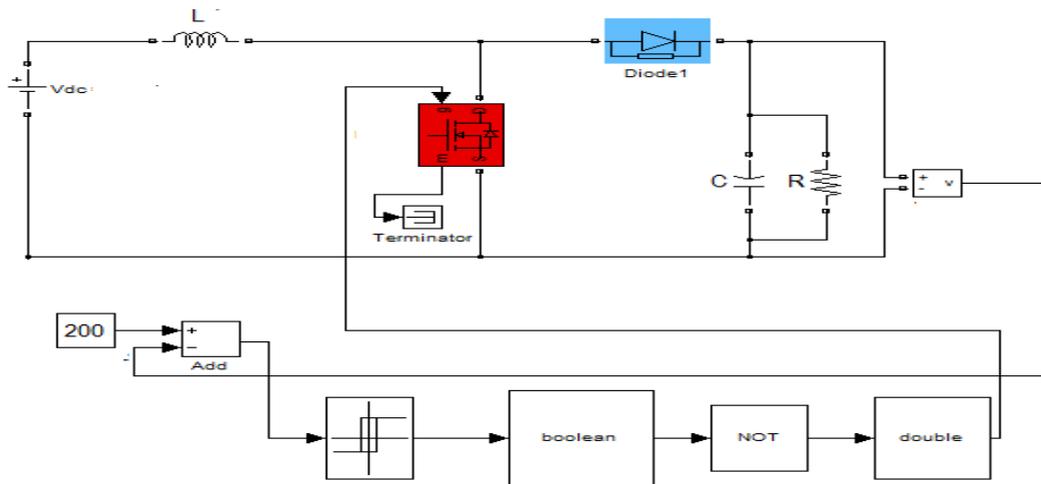


Fig.IV.5 Schéma de simulation du hacheur commandé par l'hystérésis

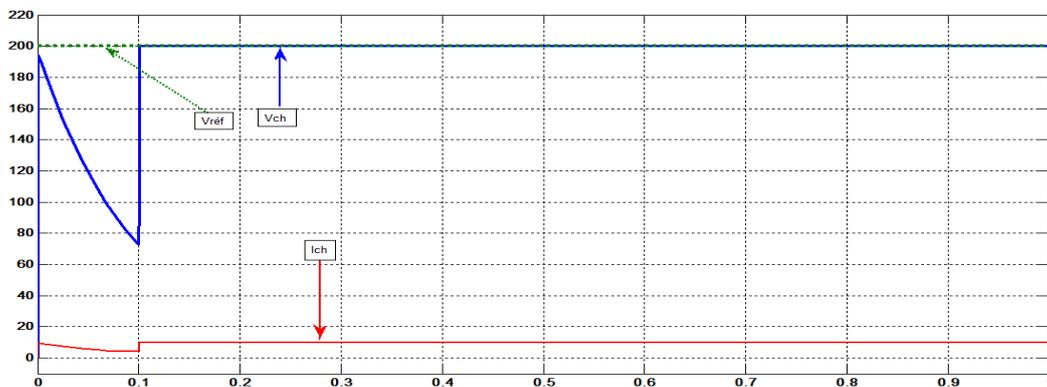


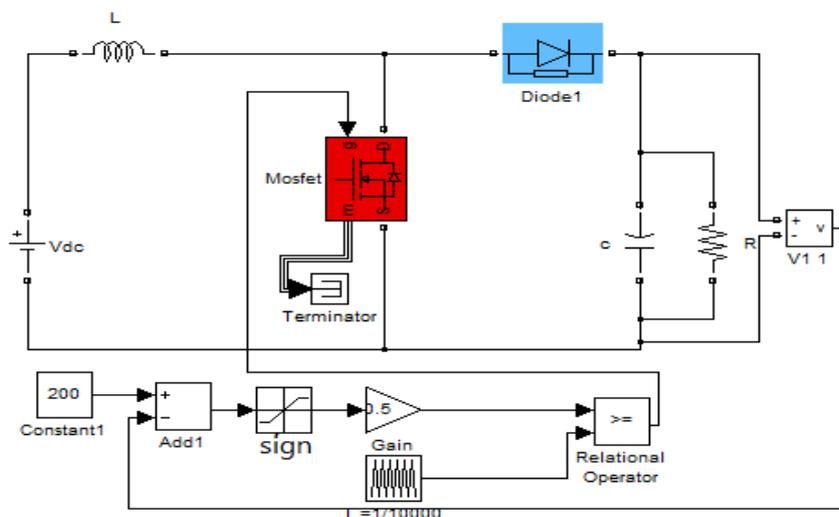
Fig.IV.6 Tensions de sortie et de référence avec le courant de la charge

### IV.2.3 Hacheur élévateur commandé par la commande par mode glissant

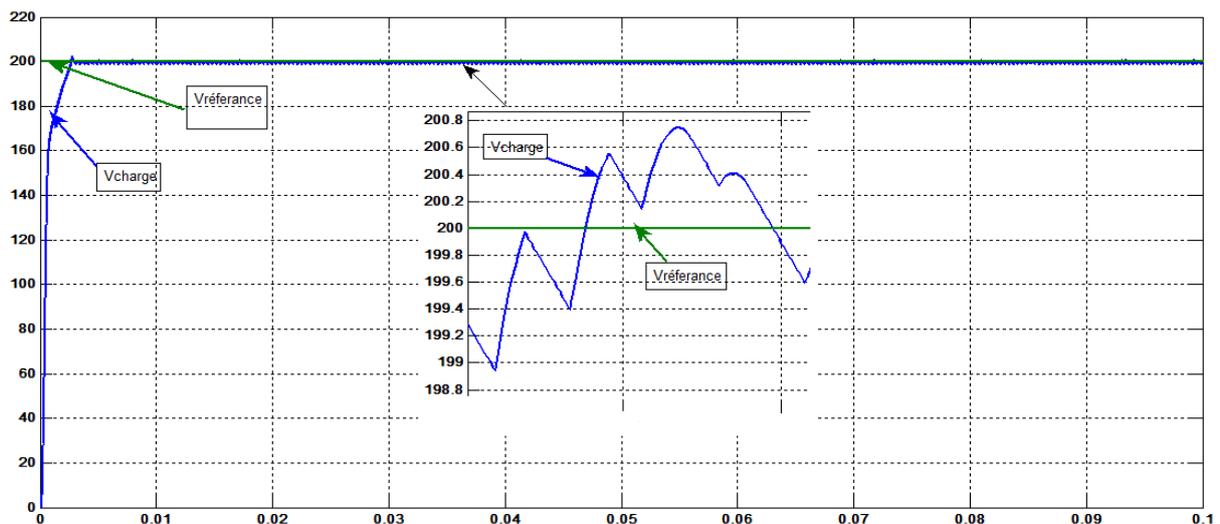
La figure IV.7 présente le schéma électrique du hacheur élévateur fonctionne en boucle fermé avec la commande par mode glissant. Les paramètres du hacheur sont  $V_e = 100 \text{ V}$ ,  $V_{\text{référence}} = 200 \text{ V}$ ,  $L = 9 \mu\text{H}$ ;  $C = 0.005 \text{ F}$ , un gain du régulateur de 0.5, la fréquence de la porteuse = 10Khz et la charge R est de  $2 \Omega$ .

La figure IV.8 montre que la tension de sortie de le hacheur suit parfaitement sa référence.

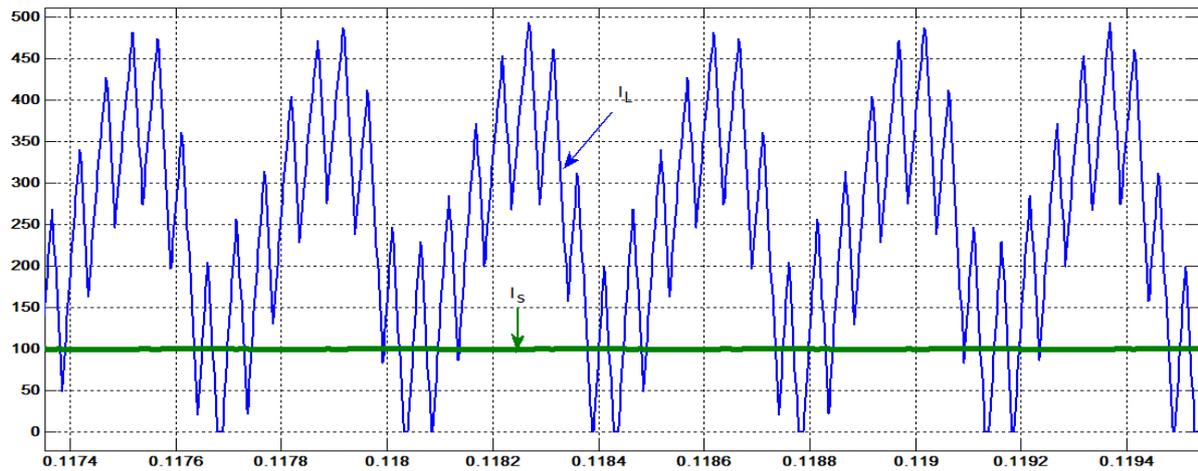
La figure IV.9 montre que le hacheur fonctionne en mode continue la plus part du temps.



**Fig.IV.7** Schéma de simulation du hacheur commandé par mode glissant



**Fig.IV.8** Tensions de référence et de sortie de le hacheur

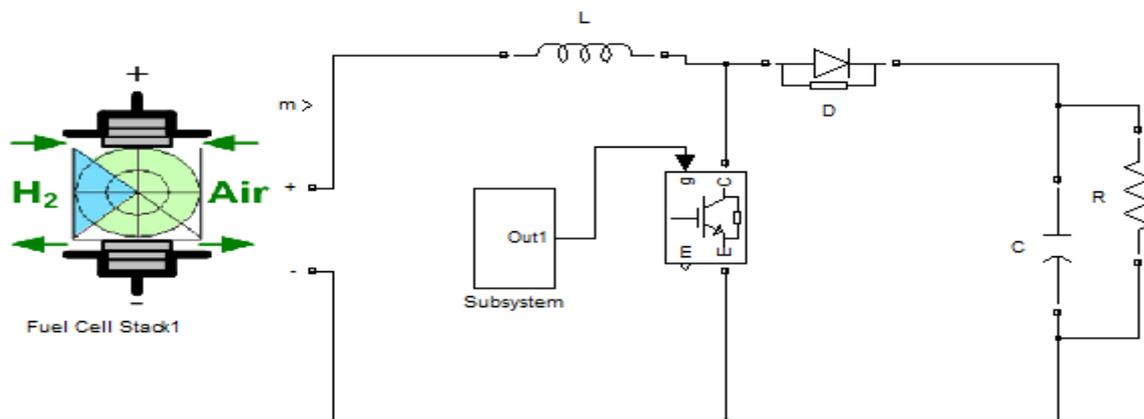


**Fig.IV.9** courants de l'inductance L et de la charge

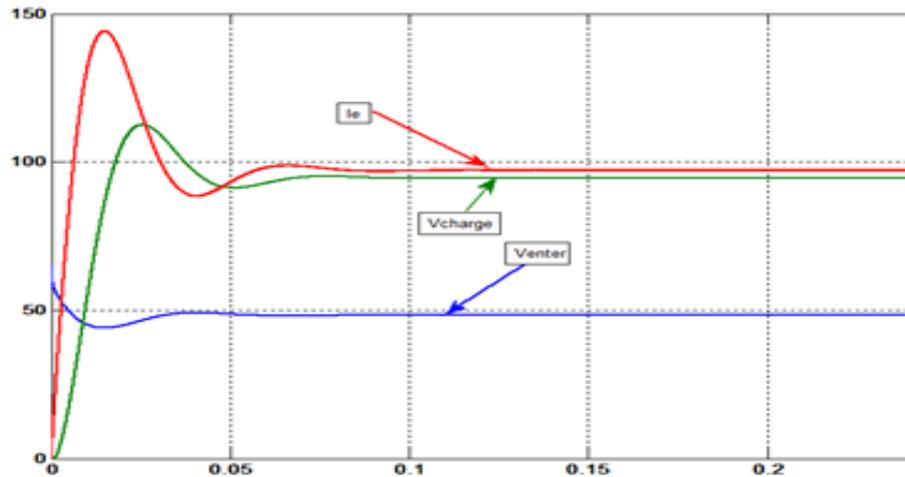
### IV.3.1 La pile combustible associée à un hacheur élévateur fonctionne en boucle ouverte

La figure IV.10 présente le schéma synoptique d'une pile de type PEMFC de 6KW, 45V associée à un hacheur élévateur fonctionne en boucle ouverte. Les paramètres du hacheur sont  $L=150\mu\text{H}$ ;  $C=0.005\text{ F}$ , un rapport cyclique de 0.5, la fréquence de la porteuse = 10Khz et la charge R est variable de  $2\Omega$  à  $20\Omega$ .

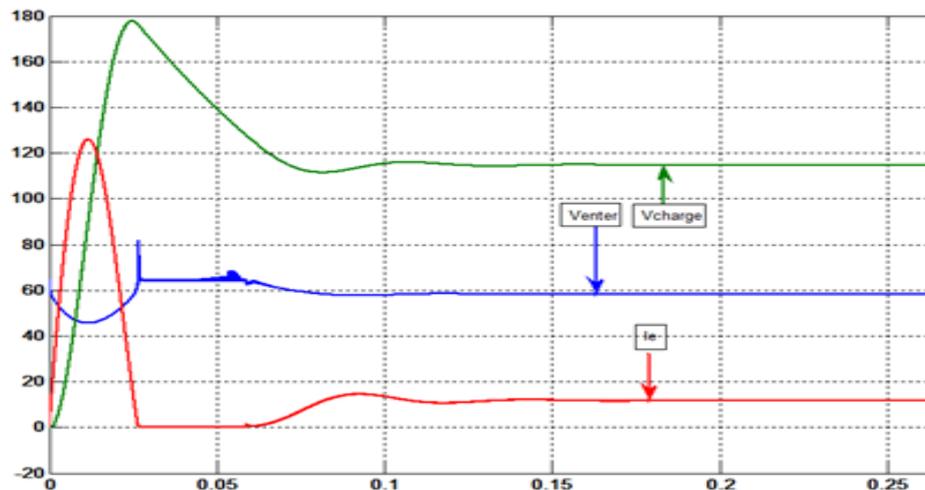
La figure IV.11 montre que la tension de la pile est de 50V pour  $R=2\Omega$  donc la tension de sortie de le hacheur est de 100V avec un courant délivré par la pile de 100A. En variant la charge de 2 à  $20\Omega$  la tension de la pile est devenue 60V et la tension de sortie de le hacheur est de 116V avec un courant délivré par la pile de 12A comme montre la figure IV.12, donc il est nécessaire d'utiliser une régulation en boucle fermé pour stabiliser le bus continu de l'alimentation.



**Fig.IV.10** Schéma de simulation de la pile associée à le hacheur en BO



*Fig.IV.11* Tensions de la pile et de sortie de le hacheur avec le courant de la charge pour  $R=2\Omega$ .



*Fig.IV.12* Tensions de la pile et de sortie de le hacheur avec le courant de la charge pour  $R=20\Omega$ .

### IV.3.2 La pile associée à un hacheur commandé par la commande par mode glissant

La figure IV.13 présente le schéma synoptique d'une pile de type PEMFC de 6KW, 45V associée à un hacheur élévateur commandé par la commande par mode glissant. Les paramètres du hacheur sont :  $V_{référence} = 90V$ ,  $L=150\mu H$ ,  $C=0.005 F$ , le gain du régulateur est de 0.5, la fréquence de la porteuse = 10Khz et la charge  $R$  est variable de  $2\Omega$  à  $20\Omega$ .

La figure IV.14.a montré que la tension de la pile varié entre 40 et 70V pour  $R=2\Omega$  par contre la tension de sortie de le hacheur oscille autour sa référence.

La figure IV.14.b montré que la courant de la charge oscille autour 45A. En variant la charge de 2 à 20  $\Omega$  la tension de la pile est devenue 60V, la tension de sortie de le hacheur suit parfaitement sa référence et le courant de la charge est de 4.5A comme montre la figure IV.15.

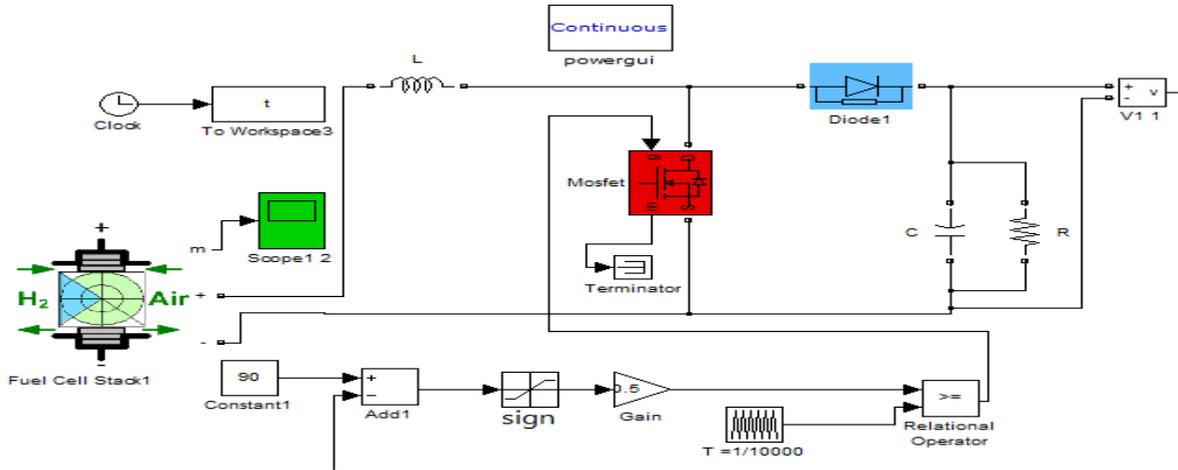


Fig.IV.13 Schéma de simulation de la pile associée à le hacheur en BF

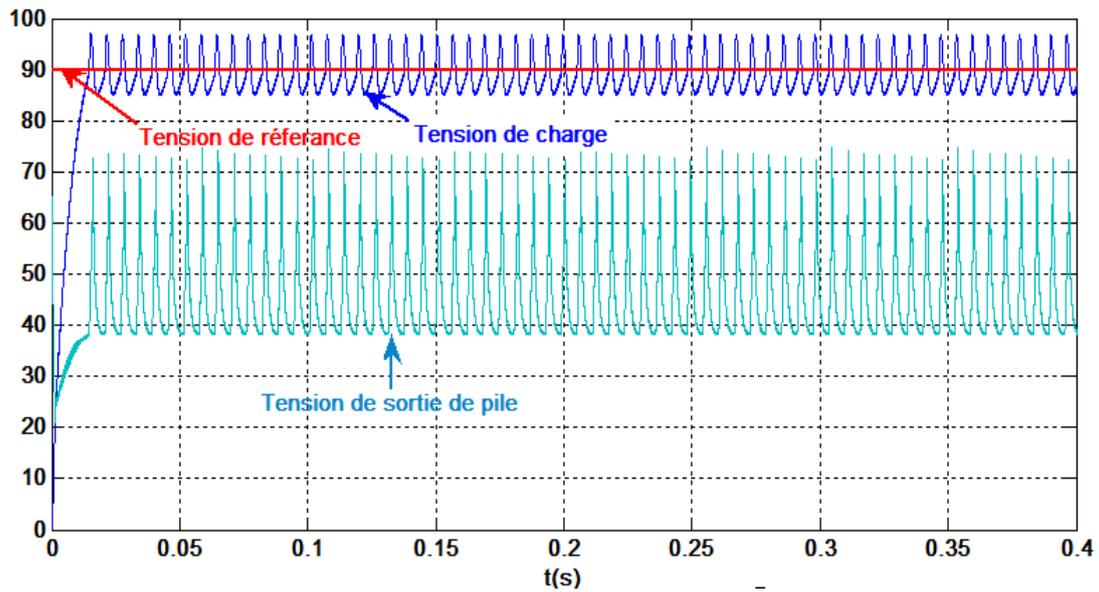


Fig.IV.14.a Tensions de la pile de sortie ,de le hacheur et référence avec de la charge pour  $R=2\Omega$ .

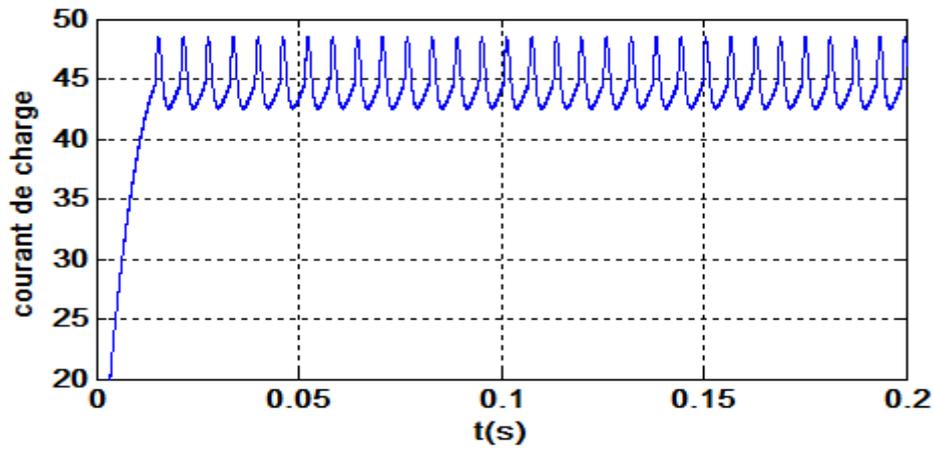


Fig.IV.14.b Courbe de courant de charge

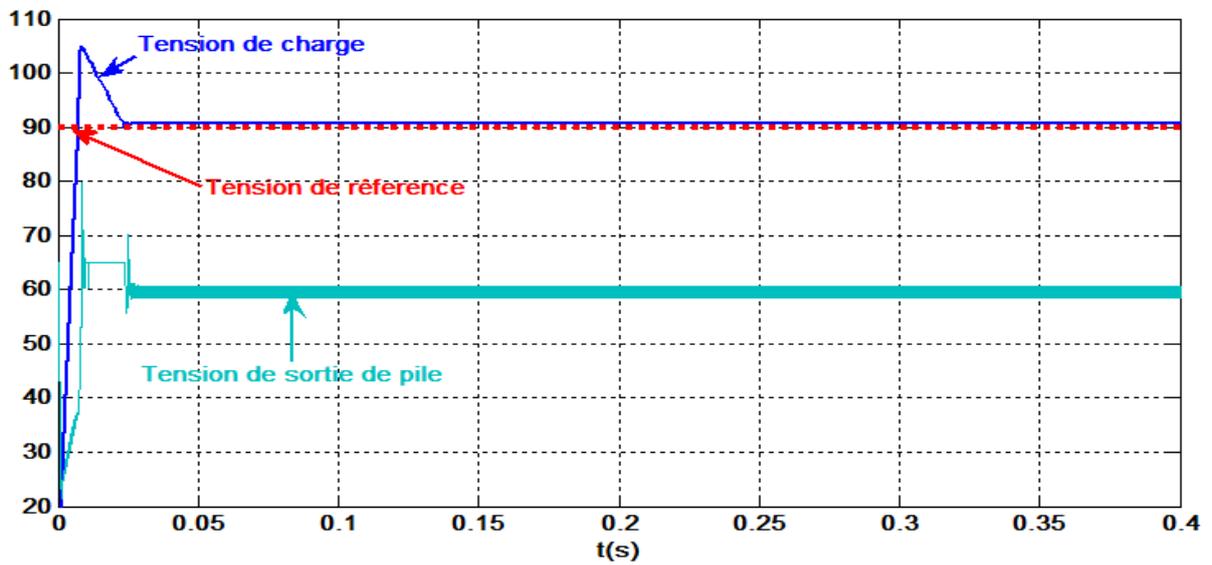


Fig.IV.15.a Tensions de la pile de sortie , de le hacheur et tension de référence pour R=20Ω.

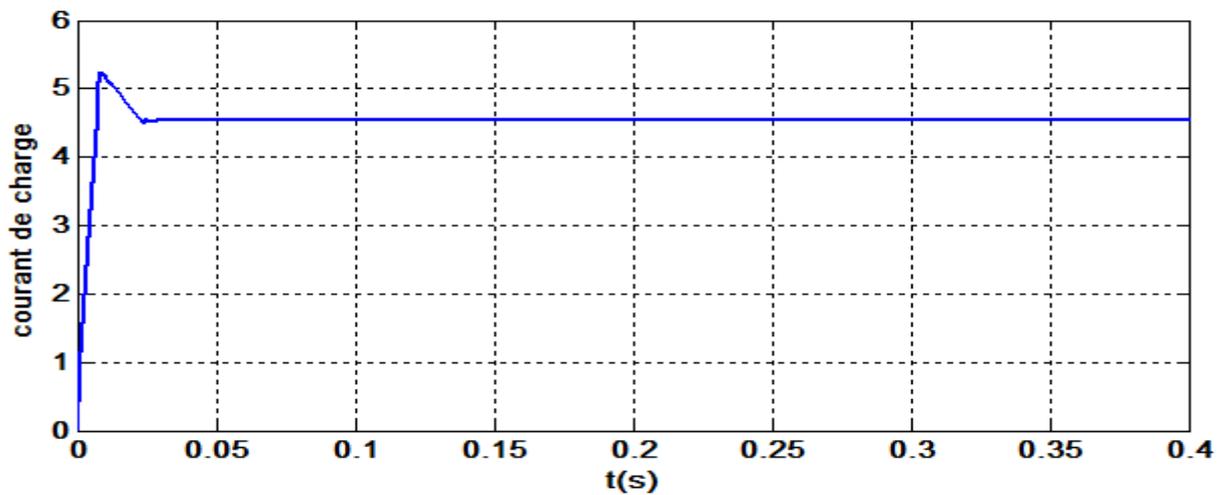
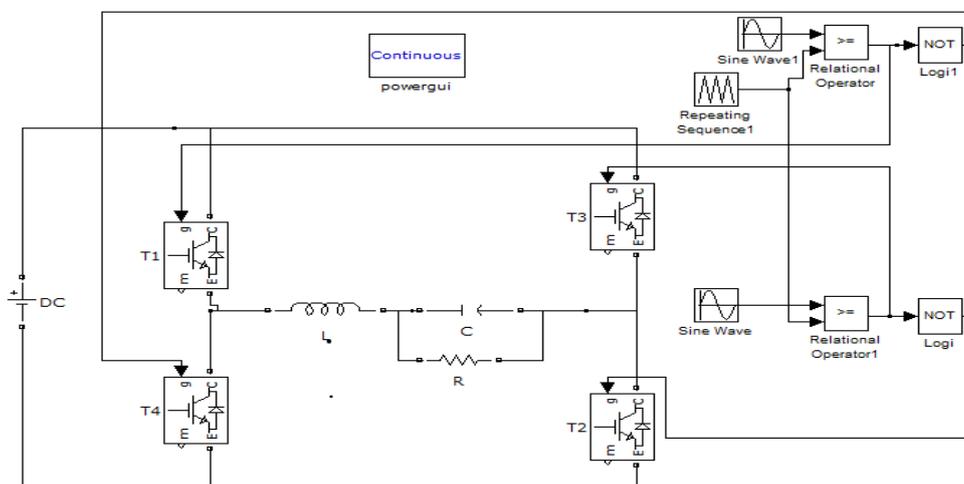


Fig.IV.15.b Courbe de courant de charge

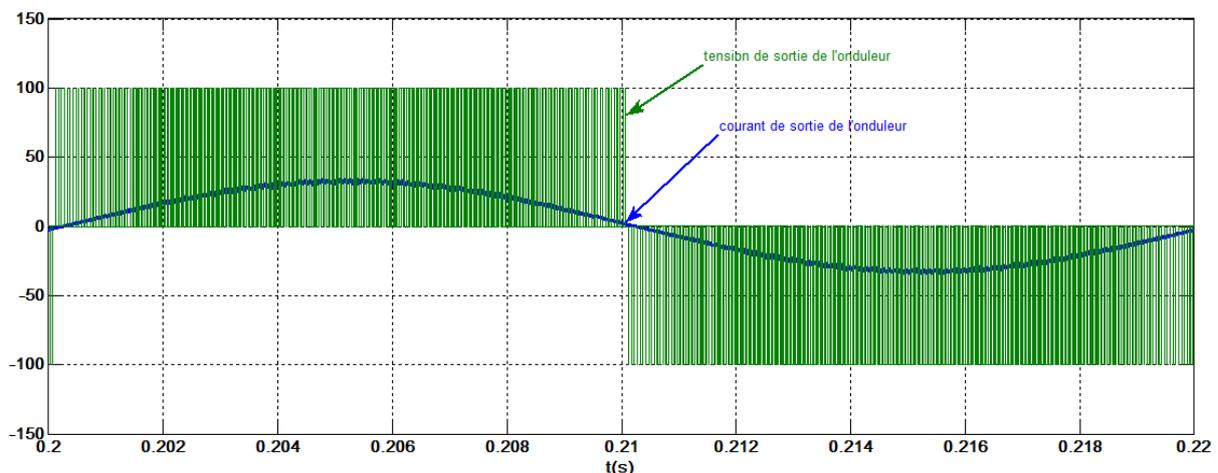
#### IV.4 L'onduleur mon phase

La figure IV.16 présente le schéma électrique de l'onduleur monophasé commandé par la modulation de largeur d'impulsion MLI unipolaire avec un filtre de sortie LC. Les paramètres de l'onduleur sont: la tension d'entrée continue  $V_{DC} = 100$  V,  $L=0.0005$  H;  $C=0.005$  F, une porteuse triangulaire de fréquence  $f=5$  KHz et une référence sinusoïdale de fréquence  $f=50$  Hz et une charge R de  $2 \Omega$ .

La figure IV.17 présente la tension de sortie de l'onduleur avec la tension de la charge. Cette dernière présente un taux de distorsion harmonique (THD) de 1.33% comme montre la figure IV.18.



**Fig.IV.16** Schéma de simulation de l'onduleur monophasé  
Pour  $R=2 \Omega$



**Fig.IV17** Tension et courant de sortie de l'onduleur.

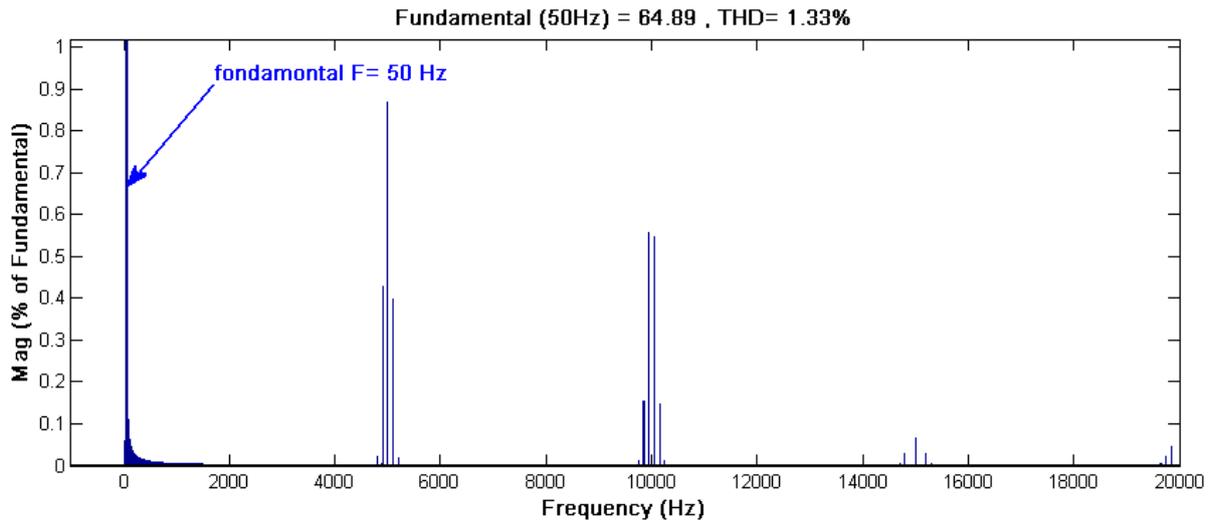


Fig.IV.18 Spectre d'harmonique de la tension de la charge

**IV.5 Association de la pile combustible PEMFC- hacheur- onduleur**

La figure IV.19 présente le schéma synoptique de l'alimentation proposée compose d'une pile de type PEMFC de 6KW, 45V associée à un hacheur élévateur fonctionne en boucle fermé commandé par la commande par mode glissant et un onduleur commandé par la MLI unipolaire. Les paramètres du système sont présentés dans le tableau IV.1.

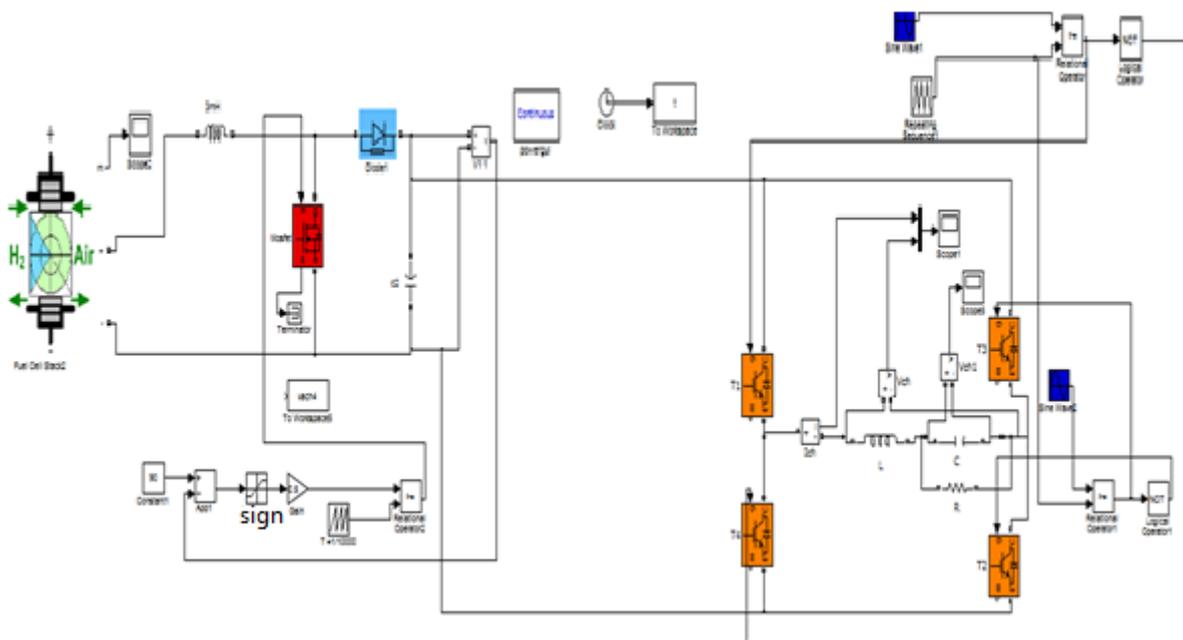
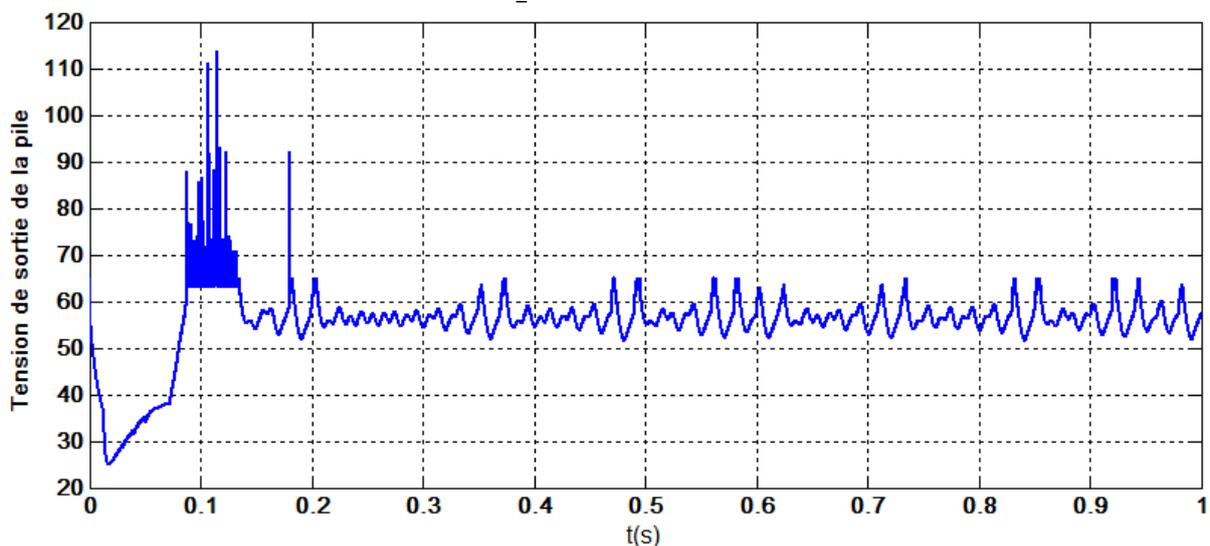


Fig.IV.19 Schéma de simulation de l'alimentation proposée.

paramètres	valeurs
Tension de la pile	45V
Inductance du hacheur	0.002 Henry
Condensateur du hacheur	0.05 F
Gain du régulateur	0.4
Porteuse du hacheur	10Khz
Inductance du filtre	0.0005 Henry
Condensateur du filtre	0.000047 F
Porteuse de l'onduleur	5 KHz

Tableau IV.1. Paramètres du système

La figure IV.20 montre que la tension de la pile varie de 54 à 64 V pour  $R=2\Omega$  par contre la tension de sortie de le hacheur suit parfaitement sa référence de 90V comme montre la figure IV.21. la figure IV.22 présente la tension et le courant de la charge qui présentent un THD de 0.74% comme montre la figure IV.23. En variant la charge de 2 à 20  $\Omega$  la tension de la pile oscille de 62 à 65 V et la tension de sortie suit parfaitement sa référence de 90V comme montre les figures IV.24 et IV.25. la figure IV.25 présente le courant délivré par la pile ce qui montre que le hacheur fonctionne en mode discontinu. la figure IV.27 présente la tension et le courant de la charge qui présentent un THD de 0.63% comme montre la figure IV.28.

*Fig.IV.20* Tension de la pile combustible PEMFC

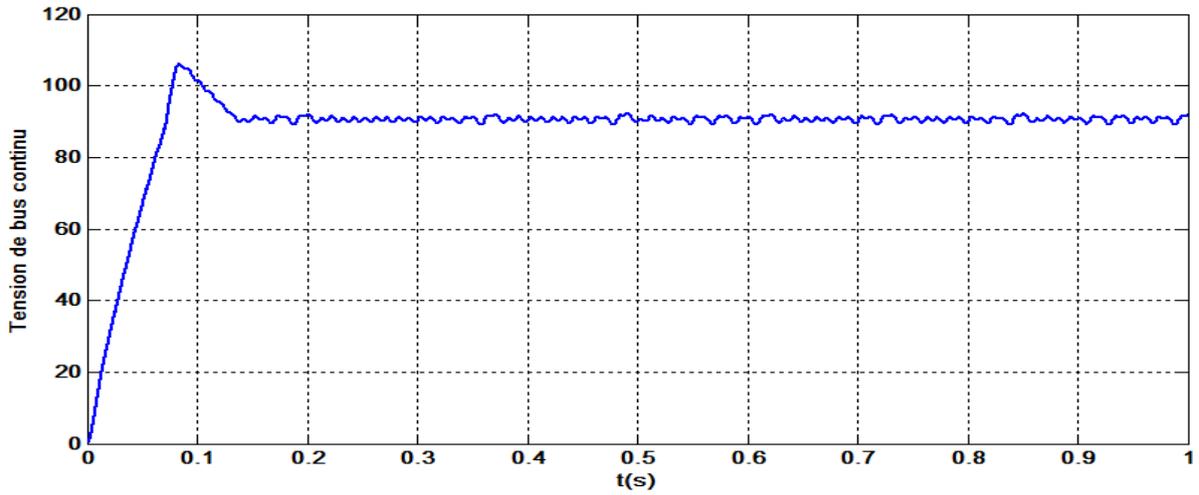


Fig.IV.21 Tension du bus continu

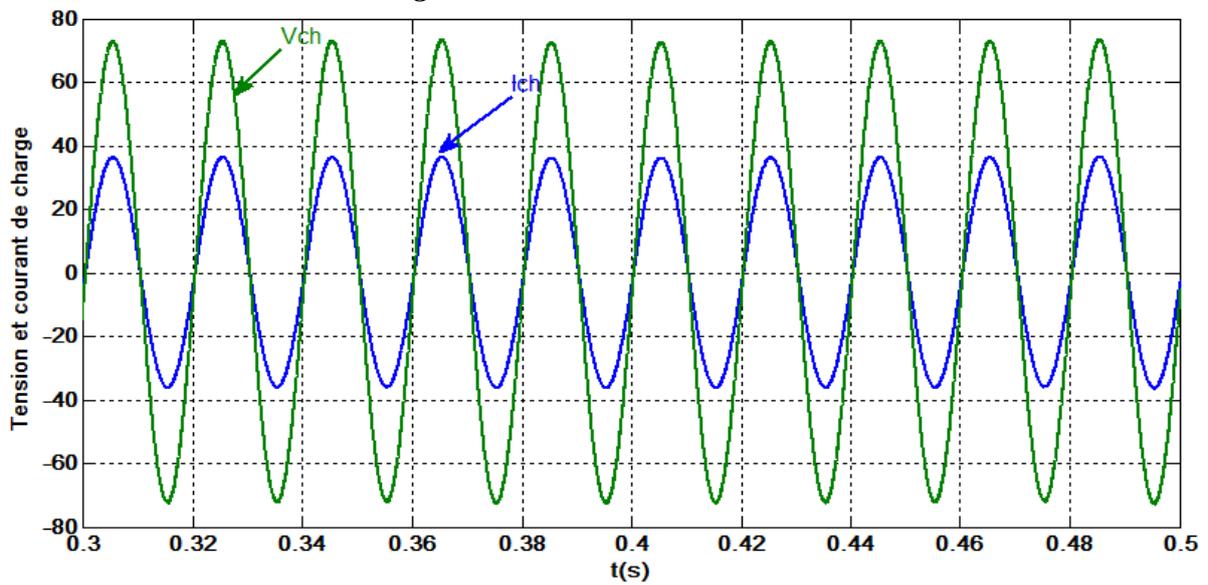


Fig.IV.22 Tension et courant de la charge

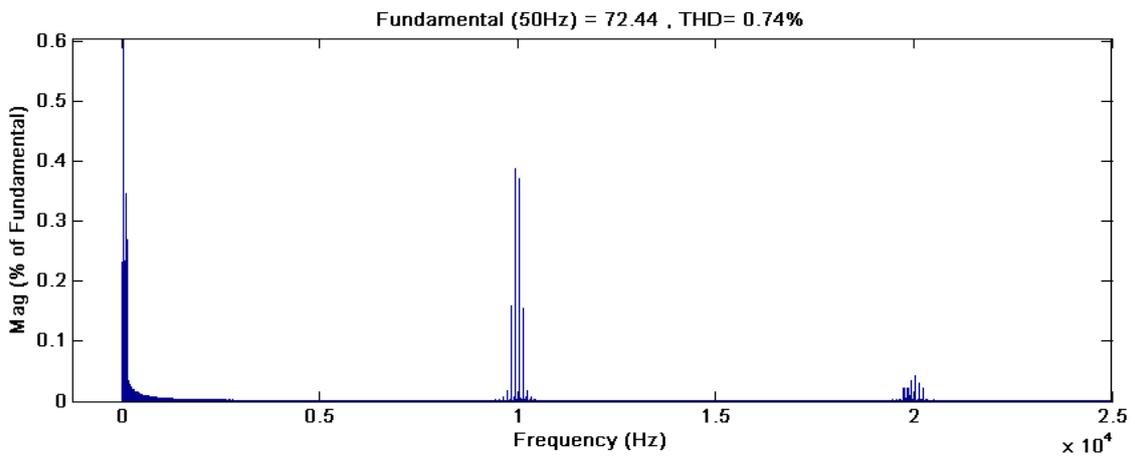
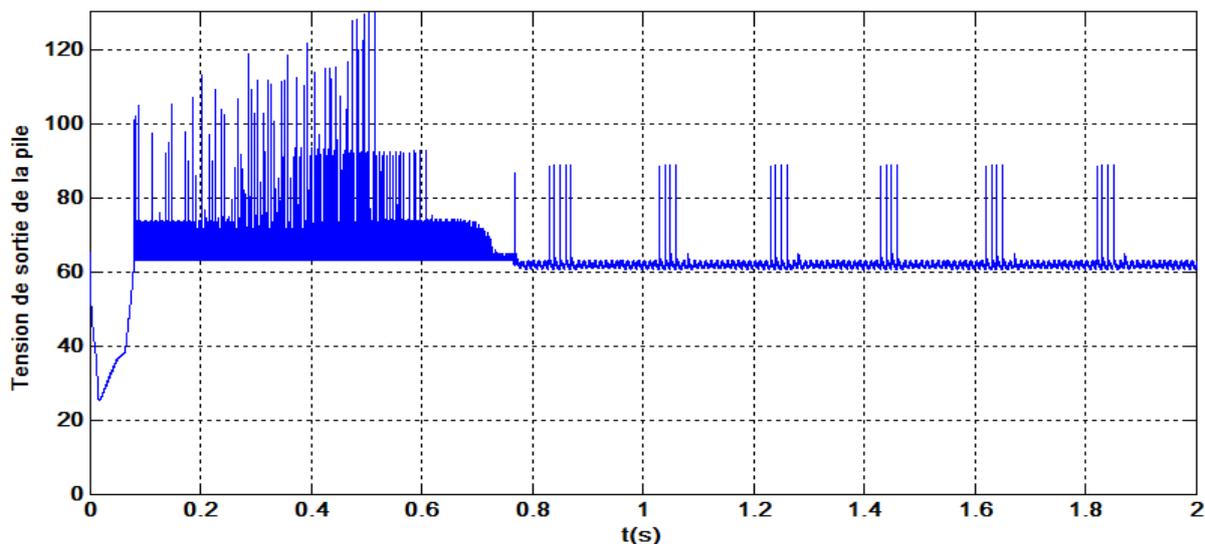
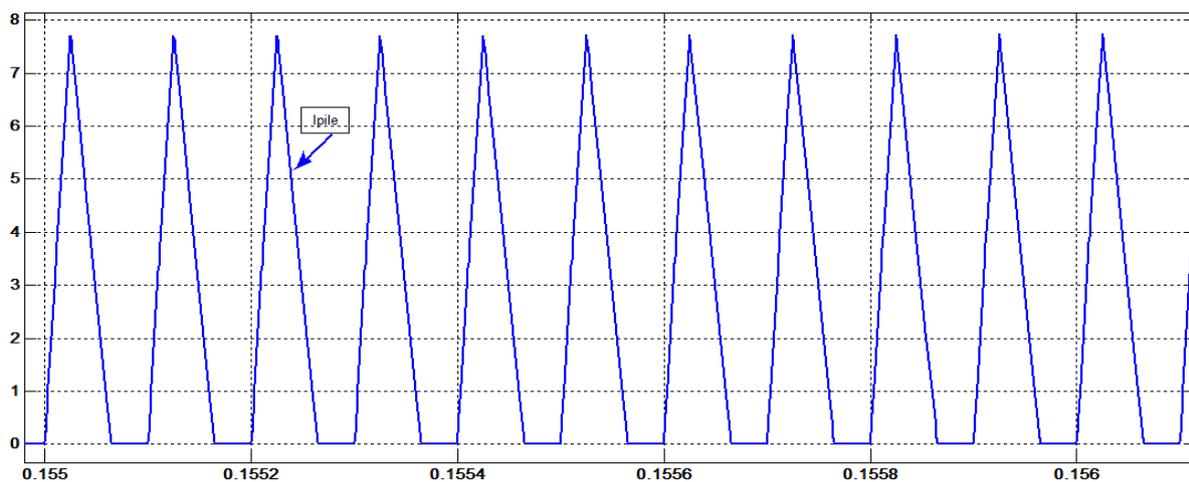


Fig.IV.23 Spectre d'harmonique de la tension de la charge.

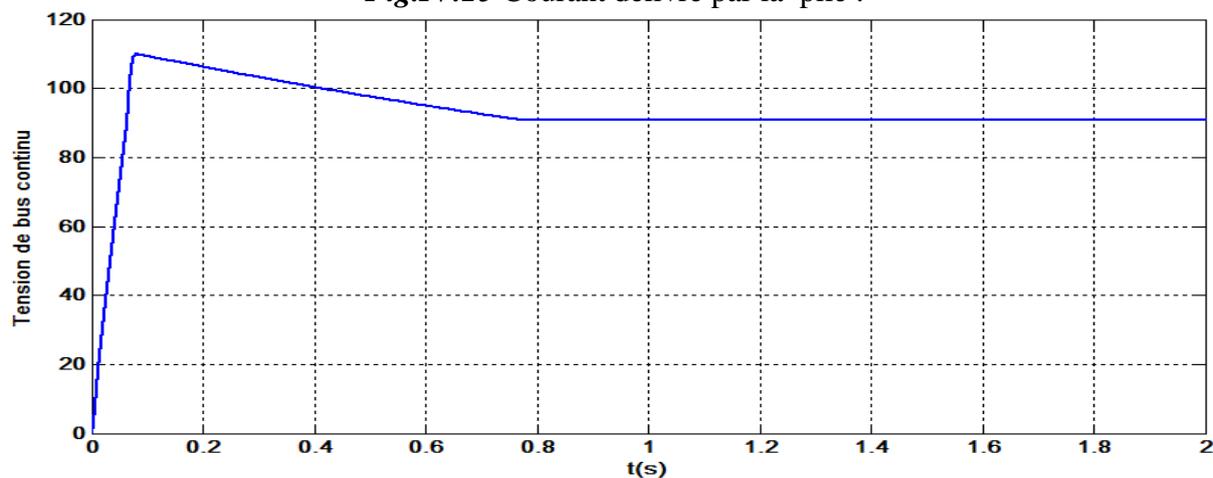
Pour  $R=20\ \Omega$



*Fig.IV.24* La tension de la pile combustible PEMFC



*Fig.IV.25* Courant délivré par la pile .



*Fig.IV.26* Tension du bus continu

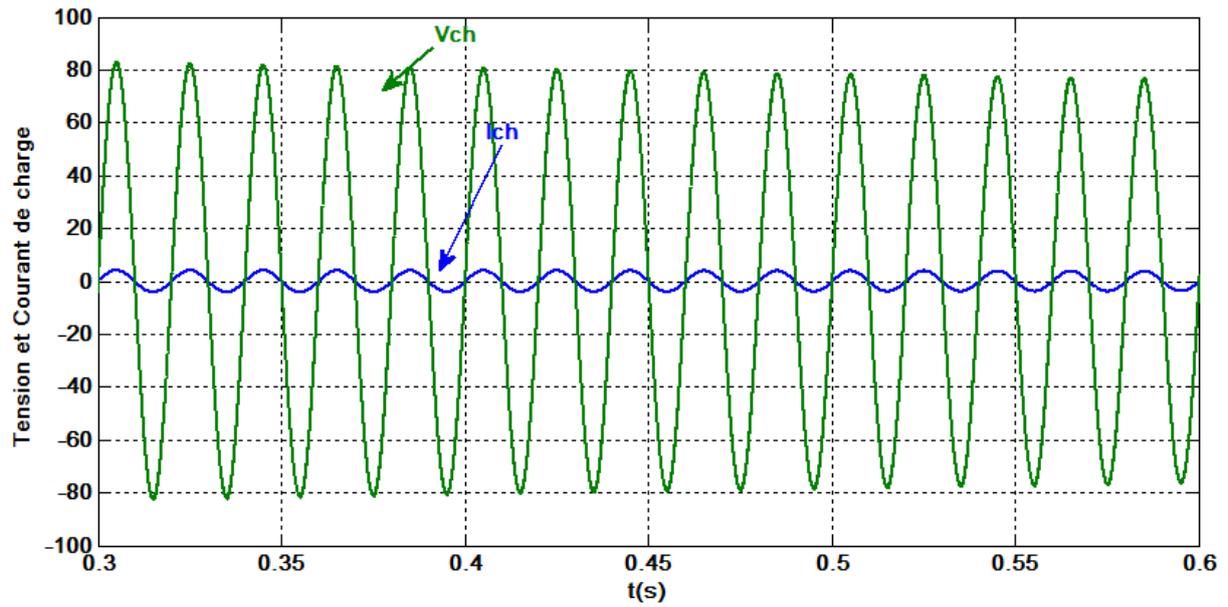


Fig.IV.27 Tension et courant de la charge.

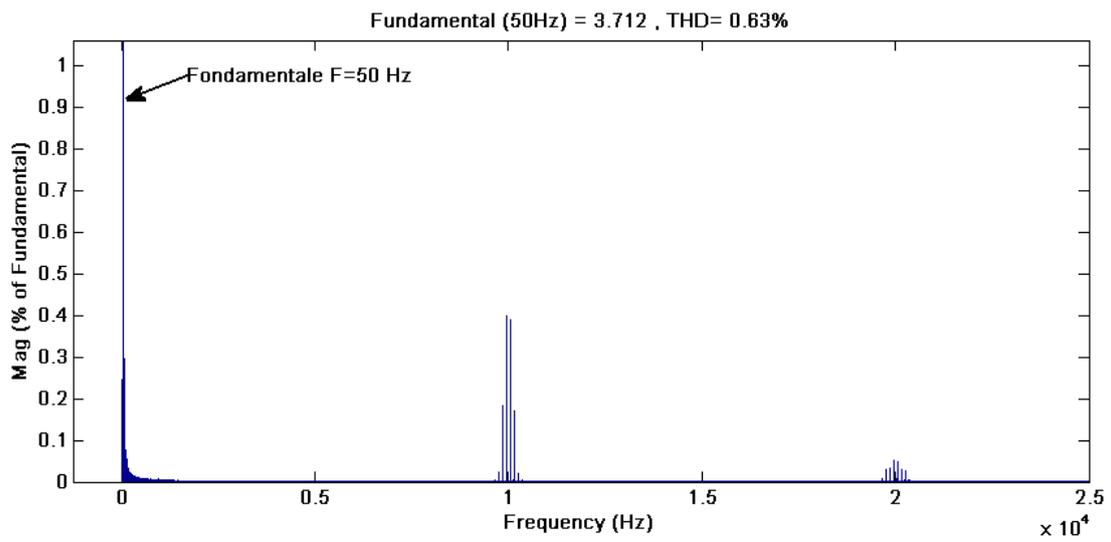
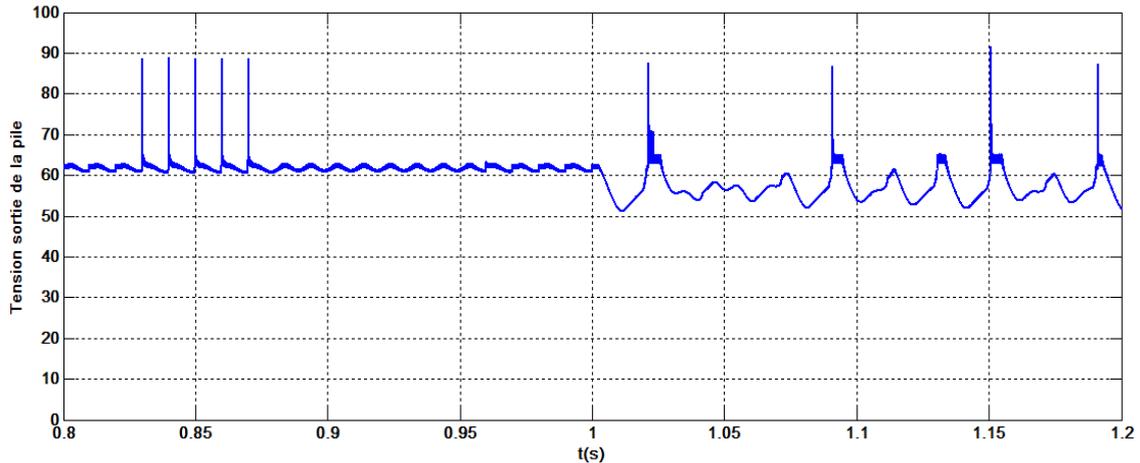
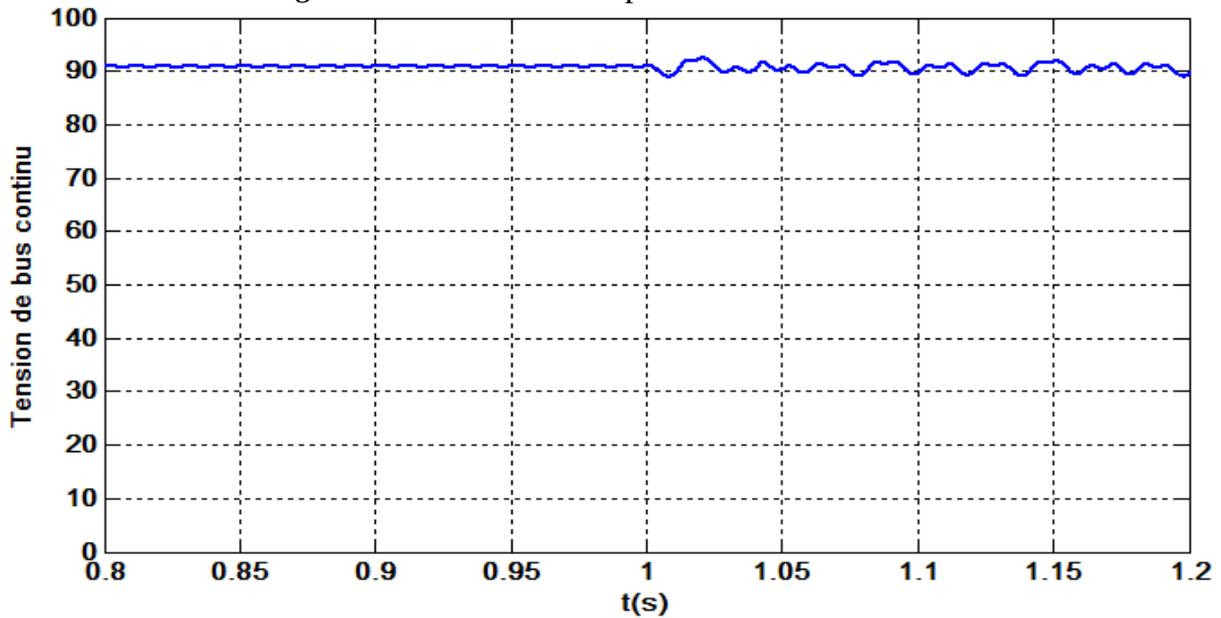


Fig.IV.28 spectre d'harmonique de la tension de la charge.

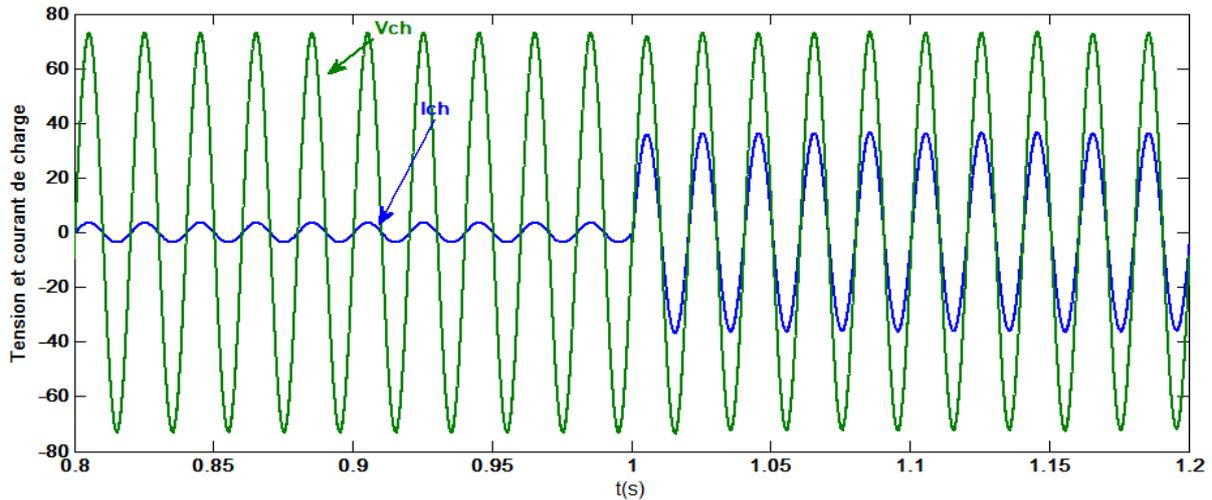
Finalement, pour tester la robustesse de l'alimentation on a varié la charge de  $20\ \Omega$  à  $2\ \Omega$  à l'instant 1S. On remarque que la tension de la pile variée de 62V à 52V par contre la tension du bus continu subit une légère variation de moins de 2V comme montre la figure IV.30. La figure IV.29 présente la tension de sortie de l'alimentation qui est parfaitement sinusoïdale avec un THD de 0.63% comme montre la figure IV.32.



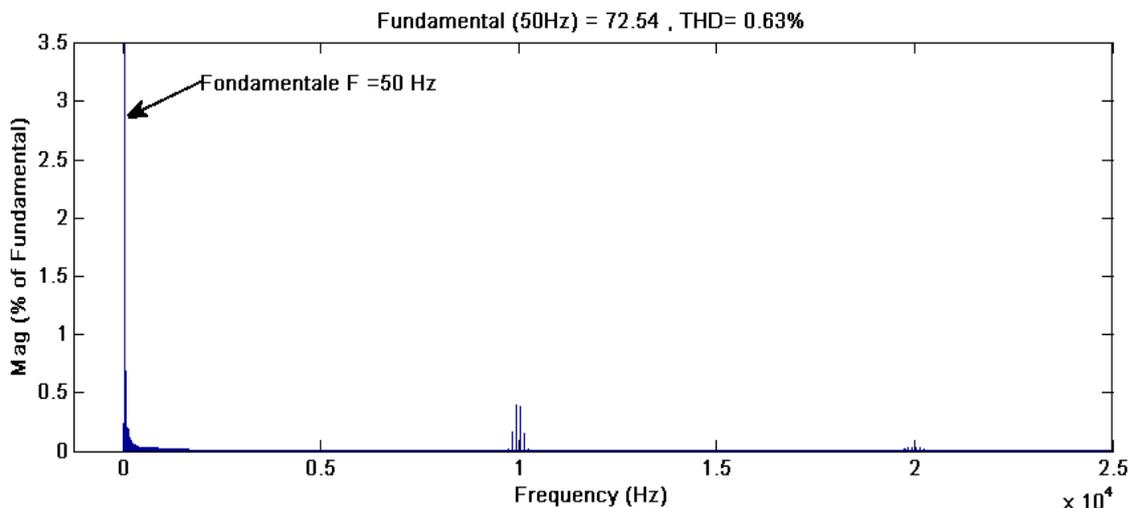
*Fig.IV.29* La tension de la pile combustible PEMFC



*Fig.IV.30* Tension du bus continu



**Fig.IV.31** Tension et courant de la charge.  $R=20 \Omega$  à  $2 \Omega$



**Fig.IV.32** spectre d'harmonique de la tension de la charge  $R=20 \Omega$  à  $2 \Omega$

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons faire la simulation des différents montages comme suivant :

- Simulation du hacheur en boucle ouvert avec différente charge  $R$ .
- Simulation du hacheur en boucle fermer avec deux technique de commande; le premier commande par hystérésis et l'autre commande par mode glissant.
- Simulation de la pile à combustible alimenter un hacheur en boucle ouvert et fermer
- Simulation de l'onduleur monophasé de tension avec un filtre avant la charge  $R$ .
- On a simulé aussi l'association de la pile à combustible avec les convertisseurs (hacheur élévateur et onduleur).

On donne les résultats de simulation et leurs interprétations.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Dans ce mémoire une alimentation stabilisée autour une pile à combustible de type PEMFC a été étudiée et simulé sous MATLAB SIMULINK.

Après avoir rappelé les généralités sur les piles à combustibles dans le premier chapitre, une étude sur le hacheur élévateur ainsi les deux modes de fonctionnement continu et discontinu ont été présentés. La commande du hacheur en boucle ouverte en cas de variation de la charge à donner une tension de sortie non stable. Par contre la régulation en boucle fermé par mode glissant a montrer une bonne aptitude de suivi de la tension de référence ce qui donne une tension de bus continu très stable même en cas d'une grande variation de la charge ( de  $20\Omega$  à  $2\Omega$ ).

Pour le bloc de l'onduleur et le filtre de sortie LC, La commande de l'onduleur avec la MLI unipolaire avec une porteuse de 5Khz à donner une tension de sortie sinusoïdale avec un taux de distorsion des harmonique (THD) très appréciable de 0.74% .

# Bibliographie

---

## Bibliographie

- [01] Saadi Ramzi " convertisseurs basse tension (42V, 540V) ; application source hybride utilisant une pile à combustible, doctorat LMD, UMK Biskra, 2014
- [02] Samahe Saker : " Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur " thèse magister, UMK Biskra 2013.
- [03] Julien Ramousse : " TRANSFERTS COUPLES MASSE-CHARGE-CHALEUR DANS UNE CELLULE DE PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE POLYMERE " doctorat, l'Institut National Polytechnique de Lorraine, soutenue publiquement le 21/11/2005
- [04] B.WAHDAME : " Analyse et optimisation 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.
- [05] Phatiphat Thounthong : "CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSTEURS ", doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine; Soutenue le 9 décembre 2005.
- [06] [http://sr.wikibidia.org/wiki/photo\\_pile\\_à\\_combustible.](http://sr.wikibidia.org/wiki/photo_pile_à_combustible)
- [07] Hattab Maker : "optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et Supercondensateur". Doctorat. Université de technologie Belfort Montbéliarde; 4 Novembre 2008
- [08] TIAR Mourad : " Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride", Magister, UMK Beskra; 10 / 10 /2011
- [09] Abdelatif Mohamed : "Etude et simulation d'une USP hybride, magister, UMK Beskra ,2015.
- [10] Bibliothèque de MATLAB de Sim power system version 2009
- [11] M.ZANDI : "Contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique" thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAIN, 2010
- [12] Cours d'hacheur, chapitre 4, Institut d'Automatisations industrielle "Esso-Haute Ecole spéciale de suisse occidentale".

## Bibliographie

---

- [13] Tourir Ibrahim et Osmane Ali : " Etude et simulation d'un convertisseur continu-continu élévateur de tension « Boost »" d'ingénieur d'état En Électrotechnique, UMK Beskra, 2007.
- [14] [http://sr.wikibidia.org/wiki/convertisser\\_boost](http://sr.wikibidia.org/wiki/convertisser_boost).
- [15] Zellouma Laide: "filtrage actif des harmoniques génères par un redresseur triphasée non commandée" Magister, U Badji Mokhtar Annaba 2006
- [16] Azri Abdellah : "commande par mode glissant d'un bus continu alimenté par une pile à combustible et un Super condensateur", Master, UMK Beskra ,4 juin 2013
- [17] Tahri Med Larbi et Rahali Adel : "Régulation de courant dans les convertisseurs CC-CA et CC-CC "Master, UMK Beskra, juin 2010.
- [18] Taleb Messaoud, Saadi Rachid, Benaissa Amar "étude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique P.W.M", mémoire d'ingénieur, centre universitaire Biskra, juin 1992.

---

***Chapitre I:***  
***La pile à combustible***

---



***Chapitre II:***  
***Convertisseur continu-  
continu survolteur «boost»***



---

***Chapitre III:***  
***Généralité sur le***  
***convertisseur monophasé***  
***DC/AC***

---

---

***Chapitre IV:***  
***Association de la pile à***  
***combustible avec les***  
***convertisseurs***

---

---

# **Introduction Générale**

---

---

# **Conclusion Générale**

---

---

# Bibliographie

---