

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Energies renouvelables

Réf:.....

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

Commande d'un convertisseur DC/DC pour l'application pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Présenté par :

DENDOUGA Amel

Soutenu le : **05 Juin 2017**

Devant le jury compose de :

Dr. DERRADJI BELLOUM Karima	MCA	Président
Dr. SAADI Aicha	MCB	Encadreur
Dr. SAADI Ramzi	MAB	Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Energie renouvelable

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

Commande d'un convertisseur DC/DC pour l'application pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Présenté par :

DENDOUGA Amel

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SAADI Aicha

Signature

Avis favorable du Président du Jury

Dr. DERRADJI BELLOUM Karima

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Energie renouvelable

Commande d'un convertisseur DC/DC pour l'application pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Proposé et dirigé : Dr. SAADI Aicha.

ملخص

الخلية الوقودية هي نظام توليد الطاقة حيث يستفيد من تفاعل كيميائي بين الأكسجين والهيدروجين لإنتاج الكهرباء ولأنه أقل تلوثا بالمقارنة مع الوقود الاحفوري أنظمة الخلية الوقودية تشهد تطورا كبيرا بالنسبة لكثير من تطبيقات الطاقة.

ومع ذلك الخلية الوقودية لديها إنتاج جهد منخفض واستجابة بطيئة بسبب ديناميكية الدارات الخارجية المساعدة لهذا السبب لا بد من محول للجهد مستمر / مستمر لرفع الجهد المنخفض لتشغيل الحمولة. هذا العمل يهدف من جهة إلى نمذجة وتحديد خصائص الخلية الوقودية تجريبيا (تحقيق النموذج الستاتيكي والديناميكي تجريبيا) من نوع غشاء البليمير الكهربائي ومن جهة أخرى إلى دراسة وتصميم وكذلك السيطرة على محول جهد مستمر / مستمر من نوع غير معزول لتطبيقات الخلية الوقودية. المحول المقترح من «élévateur» و «Sepic».

يستند اختبار كل محول على الضياعات ومردود التحويل مع ضمان تحويل مرتفع وتموج تيار المدخل منخفض. يتم بالمحول المقترح بواسطة حلقة تحكم بالجهد خطية من نوع PI.

Résumé

La pile à combustible est un système de production d'énergie, qui tire profit de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène pour produire de l'électricité. En raison de leur pollution moindre par rapport aux carburants fossiles, les systèmes pile à combustible connaissent un développement important pour de nombreuses applications de puissance.

Cependant, une PAC a une faible tension de sortie et une réponse lente en raison de la dynamique de ses auxiliaires. Pour cette raison, un convertisseur DC / DC est nécessaire pour élever cette tension afin de pouvoir alimenter nos charges.

Ce travail concerne, d'une part la modélisation et la caractérisation expérimentale d'une pile à combustible de type PEMFC, Polymère Electrolyte Membrane Fuel Cell (validation un modèle statique et un modèle dynamique expérimentalement), et d'autre part l'étude, le dimensionnement et la commande d'un convertisseur DC/DC non isolé pour les applications pile à combustible. Le convertisseur proposé est de type élévateur de tension « élévateur » et « Sepic ». Le choix de chaque convertisseur est basé sur les pertes et le rendement de celui-ci, avec une tension de sortie élevée et une faible ondulation du courant d'entrée. La commande du convertisseur est assurée par une boucle de tension par un régulateur linéaire PI.

Les mots clés :

Pile à combustible PEM, Modélisation (modèles statiques et dynamiques), Caractérisation expérimentale, Convertisseur DC/DC (élévateur et Sepic), ondulation du courant, régulateur PI.



Dédicace

Avant tous, je remercie ALLAH

Le tout puissant de m'avoir donné

Le courage et la patience

Pour réaliser ce travail malgré

Toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère source de tendresse

A mon très cher père, qui m'encourage

Dans les instants délicats

A mes chers frères (Nacer et Safi eddine)

A mes chères sœurs (Hanna et Maroua)

A toute ma famille

*A tous mes amis particulièrement : iman, Sara, Sabrina, Wafa, iman,
chaïma.*



Amal

Remerciement

Avant tout je remercie *ALLAH* le tout puissant car sans à lui je ne serai pas là.

Je veux manifester ici ma reconnaissance la plus profonde à *Mlle. Saadi Aicha* ; l'encadreur de mon mémoire, pour les conseils précieux et la remarquable patience qu'il m'a accordés tout au long de ce travail qui était réaliser.

Je remercie *Mme. Derradji belloum Karima*, qu'elle m'a fait l'honneur d'en assurer la présidence de jury.

J'adresse mon sincère remerciement à *Mr. Saadi Ramzi* ; pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinateur de ce travail.

Table des matières

Liste des Figures	III
Liste des Tableaux	VI
Introduction générale	1
Chapitre I :Généralité et modélisation de pile à combustible PEM	
I.1 Introduction	5
I.1.1 Historique sur la pile à combustible.....	6
I.2 Différentes types de la pile à combustible.....	6
I.3 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC.....	8
I.3.1 Généralité sur la pile de type PEM	8
I.3.2 Structure interne d'une pile de type PEM.....	9
I.3.3 Principe de fonctionnement	13
I.4 Système de pile à combustible PEM	17
I.4.1 Un cœur de pile à combustible PEM.....	17
I.4.2 Un circuit d'alimentation en hydrogène	17
I.4.3 Un circuit d'alimentation en air (oxygène)	17
I.4.4 Un circuit de refroidissement.....	17
I.4.5 Un circuit d'humidification	18
I.4.6 Des convertisseurs statiques	18
I.4.7 Un système de contrôle.....	18
I.5 Circuit d'alimentation en hydrogène d'une pile PEM.....	19
I.5.1 Production d'hydrogène à partir d'une électrolyse de l'eau	19
I.5.2 Électrolyseur PEM.....	19
I.6 Modélisation d'une pile à combustible PEM	20
I.6.1 Modèle statique de Larminie-Dicks.....	21
I.6.2 Modèle dynamique de la spectroscopie d'impédance	23
I.7 Conclusion.....	25
Chapitre II :Les convertisseurs DC/DC	
II.1 Introduction	27
II.2. Interrupteurs à semi-conducteurs	27
II.3 Généralité sur les convertisseurs DC/DC (hacheurs).....	29
II.4 Différents topologies des convertisseurs DC/DC	31
II.4.1 Convertisseurs DC/DC non-isolé de la source	32

II.4.1.1 Hypothèse	32
II.4.1.2 Mode de fonctionnement	33
II.4.1.3 Convertisseur élévateur « BOOST »	33
II.4.1.4. Convertisseur DC/DC « SEPIC »	39
II.5 Les pertes dans les convertisseurs DC/DC.....	46
II.5.1 Pertes dans les inductances	46
II.5.2 Pertes dans les composants semi-conducteurs.....	47
II.6 Modulation de largeur d'impulsions MLI.....	48
II.7 Conclusion.....	49
Chapitre III : Commande des convertisseurs DC/DC	
III.1 Introduction.....	51
III.2 Modélisation linéaire de convertisseur DC/DC « élévateur »	51
III.3 Commande par le régulateur PI	53
III.3.1 Présentation de régulateur proportionnel intégral PI.....	53
III.3.2 Caractéristiques de régulateur	54
III.3.3 Méthode Matlab « Sisotool »	55
III.4 Conclusion	59
Chapitre IV :Résultats expérimentales et simulation	
IV.1Introduction	61
IV.2 Présentation de la maquette	61
IV.2.1 Production d'hydrogène.....	61
IV.3 Résultats de simulation de convertisseur DC/DC en boucle ouverte	75
IV.3.1 Convertisseur DC/DC « élévateur ».....	75
IV.3.2 Convertisseur DC/DC « Sepic »	80
IV.5 Conclusion	86
Conclusion Générale.....	88
Annexe.....	91

Liste des Figures

Titre	Page
Figure I.1 : Première Pile à Combustible réalisée par William Grove.....	5
Figure I.2 : Différents types de pile à combustible.....	8
Figure I.3: Structure interne d'une cellule élémentaire de pile à combustible de type PEM.....	9
Figure I.4 : Plaque bipolaire.....	11
Figure I.5: Structure chimique d'une membrane de type Nafion à 117.....	11
Figure I.6 : Schéma d'une couche de diffusion.....	13
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	14
Figure I.8: principe de mitochondrie est similaire avec le principe de pile,.....	15
Figure I.9: Quelques applications de pile à combustible, (a) La Hyundai ix35 FCEV est le premier véhicule à pile à combustible produit en série, (b) Unité de .. Pile à combustible, (c) Pile à combustible au méthanol Ultracell	15
Figure I.10 : système pile à combustible,.....	18
Figure I.11 : Diagramme simplifié d'un électrolyseur de type PEM.....	20
Figure I.12 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEM.....	22
Figure I.18 : Principe de linéarisation autour d'un point de fonctionnement.....	24
Figure I.19: Modèle dynamique simplifié d'une pile à combustible PEM.....	25
Figure II.1: Schéma de principe d'un hacheur.....	29
Figure II.2 : Transistor IGBT : (a) symbole, (b) Structure de l'IGBT.....	30
Figure II.3: Différentes convertisseurs DC/DC.....	32
Figure II.4: Schéma de principe d'un convertisseur DC/DC élévateur.....	34
Figure II.5: Fonctionnement d'un hacheur élévateur en phase 1.....	35
Figure II.6: Fonctionnement d'un hacheur élévateur en phase 2.....	36
Figure II.7 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique d'un élévateur.....	37
Figure II.8 : Schéma bloc d'un convertisseur élévateur sur Matlab/Simulink.....	38
Figure II.9 : Convertisseur SEPIC.....	40
Figure II.10 : SEPIC avec couplage des inductances.....	41
Figure II.11 : SEPIC isolé.....	41

Figure II.12: Fonctionnement de Sepic en phase 1.....	42
Figure II.13: Fonctionnement de Sepic en phase 2.....	43
Figure II.14 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.....	44
Figure II.15: Commutation de L'IGBT.....	48
Figure III.1: Diagramme de Bode de la boucle de tension.....	52
Figure III.2: Réponse en boucle ouverte.....	52
Figure III.3: Structure de la commande par deux boucles de contrôle.....	53
Figure III.4 : schéma bloc d'un régulateur PI.....	54
Figure III.5: Fenêtre de l'outil Sisotool.....	55
Figure III.6 : choix de la boucle de régulation.....	56
Figure III.7 : Définition du correcteur.....	57
Figure III.8 : menu de réglage des paramètres.....	57
Figure III.9 : choix les diagrammes d'analyse.....	58
Figure III.10 : La réponse de la tension de sortie.....	58
Figure III.11 : Diagrammes de Bode du correcteur PI.....	59
Figure IV.1 : Cycle de production d'électricité à partir d'une pile à combustible...	62
Figure IV.2: Mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une énergie électrique.....	62
Figure IV.3 : Modèle électrique équivalent simplifié de la cellule photovoltaïque..	62
Figure IV.4 : Montage pour relever la caractéristique électrique de panneau solaire.....	64
Figure IV.5 : L'allure de la caractéristique (V_{pv} - I_{pv}) du panneau.....	65
Figure IV.6 : L'allure de la caractéristique (V_{pv} - P_{pv}) du panneau.....	66
Figure IV.7 : Production d'hydrogène par une électrolyse PEM à partir d'énergie solaire.....	67
Figure IV.8 : Pile à combustible avec une charge variable.....	68
Figure IV.9 : Influence de la résistance de la membrane sur la chute ohmique et sur la tension totale PàC (valeur de la résistance : $2R_m$, R_m et $0.5R_m$).....	69
Figure IV.10 : Influence du paramètre A sur les pertes d'activation et la tension totale de la pile (valeur du coefficient : $2A$, A et $0.5A$).....	69
Figure IV.11: Influence du courant d'échange i_0 sur les pertes d'activation et la tension totale de la pile (valeur du coefficient : $2i_0$, i_0 et $0.5 i_0$).....	70

Figure 1.12 : Influence du paramètre B sur les pertes de transport de matière et la tension totale de la pile (valeur du coefficient : 2B, B et 0.5B).....	70
Figure IV.13 : Influence du courant limite Ilim sur les pertes de transport de matière et sur la tension totale Pile (valeur du courant limite Ilim : 2Ilim, Ilim et 0.5Ilim).....	71
Figure IV.14 : L'allure de la caractéristique (I -V) de la pile.....	72
Figure IV.15 : L'allure de la caractéristique (I -P) de la pile.....	72
Figure IV.16 : Circuit électrique dynamique équivalent de la pile de simulation...	73
Figure IV.17 : Résultat du courant de modèle dynamique de la pile.....	74
Figure IV.18 : Résultat de la tension de modèle dynamique de la pile.....	74
Figure IV.19: Schéma bloc de convertisseur DC/DC élévateur.....	77
Figure IV.20: L'allure de la tension de charge Vs.....	78
Figure IV.21: L'allure du courant de charge Is.....	78
Figure IV.22:L'allure de courant d'inductance I_L	79
Figure IV.23: Schéma bloc de convertisseur DC/DC Sepic.....	81
Figure IV.24 : L'allure de tension de charge Vs.....	82
Figure IV.25 : L'allure de courant de charge Is.....	82
Figure IV.26 : L'allure de courant dans l'inductance I_L	83
Figure IV.27 : les allures des tensions du Sepic (V_e, V_s) pour α variable.....	84
Figure IV.28: Schéma bloc de convertisseur DC/DC élévateur en boucle fermée..	84
Figure IV.29 :L'allure de tension de charge Vs avec la référence.....	85
Figure IV.30:L'allure de courant de charge Is.....	85
Figure IV.31:L'allure de courant d'inductance I_L	86

Liste des Tableaux

Titre	page
Tableau I.1 : Historique sur la pile à combustible.....	6
Tableau I.2 : Les différents types de pile à combustible.....	7
Tableau I.3 : avantages et inconvénients de pile à combustible PEM.....	16
Tableau II.1 : Différentes interrupteurs à semi-conducteur.....	28
Tableau IV.1 : Paramètres de panneau solaire.....	65
Tableau IV.2 : Dimensionnement de l'électrolyseur.....	67
Tableau IV.3 : Paramètres du modèle statique de Larminie-Dick.....	71
Tableau IV.4 : Paramètres du modèle dynamique.....	74

Introduction générale

L'énergie électrique est aujourd'hui la forme la plus aisée à exploiter mais avant de la consommer il aura fallu la produire, la transporter, puis la distribuer chaque consommateur. La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des ressources fossiles, qui donnent une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable de ces ressources, attendu vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers la source de production renouvelable (énergie solaire, éolienne, hydraulique ...), pour cela centre sur l'étude de la pile à combustible, [31].

Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique transformant de l'énergie chimique d'un combustible, en énergie électrique à partir d'une réaction chimique oxydo-réduction. Une des situations idéales visées serait la production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau moyennant les énergies renouvelables tel l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique. L'une des technologies existantes la pile à membrane échangeuse de proton PEM est la plus prometteuse pour la production d'énergie.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du contrôle d'une source utilisant un bus continu, convertisseurs, pile à combustible pour alimenter une charge.

Il est équipé des éléments suivants :

- Une pile à combustible de type PEM, utilisé comme source ;
- Un convertisseur DC/DC de type élévateur de tension ;
- Une charge résistive.

L'adaptation des niveaux de tension entre la source et la charge nécessite un convertisseur statique de type élévateur, permettant de maintenir constante la tension du bus continu à une valeur constante et d'imposer la puissance ou le courant demandé par la charge.

L'objectif de notre travail est de faire la modélisation de la pile à combustible type PEM, puis valider des essais expérimentaux avec une maquette de marque Horizon pour obtenir leurs caractéristiques statiques et dynamique. Ensuite, étudier la conception et la commande d'un convertisseur DC/DC utilisé pour connecter une pile à combustible de type PEM à un bus continu présentant une faible ondulation de courant d'entrée ainsi qu'une faible ondulation de tension de sortie.

Organisation de la thèse

Cette thèse est partagée en introduction générale, quatre chapitres et en conclusion générale.

Au le premier chapitre, on fait une description générale sur la pile à combustible, et le principe de fonctionnement et les différents éléments qui les constituent, les applications, puis nous présenterons les différents circuits auxiliaires du système piles à combustible, nécessaire à son fonctionnement. Ensuite, la description d'une méthode de production d'hydrogène qui est l'électrolyse d'eau. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacré pour la modélisation de la pile.

Le deuxième chapitre a été dédié aux convertisseurs DC/DC, les différents types pour l'application pile à combustible. Nous nous intéressons ensuite aux convertisseurs non-isolé (Sepic et élévateur) qui permet de réduire l'ondulation du courant d'entrée ainsi que l'ondulation de la tension de sortie. Enfin nous terminerons ce chapitre par le dimensionnement du convertisseur.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la modélisation et commande du convertisseur DC/DC, une stratégie de commande est présentée : commande par régulateur PI.

Le dernier chapitre nous présenterons trois parties de travail sont, d'abord la première partie, il commence par une description de la maquette sur laquelle ce travail a été élaboré. Une caractérisation d'un panneau solaire (qui sert à alimenter l'électrolyseur) est faite ainsi que celle de la pile à combustible. Ce chapitre se consacrer des deux modèles étudiés, le statique ainsi que le modèle dynamique de la spectroscopie d'impédance.

Puis, la deuxième partie a consacré les résultats de la simulation de notre convertisseur « élévateur » et le convertisseur « Sepic » en boucle ouverte.

Ensuite, la troisième la stratégie de commande est simulée sur Matlab/Simulink une commande avec un régulateur de type PI.

Enfin, dans une dernière partie, le travail s'est achevé par une conclusion générale, une annexe qui décrit les interrupteurs à semi-conducteur, ainsi que les perspectives envisageables pour la poursuite de ce travail.

Chapitre I :
Généralité et modélisation de
pile à combustible PEM

I.1 Introduction

La pile à combustible est un générateur électrochimique qui utilise des ressources renouvelables comme combustible (hydrogène) et comburant (oxygène), afin de produire une énergie électrique propre avec un rendement énergétique élevé. Son principe de fonctionnement a été découvert par Sir William Robert Grove nommé « le Père de la pile à combustible » en 1839. Celui-ci expérimente la première cellule électrochimique hydrogène-oxygène d'une pile à combustible, c'est-à-dire le fonctionnement d'une cellule à électrolyse inversée, figure I.1, [1].

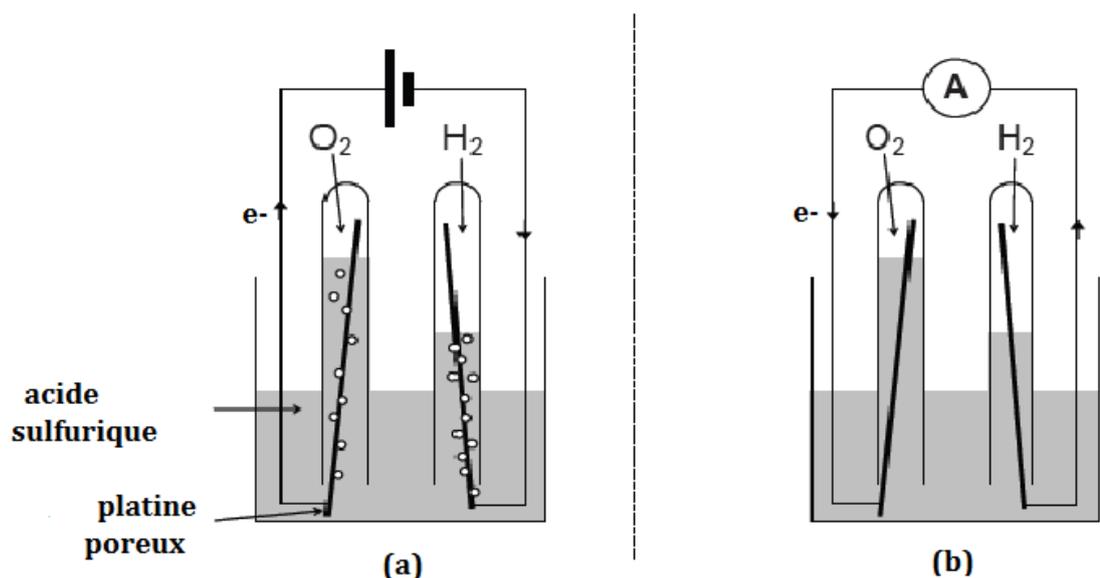


Figure I.1 : Première Pile à Combustible réalisée par William Grove [2] :

(a) : Electrolyse de l'eau, (b) : pile à combustible.

L'électrolyse décompose la molécule d'eau H_2O en hydrogène H_2 et en oxygène O_2 (énergie chimique) grâce à l'application d'une différence de potentiel entre l'anode et la cathode. A cet effet, les deux éléments résultants H_2 et O_2 sont assemblés dans les tubes à essais, selon le schéma de principe de la Figure I.1. (a).

Par conséquent, dans une pile à combustible l'énergie chimique est convertie directement en énergie électrique à partir d'une réaction d'oxydo-réduction entre l'hydrogène et l'oxygène figure I.1. (b).

I.1.1 Historique sur la pile à combustible

1800	W. Nicholson et Carlisle décrivent le processus d'utilisation de l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène.
1836	Démonstration de la pile à combustible par William Grove .
1889	Des équipes différentes : L. Mond et C. Wright et C. Thompson / L. Cailleton et L. Colardeau effectuent diverses expériences avec des piles à combustible.
1893	F. Ostwald décrit le rôle des différents éléments d'une pile à combustible.
1896	W. Jacques construit une batterie en carbone.
1900	E. Baur et ses étudiants conduisent des expériences sur des piles à combustible à haute température.
1960	T. Grubb et L. Niedrach inventent la pile PEMFC chez General Electric.
1990	Des recherches intensives ont lieu à travers le monde sur différents types de piles à combustible.

Tableau I.1 : Historique sur la pile à combustible.

I.2 Différentes types de la pile à combustible

Il existe plusieurs technologies de la pile à combustible qui se différencient suivant :

- 1- **La nature de leur Electrolyte** : il existe électrolyte solide et liquide ;
- 2- **La valeur du PH de l'électrolyte** : On distingue
 - Des électrolytes acides (conduisant les ions positifs H^+ de l'anode vers à la cathode) ;
 - Des électrolytes basiques (conduisant les anions OH^- , O^{2-} , CO_3^{2-} de la cathode vers à l'anode) [3].
- 3- **Le domaine d'application** :
 - Les transports : voitures électriques, bus, avions ;
 - Les appareils portables : ordinateurs, téléphones, DVD, etc.
 - La production stationnaire d'électricité et la cogénération chaleur/électricité ;
- 4- **La température de fonctionnement** :
 - Les piles fonctionnant à haute température (entre 600 et 1000°C) ;
 - A moyenne température (vers 200°C) ;
 - A basse température (en dessous de 100°C).

5- **Leur puissance** : On distingue

- Des piles à faible puissance ;
- Des piles à moyenne puissance ;
- Des piles à grande puissance.

6- **Leur architecture** :

- Technologie planaire ;
- Technologie cylindrique ;
- Technologie monolithique ;
- Technologie intermédiaire.

7- **Leur rendement.**

La figure I.2 représente une classification des différents types de pile à combustible selon la température de fonctionnement ; les différents types de PAC sont rappelés dans le tableau I.2.

	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Température	Basse température				Haute température	
	60 – 90°C	90 – 120°C	50 – 250°C	160 – 220°C	600 – 700°C	800 – 1000°C
Electrolyte	Acide H ⁺	Acide H ⁺	Basique OH ⁻	Acide H ⁺	Basique CO ₃ ²⁻	Basique O ²⁻
	Polymère perfluoré (Solide)	Polymère (Solide)	Hydroxyde de Potassium (KOH) liquide	Acide phosphorique (Liquide)	Carbonate de lithium potassium fondu (Liquide)	Céramique solide
Catalyseur	platine	platine	Platine-Nickel	platine	Nickel et l'oxyde de Nickel	Cermet Nickel zircon
Combustible	Hydrogène pur ou reformé	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène (gaz naturel reformé)	Méthane Hydrogène ou gaz naturel	Hydrogène (gaz naturel)
Puissance	1 W à 250 KW	mW à 100 KW	10KW à 50 MW	100 KW à 200 MW	500 KW à 10 MW	1 KW à 10 MW
Rendement	30 – 50 %	20 – 30 %	40 – 60 %	36 – 45 %	50 – 60 %	50 – 70%
Application	Transport, portables, spatial	Mobile, transport	Spatial, transport	Transport, stationnaire	stationnaire	Stationnaire, transport

Tableau I.2 : Les différents types de pile à combustible [2 ,6]

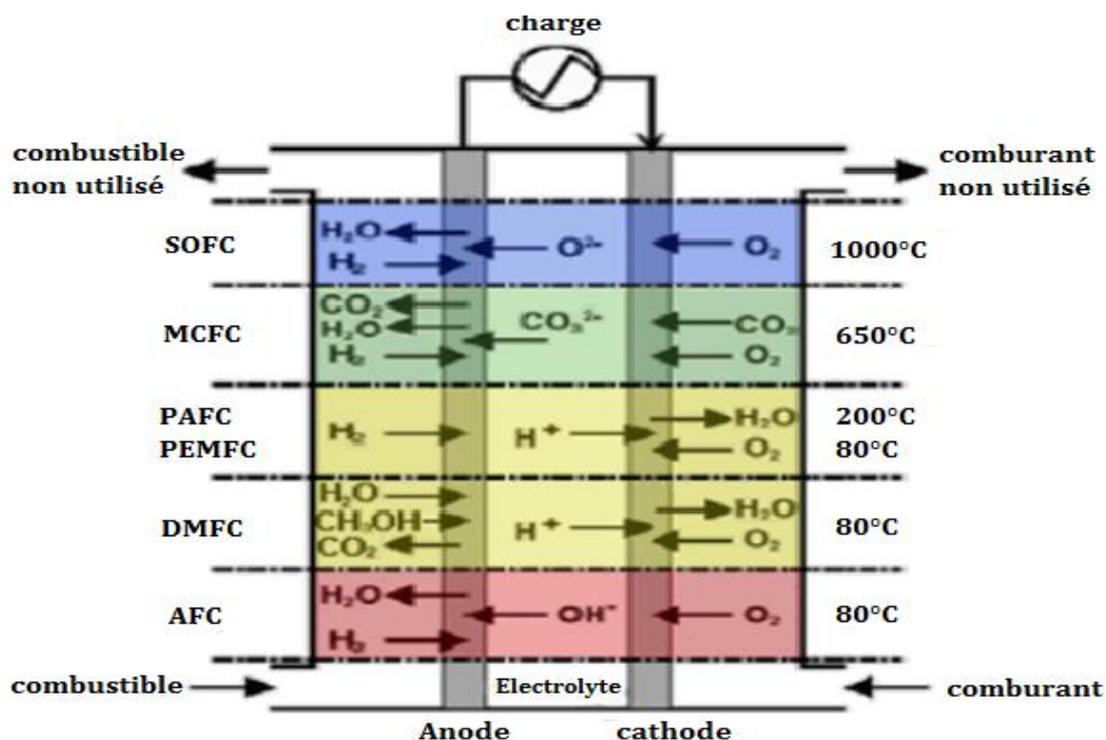


Figure I.2 : Différents types de pile à combustible [5].

I.3 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC

I.3.1 Généralité sur la pile de type PEM

Au début des années 1960, la pile PEM a été inventée par Willard Thomas Grubb et Lee Niedrach de General Electric. De membrane en polystyrène sulfoné était initialement utilisée comme électrolyte, mais elle a été remplacée en 1966 par la membrane perfluorosulfonée, Nafion, fabriquée par la société Dupont de Nemours, supérieure en performance et durabilité [10]. Cette technologie retient l'attention pour trois raisons essentielles :

- Leur température de fonctionnement relativement basse « < 100°C » laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide, une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante (meilleure gestion thermique) et une grande souplesse de fonctionnement ;
- Elle est, ensuite, insensible à la présence de CO_2 dans l'air, contrairement à la filière alcaline ;
- Elle est de technologie tout solide (spécialement la membrane en polymère), ce qui est

Plus attrayant pour des raisons essentiellement liées à des contraintes d'industrialisation en grande série et à la fiabilité : durée de vie sensiblement supérieure aux filières à électrolyte liquide.

I.3.2 Structure interne d'une pile de type PEM

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont assemblées en série électrode-membrane-électrode (EME). Une cellule d'une pile à combustible est constituée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, on trouve deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires (figure I.3) [11].

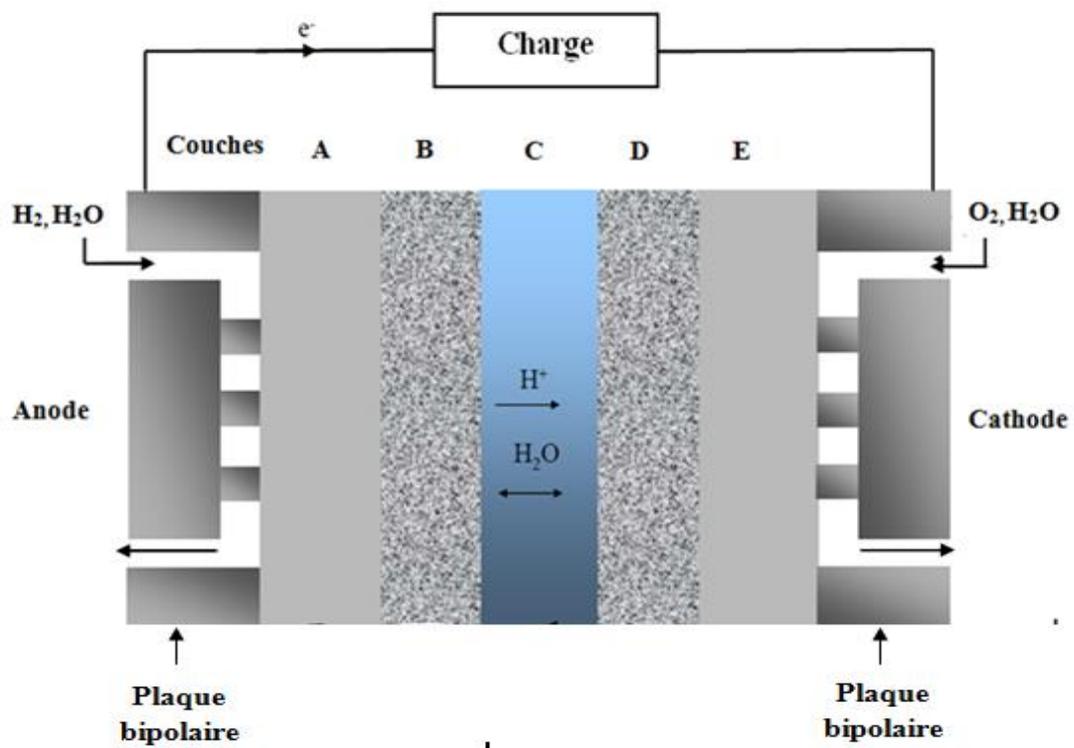


Figure I.3: Structure interne d'une cellule élémentaire de pile à combustible de type PEM.

A, E : Couche de diffusion ; B, D : Couche d'activation ; C : Membrane échangeuse de protons [15].

Chaque élément de cellule possède un rôle distinct comme suit :

- Deux plaques bipolaires dont le rôle principal est l'arrivée des gaz et la collecte du courant. La distribution des gaz peut se faire par le biais de canaux ou par une interface poreuse ;
- Deux électrodes qui, outre leurs propriétés diffusives vis-à-vis des gaz, sont le siège proprement dit des réactions électrochimiques au niveau de la zone active catalysée ;

- La membrane électrolytique, qui assure la migration des ions hydronium H^+ de l'anode vers à la cathode ainsi que des transferts d'eau par électro-osmose et diffusion. A cela, il convient d'adjoindre la présence de joints assurant l'étanchéité de l'ensemble représenté [12]. Les trois éléments constitutifs d'une cellule : la membrane, les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques bipolaires.

I.3.2.1 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires se situent entre deux cellules et forment la frontière de chacune, Elles interviennent dans leur tenue mécanique, elles sont en contact avec la surface des électrodes et permettent sur toute la surface de l'électrode :

- La collecte des électrons de l'anode d'une cellule à la cathode, elles jouent un rôle dans la connexion électrique en série des cellules leurs conductivités électriques doit être élevée possible.
- La distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- L'évacuation des produits formés (l'eau à l'anode) et la chaleur vers les canaux de refroidissement par la réaction.
- Approvisionner en réactants (hydrogène, oxygène ou air de part et d'autre de la plaque) à travers les canaux vers la couche de diffusion.

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder une forte conductivité électrique, une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons pour assurer la séparation des réactifs entre deux cellules élémentaires consécutives et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de pile. Une bonne stabilité chimique est requise pour éviter la corrosion en présence d'eau ou d'acides et une bonne résistance aux corrosions. Les matériaux utilisés pour la fabrication des plaques le graphite ou le métal [13 ,7].

Mais les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz qui permettent le passage des gaz le long de la surface. Sur le dos de chaque plaque et sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. C'est pourquoi, de nombreux développements sont entrepris, notamment vers deux nouveaux concepts de plaques bipolaires : les composites organiques et les tôles métalliques.



Figure I.4 : Plaque bipolaire [12].

I.3.2.3 Assemblage Membrane - Electrodes

L'assemblage membrane-électrodes est le cœur de la pile à combustible. Il se compose d'une membrane d'électrolyte de polymère solide serrée entre deux électrodes de carbone poreuses. Un catalyseur à base de platine est intégré entre la membrane et les électrodes.

a. Membrane

La membrane est située entre deux zones actives de deux électrodes. Dans la pile de type PEM, elle constitue d'un matériau polymère perfluoré sur lequel assurent la conduction protonique (la migration des protons H^+) de l'anode vers la cathode sous l'influence d'un champ électrique. Elles servent également de séparateur des réactifs et d'isolant électronique : sa perméabilité aux gaz doit donc être faible. Le matériau standard utilisé pour fabriquer la membrane de la pile PEM est de type Nafion basé sur du Téflon fluoré dont la formule est donnée dans la figure (I.5).

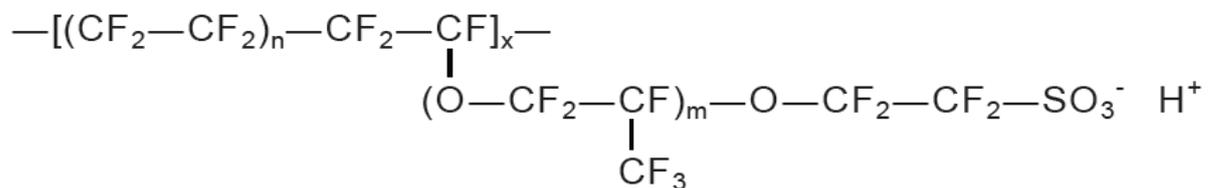


Figure I.5: Structure chimique d'une membrane de type Nafion à 117 [13].

Le Nafion est une membrane PFSI (ionomères perfluorosulfonés). Elle est constituée d'un squelette de PTFE sur lequel sont greffées des chaînes perfluorosulfonées. Le Nafion présente des analogies avec le Téflon : il est stable thermiquement et inerte terminaux des chaînes pendantes [14].

b. Electrodes

Les électrodes ont une triple fonction :

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

Les électrodes sont le siège des réactions d'oxydation de l'hydrogène et de la réduction de l'oxygène. Les électrodes sont à base d'un matériau carboné sur lequel sont déposés des grains de platine jouant le rôle de catalyseur. Leur épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Elles doivent donc offrir la plus grande surface d'échange possible avec les gaz. Elles sont constituées d'un feutre ou d'un papier de carbone (100 à 300 μm d'épaisseur) dont la face en contact avec l'électrolyte est enduite d'une pâte contenant du carbone platiné, d'un polymère hydrophobe : du poly tétrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon).

Les électrodes sont constituées de deux couches la couche de diffusion et la couche d'activation [11].

b.1 Couche de diffusion

Les couches de diffusion assurent une bonne distribution des gaz sur toute la surface de réaction, qui est la surface active de l'électrode. Elles doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à la présence d'eau. Les couches de diffusion sont faites de matériau poreux, conducteur électrique et thermique et ayant une bonne inertie chimique. Elles sont généralement constituées de papier, de feutre ou de tissu de carbone. La couche est ensuite couramment recouverte d'une couche hydrophobe, afin d'améliorer la gestion de l'eau dans la pile [11].

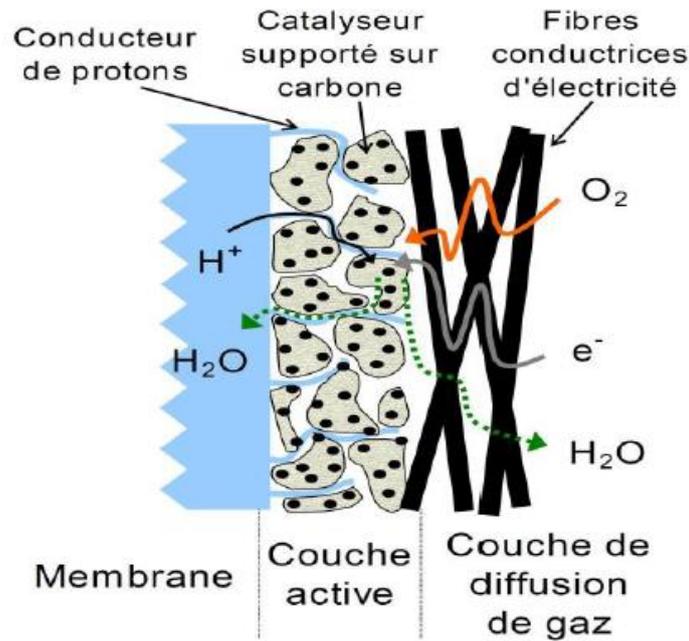


Figure I.6 : Schéma d'une couche de diffusion.

b.2. Couche d'activation

La zone active est le lieu des réactions électrochimiques. Elle correspond à la zone de couplage entre les phénomènes électriques, chimiques et le transfert de masse. Elle doit à la fois assurer le transport des pièces dissoutes en solution par diffusion, la migration des protons et le transfert électronique par le biais du carbone. La grande difficulté avec laquelle se réalisent les différents processus de diffusion et de réaction se traduit par les pertes d'activation à la cathode et à l'anode. C'est pour cela que l'utilisation du platine est nécessaire afin d'augmenter les vitesses ou cinétiques des réactions chimiques à l'interface électrolyte – catalyseur. Ces vitesses peuvent être 10 fois plus rapides en présence du platine [14].

I.3.3 Principe de fonctionnement

Une Pile à membrane échangeuse de protons PEMFC ou pile à combustible à électrolyte polymère PEFC est un convertisseur électrochimique transformant de l'énergie chimique d'un combustible, en énergie électrique à partir d'une réaction chimique oxydo-réduction (en présence de platine) à basse température (<100 °C).

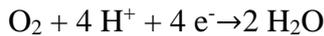
L'hydrogène est oxydé à l'anode pour donner des protons et des électrons selon la réaction d'oxydation suivante :

À l'anode couple H^+/H_2 (l'électrode négative) :



Les électrons sont prélevés du circuit électrique externe de la pile pour rejoindre la cathode alors que les protons sont migrés à travers la membrane, conducteur protonique imperméable aux électrons et isolant les réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode où ils se combinent à l'oxygène et aux électrons pour production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon la réaction de réduction suivante :

À la cathode couple O_2 / H_2O (l'électrode positive) :



La réaction globale

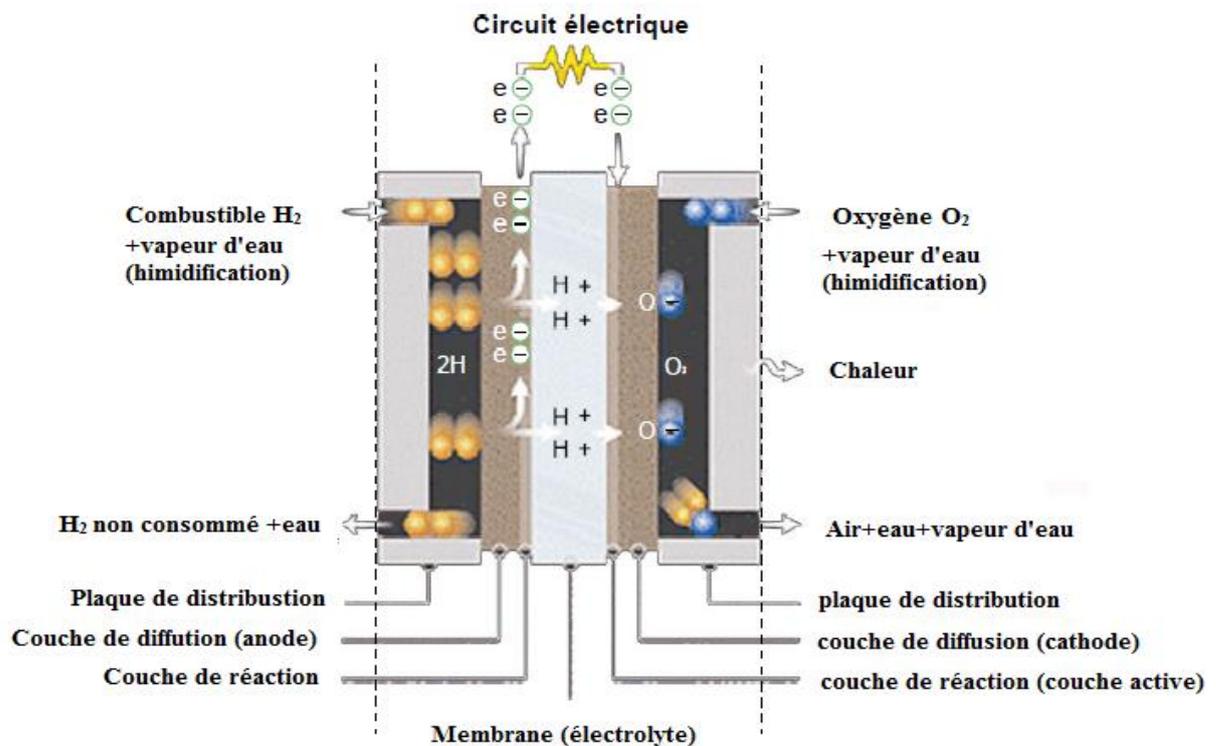
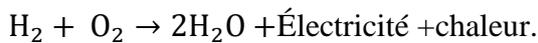


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

La circulation déséquilibrée des électrons entre lesquels créent un pôle positif et un pôle négatif c'est-à-dire une différence de potentielle de l'ordre d'un volt, produisant ainsi de l'électricité à travers une charge.

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être similaire à principe de fonctionnement mitochondrie est représentée dans la figure I.8.

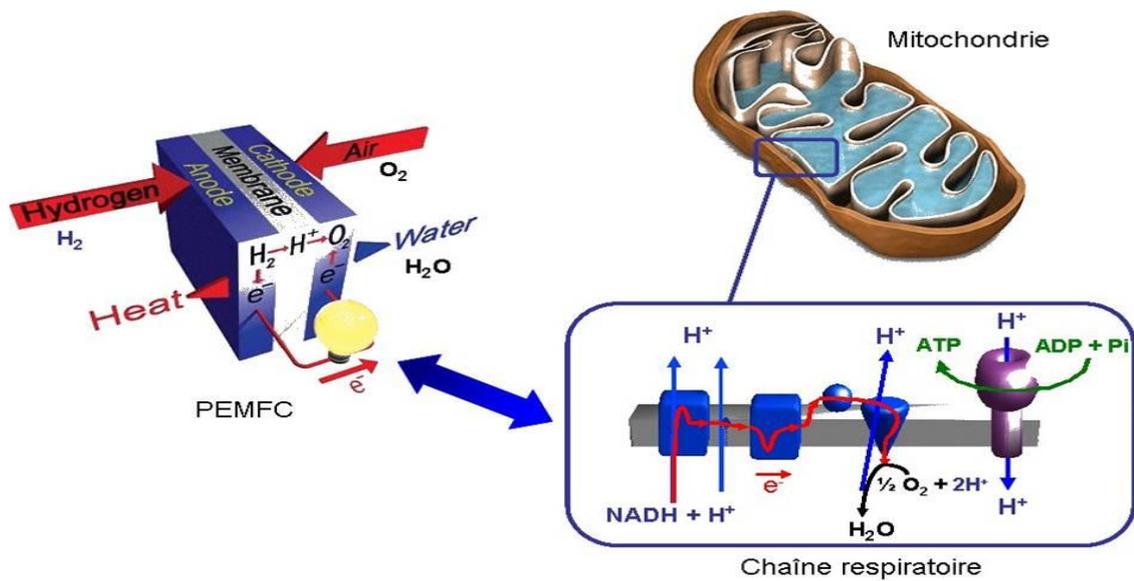


Figure I.8: principe de mitochondrie est similaire avec le principe de pile, [6].

La PAC de type PEM intéresse les industriels pour des applications stationnaires (centaines de KW) dont plusieurs prototypes sont actuellement en fonctionnement dans plusieurs pays du monde peuvent être au niveau de : l'une maison individuelle, d'un bâtiment. Les applications pour le transport, tels que les automobiles, les autobus, les véhicules utilitaires, des scooters, des vélos et d'une communauté l'industrie du portables (jusqu'à 100kw) et transportables (de l'ordre de 100KW).



Figure I.9: Quelques applications de pile à combustible, (a) La Hyundai ix35 FECV est le premier véhicule à pile à combustible produit en série, (b) Unité de Pile à combustible, (c) Pile à combustible au méthanol Ultracell.

I.3.4 Avantages et inconvénients des piles à combustible de type PEM

Dans ce travail s'intéresse tout particulièrement à la pile à électrolyte polymère PEMFC (Polymère Electrolyte Membrane Fuel Cell en anglais). Le choix s'est porté sur cette technologie pour plusieurs avantages, mais elle présente encore des problèmes qui doivent être réglés. Ces avantages et inconvénients sont rappelés dans le tableau I.3, [8] et [9].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Une densité de puissance élevée (rendement énergétique élevé, 60% pour la pile et 40% pour le système) ; • Un temps de démarrage rapide ; • La limitation des problèmes de corrosion qu'elle procure (L'électrolyte est solide) ; • La simplicité de conception ; • Une compacité des empilements et une flexibilité par rapport à la géométrie envisagée ; • Une grande souplesse de fonctionnement ; • Un générateur propre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il y a une intolérance de l'anode au CO ; • Les matériaux (platine) actuellement utilisés pour la fabrication des plaques bipolaires, membrane et catalyseur sont très coûteux ; • La gestion de l'eau et de la chaleur est très problématique ; • Leur faible température de fonctionnement ne permet pas de bien valoriser la chaleur ; • Une durée de vie encore faible en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées.

Tableau I.2 : avantages et inconvénients de pile à combustible PEM

I.3.5 Dimensionnement d'une pile à combustible PEM

Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un système étudié, le concepteur dispose de deux degrés de liberté.

- Le nombre N de cellules mises en série qui fixe la tension du stack ;
- La surface A d'une cellule qui fixe le courant du stack.

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de piles à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir.

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante :

$$P_{st} = N \cdot V \cdot J \cdot A_s$$

Avec :

P_{st} : Puissance électrique brute du stack (W) ;

N : Nombre de cellules de l'empilement ;

V : Tension par cellule (V) ;

J : Densité de courant (A/m^2) ;

As : Surface active des cellules (m^2).

V et J sont liées par la caractéristique tension /courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée. Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires. Il est intéressant d'avoir la tension $V_{st} = N_{cell} \times E_{cell}$ la plus élevée et donc le courant $I_{st} = j \times S_{Pile}$ le plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule.

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

- D'augmenter le nombre de cellules jusqu'à la limite technologique actuelle.
- D'augmenter la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. Ce choix va en outre dans le sens d'un bon rendement de pile.

I.4 Système de pile à combustible PEM

Le stack(ou cœur de pile) est obtenu par l'empilement en série des cellules élémentaires, pour donner à la sortie des niveaux de tension et de courant qui sont bien adaptés pour les applications. Un stack de pile PEM nécessite un grand nombre d'auxiliaires indispensables pour assurer son bon fonctionnement (figure I.10). Ces auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique [3], [9].

Le système pile à combustible (cœur de pile et auxiliaires) est constitué de :

I.4.1 Un cœur de pile à combustible PEM ;

I.4.2 Un circuit d'alimentation en hydrogène, ce circuit a pour fonction d'alimenter le compartiment anodique de la PAC en combustible. la plupart des piles à combustibles utilisent de l'hydrogène comme combustible ;

I.4.3 Un circuit d'alimentation en air (oxygène), l'oxygène est l'un des vecteurs indispensables au fonctionnement d'une pile à combustible. Donc ce circuit permet d'alimenter en comburant le compartiment cathodique de la pile. Comme pour l'hydrogène, le comburant (l'oxygène pur ou l'air) peut être stocké dans des réservoirs sous pression ;

I.4.4 Un circuit de refroidissement, qui permet la régulation de la température de fonctionnement de la pile (environ $80^\circ C$ pour pile PEM) et l'évacuer la chaleur issue de la réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène ;

I.4.5 Un circuit d'humidification, comme son nom l'indique, permet d'humidifier en permanence les réactifs (hydrogène et/ou air) qui entrent dans la pile. Dans les piles de type PEM, la teneur en eau de la membrane doit être constamment contrôlée, afin de garantir la conductivité ionique de celle-ci et de favoriser les transports des protons H^+ de l'anode (-) vers la cathode (+) ;

I.4.6 Des convertisseurs statiques, permet d'établir l'interface entre la PAC et le bus continu et pour faire la gestion d'énergie dans le système contenant la PAC. La tension de la pile relativement faible varie en fonction du courant débité, donc Pour cet objectif, le convertisseur choisi est généralement de type continu-continu, élévateur de tension et unidirectionnel en courant ;

I.4.7 Un système de contrôle, son rôle est de contrôler les flux d'énergie de la PAC par le débit de combustible et de carburant, de contrôler l'énergie entre la PAC et la source auxiliaire ainsi que d'asservir la tension dérivée par la charge en assurant la sécurité de fonctionnement de tout le système, Pour assurer un bon fonctionnement (rendement, sécurité de la pile, temps de réponse, contraintes mécaniques, etc.).

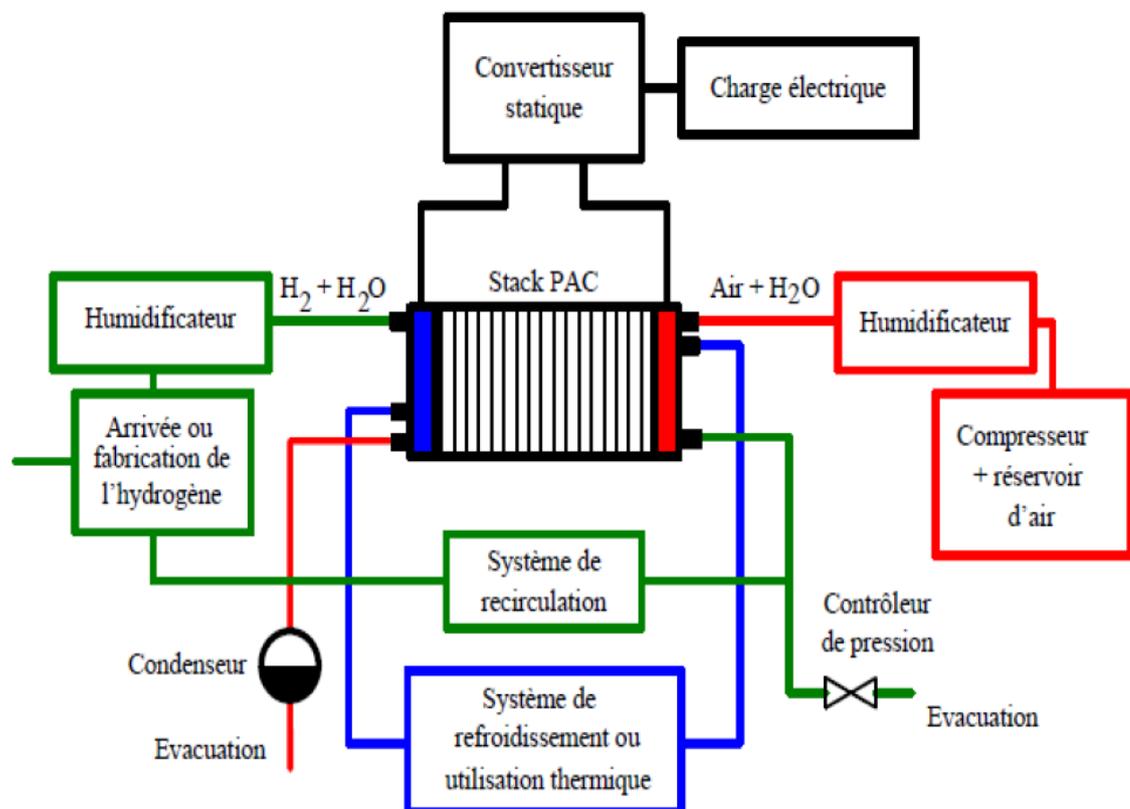


Figure I.10 : système pile à combustible, [11].

I.5 Circuit d'alimentation en hydrogène d'une pile PEM

Pour un système énergétique qui utilise l'hydrogène comme combustible « système de pile à combustible de type PEM », la disponibilité de l'hydrogène est fondamentale. De ce fait nous commencerons par le monde de production d'hydrogène. Il y a plusieurs méthodes de production d'hydrogène, dans ce travail s'intéresse à la production d'hydrogène à partir d'une électrolyse de l'eau.

I.5.1 Production d'hydrogène à partir d'une électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à décomposer l'eau H_2O en hydrogène H_2 et oxygène O_2 lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Il est très faible et peut produire de l'hydrogène pur à plus de 99.999%, d'une manière non polluante lorsque l'électricité utilisée provient de source renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique). L'hydrogène produit par un électrolyseur est idéal pour la consommation par une pile à combustible.

Les avantages d'électrolyseur sont les suivants :

- L'hydrogène produit est très pur ;
- Il peut être produit directement sur le site et au moment où il sera utilisé, il n'est donc pas nécessaire de le stocker ;
- le coût de cet hydrogène est bien inférieur à celui de l'hydrogène livré en cylindres haute pression.

Les électrolyseurs peuvent être répartis en deux types, les alcalins utilisent un électrolyte liquide et les électrolyseurs à membrane polymère à échange de protons (PEM) utilisent un électrolyte polymère solide. La structure d'un électrolyseur ressemble à celle d'une batterie ou à celle d'une PAC. Il comporte une anode, une cathode et un électrolyte.

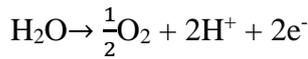
I.5.2 Électrolyseur PEM

Électrolyseur à membrane échangeuse de protons se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons PEM à basse température. Cet électrolyseur utilise le concept bipolaire.

Le principe d'un électrolyseur PEM consiste à convertir l'énergie électrique en énergie chimique à partir d'une réaction chimique oxydo-réduction au niveau d'un catalyseur de platine qui décompose l'eau en hydrogène et oxygène.

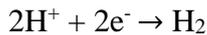
L'eau est oxydée à l'anode pour donner des protons, des électrons et l'oxygène est produit à l'anode selon la réaction d'oxydation suivante :

À l'anode (l'électrode positive) :

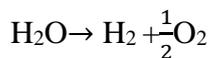


Les électrons circulent par un circuit externe pour rejoindre la cathode, les ions H^+ de passer du côté anode de la membrane au côté cathode où ils se combinent aux électrons pour production d'hydrogène à la cathode, selon la réaction de réduction suivante :

À la cathode (l'électrode négative) :



La réaction globale



L'équation montre pourquoi la proportion d'hydrogène est double de celle d'oxygène durant l'électrolyse de l'eau. La structure de base d'un électrolyseur de type PEM est représentée dans la figure I.11.

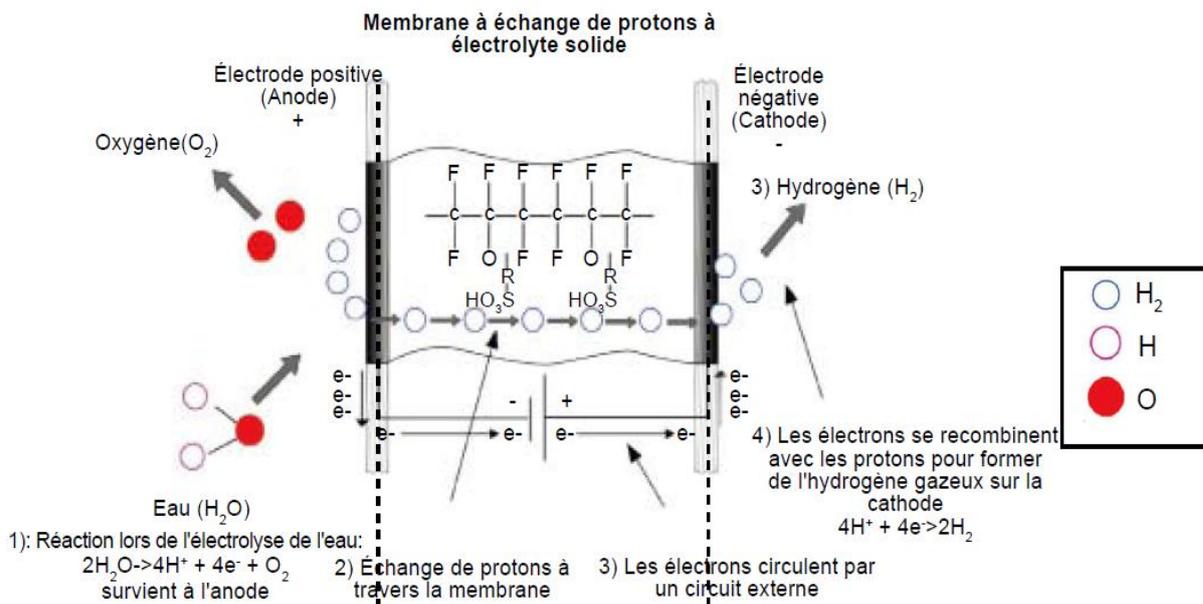


Figure I.11 : Diagramme simplifié d'un électrolyseur de type PEM.

I.6 Modélisation d'une pile à combustible PEM

L'interaction entre la pile à combustible et le convertisseur statique nécessite une bonne connaissance de ce générateur (PAC) et son modèle électrique. La modélisation d'une pile PEM

consiste à modéliser la réaction électrochimique, pour le but d'obtenir les caractéristiques de polarisation, qui sont définis par son tension et son courant. Dans ce travail nous nous sommes focalisées sur le modèle statique et dynamique de la pile PEM.

Le modèle statique, décrit la courbe de polarisation courant-tension de la pile PEM, qui est basée sur la loi de Butler-Volmer, ceci nous donne une loi de variation prenant en compte les phénomènes d'activation à l'anode et à la cathode.

Les trois modèles statiques les plus utilisés, afin de modéliser la pile PEM :

- Le modèle de Larminie-Dicks ;
- Le modèle d'Amphlett et Al ;
- Le modèle de Chamberlin-Kim.

Dans cette partie, nous étudierons le modèle statique de Larminie-Dicks qui utilise des équations empiriques pour décrire la caractéristique courant-tension de la pile en régime permanent.

Le modèle dynamique, est basé sur l'étude de perturbation autour d'un point de fonctionnement statique. La caractéristique de polarisation d'une cellule est étudiée via trois modèles dynamiques différentes (Dicks, d'impédance et circuit électrique équivalent). La technique la plus connue et la plus appliquée est la spectroscopie d'impédance.

I.6.1 Modèle statique de Larminie-Dicks

Ce modèle représente la caractéristique courant-tension de la pile PEM comme la somme de : la tension théorique à vide E_0 , la surtension d'activation V_{act} , la surtension ohmique V_{ohm} et la surtension de concentration V_{conc} . Cette courbe est très importante parce qu'elle montre le comportement de la tension de la pile quand le courant change. L'expression de la tension est la suivante : $V_{cell} = E_0 - A \cdot \log\left(\frac{i}{i_0}\right) - R_m \cdot i + B \cdot \log\left(1 - \frac{i}{i_{lim}}\right)$

Avec :

E_0 : La potentielle thermodynamique ou bien la tension de circuit ouvert, est définie par une équation de Nernst sous forme développée comme :

$$E_0 = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right]$$

Où : **T** désigne la température de la cellule et est égale à 328K.

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

A : La pente de Tafel ;

i_0 : Le courant d'échange ;

R_m : La résistance de la membrane et les différentes résistances de contacts ;

B : Le coefficient du terme de transport de masse ;

i_{lim} : Le courant limite de la pile.

Cette caractéristique peut être décomposée en trois phénomènes prépondérants en fonction de la valeur de la densité de courant. Ce sont les phénomènes de polarisation et ils sont montrés sur la figure I.6 qui présente la tension en fonction du courant pour une température constante (25 C°) et des débits fixés d'oxygène et d'hydrogène.

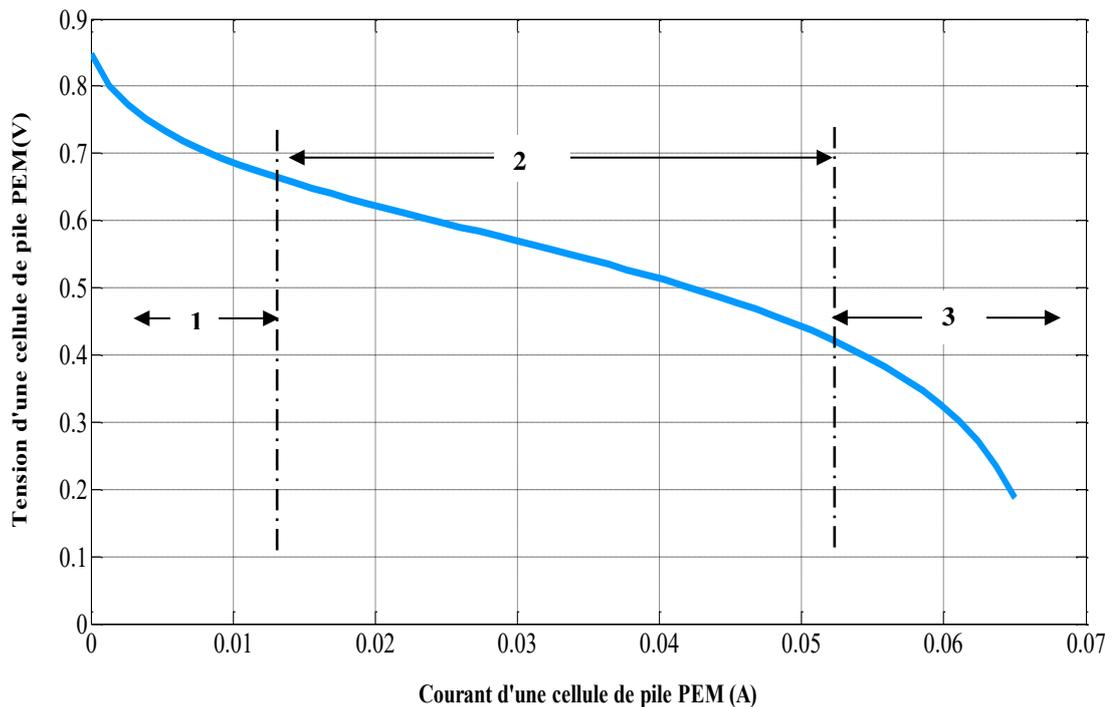


Figure I.12 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEM.

- La première zone (1) représente **la polarisation d'activation** qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant. Elle est représentée quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. En d'autres termes, les pertes d'activation sont dues à la vitesse des réactions chimiques au niveau de la surface de réaction. Donc pour la pile à combustible à basse température PEM, les pertes d'activation dues à la réaction dans la cathode sont plus importantes que celles dans l'anode. La tension chute brusquement la densité augmente et peut être exprimées par l'équation de « Tafel » : $V_{act} = A \cdot \log\left(\frac{i}{i_0}\right)$.

- La deuxième zone (2) caractérise **la polarisation ohmique de la cellule**, c'est la zone la plus utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et elle est valable sur une forte plage de

variation de la densité de courant. Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique, ces pertes sont principalement dues à l'électrolyte et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique. la chute de tension conséquente dépend linéairement du courant et peut être exprimée par l'expression : $V_{ohm} = R_m \cdot i$.

- La troisième zone (3) correspond à **la polarisation de concentration**, qui est due à la chute de concentration des réactifs. De nombreux facteurs peuvent contribuer à cette polarisation : la faible diffusion du gaz à travers les électrodes poreuses, la dissolution des réactants ou des produits dans l'électrolyte, la diffusion des réactifs ou des produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse. Cette dernière zone ne doit pas être utilisée en fonctionnement car le noyage détériore très fortement les performances de la pile. Ces pertes de transfert de charges peuvent être minimisées en s'assurant que la quantité d'hydrogène exacte, que l'air et l'eau circulent à travers les plaques, les couches de diffusion des gaz et les couches catalytiques. Ces pertes diminuent rapidement pour une densité du courant élevée.

L'expression de ces pertes est donnée comme suit : $V_{conc} = -B \cdot \log \left(1 - \frac{i}{i_{lim}} \right)$.

I.6.2 Modèle dynamique de la spectroscopie d'impédance

La pile à combustible peut être représentée par un modèle électrique plus simple consiste à mettre une source de tension contenue en série avec une impédance électrique Z_{pile} .

I.6.2.1 Principe de la spectroscopie d'impédance

La Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE) consiste à obtenir l'impédance électrique d'un dispositif sur une large gamme de fréquence tout au long de la caractéristique de polarisation pour l'analyse fondamentale des phénomènes existants dans les dispositifs.

Pour un système non linéaire si l'entrée imposée (V ou I) est effectivement sinusoïdale. Afin de continuer à parler d'impédance, il faut que la grandeur résultante (I ou V) puisse être considérée comme sinusoïdale (c'est-à-dire la linéarisation de système) [11].

Le principe de cette méthode est d'imposer au système étudié une intensité de courant sinusoïdale, autour d'un point de fonctionnement pour une fréquence donnée, et de mesurer le déphasage et l'amplitude de la tension pour la même fréquence.

Pour un courant sinusoïdal appliquer à l'entrée de la pile sous la forme :

$$I_{pile}(wt) = I_0 + \Delta I \cdot \sin(wt)$$

La tension mesurée sera déphasée de ϕ , son expression sera de la forme suivante :

$$V_{\text{pile}}(wt) = V_0 + \Delta V \cdot \sin(wt - \phi)$$

L'impédance autour du point de fonctionnement (I_0 ; V_0) a alors pour valeur :

$$Z(w) = \frac{\Delta V}{\Delta I} \exp(j\phi)$$

Où ΔV et ΔI sont respectivement les amplitudes de l'ondulation de la tension superposée sur la composante continue et du courant qui la traverse et est le déphasage ϕ entre les ondes sinusoïdales de tension et de courant.

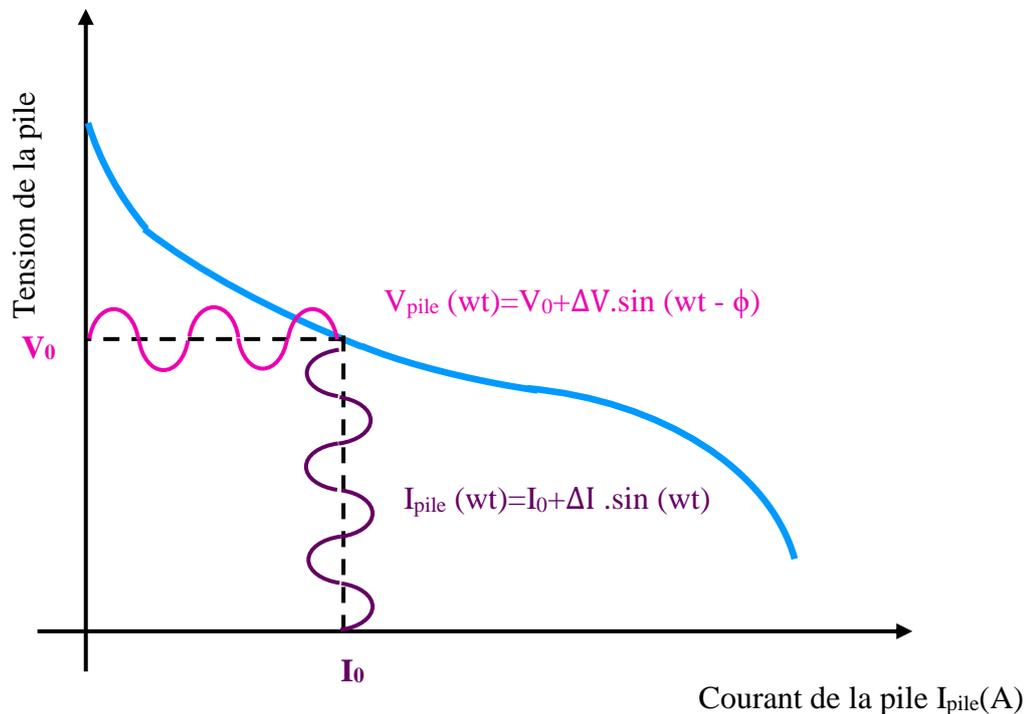


Figure I.18 : Principe de linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

I.6.2.2 Modèle simplifié

Le circuit électrique représentatif de modèle dynamique d'une cellule de pile à combustible PEM (Figure.1.14) est de structure simple : une source de tension correspondant au potentiel de Nernst E_0 en série avec quelques résistances représentant les chutes de tension d'activation R_t , et les chutes de tension ohmique R_m (essentiellement due à la membrane), la double couche électrique (située aux interfaces membrane/électrode) sont représentée par C_{ac} . L'impédance du circuit équivalent est déterminée de manière empirique ou semi-empirique, et exprimée par la formule suivante :

$$Z_{pile}(w) = R_m + \frac{R_t}{1+j.w.R_t.C_{dc}}$$

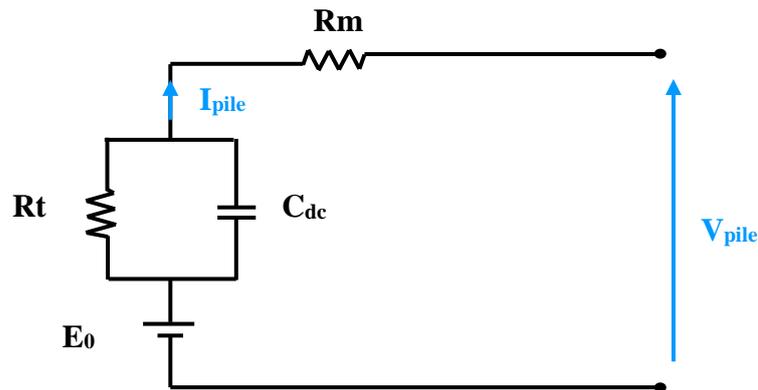


Figure I.19:Modèle dynamique simplifié d'une pile à combustible PEM.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude générale sur la pile à combustible de type PEM, de son fonctionnement, son structure interne, son dimensionnement et décrit comment elle deviendra un élément essentiel de l'économie basée sur les énergies renouvelables. Un bref aperçu a été mentionné sur le système de pile à combustible, qui contribue un bon fonctionnement de cette dernière.

Dans la dernière partie, nous avons fait un rappel sur la caractéristique statique Courant/Tension de la pile (le modèle statique de Larminie-Dicks) et après étudié l'influence de tous les paramètres sur la différente chute de tension. Ensuite, nous avons établi le modèle dynamique de la spectroscopie d'impédance.

Chapitre II :
Les convertisseurs DC/DC

II.1 Introduction

Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible, 1 V pour une seule cellule d'une pile de type PEM. Afin d'augmenter cette tension à la sortie de la pile, on met plusieurs cellules en série (stack) jusqu'à la limite technologique actuelle : la durée de vie et la fiabilité. On considère le nombre des cellules que l'on peut mettre en série est de l'ordre d'une centaine, On obtient donc une tension de sortie d'une stack de PAC est limitée à environ 100 V. Dans la plupart des applications, cette tension est insuffisante. On est alors amené à placer un convertisseur de type DC/DC, élévateur de tension et unidirectionnel en courant entre la pile et la charge électrique [18].

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout particulièrement aux convertisseurs à découpage continu-continu (DC/DC) qui peuvent être utilisés comme étage d'adaptation entre une pile à combustible et une charge électrique. Le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur statique continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie.

Dans un premier temps, on présente et on analyse les différentes structures des convertisseurs DC/DC, pour assurer la liaison avec une charge électrique quelconque alimentée par la pile, avec un rendement de conversion très élevé. Nous envisageons dans ce chapitre l'étude des deux types de convertisseurs DC/DC (BOOST et SEPIC) utilisés fréquemment dans les systèmes piles à combustible pour générer les tensions et les courants souhaités, ainsi que leur stratégie de commande MLI (modulation de largeur d'impulsion).

II.2. Interrupteurs à semi-conducteurs

Dans tous les convertisseurs d'électronique de puissance, les changes d'énergie entre le générateur et le récepteur sont contrôlés grâce à l'évolution au cours des temps des connexions que les interrupteurs du convertisseur établissent, (voir l'annexe), [16, 17].

Tout changement de connexion résulte d'un changement d'état :

- Fermeture (connexion de l'état OFF à l'état ON) ;
- Ouverture (connexion de l'état ON à l'état OFF).

La commutation d'un semi-conducteur d'un état à l'autre peut être

- Soit commandée : et résulter d'un signal appliqué à son accès de commande ;
- Soit spontanée (Naturelle) : et résulter du passage par générateur de la tension à ses homes (fermeture spontanée) ou du passage par zéro du courant qui le traverse (ouverture spontanée).

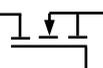
Interrupteur	Symbole	Caractéristiques		
		Tension	courant	fréquence
Diode (1955)		10V -10 kV	1-5000 A	-----
BJT: Bipolar junction transistor (1975)		30V-1.2 kV	0.5- 500 A	10 kHz
MOSFET: Metal oxide semiconductor field effect transistor (1976)		20-500V	0.5-50 A	1MHz
IGBT: Insulated gate bipolar transistor (1983)		600V- 2.5 kV	10- 600 A	20 kHz
SCR: Silicon controlled rectifier (thyristor) (1957)		200V-6 kV	10 A-3.5 kA	500 Hz
GTO: Gate turn-off thyristor (1962)		200V-4.5 kV	10 A-3 kA	2 kH
TRIAC (1958)		200-1kV	2-100 A	500 Hz

Tableau II.1 : Différentes interrupteurs à semi-conducteur. [16], [17]

Le choix d'un interrupteur à semi-conducteur pour une application particulière dépende aux critères suivants :

- La tension requise ;
- Le niveau du courant ;
- La fréquence de commutation ;
- La vitesse de commutation ;
- Les pertes (par conduction et commutation) ;
- Le mode de la commande (naturelle, semi, et totale).

II.3 Généralité sur les convertisseurs DC/DC (hacheurs)

Les convertisseurs DC/DC sont des convertisseurs de courant (ou de tension) continu, statiques de l'électronique de puissance permettant d'obtenir une tension continue variable à partir d'une tension continue constante. Placé entre une source (génératrice ou récepteur) de tension et une source (génératrice ou récepteur) de courant, il procède par découpage : le courant de la source de tension et la tension de la source de courant sont hachés, c'est-à-dire formés d'une succession de créneaux rectangulaires [19]. La figure II.1 rappelle le schéma de principe d'un hacheur.

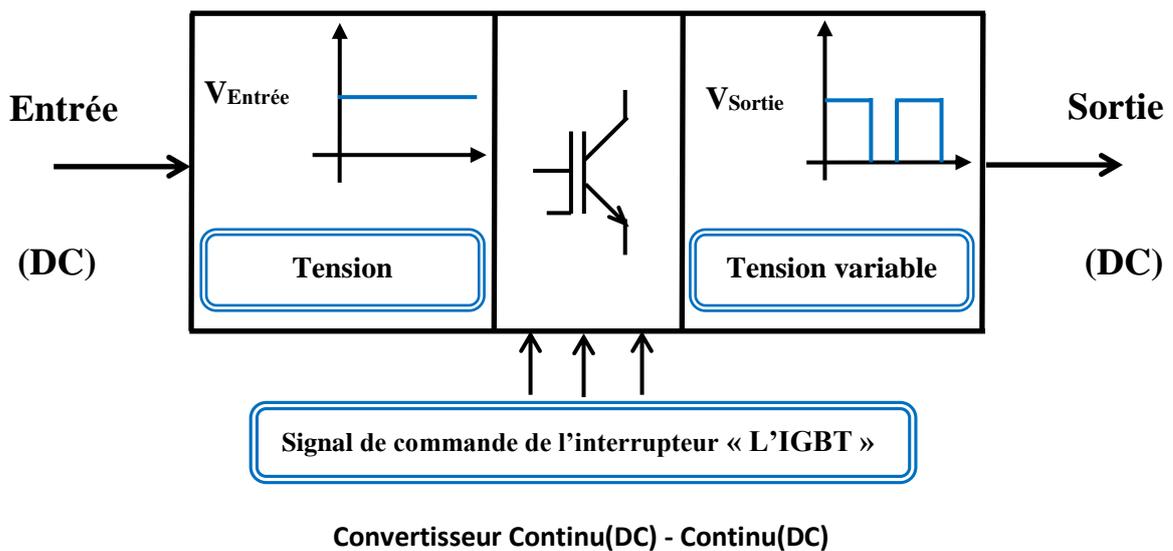


Figure II.1: Schéma de principe d'un hacheur

L'implantation et la réalisation de ces convertisseurs nécessite :

1- des semi-conducteurs de puissance, commandable à la fermeture et l'ouverture (IGBT, MOS, GTO.....etc.) avec une diode connectés en anti-parallèle. Généralement le choix d'un composant de puissance pour une application se fait selon la fréquence de commutation, la puissance véhiculée et les pertes de commutation. On utilise L'IGBT comme interrupteur dans les convertisseurs DC/DC vu leur tension de blocage importante et fréquence de commutation élevé.

Le transistor bipolaire à grille isolée ou IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, en anglais) est un élément semi-conducteur de puissance combinant les avantages du transistor bipolaire à ceux d'un transistor MOS [19].

- Les avantages du transistor bipolaire (chute de tension faible à l'état passant, tension blocable élevée).

- Les avantages du transistor MOS (commande en tension, vitesse de commutation élevée).

L'IGBT est commandé à sa gâchette, une tension V_{GE} nulle entre la grille G et l'émetteur E permet de bloquer le transistor IGBT. Par contre, une tension V_{GE} positive provoque la conduction d'IGBT jusqu'à la saturation (état de conduction). Son commutation entre l'état de fermeture et d'ouverture se fait souvent à des fréquences élevées pour augmenter les performances dynamiques de la réponse.

L'IGBT est caractérisé par :

- La tension collecteur-émetteur instantanée maximale, V_{CE} ;
- Le courant collecteur tolérable en régime continu, I_C .

La figure II.2.a montré le symbole utilisé pour représenter un IGBT et figure II.2.b son structure de l'IGBT.

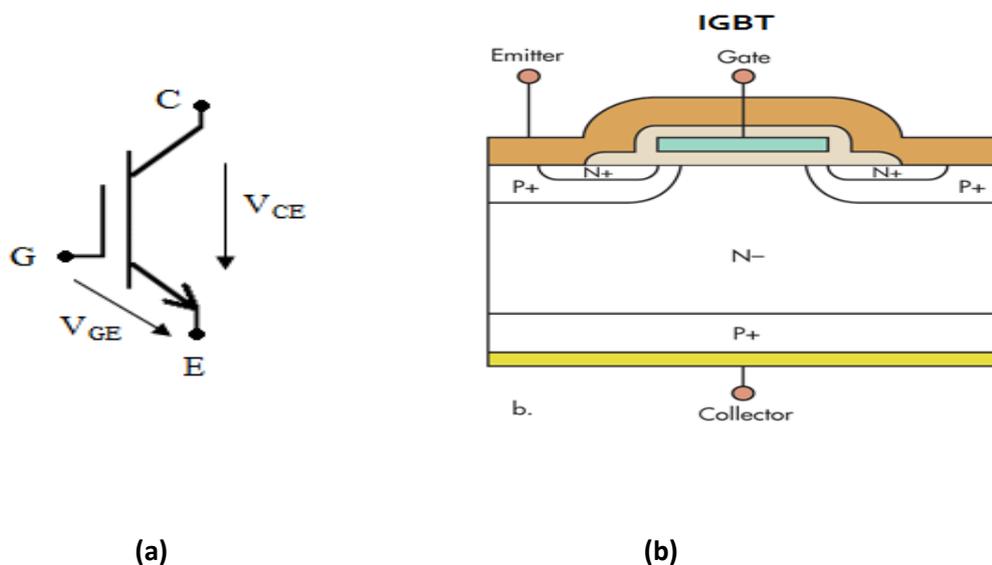


Figure II.2 : Transistor IGBT : (a) symbole, (b) Structure de l'IGBT.

2- Diode de roue libre, assure la continuité du courant inductif pendant l'absence du courant fourni par la source. Les critères importants pour le choix de la diode sont :

- La rapidité de la commutation ;
- La tension inverse de V_{AK} à l'état bloqué ;
- Le courant moyen de I_{AK} à l'état passant.

Généralement, on utilise une diode de puissance rapide (type Schottky) à cause des avantages :

- Fréquence de commutation élevée pour suivre les variations de l'interrupteur, sous peine de limiter l'efficacité du convertisseur.
- Caractéristiques électriques sont une tension de blocage de 600V ;
- Elle a une tension de seuil plus faible ($V_F=0.3V$) ;
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts (t_{rr} de 0.5 à $0.35\mu s$) ;
- La chute de tension à l'état passant n'est que de 0.3 à 0.4V.

3- filtre passe-bas passif qui est constitué d'une inductance et d'un condensateur. Le choix de l'inductance influe sur le taux d'ondulation et sur le mode de conduction du convertisseur (mode continu ou discontinu). Le condensateur assure l'action de filtrage de la tension de sortie. Sa capacité est choisie de sorte que l'ondulation de tension soit très faible, pratiquement moins de 5%.

II.4 Différents topologies des convertisseurs DC/DC

Il existe plusieurs topologies des convertisseurs DC/DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence (Flyback, Push-pull, Forward).

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement (Boost, Buck, Buck-Boost, Zéta, Sepic, Cuk) [21]. La figure II.3 montre les différents convertisseurs DC/DC principales pour les applications PAC.

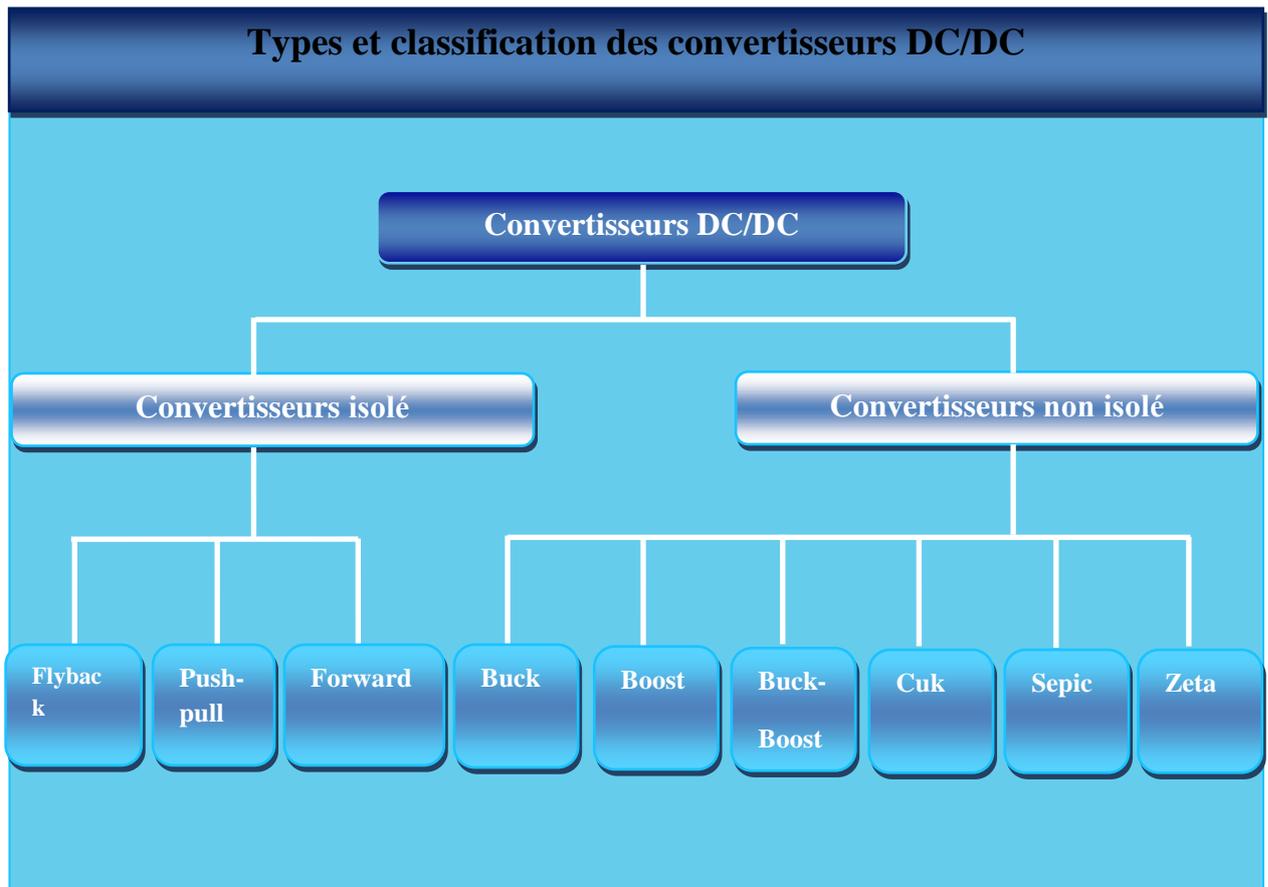


Figure II.3: Différentes convertisseurs DC/DC

Une comparaison des convertisseurs DC/DC est illustrée dans l'annexe.

II.4.1 Convertisseurs DC/DC non-isolé de la source :

Nous nous sommes intéressés dans ce partie de travail à deux configurations de base sont :

1. Boost
2. Sepic

II.4.1.1 Hypothèse

Nous supposons dans cette étude théorique les hypothèses suivantes :

- Courant périodique de période T ;
- Tension de sortie V_s continue ;
- Tension à l'entrée V_{pile} continue et constante (redressée et filtrée) ;
- Interrupteurs (semi-conducteur) idéaux, état ON (V_K, I_D) = 0, état OFF : (V_D, I_K) = 0 ;
- Puissance délivrée à la sortie égale à la puissance fournie à l'entrée ;
- La capacité du condensateur de sortie sera supposée suffisamment grande.

II.4.1.2 Mode de fonctionnement

On distingue trois modes de conduction :

- **Mode de Conduction Continue** : dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement à la charge. Le courant dans l'inductance ne s'annule jamais sur une période de commutation et est donc continu.
- **Mode de Conduction Discontinue (MCD)** : dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement à la charge. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une période de commutation. Le courant dans l'inductance est discontinu.
- **Fonctionnement en conduction critique** : c'est un fonctionnement qui définit la limite entre les deux premiers modes de fonctionnement.

II.4.1.3 Convertisseur élévateur « BOOST »

a- Définition

Le convertisseur élévateur « BOOST » convertit le courant continu basse tension en courant continu haute tension, et la puissance va de la source de courant (source de grande impédance) vers la source de tension. Ce convertisseur est appelé hacheur parallèle à cause de la place du semi-conducteur commandé, ou hacheur survolteur, car la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée ou step-up converter, en anglais [19].

On utilise un convertisseur BOOST dans les applications qui nécessitent une tension continue élevée à partir d'une source faible comme pile à combustible, générateur photovoltaïque par récupération et les alimentations de puissance régulée.

b- Présentation de structure

Cette structure de convertisseur demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (GTO, MOS, IGBT...) monté dans ce type de convertisseurs en parallèle avec la charge. L'inductance L permet de lisser le courant appelé sur la source et pour conférer à l'ensemble le caractère source de courant. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie et conférer à l'ensemble le caractère source de tension et la diode de roue libre assure la continuité du courant inductif pendant l'absence du courant fourni par la source. (amorçage et blocage spontanés). Son schéma de principe montre sur la figure II.4.

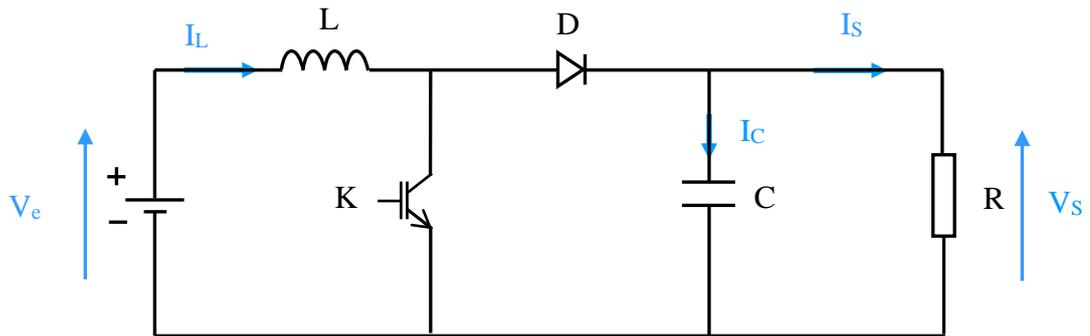


Figure II.4: Schéma de principe d'un convertisseur DC/DC élévateur.

c- Principe de fonctionnement(en mode continu)

Leur principe de fonctionnement basé sur la transformation dans une première étape de l'énergie électrique en énergie magnétique, et dans une deuxième étape la transformation de l'énergie magnétique en énergie électrique. On recommence périodiquement ces deux étapes jusqu'à la fin des temps...

Pour étudier le convertisseur DC/DC élévateur on va considérer que la tension aux bornes de la charge est constante, on trouve donc qu'il y a deux phases de fonctionnement, une **phase active** lorsque l'interrupteur IGBT est fermé et la diode est ouverte et une **phase de changement d'énergie** lorsque l'interrupteur IGBT est ouvert et la diode est fermée.

La durée de conduction T_{ON} est compris entre 0 et T donc, le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur T_{int} en fonction de α et T :

- Durée de conduction : $T_{ON} = \alpha T$
- Durée de blocage : $T_{OFF} = (1-\alpha) T$

- **Phase 1** : $0 < t < \alpha T$:

Lorsque l'interrupteur commandé IGBT est fermé figure II.5, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique $E = \frac{1}{2} L I_L^2$. La diode D est alors bloquée se comporte comme un interrupteur ouvert, et la charge est alors déconnectée de l'alimentation et alimentée par le condensateur C .

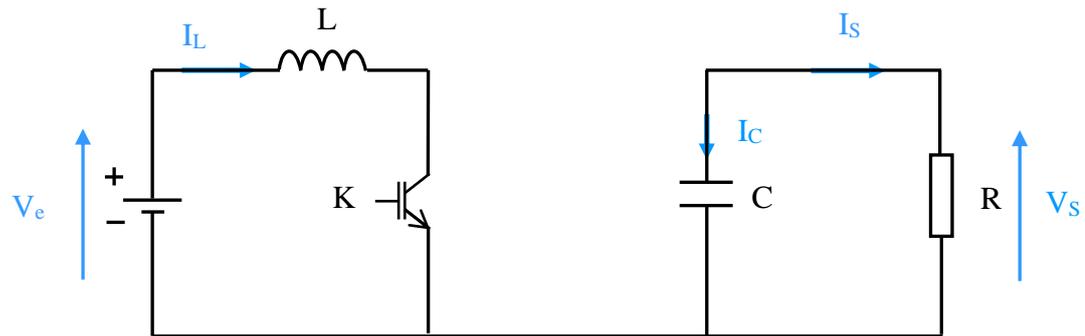


Figure II.5: Fonctionnement d'un hacheur élévateur en phase 1.

On a d'après la loi de maille :

$$V_e = V_L \Rightarrow L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{II.1})$$

$$\Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II.2})$$

C'est une équation différentielle de premier ordre et sa solution est de la forme :

$$\int_0^{\alpha T} di_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e}{L} dt \quad (\text{II.3})$$

$$\Rightarrow I_L(t) = \frac{V_e}{L} t + I_{\min} \quad (\text{II.4})$$

Donc l'ondulation Crête à Crête du courant ' I_L ' sera

$$\Delta I_L = \int_0^{\alpha T} di_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e}{L} dt \quad (\text{II.5})$$

$$\Rightarrow \Delta I_L = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.6})$$

- **Phase 2:** $\alpha T < t < T$:

Lorsque l'interrupteur IGBT est ouvert figure II.6, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée au condensateur C et à la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

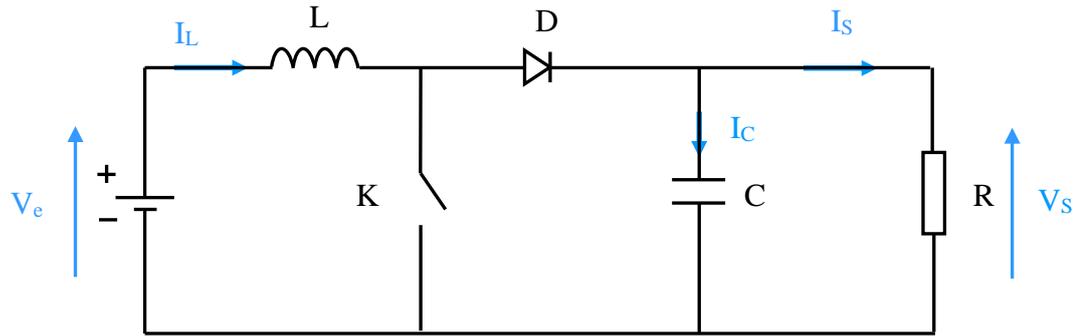


Figure II.6: Fonctionnement d'un hacheur élévateur en phase 2.

On a d'après les lois de Kirchhoff sur le circuit équivalent :

$$V_L = V_e - V_s \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (\text{II.9})$$

C'est une équation différentielle de premier ordre et sa solution est de la forme :

$$\int_{KT}^t di_L = \int_{KT}^t \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (\text{II.10})$$

$$I_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_{\max} \quad (\text{II.11})$$

On peut calculer l'ondulation crête à crête du courant I_L '

$$\Delta I_L = \int_{\alpha T}^T di_L = \int_{KT}^T \frac{V_s - V_e}{L} dt = \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T \quad (\text{II.12})$$

Soit ΔI_L l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\Delta I_L = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad \text{et} \quad \Delta I_L = \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha) T \quad (\text{II.13})$$

En combinant ces deux relations de ΔI_L , on peut établir l'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie:

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

$$\Rightarrow V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (\text{II.15})$$

Cette équation montre que la tension contenue à la sortie est supérieure à la tension moyenne d'entrée, et ne dépend pas de la charge.

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1 c'est à dire :

On néglige les pertes dans le convertisseur $\Delta P = 0 \Rightarrow P_e = P_s$

On peut donc écrire: $V_e I_e = V_s I_s$

On a: $V_e = V_s (1-\alpha) \Rightarrow V_s (1-\alpha) I_e = V_s I_s$

$$\Rightarrow I_s = (1-\alpha) I_e \quad (\text{II.16})$$

Et finalement, on obtient les relations suivantes :

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad \text{et} \quad I_s = (1-\alpha) I_e \quad (\text{II.17})$$

Donc Ces expressions montre bien que le convertisseur DC/DC « BOOST » est un élévateur de tension, et abaisseur de courant. Le rapport de transformation serait dans le cas présent

$(1-\alpha)$.

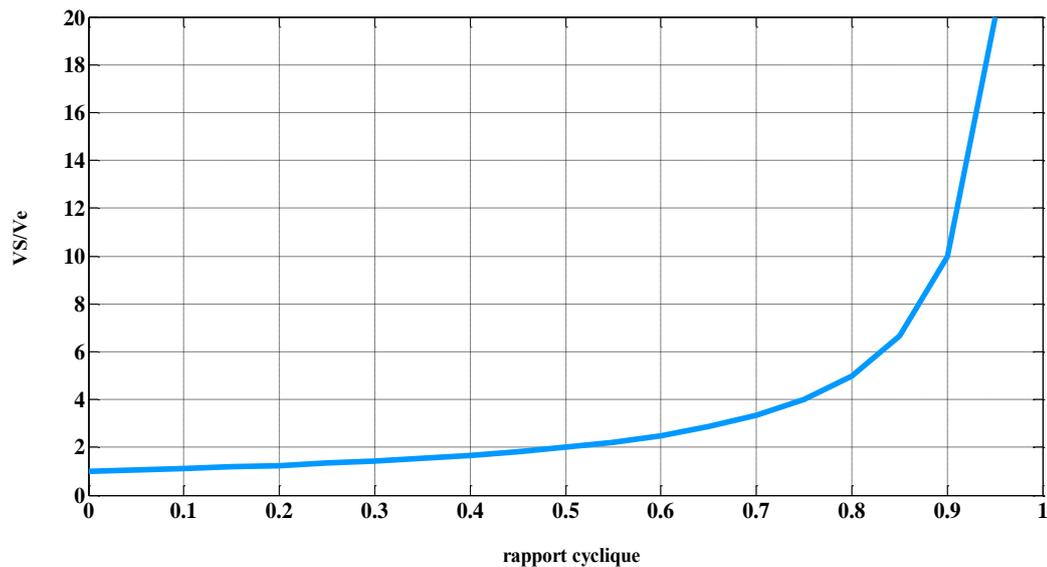


Figure II.7 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique d'un élévateur

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

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{fL} \quad (\text{II.18})$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha)RCf} \quad (\text{II.19})$$

Les contraintes de courant et de tension des interrupteurs et diode de puissance peuvent être calculer comme suite :

$$I_{D_{max}} = I_{K_{max}} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \tag{II.20}$$

$$V_{D_{max}} = V_{K_{max}} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \tag{II.21}$$

d- Modèle mathématique équivalent d'un convertisseur élévateur :

D'après le schéma de structure étudié, les équations différentielles de convertisseur élévateur de premier ordre s'écrivent :

- Pendant la phase active (l'interrupteur est fermé) :

$$\begin{cases} I_c(t) = C \frac{dv_s(t)}{dt} = -i_s(t) & \text{(II.22)} \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) & \text{(II.23)} \end{cases}$$

- Pendant la phase de roue libre (l'interrupteur est ouvert) :

$$\begin{cases} I_c(t) = C \frac{dv_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) & \text{(II.24)} \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) & \text{(II.25)} \end{cases}$$

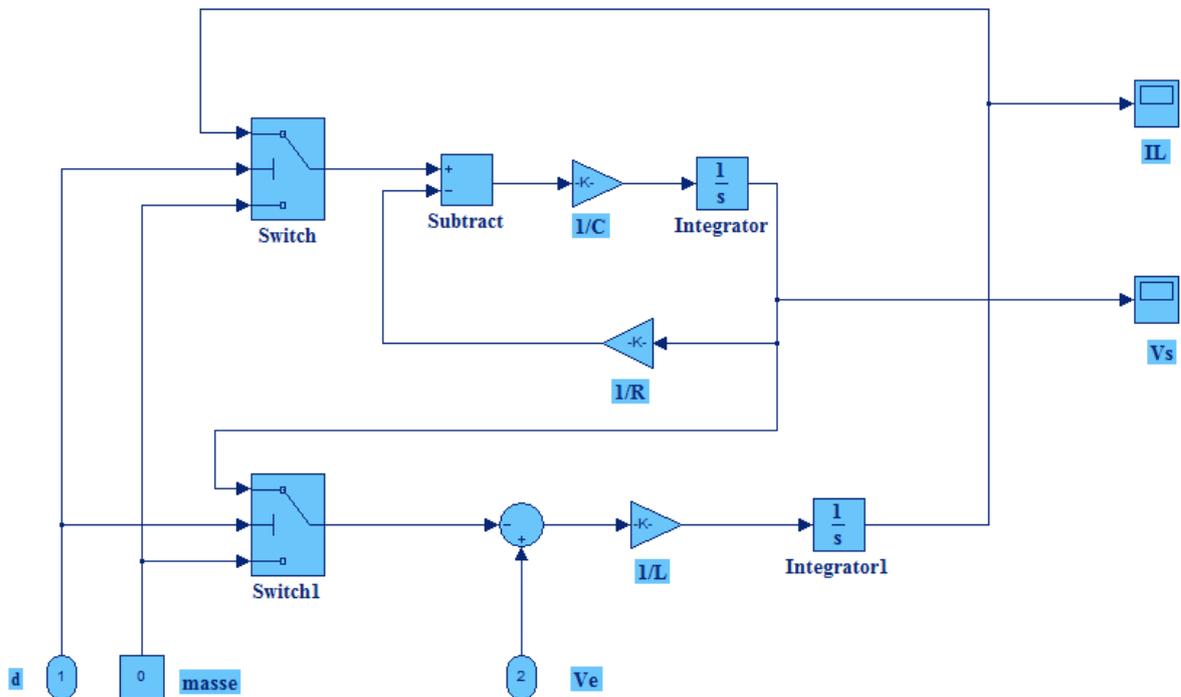


Figure II.8 : Schéma bloc d'un convertisseur élévateur sur Matlab/Simulink

e- Dimensionnement d'un hacheur élévateur**• Calcul de l'inductance de lissage**

L'inductance L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur. L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue est donnée par la relation suivante:

$$\Delta I_L = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad \Rightarrow \quad \Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_S}{fL} \quad (\text{II.26})$$

Pour réduire l'ondulation ΔI_L , on a intérêt à utiliser une inductance élevée, et une grande fréquence de commutation.

$$\Delta I_{L_{\max}} = \frac{\alpha(1-\alpha)V_S}{fL_{\max}} \quad (\text{II.27})$$

Alors, le convertisseur fonctionne toujours dans le mode de conduction continue si $L \geq L_{\max}$

Donc on choisit :

$$L \geq \frac{\alpha(1-\alpha)V_S}{f \Delta I_{L_{\max}}} \quad (\text{II.28})$$

• Calcul de condensateur

Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur et de maintenir celle-ci constante, [23].

La charge fournie est donnée par :

$$\Delta Q = \alpha \cdot I_S \cdot T \quad (\text{II.29})$$

On admet une ondulation de tension ΔV_S :

$$\Delta V_S = \frac{\Delta Q}{C} \quad (\text{II.30})$$

Le dimensionnement du condensateur C , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'équation suivante :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_S} = \frac{\alpha \cdot I_S \cdot T}{\Delta V_S} = \frac{\alpha \cdot V_S}{R \cdot f \cdot \Delta V_S} \quad (\text{II.31})$$

II.4.1.4. Convertisseur DC/DC « SEPIC »**a- Définition**

SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) est un convertisseur à découpage DC/DC qui permet d'élever ou d'abaisser la tension, ce montage a été mis au point par Slobodan Cuk à la fin des années 1970, [22].

Ce type d'architecture possède plusieurs propriétés intéressantes :

- le fonctionnement abaisseur-élevateur avec une tension de sortie ayant la même polarité que la tension d'entrée ;
- la commande de l'interrupteur est référencée par rapport à la masse, ce qui simplifie l'électronique de commande rapprochée du module à commutation.
- l'ordre du modèle est plus important que ceux des convertisseurs classiques (Buck, Boost et Buck-Boost) ;
- il présente un caractère non linéaire dont le comportement et la dynamique varient fortement selon le point de fonctionnement ;
- l'ondulation du courant d'entrée est limitée.

La topologie du SEPIC est appropriée pour les applications de charge de batteries et pour la correction du facteur de puissance (PFC) grâce à l'inductance en série avec la source.

b- Synoptique

Le convertisseur SEPIC peut être réalisé de divers circuits électriques. La Figure II.9 présente la structure basique, la Figure II.10 montre le couplage des inductances L_1 et L_2 et la Figure II.11 illustre la version isolée du SEPIC en remplaçant l'inductance L_2 par un transformateur.

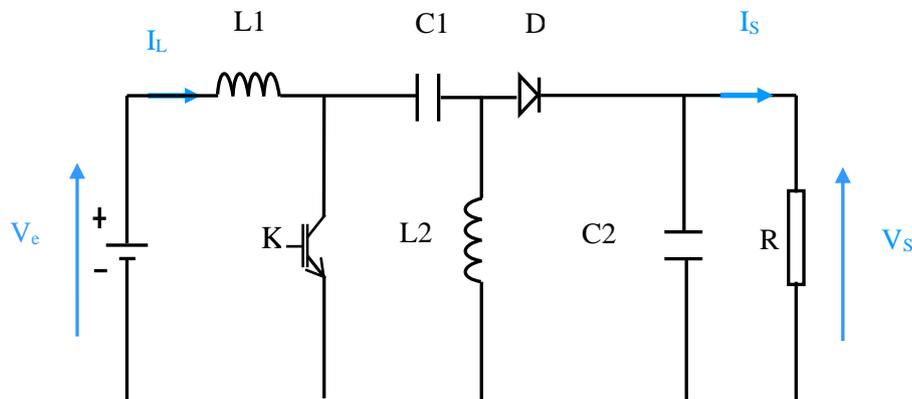


Figure II.9 : Convertisseur SEPIC.

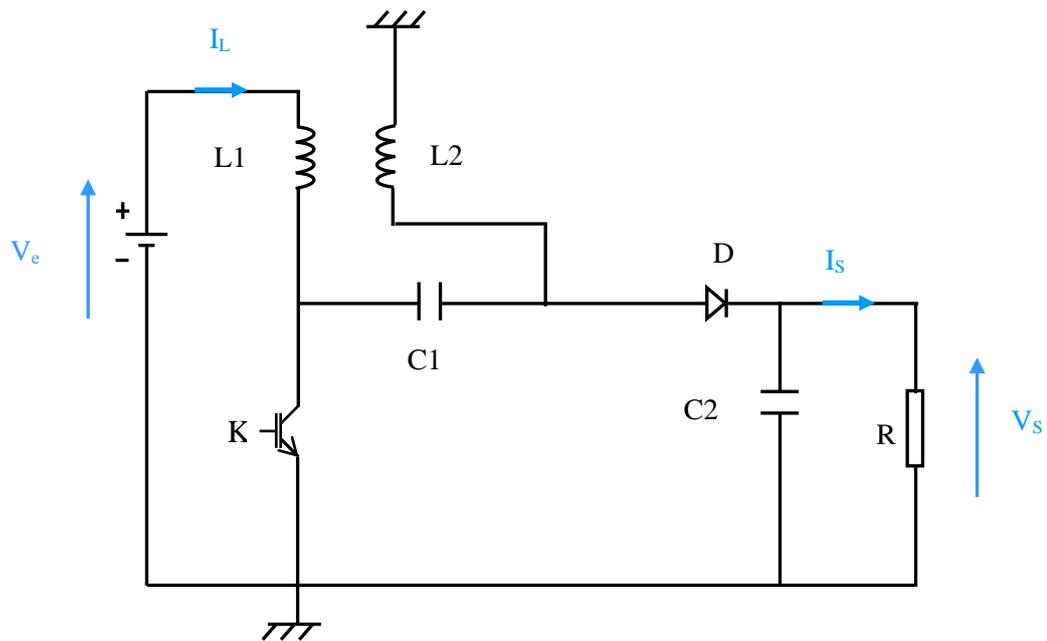


Figure II.10 : SEPIC avec couplage des inductances.

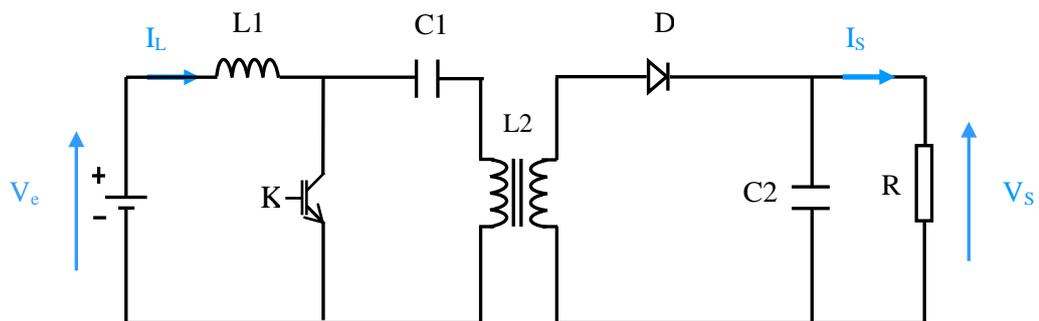


Figure II.11 : SEPIC isolé.

c- Principe de fonctionnement (en mode continu)

On trouve donc qu'il y a deux phases de fonctionnement d'un convertisseur Sepic, une **phase active** lorsque l'interrupteur IGBT est fermé et la diode est ouverte et une **phase de changement d'énergie** lorsque l'interrupteur IGBT est ouvert et la diode est fermée.

- **Phase 1** : $0 < t < \alpha T$:

Lorsque l'interrupteur IGBT est fermé figure II.12, l'inductance L_1 est chargée par la source et l'inductance L_2 est chargée par le condensateur C_1 , le courant traversant L_1 va augmenter

linéairement. La diode D est alors bloquée se comporte comme un interrupteur ouvert, et la tension de charge est maintenue par le condensateur C_2 .

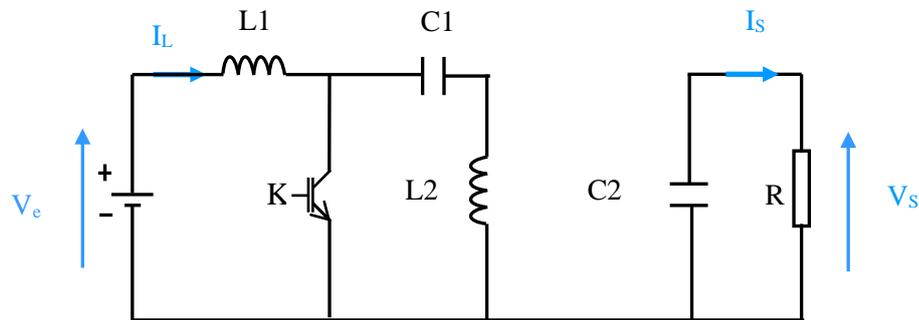


Figure II.12: Fonctionnement de Sepic en phase 1.

On a d'après la loi de maille :

$$V_e = V_{L_1} \Rightarrow L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_e \quad (\text{II.32})$$

$$\Rightarrow \frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{V_e}{L_1} \quad (\text{II.33})$$

Donc l'ondulation Crête à Crête du courant ' i_{L_1} ' sera

$$\Delta i_{L_1} = \int_0^{\alpha T} di_{L_1} = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e}{L_1} dt \quad (\text{II.34})$$

$$\Rightarrow \Delta i_{L_1} = \frac{V_e}{L_1} \alpha T \quad (\text{II.35})$$

- **Phase 2:** $\alpha T < t < T$:

Lorsque l'interrupteur IGBT est ouvert figure II.13, l'énergie emmagasinée dans les inductances L_1 , L_2 est restituée aux condensateurs C_1 , C_2 et à la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans les inductances vers les condensateurs.

On a d'après les lois de Kirchhoff sur le circuit équivalent :

$$V_s = V_{L_1} \Rightarrow L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_s \quad (\text{II.36})$$

$$\Rightarrow \frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{-V_s}{L_1}$$

On peut calculer l'ondulation crête à crête du courant « I_{L1} »

$$\Delta I_{L1} = -\frac{V_S}{L_1}(1-\alpha)T \tag{II.37}$$

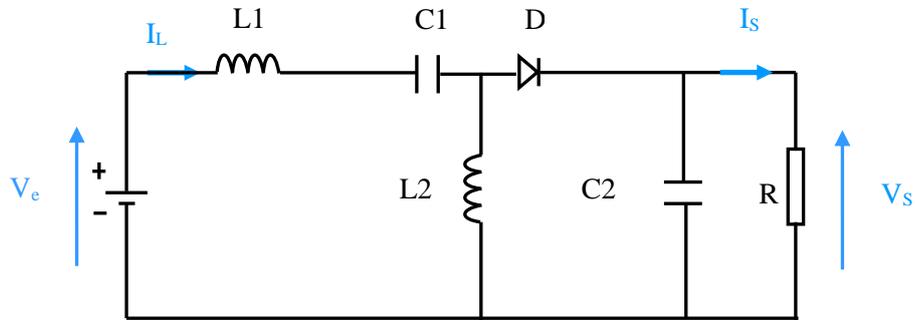


Figure II.13: Fonctionnement de Sepic en phase 2.

En raison du principe de l'inductance à l'état d'équilibre la tension moyenne en L_1 est nulle. A deux états, tous deux ayant une tension constante, la valeur moyenne de V_{L1} est :

$$\frac{V_e \alpha T + (-V_S)(1-\alpha)T}{T} = 0 \tag{II.38}$$

$$\alpha V_e - V_S + \alpha V_S = 0 \tag{II.39}$$

Simplifier ce qui précède donne l'expression finale de la tension entrée-sortie

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1-\alpha} \tag{II.40}$$

L'hypothèse d'un circuit sans perte nécessite une puissance d'entrée à une puissance de sortie égale, donc

$$I_s = \frac{(1-\alpha) I_e}{\alpha} \tag{II.41}$$

Ainsi, le convertisseur est en mode "Buck" pour $\alpha < 0.5$ et en mode "Boost" pour $\alpha > 0.5$.

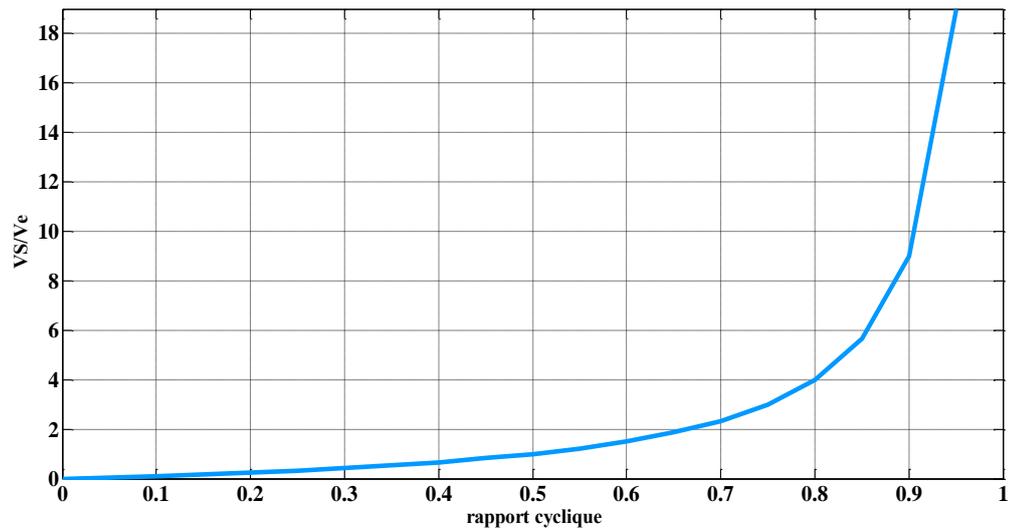


Figure II.14 : Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

Les ondulations de courant et l'ondulation des tensions ayant pour valeurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta I_{L1} = \frac{\alpha V_e}{f L_1} \end{array} \right. \quad (\text{II.42})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta I_{L2} = \frac{\alpha V_e}{f L_2} \end{array} \right. \quad (\text{II.43})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta V_{C2} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R f C_2} \end{array} \right. \quad (\text{II.44})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta V_{C1} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R f C_1} \end{array} \right. \quad (\text{II.45})$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont identiques en tension et en courant :

$$I_{K\max} = I_{d\max} = I_{L1} + I_{L2} + \frac{\Delta I_{L1} + \Delta I_{L2}}{2} \quad (\text{II.46})$$

$$V_{K\max} = V_{d\max} = V_{c1\max} + V_{c2\max} = \frac{\Delta V_{C1} + \Delta V_{C2}}{2} \quad (\text{II.47})$$

d- Dimensionnement du SEPIC

Pour ce convertisseur nous utiliserons seulement les équations finales permettant de dimensionner les éléments du convertisseur [24].

- **Calcul du rapport cyclique**

Pour un convertisseur Sepic fonctionne en mode continu le rapport cyclique est donnée par :

$$\alpha = \frac{V_S + V_D}{V_e + V_S + V_D} \quad (\text{II.48})$$

V_D : le chute de tension de la diode ; V_S : la tension de sortie ; V_e : la tension d'entrer.

Le rapport cyclique maximum est :

$$\alpha_{\text{Max}} = \frac{V_S + V_D}{V_{e_{\text{min}}} + V_S + V_D} \quad (\text{II.49})$$

Le rapport cyclique minimum est :

$$\alpha_{\text{Min}} = \frac{V_S + V_D}{V_{e_{\text{Max}}} + V_S + V_D} \quad (\text{II.50})$$

- **Calcul de l'inductance**

Une bonne règle pour la détermination de l'inductance permettre aux ondulations crête à crête de courant à environ 40% de courant d'entrée maximal à la tension d'entrée minimum.

L'ondulation de courant dans les inductances L_1 et L_2 est de même valeur est donné par :

$$\Delta I_L = I_e \times 40\% = I_s \frac{V_S + V_D}{V_{e_{\text{Min}}}} \times 40\%$$

La valeur inductance est calculée par :

$$L_1 = L_2 = \alpha_{\text{Max}} \frac{V_{e_{\text{Min}}}}{\Delta I_L \times f} \quad (\text{II.51})$$

f est la fréquence d'interrupteur et α_{Max} est le rapport cyclique sous V_e minimale. La valeur crête de courant d'inductance pour éviter sa saturation est donnée par :

$$I_{L1} = I_s \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (\text{II.52})$$

$$I_{L2} = I_s \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (\text{II.53})$$

Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L_1=L_2=\frac{V_e}{2\Delta L \times f} \times \alpha_{Max} \quad (II.54)$$

- **Calcul de condensateur de couplage**

Le choix de condensateur de Sepic, C_1 dépend de la valeur efficace de courant qui est donnée par :

$$I_{C1eff} = I_S \times \sqrt{\frac{V_S - V_D}{V_{e_{min}}}} \quad (II.55)$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante :

$$\Delta V_{C1} = \frac{\alpha_{max} \cdot I_S}{C_1 \cdot f} \quad (II.56)$$

$$C_1 = \frac{\alpha_{max} \cdot I_S}{\Delta V_{C1} \cdot f} \quad (II.57)$$

Un condensateur qui répond aux exigences de courant efficace, la plupart du temps peut produire petite ondulation de la tension dans le C_1 . Par conséquent, la tension de crête est généralement proche de la tension d'entrée.

- **Calcul de condensateur de sortie**

Le condensateur C_2 à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donnée par :

$$C_2 = \frac{\alpha_{max} I_S}{\Delta V_{ond} \times 0.5 \times f} \quad (II.58)$$

Avec :

I_S le courant dans la charge, ΔV_{ond} l'ondulation de tension.

II.5 Les pertes dans les convertisseurs DC/DC

Les pertes dans le convertisseur que nous allons calculer se décomposent en trois parties : les pertes dans les inductances, dans les composants semi-conducteurs et dans les pertes dans les condensateurs [9].

II.5.1 Pertes dans les inductances

Les pertes dans les inductances sont calculées par la somme des pertes Joule et des pertes dans les circuits magnétiques.

Les pertes Joule sont définies par :

$$P_j = R_L \cdot I_{L_{\text{eff}}}^2$$

$$P_j = \left(I_e^2 + \frac{\Delta I_e^2}{12} \right) \cdot R_L \quad (\text{II.59})$$

Avec : R_L est la résistance équivalente en série dans l'inductance.

Les pertes dans les circuits magnétiques sont les pertes par hystérésis et par courant de Foucault. Grâce à la formule fournie par le constructeur, ces pertes sont calculées à l'aide de la fréquence du courant, de l'amplitude de l'ondulation d'induction et du poids du circuit magnétique :

$$P_{\text{magnétique}} = 6.5 \times f^{1.51} \cdot \left[\frac{\Delta B}{2} \right]^{1.74} \times m \quad (\text{II.60})$$

Où : f est la fréquence des ondulations de courant en kHz ; ΔB est l'ondulation de l'induction T et m la masse du circuit magnétique en kg.

II.5.2 Pertes dans les composants semi-conducteurs

II.5.2.1 Les pertes dans l'IGBT

Ces pertes sont représentées les pertes de conduction $P_{K_{\text{cond}}}$ et les pertes de commutation $P_{K_{\text{com}}}$ dans l'interrupteur.

Lors de la conduction de l'IGBT, il y a une différence de potentiel non nulle sur ses bornes qui crée les pertes par conduction :

$$P_{K_{\text{cond}}} = I_{K_{\text{eff}}}^2 \cdot R_K + I_{K_{\text{moy}}} \cdot V_K \quad (\text{II.61})$$

V_K : la chute de tension ; R_K : la résistance dans l'état « ON » de l'interrupteur ; I_K : courant circulant au borne de l'interrupteur lors de la commutation.

Les pertes de commutation sont la puissance dissipée pendant la fermeture (l'état ON) et l'ouverture (l'état OFF) de l'interrupteur. Pour calculer les pertes de commutations des interrupteurs, il faudrait connaître les formes de la tension et du courant pendant l'intervalle de commutation. La figure II.14 montre un exemple des formes d'ondes des tensions et du courant pendant la commutation pour un IGBT.

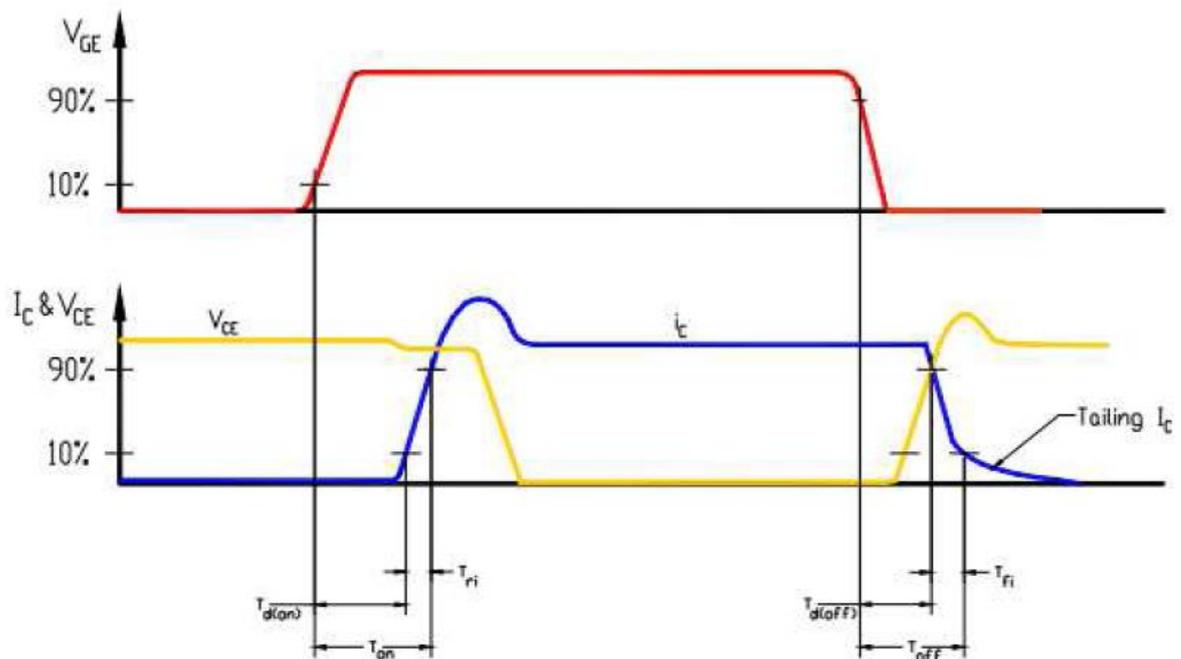


Figure II.15: Commutation de l'IGBT [25]

Les pertes de commutation dans les IGBT peuvent être définies par :

$$P_{Kcom} = \frac{1}{2} I_K \cdot V_K (t_{dON} + t_r + t_{dOFF} + t_f) f \quad (II.62)$$

I_K et V_K sont le courant et la tension aux bornes de transistor durant la commutation.

t_{dON} ; t_r ; t_{dOFF} et t_f sont le temps de retard à l'état « ON » ; temps de montée ; temps de retard à l'état « OFF » ; temps de descente respectivement.

II.5.2.2 Les pertes dans les diodes

Les pertes de conduction de diode peuvent être définies par :

$$P_{D_{cond}} = I_{D_{eff}}^2 \cdot R_D + I_{D_{moy}} \cdot V_D \quad (II.63)$$

V_D : la chute de tension de la diode ; R_D : la résistance dans l'état « ON » de la diode ;

Pour les diodes de type Schottky les pertes de commutation sont négligeables.

II.5.3 Pertes dans le condensateur

Les pertes dans le condensateur est définies par :

$$P_C = R_{eq} \cdot I_{eff}^2 \quad (II.64)$$

II.6 Modulation de largeur d'impulsions MLI

Dans cette étude, l'interrupteur du convertisseur est attaqué par un signal MLI avec une fréquence f fixe et un rapport cyclique α variable.

La commande par MLI (PWM : Pulse Width Modulation) est une technique de commande par un signal rectangulaire d'une fréquence (période) constante et d'un rapport cyclique α variable. Le rapport cyclique est défini comme étant le temps TON pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement T, soit : $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$ [20].

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$V_{ref} \geq V_P \quad \Rightarrow \quad S(t) = 1 \text{ si non } S(t) = 0$$

Avec : V_{ref} : Tension de référence ; V_P : Tension de porteuse ; $S(t)$: est le signal MLI résultant.

La modulation de largeur d'impulsion est basée sur la comparaison d'une onde modulée (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

L'utilisation de la modulation MLI permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les semi-conducteurs et les différentes structures des convertisseurs DC/DC pour les applications des piles à combustible. Ensuite, nous avons étudié en particulier deux topologies de convertisseur DC/DC non isolé « Boost et Sepic » et présenter leurs principes de fonctionnement en mode continu, leurs avantages et inconvénients, le dimensionnement de leurs composantes qui constituées, et les pertes dans ces convertisseurs. Dans le suivant chapitre, notre discussion se centre à la commande de convertisseur DC/DC « Boost » par régulateur PI.

Chapitre III :
Commande des convertisseurs
DC/DC

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous nous sommes essentiellement intéressés au fonctionnement du convertisseur DC/DC. Ce convertisseur gère l'énergie entre la source (PAC) et la charge, pour son bon fonctionnement une stratégie de commande est nécessaire. Dans notre travail, nous allons étudier la stratégie de commande de l'interface d'électronique de puissance.

Ce chapitre est dédié à la commande du convertisseur DC/DC utilisé pour l'application pile à combustible. Concerne la pile à combustible connecté via un convertisseur DC/DC, qui assure son régulation en utilisant un régulateur linéaire de type PI. Pour contrôler le convertisseur DC/DC.

III.2 Modélisation linéaire de convertisseur DC/DC « élévateur »

Afin de concevoir nos commandes du convertisseur, le modèle dynamique approprié est nécessaire pour obtenir les relations entre les entrées et les sorties ainsi que le comportement du convertisseur et des sources.

Les travaux présentés dans [26,27] donnent la fonction de transfert en boucle ouverte dans le domaine de Laplace suivante.

La dépendance de la tension de sortie vis-à-vis le rapport cyclique est donné par :

$$\frac{V_S}{\alpha} = \frac{V_S}{(1-\alpha)} \frac{1 - \frac{L}{R(1-\alpha)^2}P}{1 + \frac{L}{R(1-\alpha)^2}P + \frac{LC}{(1-\alpha)^2}P^2} \quad \text{III.1}$$

Du côté de la charge, nous considérons une charge résistive $R=10\Omega$ et une fréquence de hachage de 100kHz, une tension maximale du bus DC $V_S = 48V$.

Pour $\alpha = 0.5$, la fonction de transfert de système est :

$$G = \frac{-0.0046P+96}{1.056 \times 10^{-7}P^2 + 4.8 \times 10^{-5}P + 1} \quad \text{III.2}$$

La figure III.1 et La figure III.2 suivantes montre le diagramme de Bode et la réponse en boucle ouverte du système pour rapport cyclique $\alpha = 0.5$.

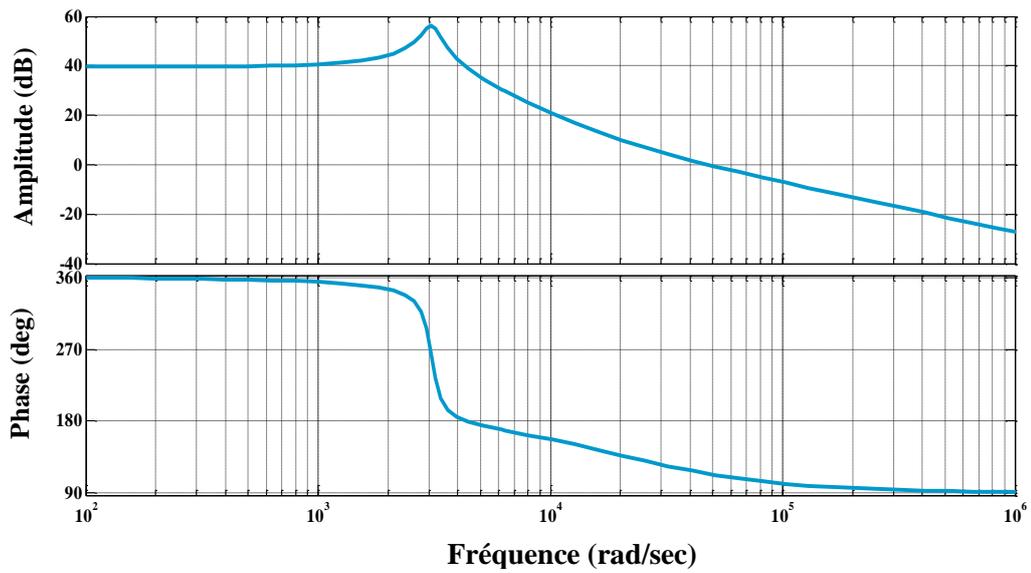


Figure III.1: Diagramme de Bode de la boucle de tension

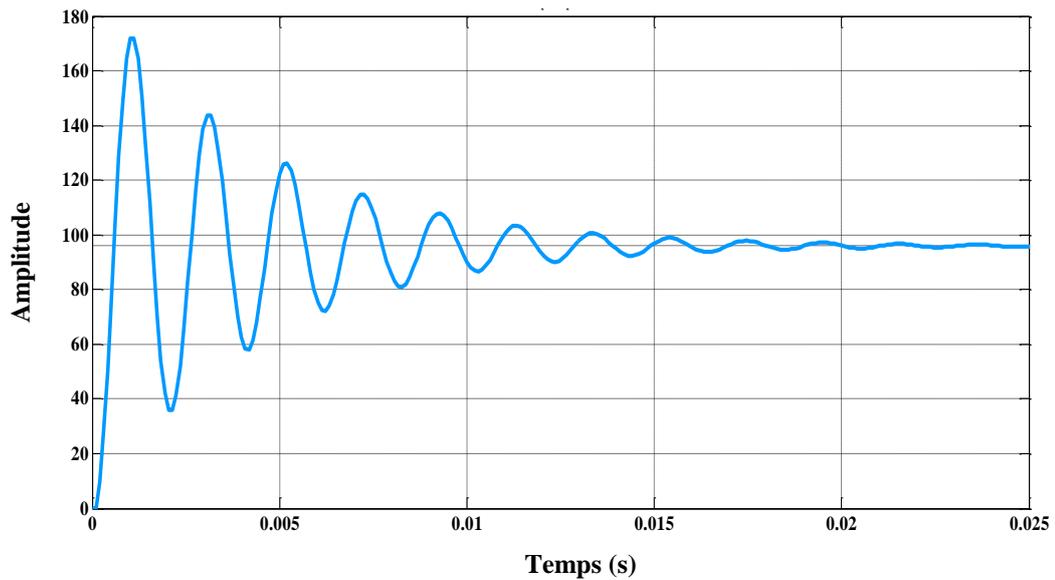


Figure III.2: Réponse en boucle ouverte

D'après ces graphiques on constate que le système reste stable en boucle ouverte pour valeur de rapport cyclique $\alpha = 0.5$ mais il représente beaucoup de dépassement. Dans ce qui suit nous synthétisons le régulateur du type PI.

III.3 Commande par le régulateur PI

Dans cette section, on a mis en place une commande à une boucle de régulation de la tension de sortie V_S (figure III.3), qui compare la tension de référence de sortie avec la tension mesurée pour donner l'erreur corrigée qui permet d'obtenir le rapport cyclique α . Enfin une stratégie de commande MLI permet de comparer le rapport cyclique à un signal modulant de la fréquence de commutation f , pour donner des impulsions 0 ou 1 du convertisseur [28].

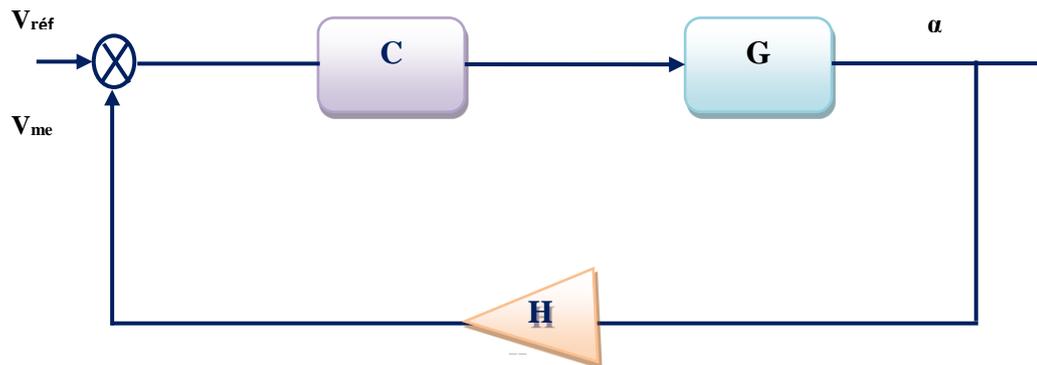


Figure III.3: Structure de la commande par deux boucles de contrôle.

Avec :

$V_{\text{réf}}$: tension de référence ; C : régulateur de tension ;

α : le rapport cyclique ; G : fonction de transfert $\frac{V_S}{\alpha}$; H : gain du capteur de V_S .

III.3.1 Présentation de régulateur proportionnel intégral PI

Le régulateur utilisé pour cette partie de commande est le régulateur classique Proportionnel Intégrateur **PI**, qui comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de référence.

1- action proportionnelle

- si K_p est grand la correction est rapide, le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.
- si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

2- action intégrale

- L'action intégrale réagit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.
- Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

Donc pour obtenir une réponse plus rapide et plus précise, on utilise un correcteur proportionnel-intégral PI.

Le régulateur PI est connu par une loi de commande:

$$C(t) = K_P e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{III.3}$$

Son fonction de transfert (c'est -à-dire après la transformation de Laplace) sera :

$$C(p) = K_P + \frac{K_i}{p} \quad \text{III.4}$$

Avec :

K_P : gain proportionnel ; K_i : gain intégrale.

Le régulateur PI est donné par la figure suivant :

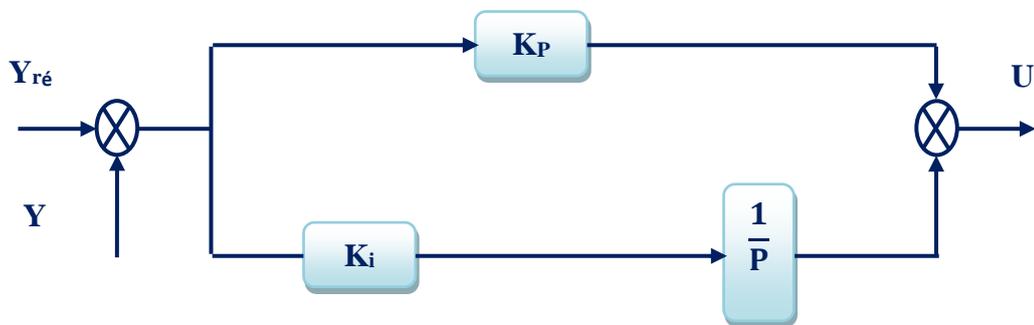


Figure III.4 : schéma bloc d'un régulateur PI.

III.3.2 Caractéristiques de régulateur

1- Stabilité :

Un système bouclé doit être stable. Seulement si les réactions du système de régulation soient énergétiques sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger. Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité.

2- Précision :

En régulation, la précision est obtenue par l'implantation d'intégration dans la boucle.

3- Rapidité :

En générale, un système bouclé doit répondre rapidement à la variation de sa consigne (poursuite) et effacer rapidement les perturbations (régulation). Le temps de réaction est, bien entendu, en relation étroite avec l'inertie propre du processus, [30].

Pour la détermination de correcteur $C(s)$, nous utilisons le logiciel Sisotool qui est intégré dans l'environnement Matlab-simulink.

III.3.3 Méthode Matlab « Sisotool »

Pour appliquer cette méthode on suit les étapes suivantes :

- 1- Entrez la fonction de transfert $G(p)$, dans votre espace de travail (c'est-à-dire à partir de la fenêtre de Matlab commande).
- 2- Tapez « Sisotool » à la fenêtre de Matlab commande : `>>Sisotool`.

La fenêtre de cet outil apparaît comme dans la figure III.5.

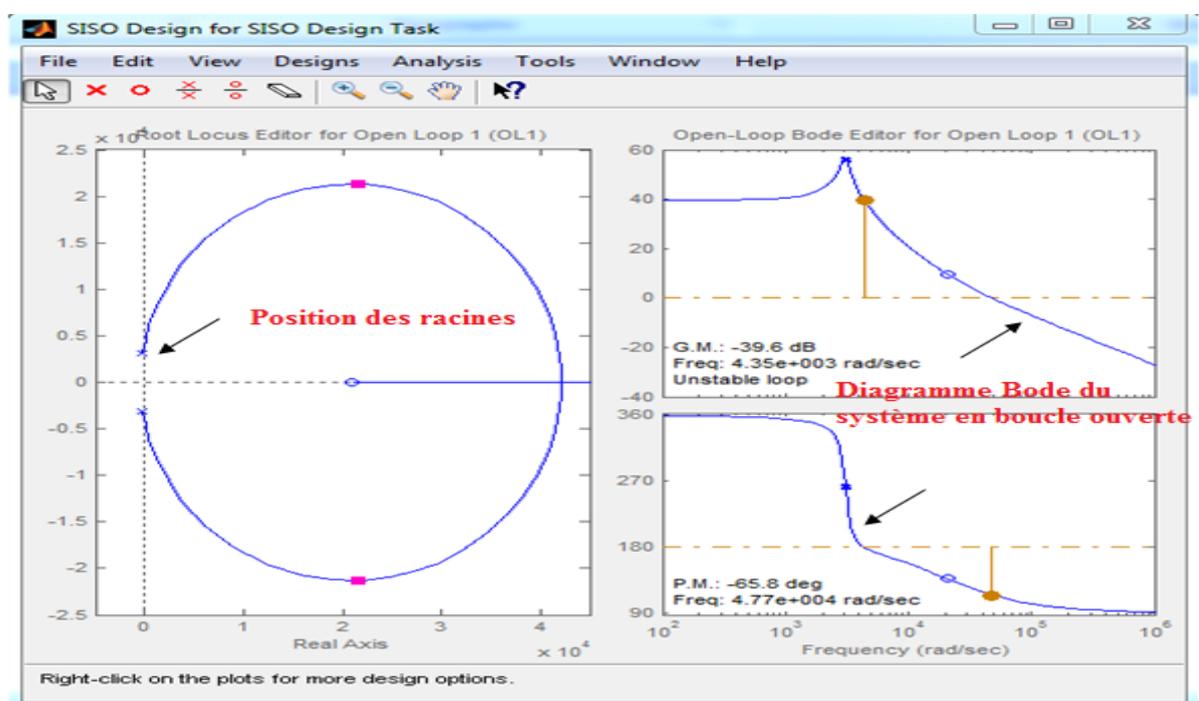


Figure III.5: Fenêtre de l'outil Sisotool

Cette étape franchie, nous choisissons la boucle de régulation souhaitée comme ci montré sur la figure III.6.

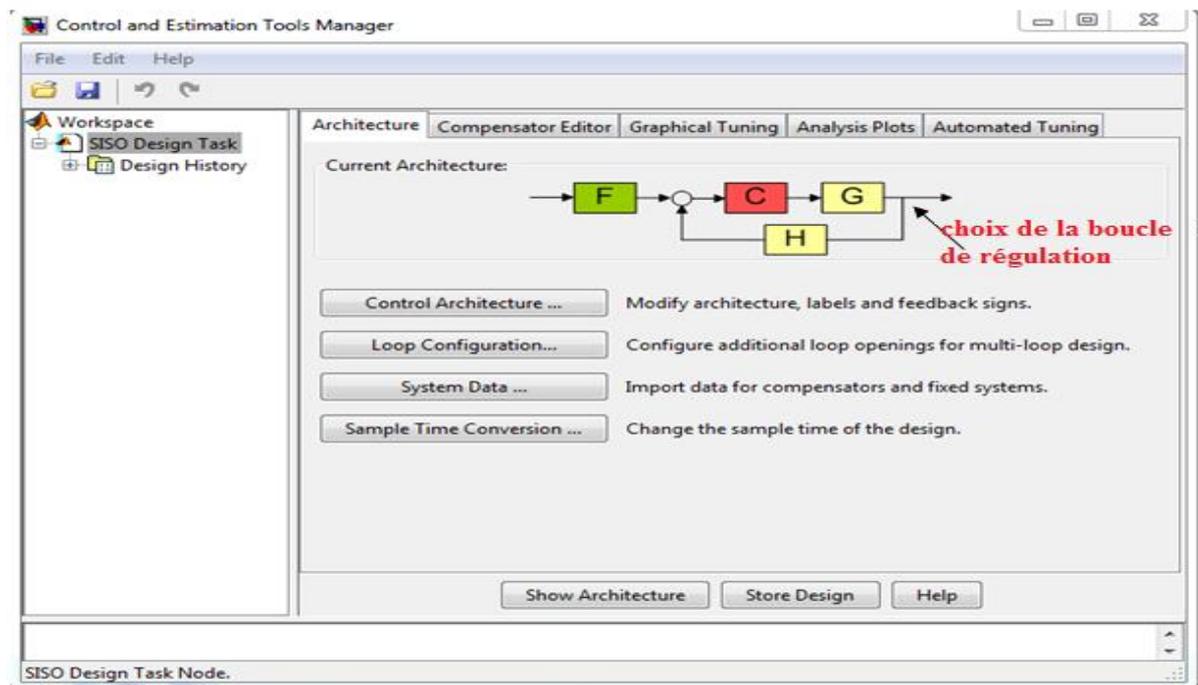


Figure III.6 : choix de la boucle de régulation

Réglage de la boucle interne en renseignant les blocs F (échelon de courant unitaire), G (fonction de transfert de système $G = \frac{V_S}{\alpha}$) et H (gain du capteur de tension).

Après le choix de la boucle de régulation on définit le régulateur PI ou PID en utilisant la fenêtre « compensator editor » comme ci montré sur la figure III.7.

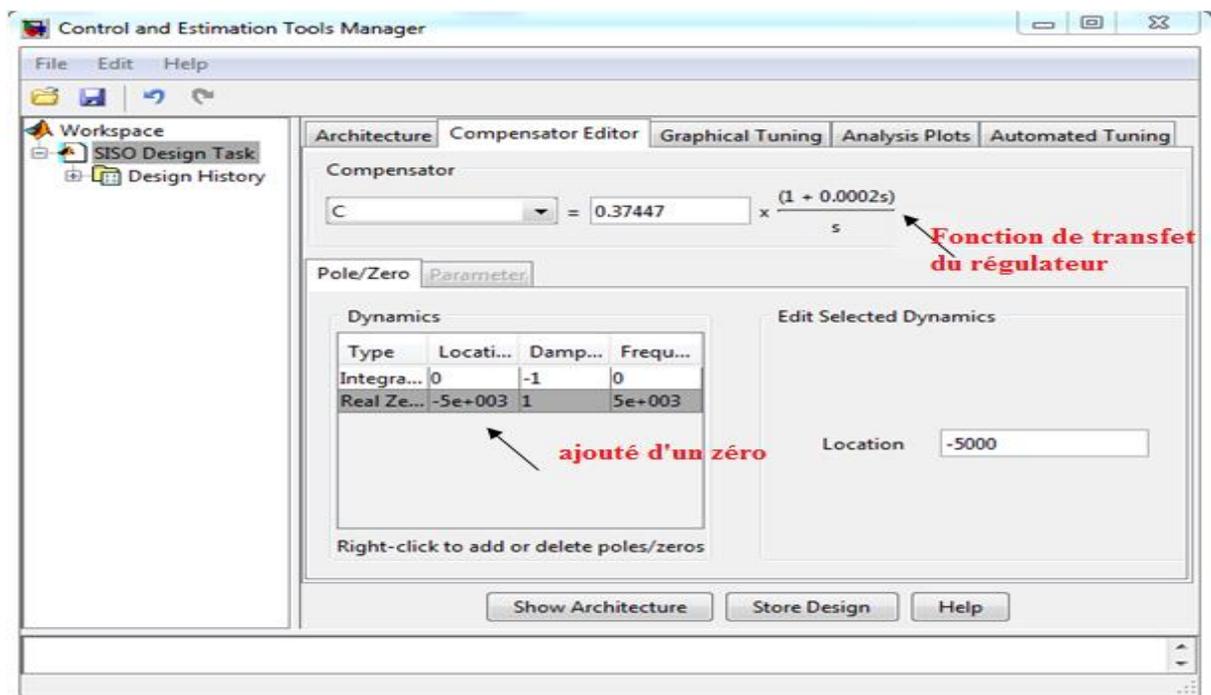


Figure III.7 : Définition du correcteur

Après les trois étapes expliquées précédemment, on analyse le comportement de système. La figure III.8 montrera la fenêtre d'analyse des systèmes

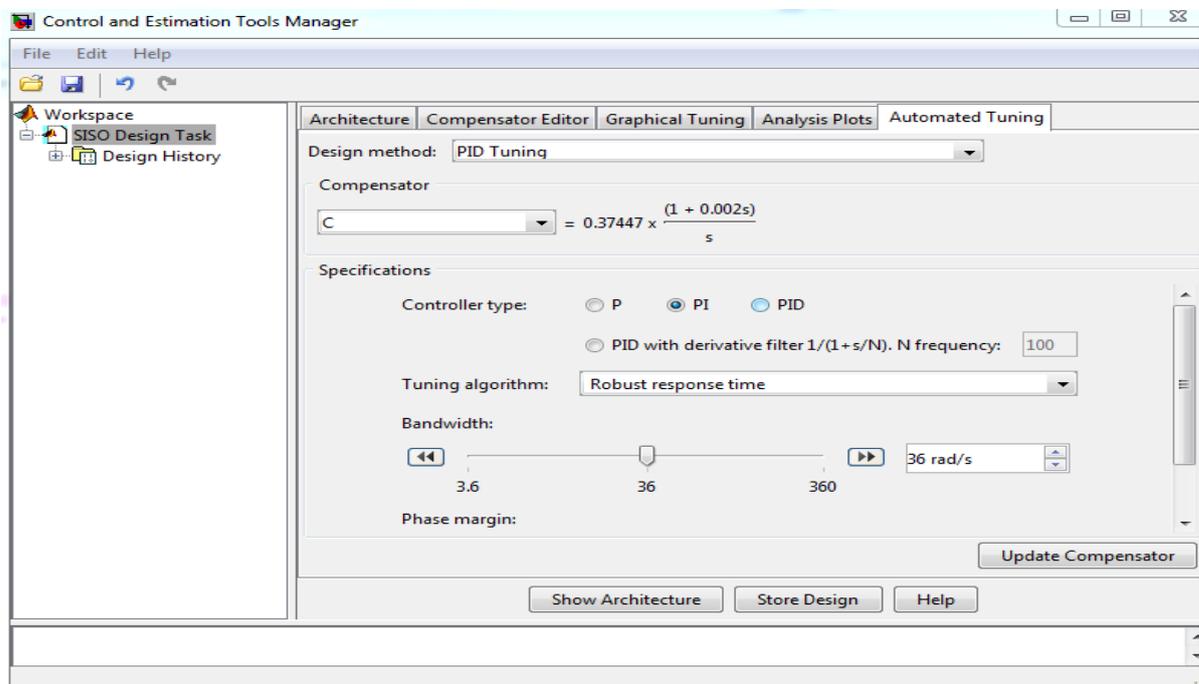


Figure III.8 : menu de réglage des paramètres

On renseigne le type de correcteur, l'algorithme de résolution (Robust Response Time), la bande passante et la marge de phase. Nous obtenons le correcteur.

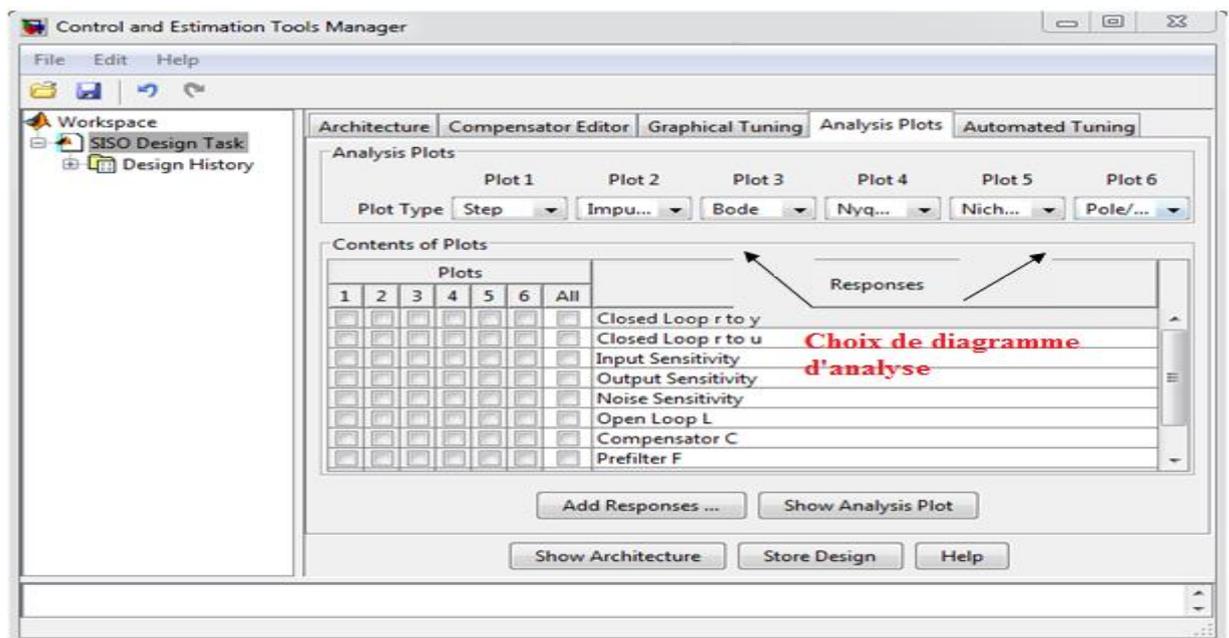


Figure III.9 : choix les diagrammes d'analyse

Ce qui nous donne une réponse indicielle de la tension de sortie.

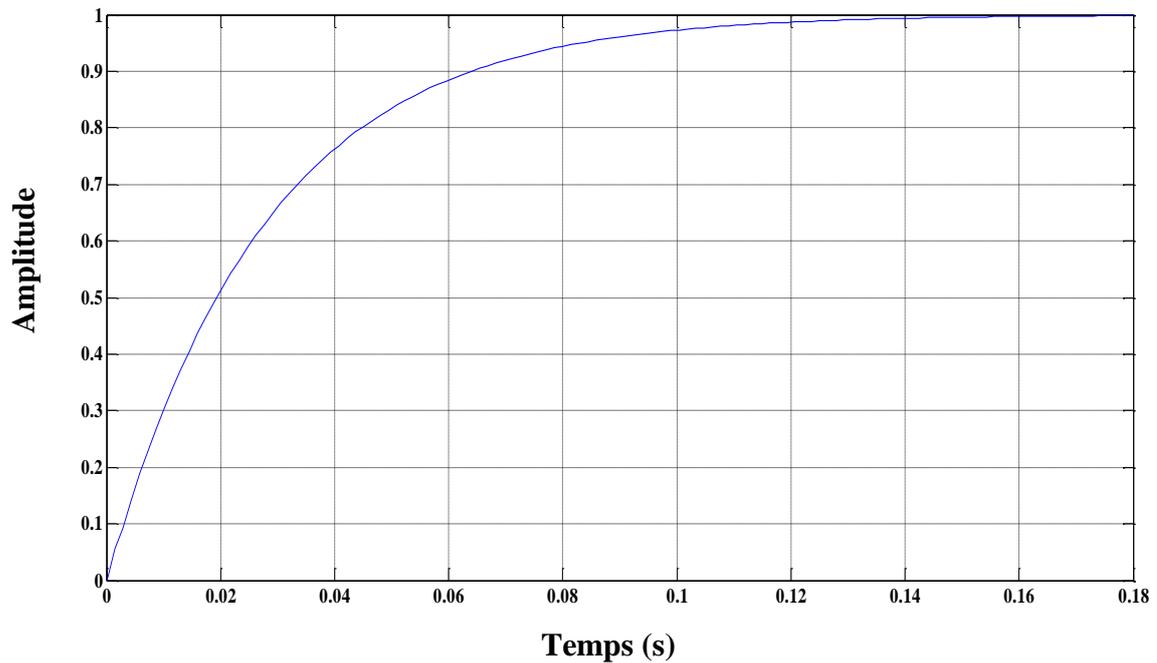


Figure III.10 : La réponse de la tension de sortie

Enfin, le logiciel fourni un régulateur de la forme $C(p) = K_P + \frac{K_i}{p}$.

Les diagrammes de Bode de PI sont :

- Le diagramme d'amplitude en dB : $A_{dB} = 20 \text{Log} (|C(jW)|)$.
- Le diagramme de phase en degré : $\varphi = \text{Arg} (C(jW))$.

Leurs allures sont données dans la figure suivante :

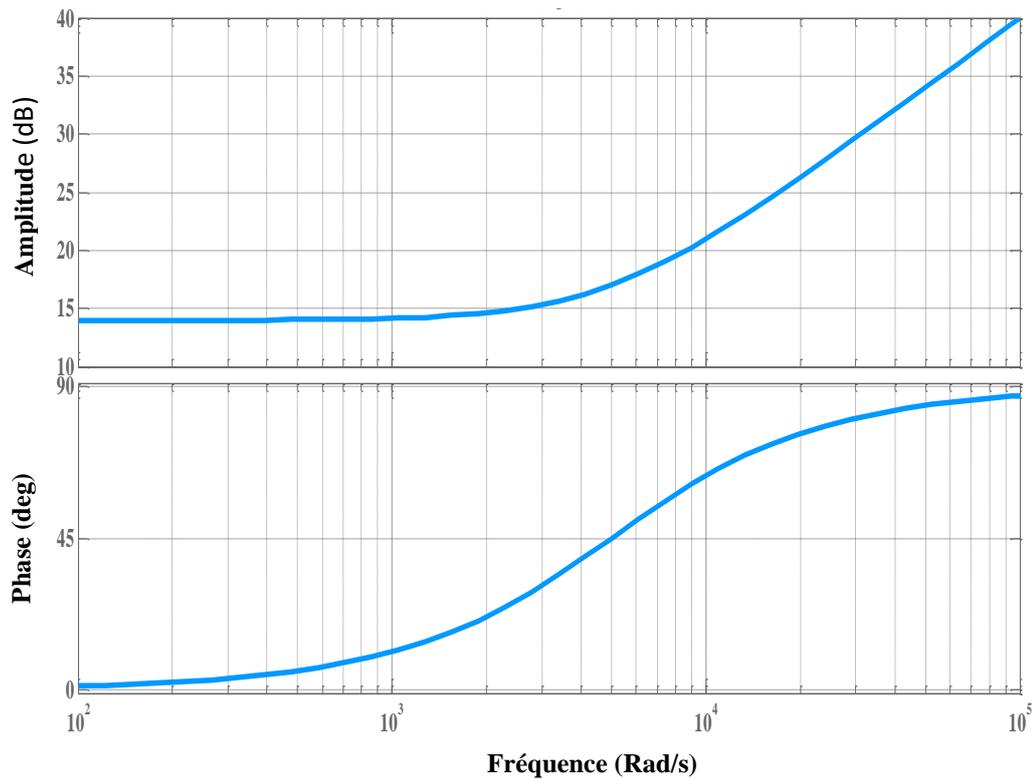


Figure III.11 : Diagrammes de Bode du correcteur PI

Le diagramme de Bode d'un système de réponse fréquentielle est ainsi une représentation graphique composé de deux tracés :

- Le gain (ou amplitude) en décibels (dB). Sa valeur est calculée à partir de $20\text{Log}(|C(jW)|)$.
- la phase en degré, donnée par $\varphi = \text{Arg}(C(jW))$.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude générale sur la commande du convertisseur DC/DC « élévateur » par un régulateur linéaire PI, de son présentation, son caractérisation. Et on a fait une bref explication sur la méthode de calcul des paramètres KP et Ki de régulateur linéaire de type PI « Sisotool » sous l'environnement Matlab.

Chapitre IV :
Résultats expérimentales et
simulation

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, on a modélisé la pile à combustible de type PEM et on a dimensionné la structure de convertisseur DC/DC non isolé « élévateur et Sepic ». Nous avons traité la commande de convertisseur DC/DC « élévateur » en boucle fermée par le régulateur PI.

Nous présentons dans ce chapitre trois parties de travail, la première partie est dédiée pour saisir les résultats pratiques de la pile à combustible type PEM, (la validation expérimentale est effectuée au niveau du laboratoire des énergies renouvelables Biskra). Et dans la deuxième partie on a montré les résultats de simulation des convertisseurs DC/DC « élévateur et Sepic » en boucle ouverte. En fin, les résultats de simulation de système pile-convertisseur-charge en boucle fermée ont mis dans la dernière partie.

IV.2 Présentation de la maquette

Dans cette partie actuelle, nous éclairerons sur l'étude pratique, afin d'obtenir une plus grande profondeur des résultats sur cette recherche, qui sont réalisées sur une maquette pédagogique de marque Horizon, la figure IV.1 montre tous les éléments qui constituent la maquette. Elle est basée sur deux types des énergies renouvelables qui sont l'énergie solaire photovoltaïque, et la pile à combustible (l'hydrogène).

Notre travail se centre sur la discussion autour de :

- 1- Comment produire l'hydrogène à partir d'un électrolyseur d'eau avec une source d'énergie solaire photovoltaïque ?
- 2- Comment fonctionne la pile à combustible, afin de produire l'énergie électrique ?

IV.2.1 Production d'hydrogène

Différents processus sont actuellement utilisés pour produire l'hydrogène, parmi lesquels, électrolyse de l'eau. Ce processus de production d'hydrogène nécessite une énergie électrique devrait provenir de source renouvelable (un panneau solaire photovoltaïque) pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène.

Premièrement et avant la production d'hydrogène, on fait une petite étude sur le panneau solaire et l'électrolyseur PEM utilisée dans cette expérience pour donner leurs caractéristiques.

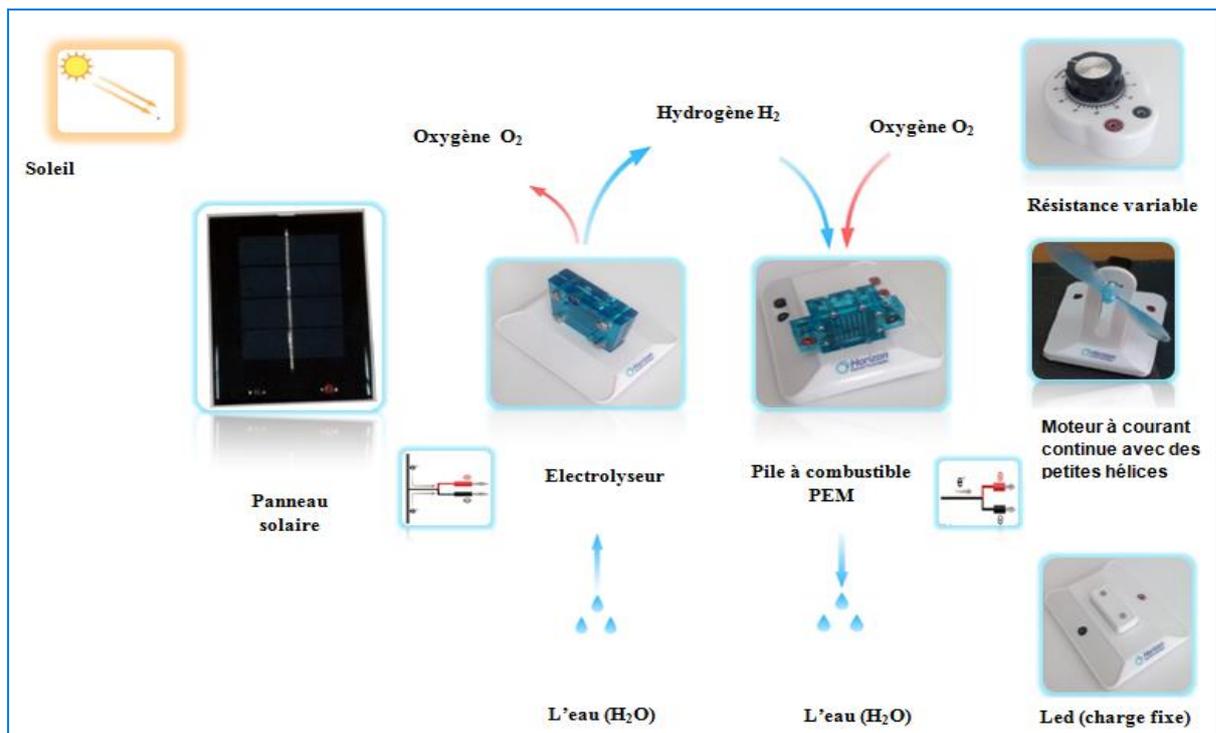


Figure IV.1 : Cycle de production d'électricité à partir d'une pile à combustible

.IV.2.1.1 Panneau solaire

Le panneau solaire est utilisé de fournir l'énergie électrique pour alimenter l'électrolyseur, il est constitué des plusieurs cellules en série où en parallèle. La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives qui absorbe l'énergie lumineuse (photons) et la transforme directement en courant électrique, la figure IV.2 montre les trois mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une énergie électrique.

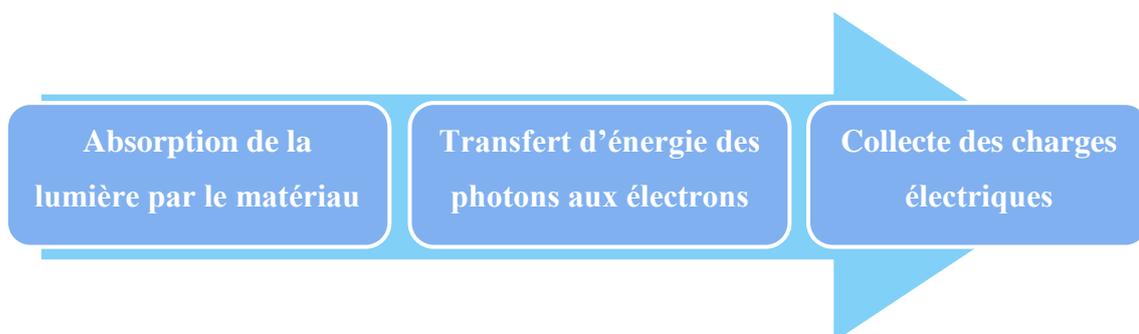


Figure IV.2: Mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une énergie électrique.

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. La figure IV.3 illustre le modèle simplifié de la cellule photovoltaïque.

Le circuit équivalent d'une cellule solaire réalisé par la connexion en parallèle d'une diode de courant de saturation I_0 et de facteur de diode n , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. Une résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. Sa valeur peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique I/V pour la tension à circuit ouvert V_{oc} .

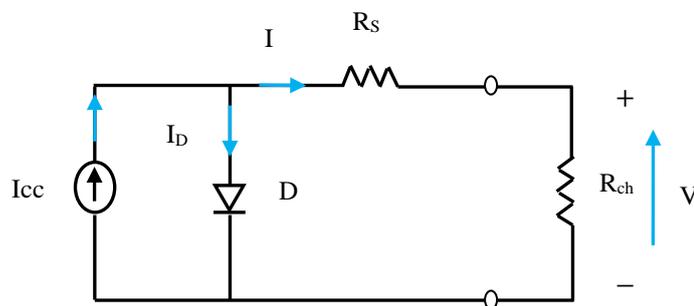


Figure IV.3 : Modèle électrique équivalent simplifié de la cellule photovoltaïque.

Pour analyser la figure IV.3, le circuit équivalent sera simplifié :

$$I = I_{cc} - I_D \quad \text{IV.1}$$

$$I = I_{cc} - I_0 \left(\exp^{q \left(\frac{V + I R_s}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad \text{IV.2}$$

Où :

I_D : le courant de diode ;

I : le courant d'une cellule ;

I_{cc} : le courant de court-circuit ;

I_0 : le courant de la saturation de la diode ;

q : la charge d'un électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) ;

V : la tension aux bornes d'une cellule ;

R_s : la résistance en série ;

n : facteur d'idéalité de la diode ;

K : la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin) ;

T : la température de la cellule en Kelvin.

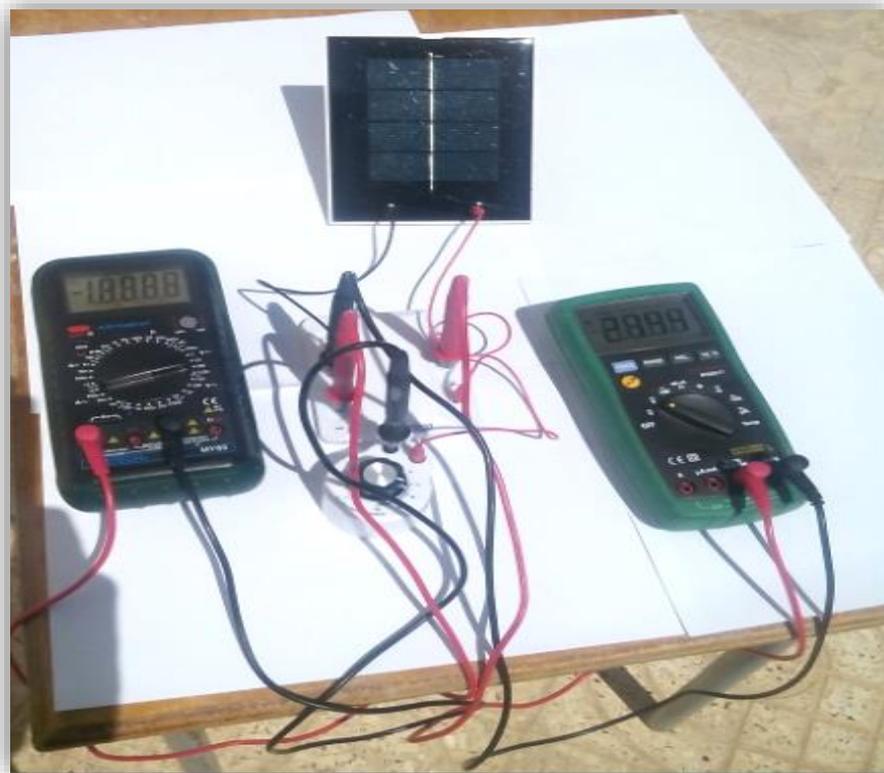


Figure IV.4 : Montage pour relever la caractéristique électrique de panneau solaire.

La figure IV.4 propose une configuration classique de mesure pour relever les caractéristiques I/V et P/V de panneau solaire cette opération est réalisée manuellement en variant successivement la charge de 100Ω toute en enregistrant les valeurs correspondantes du courant et de tension de panneau, cette méthode est simple à réaliser, mais en même temps difficile de prendre les mesures de différentes grandeurs instantanément pour le même ensoleillement la mesure peut durer quelque minutes pendant ce temps l'éclairement peut changer et cela influe énormément sur la qualité de mesure.

Les paramètres identifiés expérimentalement sont la résistance en série et le coefficient d'idéalité, ils sont donnés dans le tableau IV.1 avec les autres caractéristiques du panneau. Les caractéristiques électrique (I/V) et (V/P) pratiques de ce panneau est présentée dans la figure IV.5 et la figure IV.6. Ces caractéristiques sont obtenues Pour un éclairement qui est égale à 1000 Watt/m^2 et une température ambiante de $25,4^\circ\text{C}$.

Caractéristique		Valeur
La puissance maximale	P_{max}	1.09 watt
La tension du circuit ouvert	V_{OC}	2.19 v
Le courant de court-circuit	I_{CC}	0.58 A
La tension optimale	V_{opt}	2.06 v
Le courant optimal	I_{opt}	0.53 A
La résistance en série	R_S	0.01 ohm
Le coefficient d'idéalité		1.3

Tableau IV.1 : Paramètres de panneau solaire.

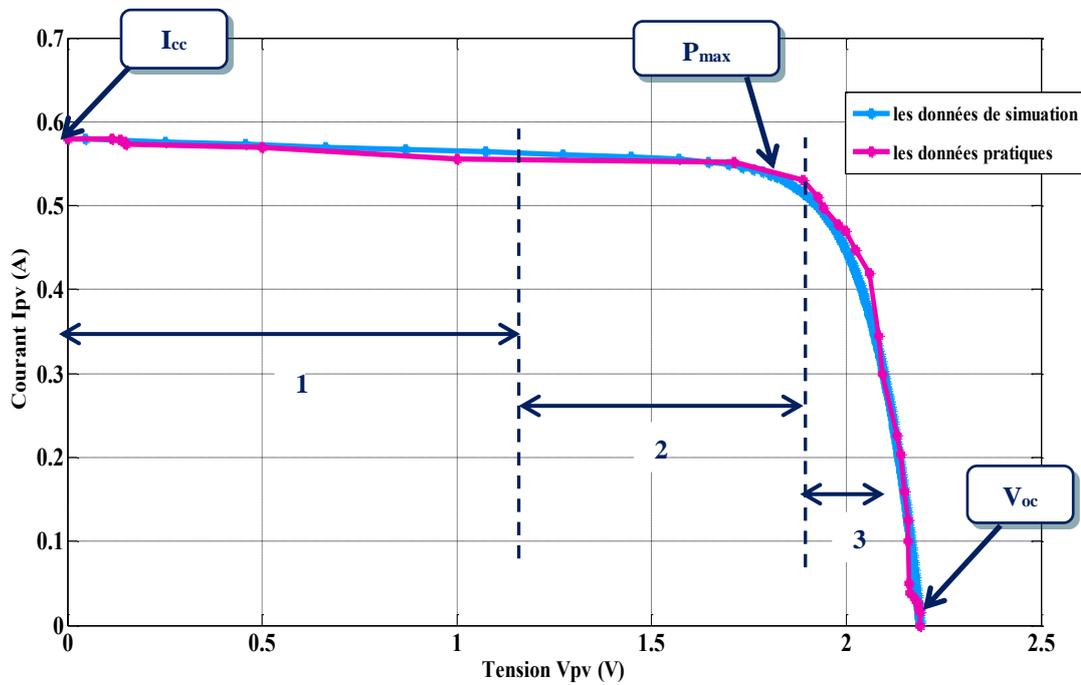


Figure IV.5 : L'allure de la caractéristique (V_{pv} - I_{pv}) du panneau

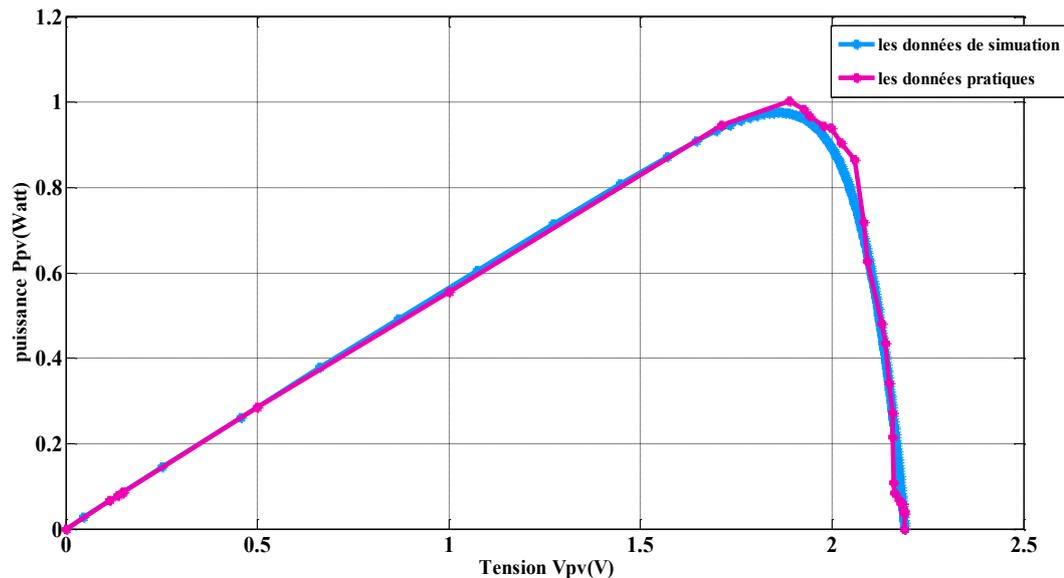


Figure IV.6 : L'allure de la caractéristique (V_{pv} - P_{pv}) du panneau

On constate que qualitativement, la courbe obtenue par la simulation est conforme et superposée à la courbe de panneau obtenue expérimentalement, donc notre modèle est fiable. On remarque que, sous un éclairage donné le panneau photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire. Cette courbe est caractérisée essentiellement par trois zones :

- a- Zone 1 : le panneau fonctionne en générateur de tension.
- b- Zone 2 : c'est la zone préférée pour le fonctionnement optimal, ou le panneau délivre sa puissance maximale, comme il est indiqué sur la figure IV.6.
- c- Zone 3 : le panneau fonctionne en générateur de courant.

Les deux grandeurs (courant/tension), dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique aux bornes de panneau photovoltaïque.

D'après les caractéristiques courant-tension, il est possible de déduire d'autres paramètres électriques spécifiques à chaque cellule :

- Sa tension à vide V_{oc} , Cette valeur représenterait la tension générée par un panneau non raccordée, pour ce panneau $V_{oc} = 2.19v$.
- Son courant de court-circuit I_{cc} , Cette valeur représenterait le courant généré par le panneau raccordé à elle-même, pour ce panneau $I_{cc} = 0.58 A$.
- Sa puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension optimale V_{opt} multipliée par le courant optimal I_{opt} : $P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt}$.

IV.2.1.2 la production d'hydrogène par l'électrolyse PEM

L'énergie électrique générée par le panneau solaire attaque l'électrolyseur PEM pour, décompose les molécules d'eau distillé en hydrogène et oxygène puis, stockant dans deux tubes comme la figure IV.7 indique.

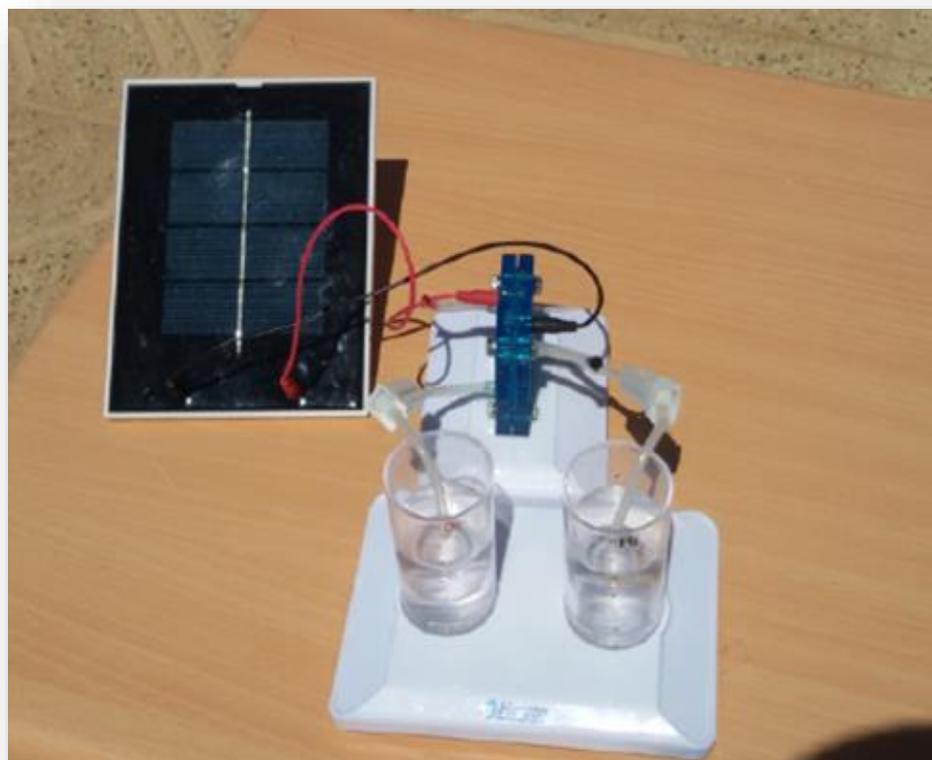


Figure IV.7 : Production d'hydrogène par une électrolyse PEM à partir d'énergie solaire.

Paramètre	Valeur
Duré	5 min 17 secondes
Volume de H ₂ produit	14ml
Volume d'O ₂ produit	7ml

Tableau IV.2 : Dimensionnement de l'électrolyseur

On constate que, d'après cette expérience le volume d'hydrogène produit est deux fois plus important de celle d'oxygène.

IV.2.1.2 Caractéristique électrique de Pile à combustible PEM

Dans ce partie, nous avons laissé plus de place pour discuter de l'élément l'important de la présente recherche qu'est la pile à combustible PEM. On va étudier ses caractéristiques

électriques statique et dynamique expérimentalement, la figure IV.8 représente l'essai validé pour relever leurs caractéristiques.

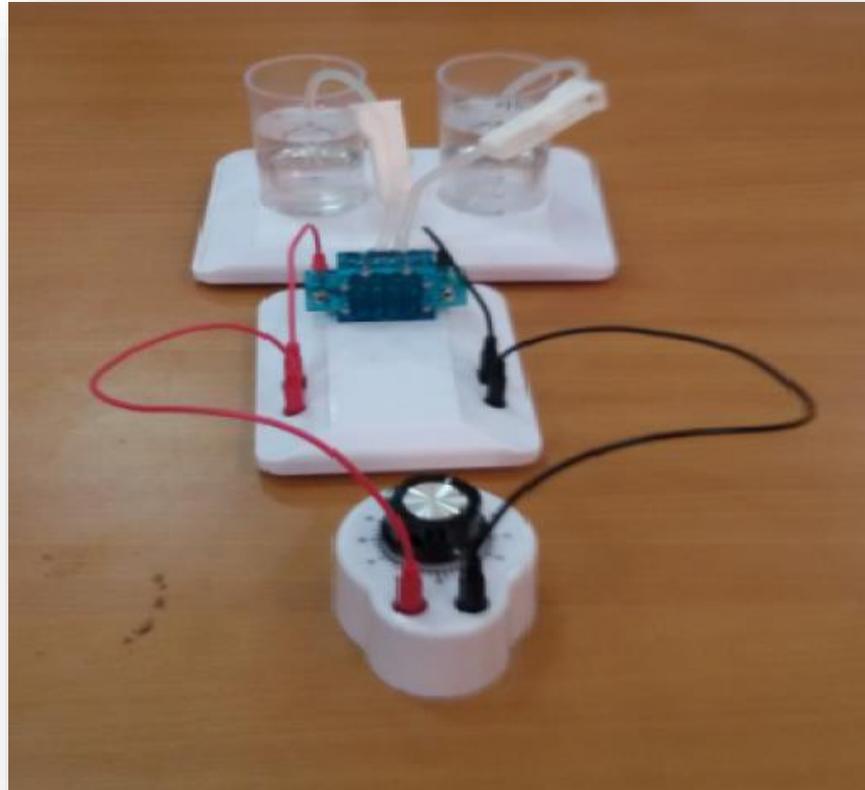


Figure IV.8 : Pile à combustible avec une charge variable.

a- Modèle statique :

Nous avons expliqué ce modèle précédemment (modèle statique de Larminie–Dick), qui met en évidence la relation entre la tension de sortie de la pile à combustible et le courant débité. Les résultats expérimentaux sont effectués sur une pile PEM d'une seule cellule unitaire. Pour voir l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique Courant /Tension, il faut varier ce paramètre et fixer les autres.

1- L'influence d'une variation de la résistance de la membrane

On remarque que la variation de la résistance influe sur la zone linéaire de la caractéristique statique donc sur la chute ohmique, l'augmentation de la résistance implique une diminution de la tension avec des valeurs constantes de courant.

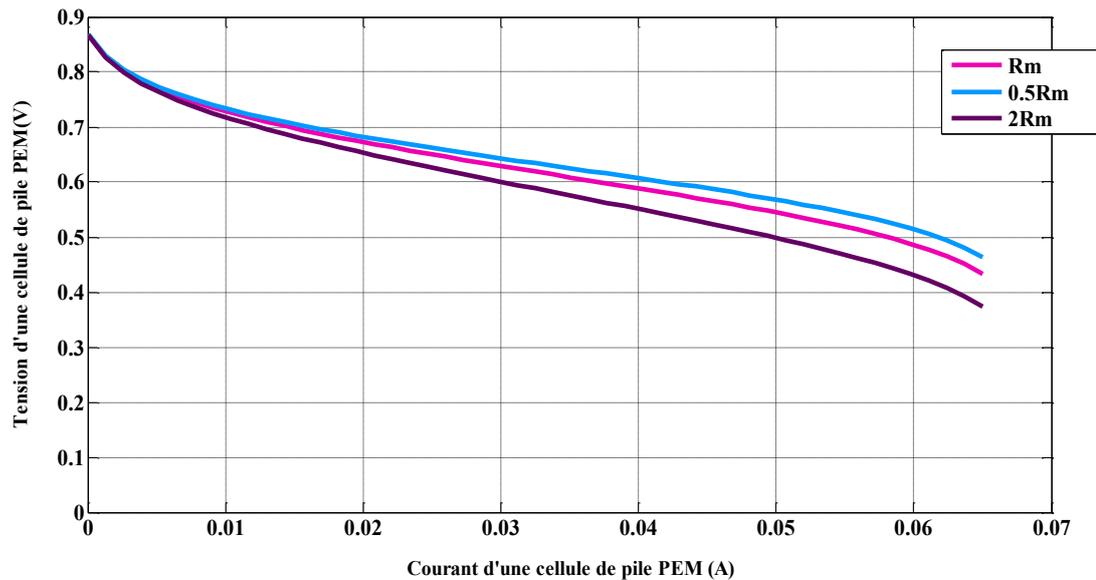


Figure IV.9 : Influence de la résistance de la membrane sur la chute ohmique et sur la tension totale PàC (valeur de la résistance : $2R_m$, R_m et $0.5R_m$).

2- l'influence du coefficient A

On constate que d'après la courbe suivante le coefficient A influe sur la chute d'activation, il correspond à la pente de Tafel, et il est égale à $\frac{RT}{2\alpha F}$.

avec : R est la constante universelle des gaz ; $T(K)$ est la température en Kelvin ; F est le nombre de Faraday ; α est le coefficient de transfert de charges il varie de 0,1 à 1 selon la réaction et le type des électrodes. Plus le coefficient augmente plus la réaction est lente en générale A est égale à 0,06.

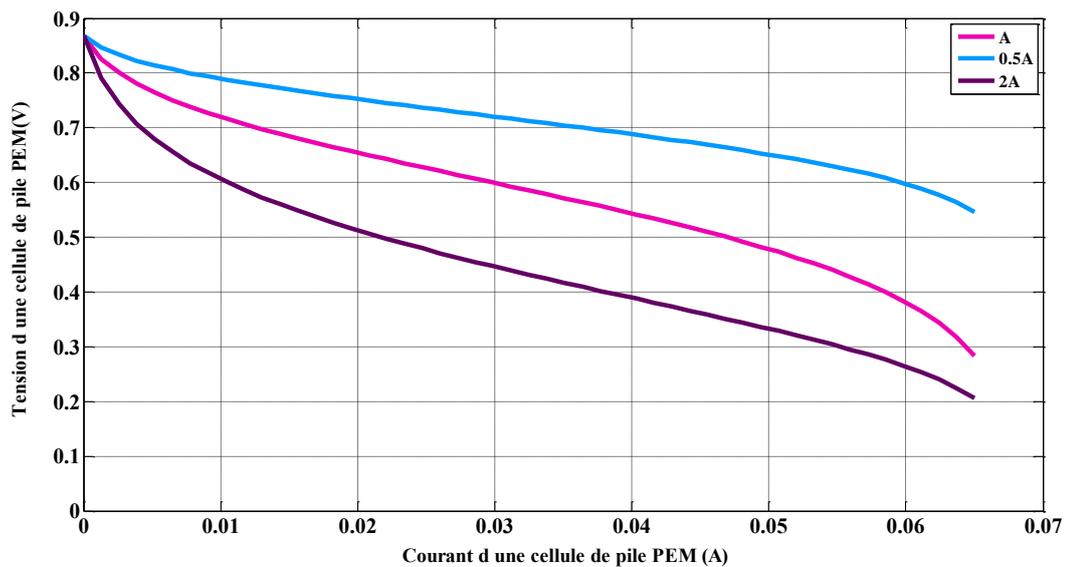


Figure IV.10 : Influence du paramètre A sur les pertes d'activation et la tension totale de la pile (valeur du coefficient : $2A$, A et $0.5A$).

3- Influence du courant d'échange i_0

Le courant i_0 est le courant d'échange et c'est à partir de sa valeur que la réaction commence à s'activer. On remarque que, l'augmentation de i_0 implique la diminution des pertes d'activation.

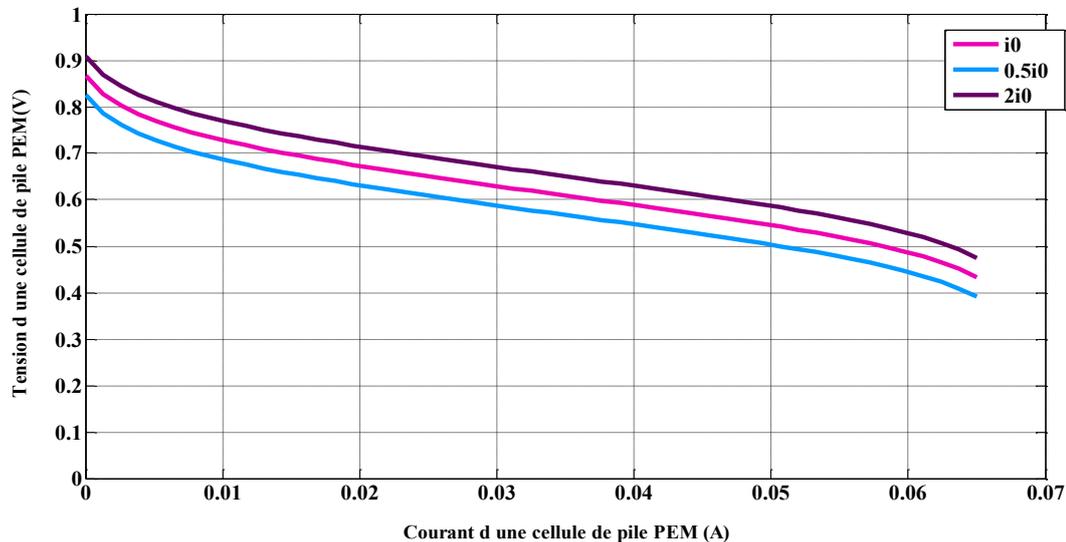


Figure IV.11: Influence du courant d'échange i_0 sur les pertes d'activation et la tension totale de la pile (valeur du coefficient : $2i_0$, i_0 et $0.5i_0$).

4- Influence du paramètre B

B est un facteur multiplicateur de la chute de tension de diffusion. Cette chute de tension intervient peu pour les faibles valeurs du courant, par contre elle intervient fortement pour les valeurs du courant qui s'approchent de la valeur du courant limite, B est égale à $\frac{RT}{2F}$.

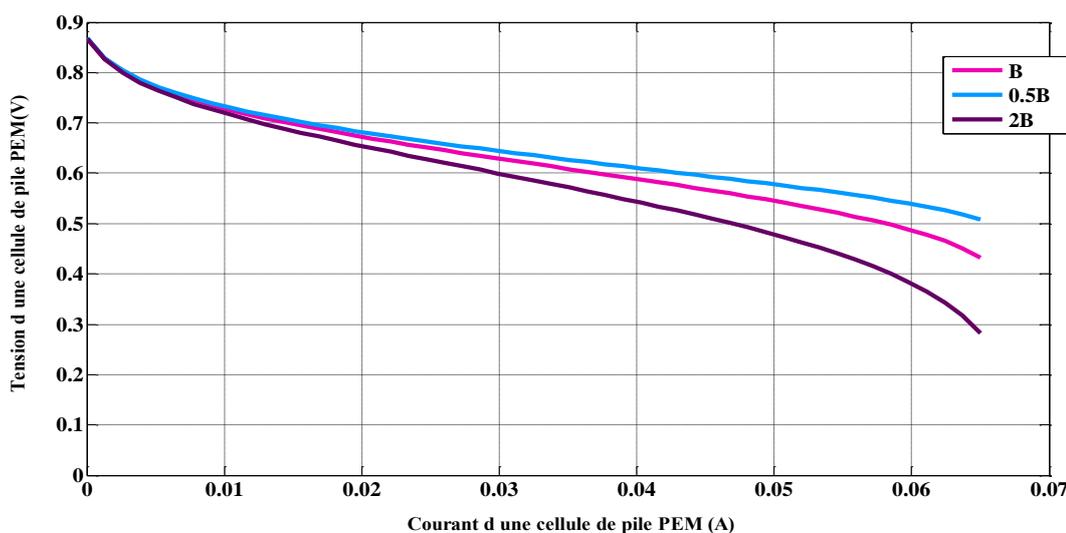


Figure 1.12 : Influence du paramètre B sur les pertes de transport de matière et la tension totale de la pile (valeur du coefficient : $2B$, B et $0.5B$).

5- Influence du courant limite I_L

Le courant I_L est influé sur la région de transport de masse sa valeur détermine la zone de fonctionnement de la pile.

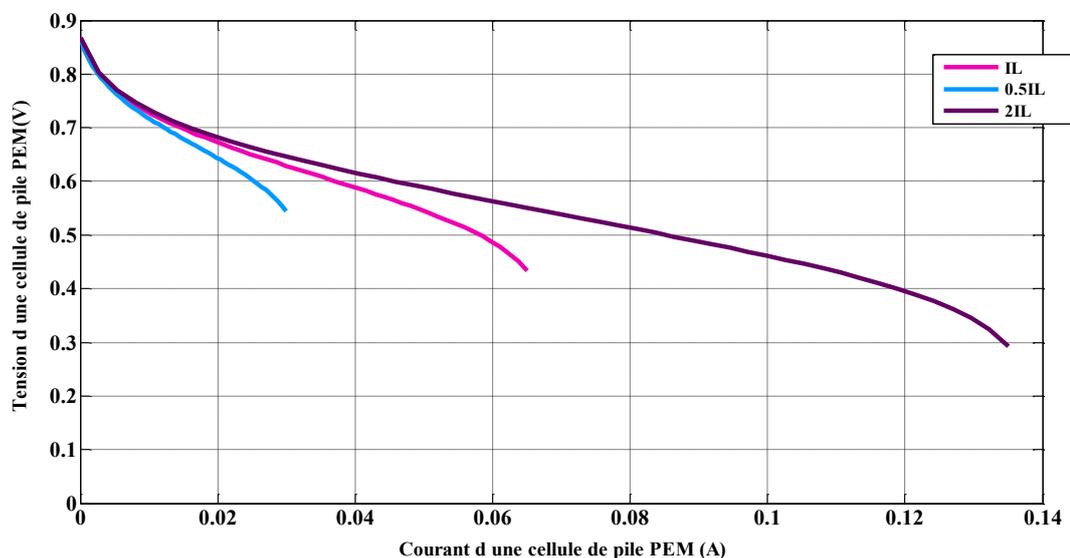


Figure IV.13 : Influence du courant limite I_{lim} sur les pertes de transport de matière et sur la tension totale Pile (valeur du courant limite I_{lim} : $2I_{lim}$, I_{lim} et $0.5I_{lim}$)

La technique utilisée pour le prélèvement de la caractéristique statique est d'appliquer une charge de 100 ohm afin d'activer la réaction, la variation de la charge implique une variation de courant d'une manière qu'il aura un balayage de la caractéristique.

L'application des charges ne sera pas simultanée mais elle dure plus d'une minute avec des débits constants pour rester dans le régime permanent.

Les paramètres du modèle statique de Larminie-Dick de la pile sont donnés dans le tableau suivant.

Pramètres	Valeur
E_0 (V)	0.87 V
i_0 (A)	0.0015 A
A	0.06
B	0.1
R_m (ohm)	0.9
i_n (A)	0.0015 A
i_L (A)	0.066 A

Tableau IV.3: Paramètres du modèle statique de Larminie-Dick.

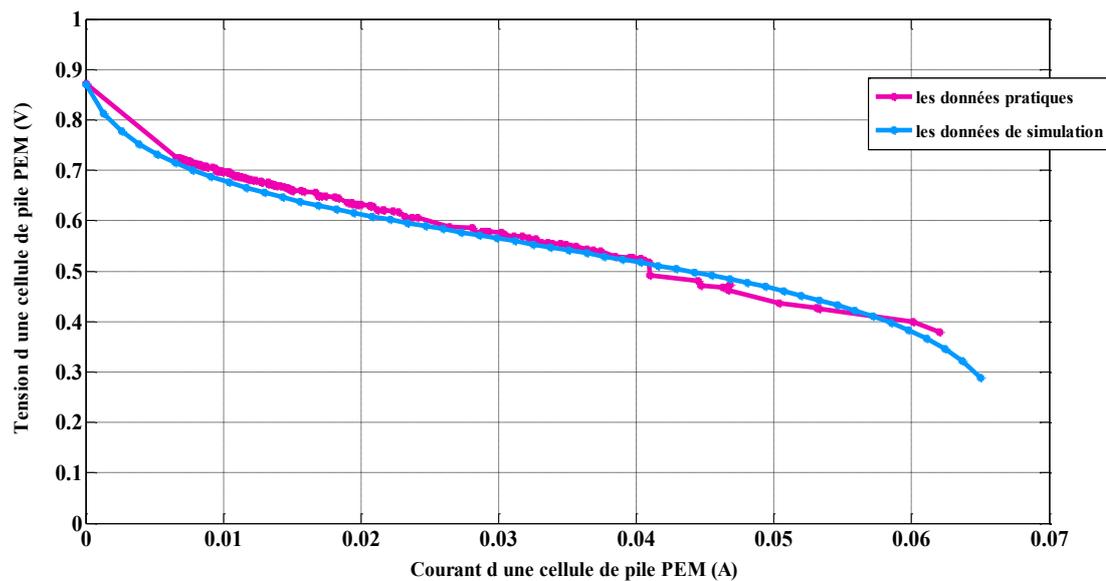


Figure IV.14 : L'allure de la caractéristique (I -V) de la pile.

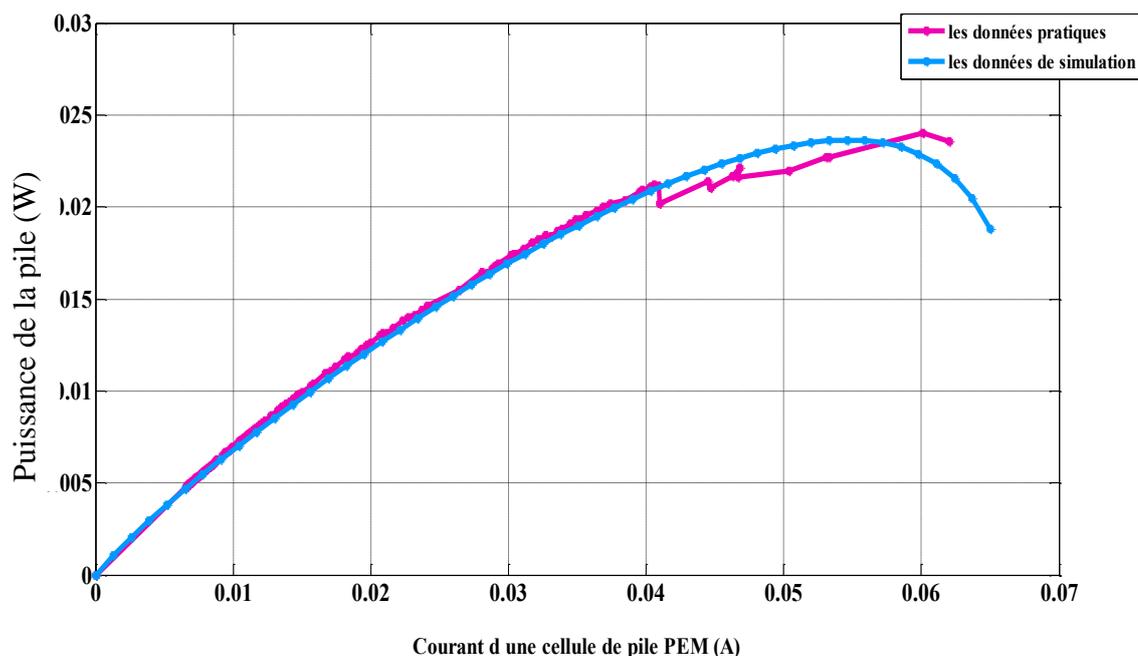


Figure IV.15 : L'allure de la caractéristique (I -P) de la pile.

On remarque que d'après les résultats obtenus, la courbe de caractérisation électrique de la pile à combustible de cellule unitaire PEM est non linéaire. Il est possible de distinguer trois phases sur cette courbe, ces trois phases sont définies comme les trois polarisations (activation, ohmique et concentration), qui sont expliquées précédemment.

En fait E_0 n'atteint jamais la valeur 1.23 V en pratique.

On constate que qualitativement, la courbe obtenue par la simulation est superposée à la courbe de pile obtenue expérimentalement.

La puissance délivrée est donnée sur la figure IV.15, le maximum de puissance est de 24mW. Pour une puissance donnée par le constructeur de 270 mW. Cet écart provient de la limitation en courant imposé par la charge.

b- Modèle de la spectroscopie d'impédance

Au départ, la pile à combustible est modélisée par un circuit électrique sous Matlab/Simulink (représenté dans figure IV.16), en référant au modèle simple choisie dans le premier chapitre.

Dans ce circuit électrique équivalent, l'écart des tensions d'activation et d'ohmique sont représentés par les résistances R_t et R_m respectivement, les pertes de concentration sont négligées et l'effet de la double couche de charge est représenté par C_{dc} . Sachant que ce phénomène apparaît quand il y a une accumulation de charges entre deux matériaux différents qui sont en contact direct alors, la couche de charge dans l'interface électrode/électrolyte se comporte comme un condensateur.

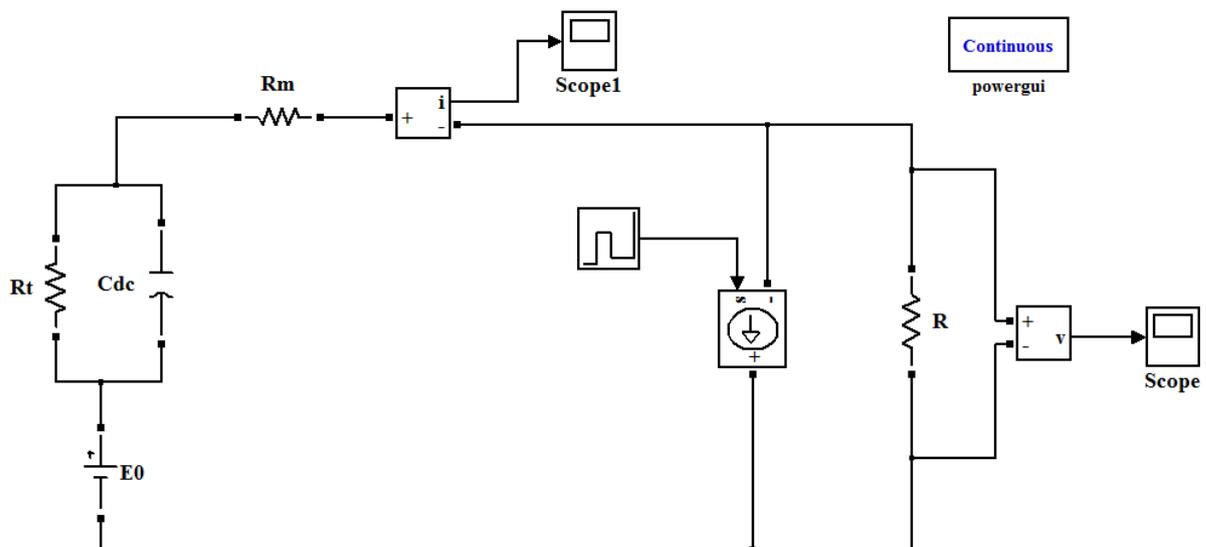


Figure IV.16 : Circuit électrique dynamique équivalent de la pile de simulation

La validation du modèle dynamique est faite sur un essai dynamique qui contient trois échelons de courant, Le premier échelon de courant est égal à 30 mA et dure 50 seconde, ensuite il atteint la valeur de 10 mA pendant une 50 seconde et à la fin il est diminué à 20 mA.

La figure IV.17 et la figure IV.18, sont illustrées les allures de courant et de la tension de modèle dynamique de la pile à combustible PEM.

Paramètre	Valeur
$E_0(V)$	0.87
$R_m (Ohm)$	0.9
R_t	0.8
C_{dc}	0.64

Tableau IV.4: Paramètres du modèle dynamique

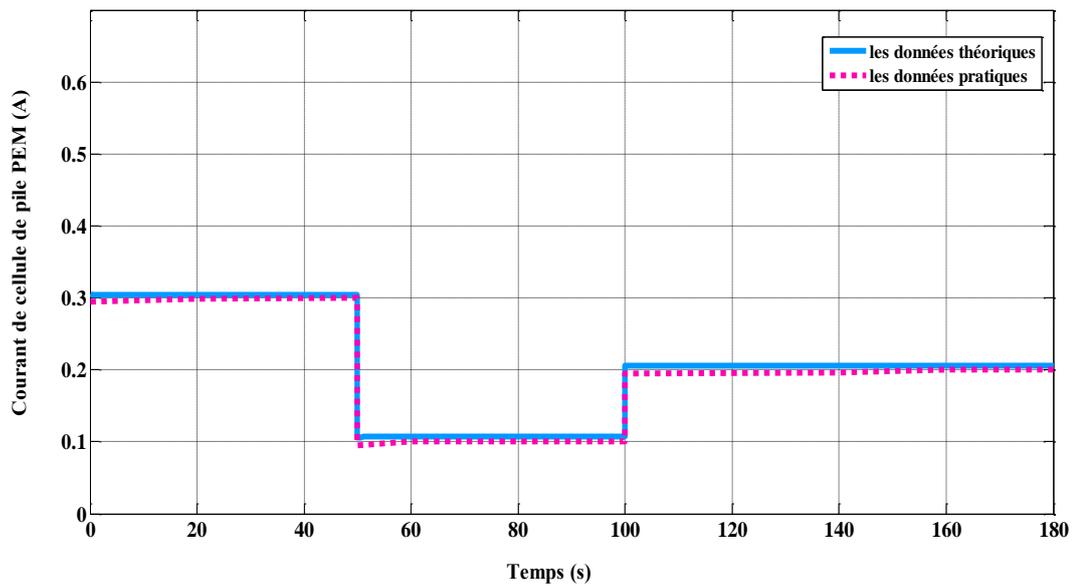


Figure IV.17 : Résultat du courant de modèle dynamique de la pile.

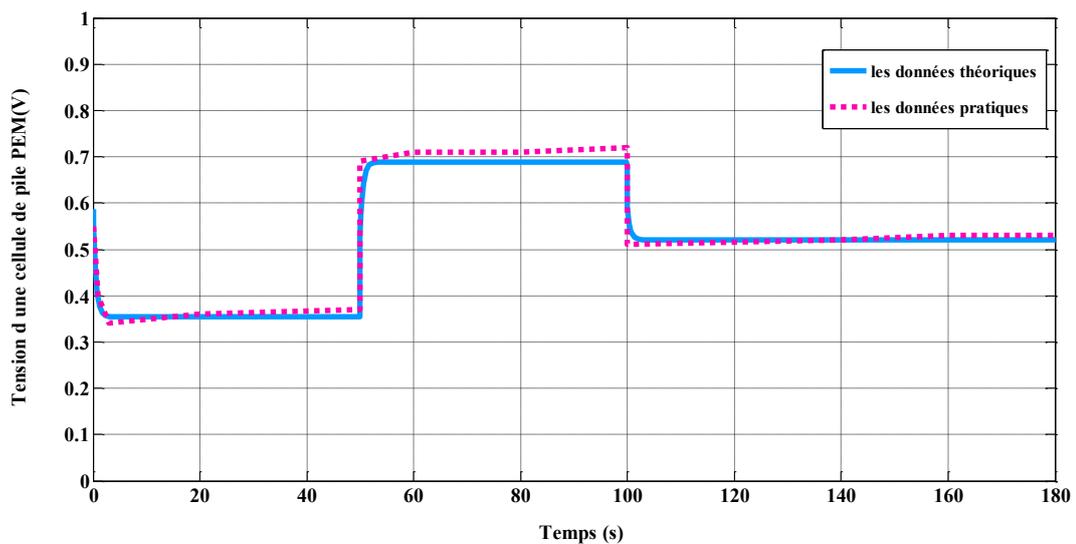


Figure IV.18 : Résultat de la tension de modèle dynamique de la pile.

On constate que, la courbe obtenue par la simulation est superposée à la courbe de pile obtenue expérimentalement.

On peut voir que comme la charge augmente et puis elle diminue le courant de sortie diminue et ensuite il augmente et vice versa. Cependant la tension de sortie n'atteint pas de nouvelle valeur immédiatement lorsque la charge est augmentée, les chutes de tension ont une certaine petite période pour s'étendre à la nouvelle valeur dans une façon exponentielle. Ceci est dû à la capacité de la double couche de charge formée à la surface électrode/électrolyte.

Les résultats ont montré aussi que le modèle est capable de prévoir le comportement de la tension et de courant. Ceci sera utile dans le développement d'une stratégie de contrôle pour la pile à combustible et en examinant des processus fortement dynamiques comme l'emplacement de la pile à combustible sur un véhicule électrique.

IV.3 Résultats de simulation de convertisseur DC/DC en boucle ouverte

Dans ce partie on va étudier les deux convertisseurs DC/DC « élévateur ,Sepic », et nous présentons les résultats de simulation obtenus à partir de l'environnement Simulink /MATLAB.

IV.3.1 Convertisseur DC/DC « élévateur »

IV.3.1.1 Dimensionnement du convertisseur

1- Cahier des charges

La détermination des valeurs réelles de ces composants nécessite une étude largement étendue sur les paramètres imposés par la pile à combustible. Les paramètres du convertisseur sont les suivants :

- La tension d'entrée : $V_e = 24\text{v}$, $P_{PAC} = 250\text{w}$;
- La tension de sortie : $V_s = 48\text{v}$, avec une ondulation de 5% ;
- La fréquence de commutation d'interrupteur : $f = 100\text{kHz}$;
- Puissance nécessaire à la charge $P_{ch} = 249\text{w}$, $I_s = \frac{P_{ch}}{V_s} = 4.63\text{A}$.

$$\alpha = 1 - \frac{V_e}{V_s} \Rightarrow \alpha = 0.5$$

2- Cellules de commutation

La cellule de commutation est composée de deux interrupteurs : Diode et IGBT.

- La diode doit supporter une tension inverse et doit pouvoir conduire un courant positif. Son amorçage et son blocage sont spontanés. Cet interrupteur ne sera donc qu'une diode.
- L'IGBT doit supporter une tension positive et doit pouvoir conduire un courant positif. Les commutations de cet interrupteur doivent être commandées.

- **Choix de la diode D :**

Les principaux critères de choix pour une diode sont les suivants :

- Courant moyen $I_F > I_{AK\text{moy}}$.
- Tension inverse $V_{RRM} > V_{R\text{max}}$.

$$\text{Alors : } I_{AK\text{moy}} = \langle i_D(t) \rangle = I_{S\text{max}} = 4.63\text{A}$$

$$\text{Et ainsi : } I_{D\text{max}} = \frac{I_{S\text{max}}}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$V_{R\text{max}} = |V_{D\text{max}}| = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \Rightarrow V_{R\text{max}} = |V_{D\text{max}}| = 49.2 \text{ v.}$$

Donc on choisit des semi-conducteurs de tension inverse égale au minimum 100 V et ce dans le but d'avoir une marge de sécurité et d'assurer le bon fonctionnement de composant.

- **Choix de l'interrupteur commandé K**

L'interrupteur IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor) est bien adapté pour le convertisseur DC/DC élévateur moyenne puissance fonctionnant avec une fréquence de commutation de quelques KHz.

Les principaux critères de choix pour un transistor IGBT sont les suivants :

- $V_{CES} > V_{CE\text{max}}$
- $I_{C(DC)} > I_{C\text{eff}}$

$$V_{CE\text{max}} = V_{Tr\text{max}} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \Rightarrow V_{CE\text{max}} = 49.2\text{V.}$$

$$I_{C\text{eff}} = I_{Tr\text{eff}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right) \alpha} \Rightarrow I_{C\text{eff}} = 6.55\text{A}$$

3- Éléments réactifs

- **L'inductance L :**

$$L \geq \frac{V_s}{4f \Delta I_{L\text{max}}} \Rightarrow L \geq 0.12\text{mH.}$$

$$I_{L\text{max}} = \frac{I_{S\text{max}}}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \Rightarrow I_{L\text{max}} = 9.263\text{A}$$

- **Le condensateur**

$$C \geq \frac{\alpha \cdot V_s}{R \cdot f \cdot \Delta V_s} \Rightarrow C \geq \frac{\alpha \cdot I_s}{f \cdot \Delta V_s} \Rightarrow C \geq 340\mu\text{F.}$$

IV.3.1.2 Résultats de simulation du convertisseur

a- Schéma bloc implanté sur le MATLAB/Simulink

La figure (IV.19) représente le schéma bloc Simulink d'un convertisseur élévateur fonctionne en mode de conduction continue, et les résultats obtient sont donnés pour une charge résistive $R = 10\Omega$. Cette structure ne présente aucune boucle d'asservissement. Elle est

composée d'un circuit de puissance accompagné d'un générateur de la commande (bloc de commande MLI) qui impose la fréquence de découpage ainsi que le rapport cyclique α . Pour la commutation de l'interrupteur (transistor IGBT).

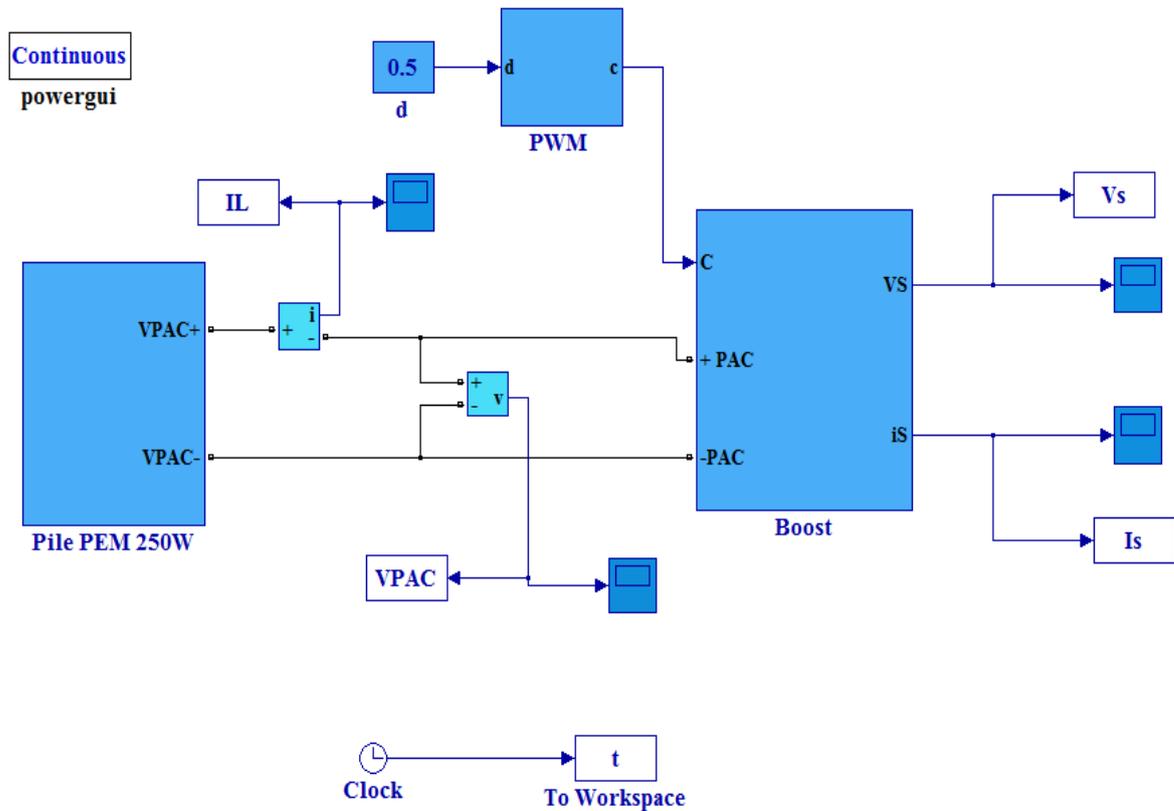


Figure IV.19: Schéma bloc de convertisseur DC/DC élévateur.

b- Résultat de la simulation

Les résultats obtenus par la simulation montrent dans la figure IV.20, la figure IV.21 et la figure IV.22, représentent l'allure de la tension de sortie V_s , du courant dans l'inductance I_L et du courant de sortie I_s ainsi que la forme d'onde des ondulations résiduelles de tension et du courant du convertisseur DC/DC élévateur.

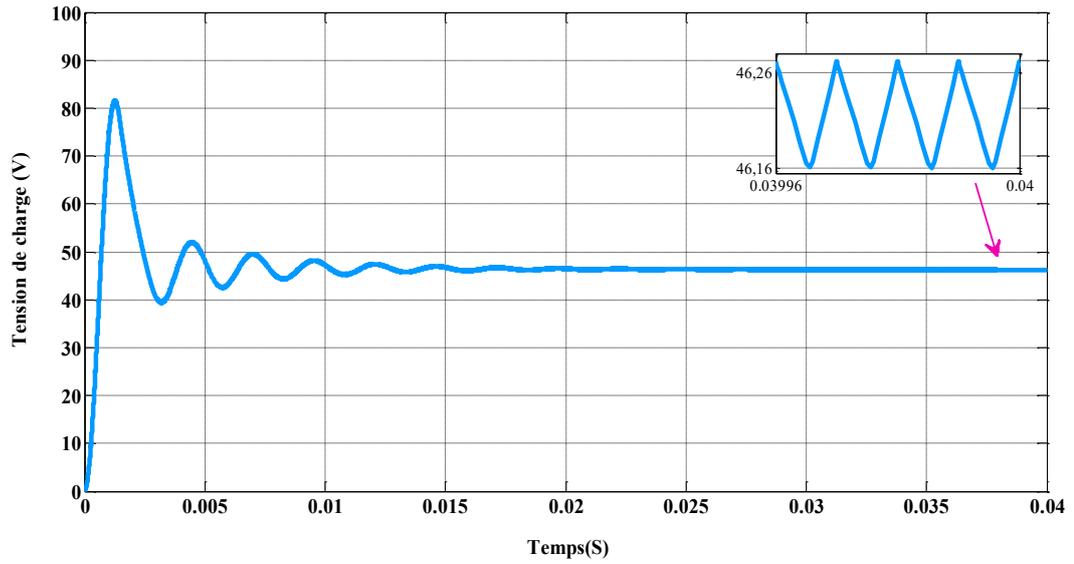


Figure IV.20: L'allure de la tension de charge V_s

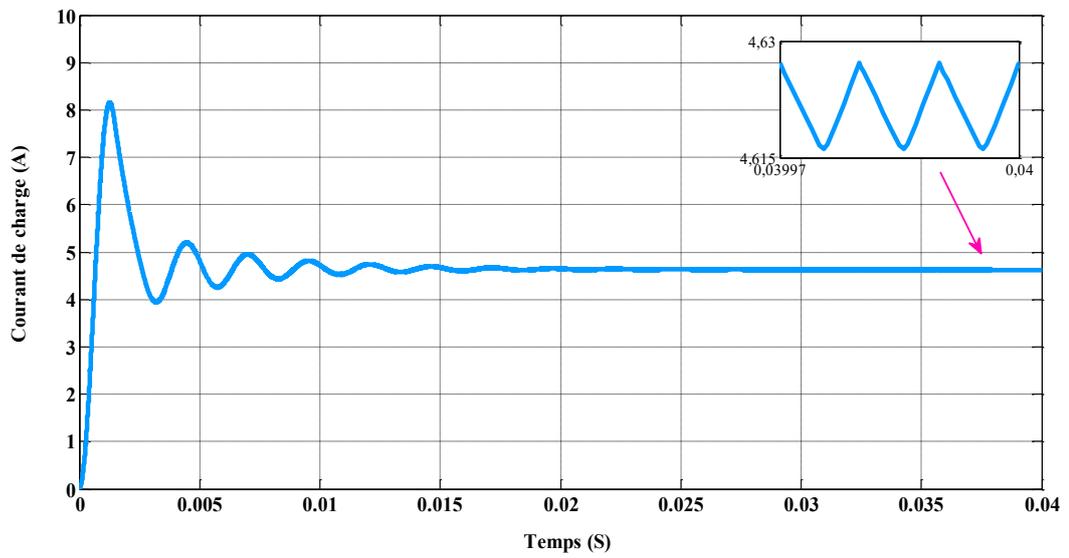


Figure IV.21: L'allure du courant de charge I_s

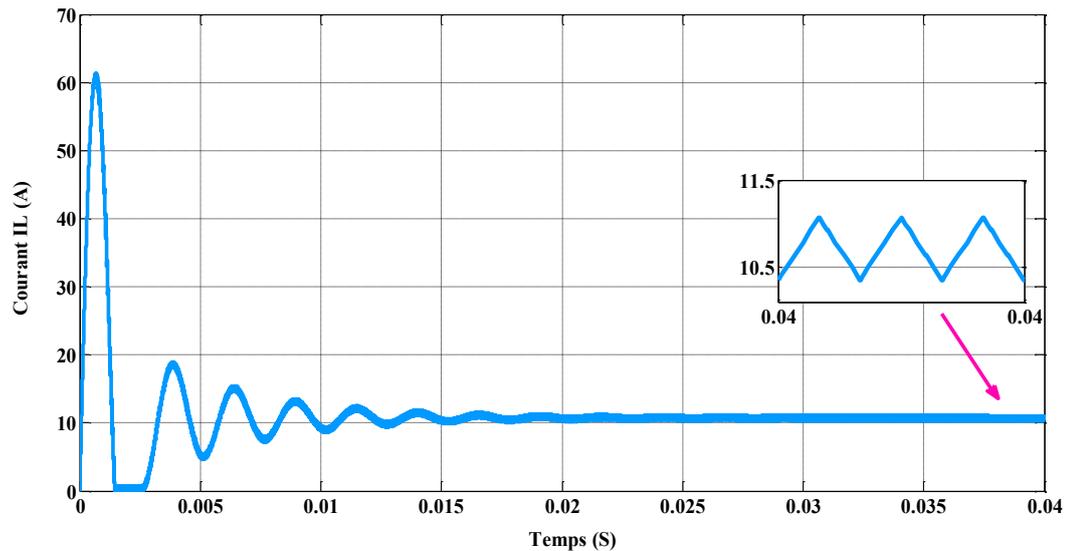


Figure IV.22: L'allure de courant d'inductance I_L

c- Interprétation des résultats

À partir de la figure IV.20, qui représente l'allure de la tension de sortie V_s , on constate que cette allure comporte deux régimes : régime transitoire de 0-0.015 (s) et l'autre permanent de 0.015-0.04 (s). On observe dans le premier régime un pic de valeur assez importante $V_{s(pic)} = 80V$, au court de temps la tension de sortie passe par un pic maximal et un pic minimal pour approcher à l'état d'équilibre ou V_s est environ de 48V.

Comme indique dans la figure IV.21, l'allure de courant de sortie I_s compose de deux régimes, le régime transitoire de 0-0.015 (s) il ya de courant de pic qui arrive à $I_s = 8A$. Le régime permanent de 0.015-0.04 (s) ou le courant prend la valeur $I_s = 4.6A$.

Dans la figure IV.22, représente l'allure du courant dans l'inductance en deux régimes le premier régime est le régime transitoire de 0-0.015 s, c'est comme l'allure de V_s et I_s , il ya de courant de pic qui arrive à $I_L = 60A$, et le régime permanent ou le courant stabilise auteure d'une valeur d'environ 10.8 A.

Un zoom sur les allures montre la présence d'un phénomène de chattering (des ondulations au niveau de la tension et du courant) due à la commutation des interrupteurs et les paramètres des composants du système.

On constate que la valeur du courant de sortie I_s est diminué par rapport au courant d'entrer I_L , par contre la tension de sortie V_s est augmenté par rapport à tension d'entrer V_e , cela s'explique par le fait que la performance du convertisseur DC/DC élévateur.

IV.3.2 Convertisseur DC/DC « Sepic »

IV.3.2.1 Dimensionnement du convertisseur

1- Cahier des charges

A partir d'une tension d'entrée de 24V, nous souhaitons obtenir une tension de sortie de 48V acceptera une ondulation de $\pm 2\%$, avec une charge de 10Ω et fréquence de découpage de 100kHz.

- **Rapport cyclique**

En négligeant la chute de tension aux bornes de la diode, on trouve :

$$\alpha_{\text{Max}} = \frac{V_S + V_D}{V_e + V_S + V_D} = \frac{48}{24 + 48} = \frac{2}{3}$$

2- Cellules de commutation

- **Transistor,**

Le transistor doit être capable de supporter une tension, $V_K = V_e + V_S$ $V_K = 24 + 48 = 72V$ et être traverser par une courante crête égale à $I_K = I_{L1} + I_{L2}$

$$I_K = 12.48 + 6.24 = 18.72 \text{ A.}$$

Le courant efficace est passant dans le transistor est $I_{K\text{eff}} = I_S \sqrt{\frac{(V_D + V_S + V_e) \times (V_D + V_S)}{V_e^2}}$

$$I_{K\text{eff}} = 5.2 \sqrt{\frac{(24 + 48) \times (48)}{24^2}} = 12.74 \text{ A}$$

Donc on choisi un transistor supportant 200V à ses bornes et pouvant laisser passer un courant de 40A.

- **Diode**

La diode doit supporter un courant $I_D = I_K = 18.72A$. Elle doit résister à une tension inverse de $V_D = V_e + V_S = 72V$. La diode choisie supportant 100V à ses bornes et un courant de 30A.

3- Éléments réactifs

- **Inductances**

L'ondulation de courant est : $\Delta I_L = I_e \times 40\% = I_S \frac{V_S}{V_{e\text{Min}}} \times 40\% = 5.2 \times \frac{48}{24} \times 40\% = 14.6 \text{ A}$

Les valeurs d'inductances L1 et L2 sont données par :

$$L1 = L2 = L = \alpha_{\text{Max}} \frac{V_{e\text{Min}}}{\Delta I_L \times f} = \frac{2}{3} \times \frac{24}{4.16 \times 100000} = 38 \mu\text{H}$$

- **Condensateur de couplage**

La valeur efficace de courant $I_{C\text{leff}} = I_S \times \sqrt{\frac{V_S}{V_{e\text{min}}}} = 5.2 \times \sqrt{\frac{48}{24}} = 7.35 \text{ A}$

En prenant une ondulation de tension de l'ordre de 40% la tension d'entrée, on obtient :

$$C1 = \frac{\alpha_{max} I_S}{\Delta V_{C1} \cdot f} = \frac{\frac{2}{3} \times 5.2}{24 \times 40\% \times 100000} = 3.6 \mu F$$

- Condensateur de filtrage

La valeur de le condensateur C2 est donnée par : $C2 = \frac{\alpha_{max} I_S}{\Delta V_{ond} \times 0.5 \times f} = \frac{\frac{2}{3} \times 5.2}{2 \times 0.5 \times 100000} = 36 \mu F$

IV.3.1.2 Résultats de simulation du convertisseur

a- Schéma bloc implanté sur le MATLAB/Simulink

La figure (IV.23) représente le schéma bloc Simulink d'un convertisseur Sepic fonctionne en mode de conduction continue, et les résultats obtient sont donnés pour une charge résistive $R= 10\Omega$. Cette structure ne présente aucune boucle d'asservissement. Elle est composée d'un circuit de puissance accompagné d'un générateur de la commande (bloc de commande MLI) qui impose la fréquence de découpage ainsi que le rapport cyclique α . Pour la commutation de l'interrupteur (transistor IGBT).

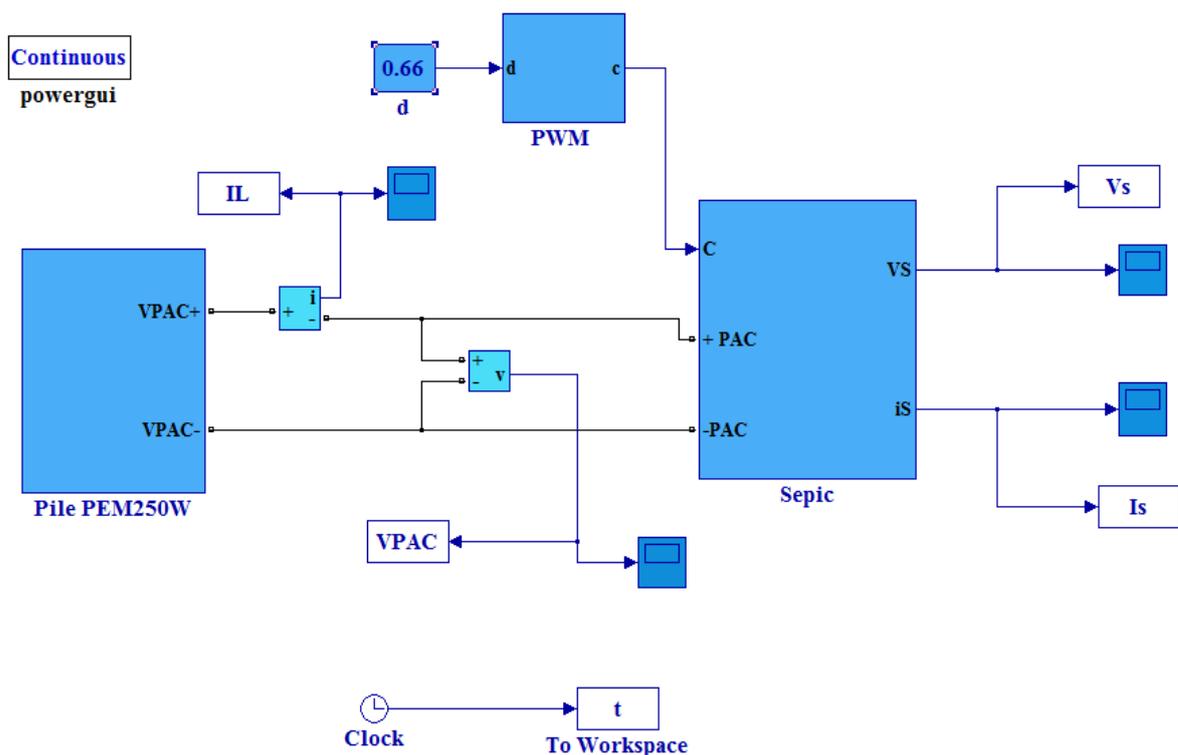


Figure IV.23: Schéma bloc de convertisseur DC/DC Sepic.

b- Résultats de simulation

Les résultats obtenus par la simulation sont illustrés dans la figure IV.24, la figure IV.25 et la figure IV.26, représentent l'allure de la tension de sortie V_s , du courant dans l'inductance I_L et du courant de sortie I_s ainsi que la forme d'onde des ondulations résiduelles de tension et du courant du convertisseur DC/DC Sepic.

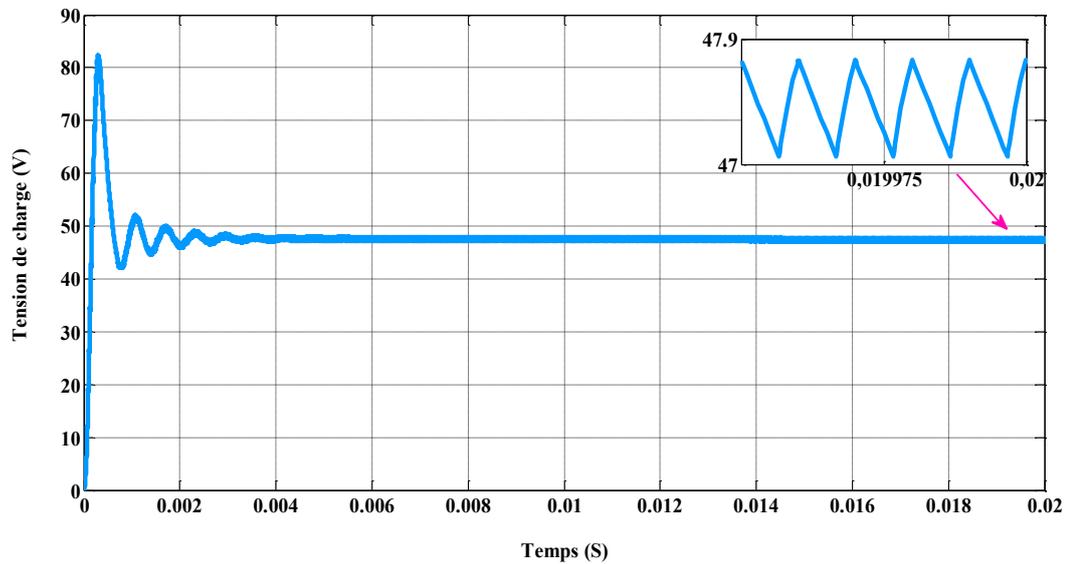


Figure IV.24 : L'allure de tension de charge V_s

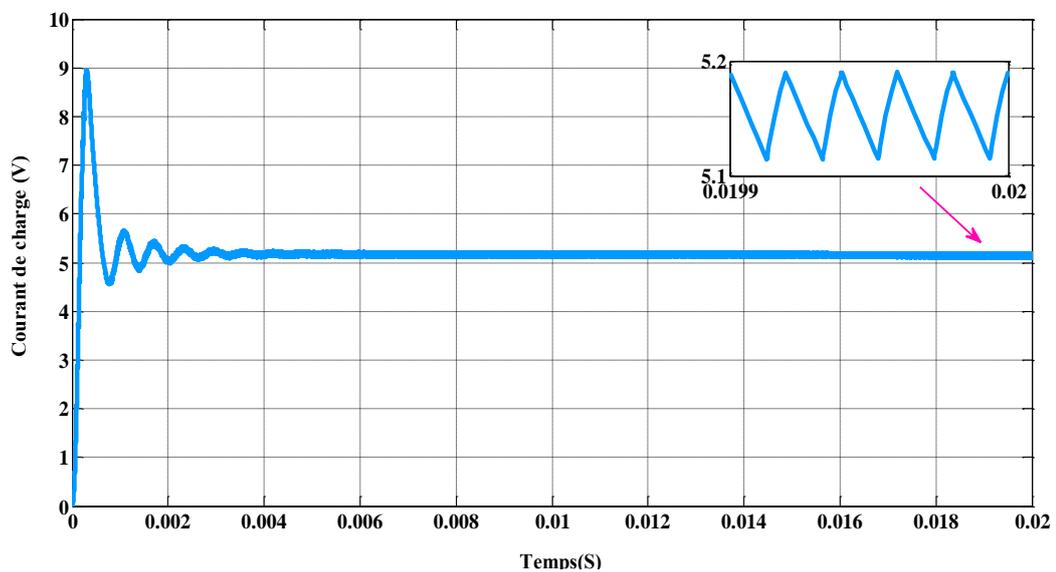


Figure IV.25 : L'allure de courant de charge I_s

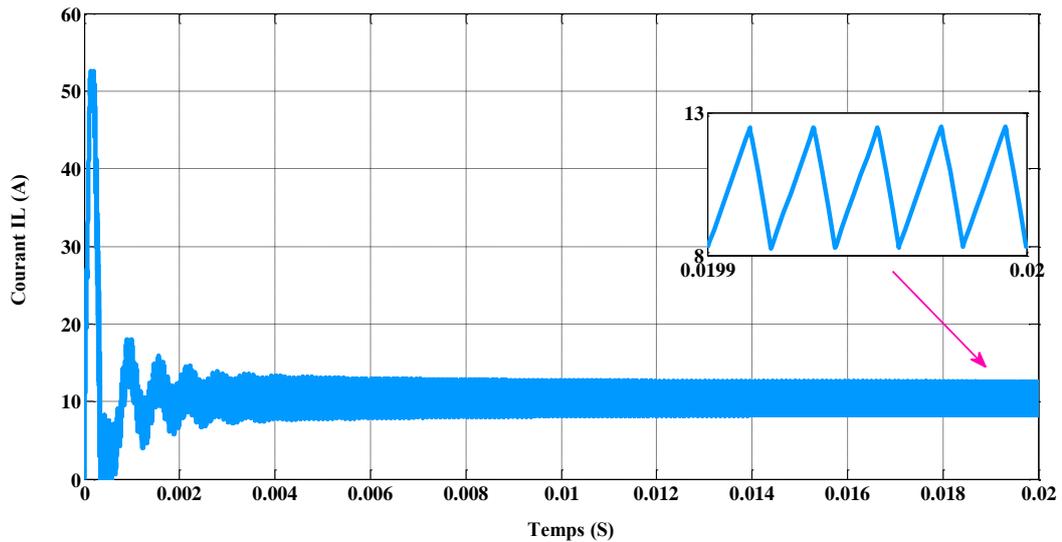


Figure IV.26 : L'allure de courant dans l'inductance I_L

c- Interprétation des résultats

Ces figures sont obtenues par un convertisseur Sepic avec un rapport cyclique $\alpha = 0.66$. Dans la figure IV.24, la tension de charge prend une valeur moyen de $V_{S_{moy}} = 47.5$ V après une oscillation dans le régime transitoire. L'ondulation de tension dans le régime permanent et entre une valeur minimale de $V_{S_{min}} = 46.9$ V et valeur maximale de $V_{S_{max}} = 47.5$ V, avec une fréquence de commutation de 100KHz.

La figure IV.25, montre l'allure de courant I_s en deux régimes le premier régime est le régime transitoire de 0-0.005 s, c'est comme l'allure de la tension V_s , il ya des courant de pic qui arrive à $I_s = 9$ A, et le régime permanent qui montre la valeur moyenne du courant de la charge est environ $I_{smoy} = 0.715$ A et il ya une ondulation de courant donne la valeur maximale est environ de $I_{smax} = 0.73$ A, la valeur minimale de la charge est $I_{smin} = 0.7$ A.

Les résultats de simulation du convertisseur Sepic pour un rapport cyclique α variable, représentés sur la figure IV.27, montrent le test de performance concernant la variation de la tension lorsqu'on varie le rapport cyclique α . Ou la charge est purement résistive. Pour des valeurs de $\alpha = 0.66 > 0.5$ le convertisseur est élévateur et contrairement pour $\alpha = 0.35 < 0.5$ le convertisseur est abaisseur.

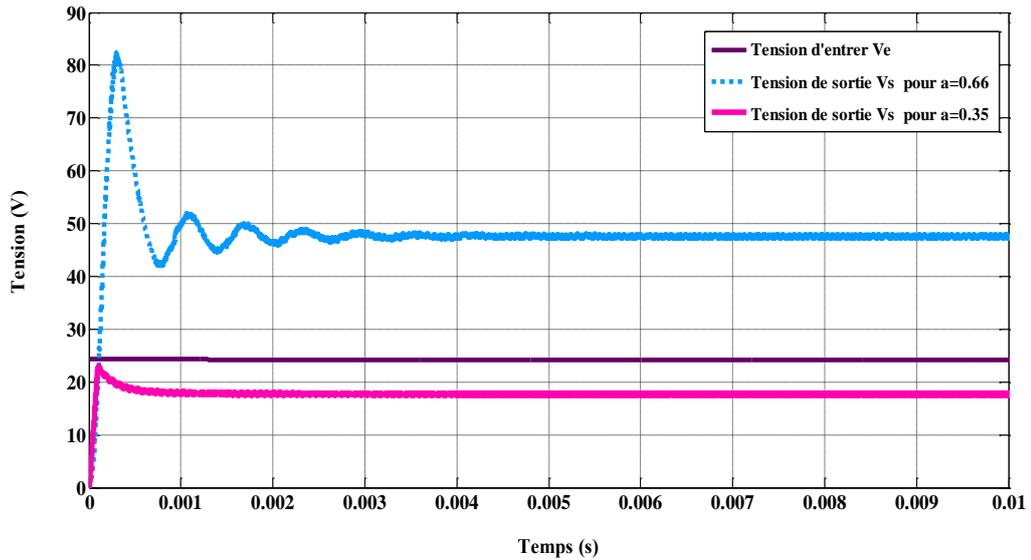


Figure IV.27 : les allures des tensions du Sepic (V_e, V_s) pour α variable.

IV.4 Résultats de simulation de Boost en boucle fermée

La figure (IV.28) représente le schéma bloc Simulink d'un convertisseur élévateur alimentée par une pile à combustible en boucle fermée, avec une régulation de la tension par un régulateur PI.

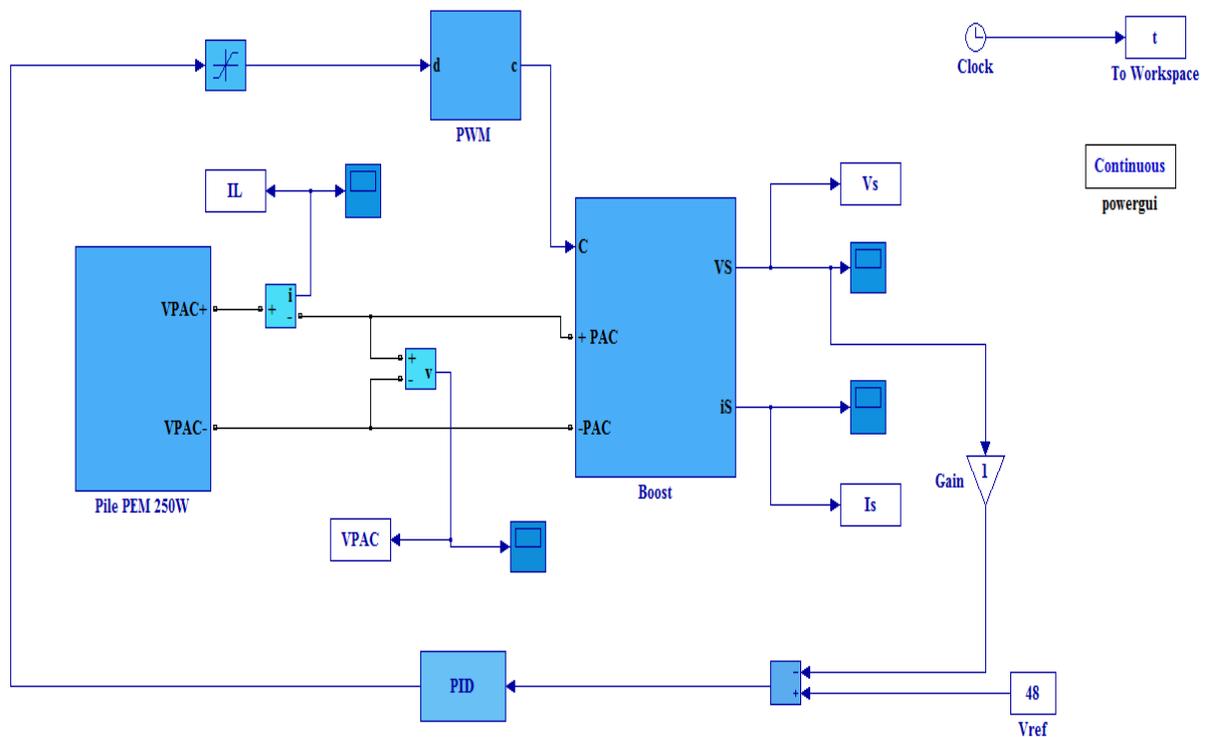


Figure IV.28: Schéma bloc de convertisseur DC/DC élèveur en boucle fermée

a- Résultats de simulation

Les résultats obtenus par la simulation sont illustrés dans la figure IV.29, la figure IV.30 et la figure IV.31, représentent l'allure de la tension de sortie V_s avec la référence, du courant dans l'inductance I_L et du courant de sortie I_s du convertisseur DC/DC élévateur avec une boucle de régulation par PI.

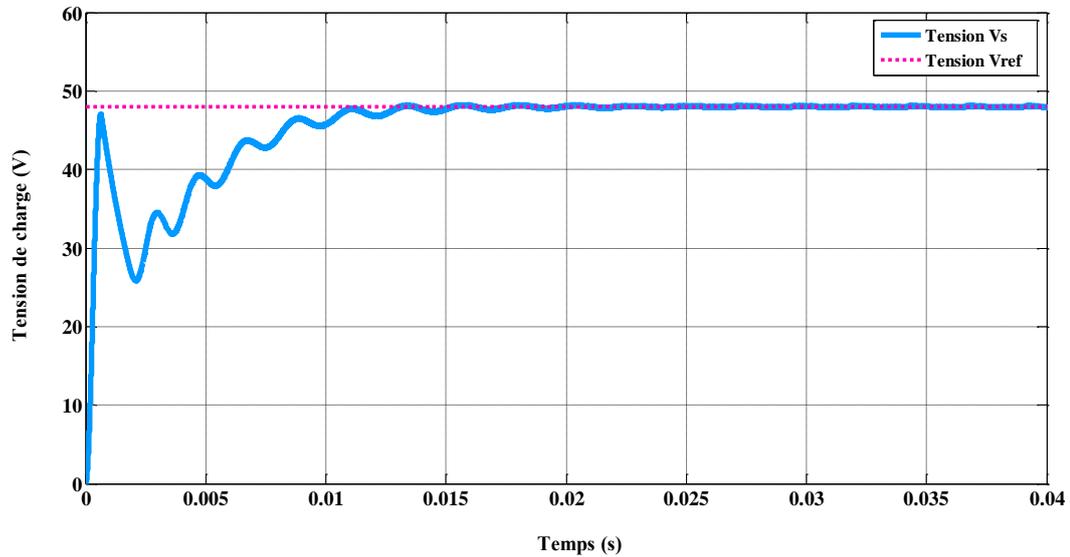


Figure IV.29 :L'allure de tension de charge V_s avec la référence

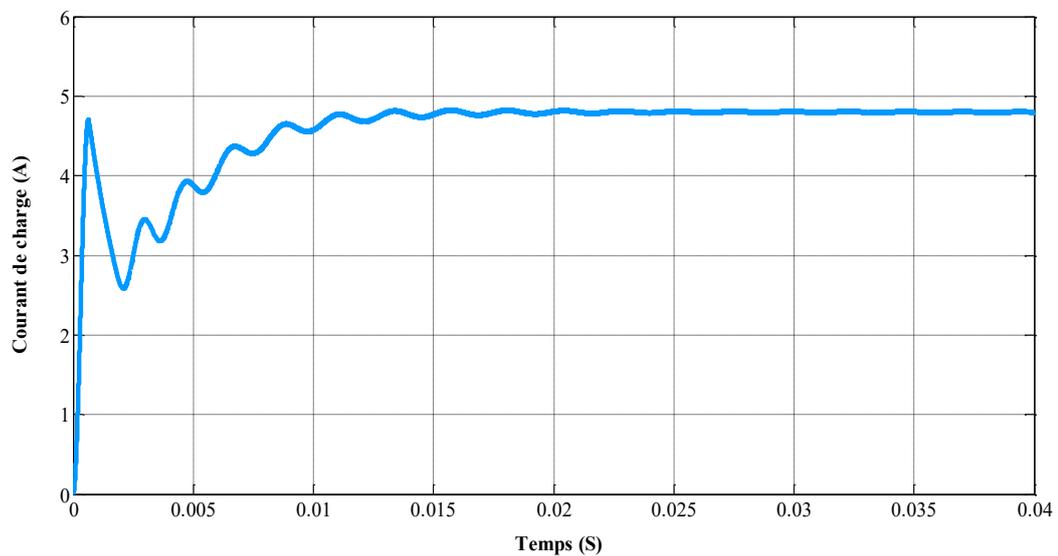


Figure IV.30:L'allure de courant de charge I_s

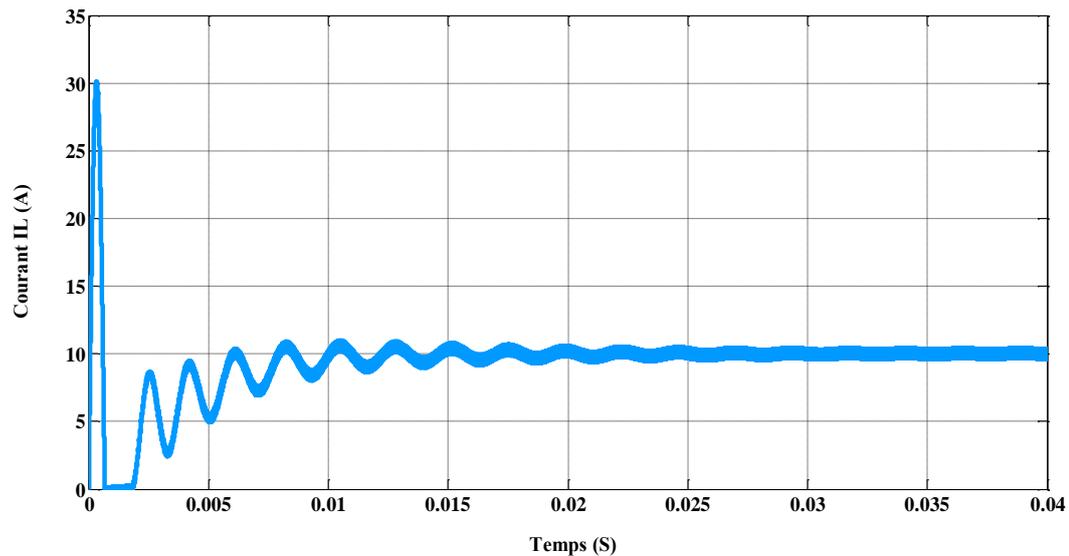


Figure IV.31: L'allure de courant d'inductance I_L

b- Interprétation des résultats

À partir de la figure IV.29, qui représente l'allure de la tension de sortie V_s avec sa référence, on observe que la tension de sortie suit bien sa référence avec une réponse un peu retardée qui est due aux phénomènes inductifs et capacitifs. On remarque aussi le dépassement de la tension est diminué par rapport à la tension de sortie en boucle ouverte.

D'après les figures qui précèdent, on constate que le régime transitoire nécessite plus du temps pour qu'il s'établisse ce qui fait prolonger le temps de réponse contrairement à la structure du convertisseur non asservi. Cependant l'ondulation du courant et de la tension, en régime permanent, donnent des résultats qui sont acceptables et qui garantissent la protection de la charge appropriée.

On conclure que, le régulateur PI est connu de sa simplicité et de sa fiabilité, facile à simuler et même facile à concevoir.

IV.5 Conclusion

Pour comprendre le comportement de la pile à combustible deux modèles sont étudiés, le premier c'est le modèle statique, qui est validé pratiquement et sous l'environnement Matlab/Simulink pour extraire la courbe de polarisation de la pile. Un modèle de circuit équivalent de la pile est proposé par la méthode de la spectroscopie d'impédance, la réponse des grandeurs courant et tension ont été obtenues expérimentalement, ensuite comparées avec les réponses de la simulation utilisant MATLAB/Simulink.

Cette pile délivre une faible tension pour cela on a adapté par un convertisseur DC/DC élévateur pour commander et réguler la tension du bus continu avec un régulateur simple PI ; le générateur alimenté une charge résistive.

Le but de la régulation de tension est de maintenir la tension de sortie du bus continu à une valeur fixe 48V.

*Conclusion
Générale*

L'objectif principal de ce travail a été de synthétiser la commande du convertisseur DC/DC, qui représente l'étage d'adaptation entre une source non linéaire pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et une charge résistive.

Dans la première partie de ce travail, un état de l'art des piles à combustible décrit leur développement au cours de dernières années, ensuite on va expliquer le principe de fonctionnement de la pile, afin de bien comprendre ce convertisseur électrochimique, sa structure interne a été bien détaillée. Avant de modéliser la pile à combustible, il est nécessaire de situer la méthode de production d'hydrogène. Dans ce sens, le premier chapitre est consacré à la production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau à partir de l'énergie solaire. La dernière partie de ce chapitre propose le modèle de Larminie-Dick qui répond au besoin des applications stationnaire modèle simple de la spectroscopie d'impédance.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs DC/DC non isolé pour l'application pile à combustible, pour ce travail on concentre sur deux types des convertisseurs « élévateur » et « Sepic ». Après le choix de la structure de notre convertisseur, nous avons présenté le dimensionnement des différents éléments de convertisseur, avec une source de type pile à combustible d'une puissance 250W.

Dans le troisième chapitre, nous avons proposé une stratégie de commande baser sur une structure de contrôle non linéaire de type PI, cette commande forcer le système à suivre la référence.

Dans la dernière partie, nous avons présenté la modélisation et la caractérisation expérimentale de la pile à combustible PEM, deux modèles ont été étudiés le premier est un modèle statique de Larminie-Dick et l'autre est le modèle dynamique de spectroscopie d'impédance, qui sont destinés respectivement aux applications stationnaires et de transport. Ensuite, nous avons interprété les résultats obtenus par la simulation sous Matlab/Simulink de convertisseur élévateur et Sepic alimenté par une pile à combustible PEM en boucle ouverte sans commande. Enfin la simulation sous Matlab/Simulink a montré que les résultats de la stratégie de commande par un régulateur PI.

En conclusion, ce travail a démontré de la modélisation et la caractérisation expérimentales pour la compréhension des phénomènes liées à la pile.

La commande de système par PI maintenir la tension de sortie du bus continu à une valeur fixe.

Perspectives de recherche

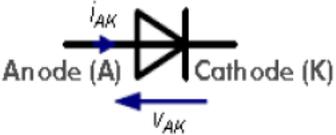
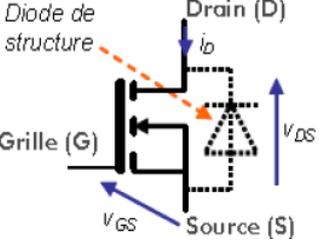
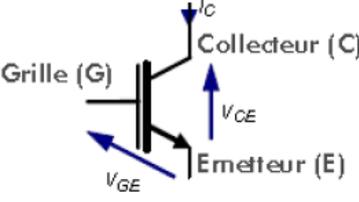
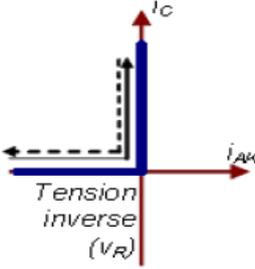
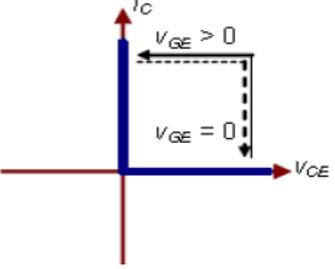
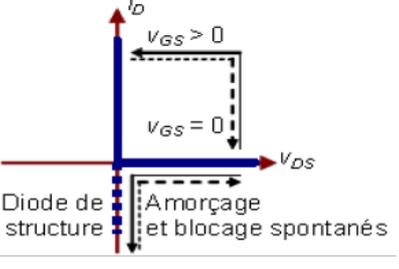
La perspective qui peut être envisagée à la suite de cette mémoire est :

- Il serait intéressant de consolider notre travail par des essais pratiques, pour valider les résultats de simulation.
- L'ajout d'un panneau solaire comme deuxième source principale afin de l'utiliser durant la journée.
- Proposer d'autres stratégies de commandes robustes.
- L'ajout d'un onduleur afin d'alimenter une charge alternative, moteur synchrone ou asynchrone.

Annexe

Annexe

Comparatif des interrupteurs statiques

	Diode	Transistor MOS /MOSFET	Transistor IGBT
Symbole			
Commande	Amorçage et blocage spontanés	Amorçage et blocage commandés par V_{GS}	Amorçage et blocage commandés par V_{GE}
Caractéristiques idéal			
propriété	Unidirectionnel en courant : $I_K > 0$ Unidirectionnel en tension : $V_K < 0$	Unidirectionnel en courant : $I_D > 0$ (bidirectionnelle avec la diode) Unidirectionnelle en tension : $V_K < 0$	Unidirectionnel en courant : $I_C > 0$ Unidirectionnelle en tension : $V_{CE} < 0$

Une comparaison des convertisseurs DC/DC est donnée par le Tableau suivant.

Paramètres Convertisseurs	Gain en tension $\frac{V_s}{V_e}$	Contraintes en tension $V_{K,\max} = V_{d,\max} $	Contraintes en courant $i_{K,\max} = i_{d,\max}$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$
Cuk	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_e}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2}$
Sepic	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_e + \Delta V_s}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2}$
Buck-Boost	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$
Buck	α	V_e	$I_L + \frac{\Delta i_L}{2}$

Bibliographie :

- [1] S. Thomas, M. Zalbowitz, « Fuel Cells Green Power », Los Alamos National Laboratory, <http://www.education.lanl.gov/resources/fuelcells> (2000).
- [2] Mathieu Boillot, « Validation expérimentale d'outils de modélisation d'une pile à combustible de type PEM », thèse de doctorat : l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy. Le 26 octobre 2005.
- [3] Saadi Aicha, «Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC », thèse de doctorat : l'université de Mohamed Khider - Biskra 2013-2014.
- [4] Fei Gao, Benjamin Blunier et Miraoui Abdellatif, « modélisation de piles à combustible membrane échangeuse de protons » Livre, 11 rue la voisier75008 Paris.LA VOISIER 2011.
- [5] [http : // www.clubpac.net](http://www.clubpac.net).
- [6] [iramis.cea. fr](http://iramis.cea.fr).
- [7] Jérôme Lachaise, « des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat : l'institut national polytechnique de Toulouse. Le 20 septembre 2004.
- [8] Nadine Hassanaly, «Modèle dynamique du système d'alimentation d'air pour le contrôle d'une pile à combustible H₂/AIR de type PEM», L'université du QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES .le décembre 2009.
- [9] R. Saadi. Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible .Thèse de doctorat : Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [10] D. Mecerreyes, h. Grande, o. Miguel, e. Ochoteco, r. Marcilla, and l. Cantero.2004 Porous polybenzimidazole membranes doped with phosphoric acid: highly proton- conducting solid electrolytes.Chem. Mater, (16).
- [11] Idris Sadli, « modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance », thèse de doctorat de L'INPL ; National Polytechnique de LORRAINE ; 2006.

- [12] Guillaume Lefevre, « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible », thèse de doctorat : l'université Joseph Fourier. Le 26 Novembre 2004.
- [13] Cécile Gondrand, « analyse des transferts d'eau dans les micropiles à combustible », thèse de doctorat : l'institut national polytechnique de Toulouse (transfert, dynamique des fluides, énergétique, procédés). Le 6 novembre 2006.
- [14] Dang Bang Viet, Etude « Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible », thèse de doctorat : l'université Joseph Fourier Le 08 Décembre 2006.
- [15] H. Maker. « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super condensateurs ». Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [16] Muhammad H. Rashid, "Power electronics Handbook", 2nd Edition, Academic press of Elsevier, USA, 2007.
- [17] W. Hart Daniel, "Power electronics", McGraw-Hill, New York, USA, 2011.
- [18] Amel LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible », Université de Franche-Comté, 2005.
- [19] Guy Séguier, « entrainement électrique à vitesse variable ».
- [20] Bassaid Mounir, Chirk Belhadj Mohamed, « Étude et réalisation d'un contrôleur de batterie solaire à base de PIC16F876 », école nationale polytechnique, 2011.
- [21] C. Liu, A. Johnson, and J.-S. Lai, « A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications , Industry Applications », IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 1691-1697, 2005.
- [22] Wei Gu, Dongbing Zhang, « Designing a SEPIC Converter .National Semiconductor Application »Note 1484, April 30, 2008.
- [23] Seif Eddine Naffouti, « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque », University of Burgundy, Juillet 2012.
- [24] Texas instrument, AN-1484 « Designing A SEPIC Converter, Application Report » SNVA168E–May2006–Revised April2013.

Bibliographie

- [25] I.Corporation, « Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics », ed http://www.ixysIGBT_Basic_I.pdf.
- [26] FOREST F., FERRIEUX J.P., 1999, « Alimentations à découpage convertisseurs à résonance », 3rd ed: Dunod, 318p.
- [27] VIET D., 1977, « Conception d'une interface électronique de puissance pour pile à combustible » Thèse de Docteur es-Sciences, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [28] SPIROV Dimitar, LAZAROV Vladimir, ROYE Daniel, ZARKOV Zahari, MANSOURI Omar, « Modélisation des convertisseurs statiques DC/DC pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant Matlab/Simulink », Université Technique de Sofia, 8 Kliment Ohridski, Sofia 1000, Bulgarie, Septembre 2009.
- [29] S.KEDJOITI, C.MESSAOUDI, « Réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation par mode glissant », mémoire d'ingénieur d'état, Université Med Boudiaf M'SILA, 2005.
- [30] Zemouri Azzedine, « Etude expérimentale d'un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande robuste », mémoire de magister, université de Batna, 2014.
- [31] Rahmoune Karima et Zouzou Sara, « simulation et implémentation de MPPT d'un panneau solaire », mémoire d'ingénieur, universitaire de Biskra, 2010.