



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

Réf:.....

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

MASTER

Thème

Etude et Modélisation des convertisseurs DC/DC
pour un système pile à combustible

Présenté par :
Djellab Badreddine
Soutenu le : 04 Juin 2013

Devant le jury composé de :

Mr Moussi Amar

Pr

Président

Mr Aboubou Abdennacer

Pr

Encadreur

M^{eme} Abdeddaim Sabrina

M.A.A

Examineur

Année universitaire : 2012 / 2013

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

A l'âme de ma mère qui été pour mon corps mieux qu'un cœur ;
A Ma jolie Grande Mère symbole de sacrifice et qui est tout pour moi, pour Sa Tendresse profonde « Que Dieux me les protègent ».
A mes Oncles : Chaaban, Mami
A mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous ;
A mes Sœurs : Zahra, Samira, Mouna, Aicha, Zahra, Khadija ;
A mes Frères: Sabri, Nasri, Hacén, Billel, Hamoudi, Hamza
A mes chères Tantes : Zoubida, saliha et Zohra
A ma bien aimée Narimane ;
A mes Amis : Nirvana ,Ab2o(the game). J3oti Amine, Hama, Garoum, Mohamed, pti moh, tifa, chokri ,

A tous ceux qui me sont chers :
A toute ma grande famille : Djellab ,Rachedi ;
A mes collègues des études;.... Et à tous mes amis.

Djellab Badreddine



Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé

Je tiens à remercier Mr Aboubou Abdennacer, Professeur à l'Université de Biskra qui a accepté de m'encadrer, et pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr Moussi Amar, Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté de présider le Jury de cette mémoire.

Je remercie sincèrement M^{em} abdeddaim Sabrina, Maître de conférence à l'Université de Biskra, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

J'exprime aussi mes vifs remerciements à M^{elle} Saadi Aïcha Maître de conférence à l'Université de Biskra pour ses conseils, suggestions, et ses directives tout au long de ce travail.

Mon remerciement aussi au département de l'électrotechnique de l'université de BISKRA et à tous les enseignants qui m'ont enseignés durant les années du cursus.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mr Djellab Badreddine.

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau (1.1) : Les différents types de pile à combustible	6
--	---

Chapitre 2

Tableau (2-1) : Comparaison des montages	29
--	----

Chapitre 3

Tableau (3-1) : Paramètres du hacheur survolteur	33
Tableau (3-2) : Paramètres de la pile à 55°C	39

Liste des Figures

Chapitre 1

Fig (1-1): Sir William Grove.....	4
Fig (1-3): Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide.	5
Fig (1-4): Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique.	5
Fig (1-5): Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004),.....	7
Fig (1-6): Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène.....	9
Fig (1-7) : Structure du stack.....	9
Fig (1-8) : Élément de base d'une cellule de pile à combustible PEM	10
Fig (1-9) : Exemple de courbe de polarisation d'une cellule de pile	13

Chapitre 2

Fig (2-1) : Schéma synoptique d'un système à pile à combustible	20
Fig (2-2) : Schéma 3d système pile à combustible.....	20
Fig (2-3): Schéma simplifié du système de reformage	21
Fig (2-4) : Exemple de système pile à combustible en mode stationnaire.....	24
Fig (2-5) : (a) Convertisseur Boost (hacheur élévateur), (b) Convertisseur Buck	25
Fig (2-6): Circuit électrique de base du hacheur survolteur.....	26
Fig (2-7) : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.....	27
Fig (2-8) : Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur	29

Chapitre 3

Fig (3-1): schéma de l'hacheur – survolteur (boost).....	31
Fig (3-2) : Schéma bloc du modèle moyen hacheur-survolteur	32
Fig (3-3) : Schéma de simulation du hacheur survolteur (circuit et modèle moyen).....	33
Fig (3-4) : tension de charge $V_s(V)$ (hacheur survolteur).....	34
Fig (3-5) : courant d'entrée $I_L(A)$ (hacheur survolteur).	34
Fig (3-6) : le courant dans l'inductance (I_L) en fonction de temps.....	35
Fig (3-9) : le courant de la capacité (I_C) en fonction de temps.....	36
Fig (3-10) : la tension aux borne de la l'inductance (V_L).....	36
Fig (3-11) : la tension aux borne de Switch en fonction de temps.....	37
Fig (3-14) : la puissance de la pile en fonction de courant	39

Fig (3.16) : Architecture de l'ensemble PAC et Hacheur élévateur	40
Fig (3.17) : schéma de simulation de l'ensemble PAC + Hacheur élévateur	41
Fig (3.18) : Le courant de la pac en fonction de temps	41
Fig (3.19) : La tension de bus continu en fonction de temps	41
Fig (3.21) : La tension de la PAC en fonction de temps	42
Fig (3.23) : La tension de bus.....	43
Fig (3.24) : La tension de la pile	43

Chapitre 4

Fig (4-1) : Régulation de courant de la pile (PI+MLI).....	46
Fig (4-2) : Schéma bloc en courant du convertisseur.....	46
Fig (4-3) : La fonction MLI.....	47
Fig (4-5) : Simulation de la réponse à une consigne de courant en échelon	49
Fig (4-6) : tension de pile en fonction de temps.....	50
Fig (4-7) : le courant I_L , I_{L_ref} et la commande u	50
Fig (4-8) : Schéma de Régulation de courant de la pile (hystérésis).....	51
Fig (4-9) : le courant de l'inductance (i_L et i_L référence) en fonction de.....	51
Fig (4-11) : la tension de la pile en fonction de temps	52
Fig (4-12) : l'ensemble pile – convertisseur, avec les deux boucles de régulation.....	53
Fig (4-14) : la tension (V_{bus} , $V_{bus_réf}$) en fonction de temps.....	54
Fig (4-16) : la tension de la Pac en fonction de temps	55
Fig (4-17) : le courant demandé par la charge en fonction de temps	56

Liste des abréviations

PAC : Pile à combustible

ΔG : Variation d'enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs

ΔH : Variation de l'enthalpie

$(\Delta S, \Delta S \text{ Standard})$: Variation d'entropie quince et standard -0.164 kJ/(mol K)

$E_{PAC \text{ MAX}}$: Tension maximale de la PAC en circuit ouvert

$E_{PAC \text{ MAX Standard}}$: Tension maximale de la PAC en circuit ouvert dans de conditions standards

m_{elec} : Mols d'électrons mises en jeu lors de la réaction d'une PAC

E_{Rev} : Potentiel thermodynamique réversible de la réaction d'une PAC

E_0 : Potentiel thermodynamique d'équilibre à une température $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$

$(\eta_{act_c}, \eta_{act_a}, \eta_{conc})$ Surtensions d'activation à la cathode, à l'anode et de concentration

I_{PAC} : Courant de sortie de la PAC.(A)

P_{PAC} : Puissance instantanée nette fournie par la PAC (w)

P_{Aux} : Puissance demandée par les auxiliaires. (w)

R Constante de gaz parfait, $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ou $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

T_{PAC} Température de fonctionnement de la PAC

$Welec$ Energie électrique produite par la réaction de la PAC

η_{PAC} Rendement global de la PAC

η (Théorique, Réversible, Faradique, Matière Système) Respectivement : rendement théorique, réversible, faradique, du combustible et du générateur

PEM : PAC à membrane polymère échangeuse de proton ou proton exchange membrane fuel cell.

N_{cell} : nombres de cellule.

E_{cell} : La tension d'une cellule. (V)

J : la densité de courant A/m^2

S : surface d'une cellule cm^2

V_{Bus} Tension du bus continu (V)

i_L : courant de l'inductance. (A)

MLI : modulation de la largeur d'impulsion

PI : proportionnelle intégrale.

Résumé

Ce mémoire présente l'étude et la modélisation d'un convertisseur statique basse tension dédié à l'utilisation d'une pile à combustible PEM 500 W dans un environnement d'électronique de puissance. La structure de conversion est de type hacheur parallèle, ce qui permet d'adapter la tension nominale de la pile (10 V) au niveau de tension standard (24V).

Ce convertisseur est régulé en courant d'entrée et en tension de sortie

Mots-clés: pile à combustible, modélisation, convertisseur, hacheur parallèle.

ملخص

هذه المذكرة تعرض دراسة وتصميم المحول ذو التوتر المنخفض والمكسر للاستخدام في خلية الوقود استطاعة 500 واط في بيئة الكترولنيات القدرة , هيكلية التحويل هي من المفرمة المتوازية من اجل السماح بتطابق التوتر الاسمي للبطارية 7 فولط الى مستوى الجهد القياسي .

هذا المحول هو مضبوط حسب تيار المدخل وكذلك توتر المخرج .

مفتاح الكلمات

خلية وقود , المفرمة المتوازية , المحول , تصميم .

Sommaire

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

Chapitre 1 : la pile à combustible

1.1. Introduction	3
1.2. Historique	3
1.3 Généralités sur les piles à combustible	4
1.3.1 Réactions de base.....	4
1.3.2 Différentes technologies de piles à combustible.....	5
1.4 Les applications envisageables pour la PAC.....	6
1.4.1 Applications portables.....	7
1.4.2 Applications stationnaires	7
1.4.3 Applications embarquées	8
1.5 Eléments de technologie de la pile PEM	8
1.5.1 Principe de fonctionnement de la pile PEMFC	8
1.5.2 Structure du stack PEM	9
1.5.3 Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM	10
a) Plaques bipolaires	10
b) Couches de diffusion	11
c) Assemblage Membrane – Electrodes	
1.6 Caractéristique tension - courant d'une PAC	11
1.7 Rendement énergétique :.....	14
1.8 Avantages et problèmes de la PAC.....	15
1.8.1 Les avantages :.....	15
1.8.1 Les inconvénients :	17
1.9 Conclusion :.....	18

Chapitre 2 : système pile à combustible

2.1	Introduction	19
2.2	Description d'un système Pile à Combustible complet.....	19
2.2.1	Auxiliaires d'une pile à combustible PEM :.....	19
a)	Production du combustible, hydrogène :.....	21
b)	Alimentation en hydrogène	21
c)	Alimentation en air	22
d)	Circuit de refroidissement	23
e)	Circuit d'humidification	23
f)	Convertisseur statique	23
g)	Système de contrôle	24
2.3	LES CONVERTISSEURS DC -DC (HACHEURS).....	25
2.3.1	Les Convertisseurs continu-continu non-isolés.....	25
a.	Le hacheur survolteur (Boost)	26
b.	Le hacheur dévolteur (Buck)	27
c.	Le convertisseur Buck-Boost.....	28
2.4	Le choix de convertisseur :	29
2.5	Conclusion.....	29

Chapitre 3 : Modélisation l'ensemble PAC et convertisseur

3.1	Introduction	30
3.2	Modélisation de l'interface de puissance	30
3.2.1	Hacheur survolteur.....	31
3.2.2	Modélisation du hacheur survolteur.....	31
A.	Le modèle statique :	31
3.2.3	les Formes d'ondes du hacheur survolteur.....	35

3.3	Courbe de polarisation de la pile à combustible :.....	37
3.3.1	Pertes d'activation :.....	37
3.3.2	Pertes ohmiques.....	38
3.3.3	Pertes de concentration.....	38
3.4	Modélisation de la pile.....	38
3.5	Modèle de convertisseur de pile.....	40
3.6	Architecture de l'ensemble PAC + Hacheur élévateur :.....	40
3.6.1	Les résultats :.....	43
3.6.2	Interprétation des résultats :.....	44
3.7	Conclusion :.....	44

Chapitre 4: Les stratégies de commande du convertisseur

4.1	Introduction.....	46
4.2	Aperçu des stratégies de commande - choix du mode de contrôle.....	46
4.2.1	Stratégie de commande de la pac.....	46
a.	Etude de la commande par $pi + mli$	47
b.	Etude de la commande par Correcteur Hystérésis.....	52
c.	Régulation en tension.....	54
4.2.2	Les résultats :.....	55
4.2.3	Interprétation des résultats :.....	57
4.3	Conclusion.....	58
	Conclusion générale.....	59
	Références bibliographiques.....	60

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine des énergies, principalement basé sur les ressources fossiles, est appelé à connaître une forte évolution en raison des problèmes posés par l'exploitation massive de ces combustibles. La dégradation de l'environnement et la baisse des réserves, ainsi que de nouvelles applications autonomes ou portables, incitent au développement de nouvelles technologies de l'énergie. Le génie électrique, composante majeure de cette évolution, se trouve en conséquence en plein renouveau pour apporter des réponses innovantes en termes d'efficacité énergétique et de valorisation de nouvelles sources pour un développement durable.

Ainsi, le développement des énergies renouvelables paraît incontournable à moyen terme compte tenu du potentiel considérable qu'elles offrent et de leurs qualités écologiques intrinsèques. Mais, outre un coût souvent excessif dans les conditions actuelles, ce développement est encore freiné par plusieurs problèmes liés à leur nature répartie, à faible densité énergétique et à production irrégulière. Souvent disponibles en site isolé, éoliennes off shore par exemple, il faut prévoir un transport sur les zones de consommation, soit par un réseau électrique, mais une production aléatoire n'est pas sans poser des problèmes de stabilité du réseau, soit au moyen d'un autre vecteur énergétique après stockage, combustible de synthèse renouvelable aux qualités énergétiques comparables aux hydrocarbures.

L'hydrogène est présenté comme un très bon candidat à cette fonction pour le futur, car sa capacité de stockage de 30000 Wh.kg^{-1} est trois fois plus élevée que celle de l'essence et une utilisation bien maîtrisée ne présente que peu de risques, tout comme celle du gaz naturel.

Un temps d'ailleurs, le gaz de ville était composé en partie d'hydrogène. D'autres vecteurs sont aussi envisageables : aluminium, zinc, alcools... De plus, les progrès de la technologie permettent d'envisager de produire de façon décentralisée de l'électricité à partir de ces nouveaux vecteurs, grâce à la pile à combustible,[19]

Mais qu'est ce qu'une pile à combustible ? La définition la plus courante est « c'est un générateur qui convertit directement l'énergie d'un combustible (hydrogène pur ou hydrocarbure) en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique inverse de

INTRODUCTION GENERALE

l'électrolyse ». Néanmoins, sous le vocable « pile à combustible » se cachent des composants et sous-systèmes pour la transformer en « générateur d'électricité ». [4]

Un tel système est constitué de trois principaux éléments :

- l'élément qui produit l'hydrogène si celui-ci est extrait d'un hydrocarbure gazeux ou liquide, nécessitant dans ce cas un reformeur, ou qui le fournit si celui-ci est stocké sous forme gazeuse ou liquide ;
- le cœur de la pile à combustible ou stack formé d'un assemblage d'éléments électrode-membrane-électrode, reliés par des plaques bipolaires. Le cœur alimenté par les gaz fournit la puissance électrique ;
- l'élément de compression et d'humidification des gaz qui assure, entre autres tâches, l'humidification de la membrane.

Plusieurs filières de pile à combustible ont été développées, mais la puissance électrique reste intrinsèquement délivrée sous la forme d'une basse tension et d'un fort courant, pas toujours aisés à exploiter au niveau de la charge alimentée. D'où la nécessité d'utiliser un ou plusieurs dispositifs de conversion qui assurent l'adaptation de la tension de sortie de la pile à la tension d'utilisation passe souvent par une élévation de la tension en utilisant des convertisseurs statiques adaptés.

Le premier chapitre se veut une introduction aux piles à combustibles. Après un rappel historique de leur évolution depuis leur découverte à ce jour, on présente les différentes filières existantes et les principaux critères qui les différencient. On s'intéresse ensuite tout particulièrement à la filière des piles à membrane échangeuse de protons dites PEMFC. On présente alors le principe de fonctionnement et les équations thermodynamiques mises en jeu pour obtenir la caractéristique tension-courant sur laquelle on se basera pour justifier la nécessité d'utiliser des convertisseurs statiques.

Le deuxième chapitre présente dans un premier temps la description d'un système pile à combustible complet et la production du combustible hydrogène enfin les différentes structures de convertisseurs continu-continu non isolés ainsi que sa modélisation statique .

INTRODUCTION GENERALE

le troisième chapitre présente la comparaison de modèle moyen du convertisseur avec son circuit puis et la modélisation statique de la pile PEMFC avec un hacheur boost puis on a présenté l'architecture de l'ensemble pac et hacheur élévateur .

Le quatrième et dernier chapitre est dédié à la stratégie de commande du convertisseur continu-continu lorsque ce dernier voit sa tension d'alimentation fluctuer dans une large plage de variation. en utilisant le MATLAB-simulink. On présente le principe de la commande qui associe la commande par un régulateur PI (proportionnelle intégrale) et la commande à hystérésis

Chapitre 1

la pile à combustible

1.1. Introduction

Les piles à combustible connaissent actuellement un regain d'intérêt tant sur le plan industriel qu'en recherche. Des industriels de différents secteurs (électronique, automobile, chauffage...) investissent dans le développement de cette technologie à faibles émissions de gaz nocifs et à faibles nuisances sonores. Ce chapitre introductif sur les piles à combustible poursuit plusieurs objectifs. On effectue tout d'abord un rappel chronologique de l'évolution des piles à combustible depuis leur découverte jusqu'à nos jours. On présente ensuite les différentes technologies de piles existantes et on explique leur principe de fonctionnement. On présente enfin les avancées technologiques réalisées sur les piles PEM et les applications.[1]

1.2. Historique

La première démonstration pile à combustible a été faite en 1839 par William Grove, figure (1.1). Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et d'un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible devinrent pertinentes grâce aux travaux de l'ingénieur anglais Francis T. Bacon, à Cambridge sur une pile à combustible hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux (température de 80 à 200°C, pression de gaz de quelques atmosphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel). En 1953, la réalisation d'un premier prototype de puissance notable a eu lieu. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) conduisit, à la fin des années cinquante, à une série de réalisations technologiques concernant des piles à électrolyte polymère solide (SPEFC de General Electric), pour le programme GEMINI, et, à partir des années soixante, à la fabrication de piles alcalines de type Bacon par Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation), pour les missions lunaires APOLLO et maintenant pour les navettes spatiales. Parallèlement, Justi et Winsel, en Allemagne, développèrent des piles alcalines (AFC) de quelques kilowatts, avec des électrodes de nickel de Raney de grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK) [2].



Fig (1-1) : Sir William Grove, inventeur historique de la Pile à Combustible

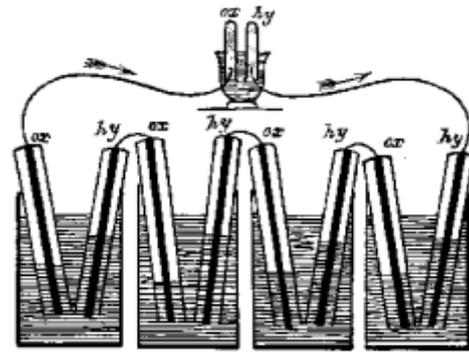


Fig (1-2) : La Pile à combustible de W. Grove [3]

1.3 Généralités sur les piles à combustible

1.3.1 Réactions de base

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique. Le combustible utilisé dans la plupart des piles à combustible est l'hydrogène. Le méthanol peut aussi être utilisé directement dans certaines piles à combustible

Dans les piles à hydrogène, la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, est réalisée par une réaction chimique de type redox. L'hydrogène se combine avec l'oxygène pour former de l'eau selon la relation globale suivante : [1]



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

Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) qui se déplacent de l'anode à la cathode (fig 1.3). L'eau est produite à la cathode. Par contre, dans un électrolyte basique (alcalin), ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode à

l'anode (fig 1.4). L'eau est produite à l'anode, mais de l'eau est aussi nécessaire à la cathode pour créer les ions. [1]

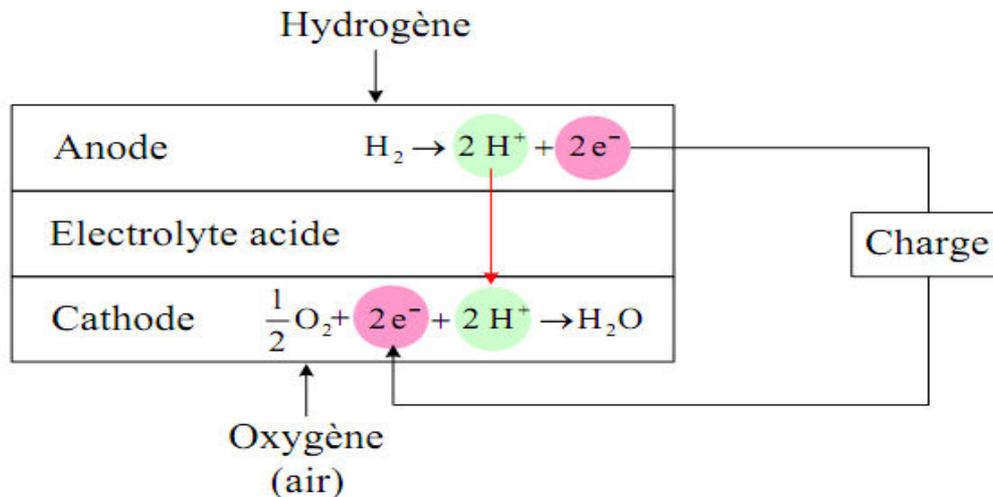


Fig (1-3): Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide.

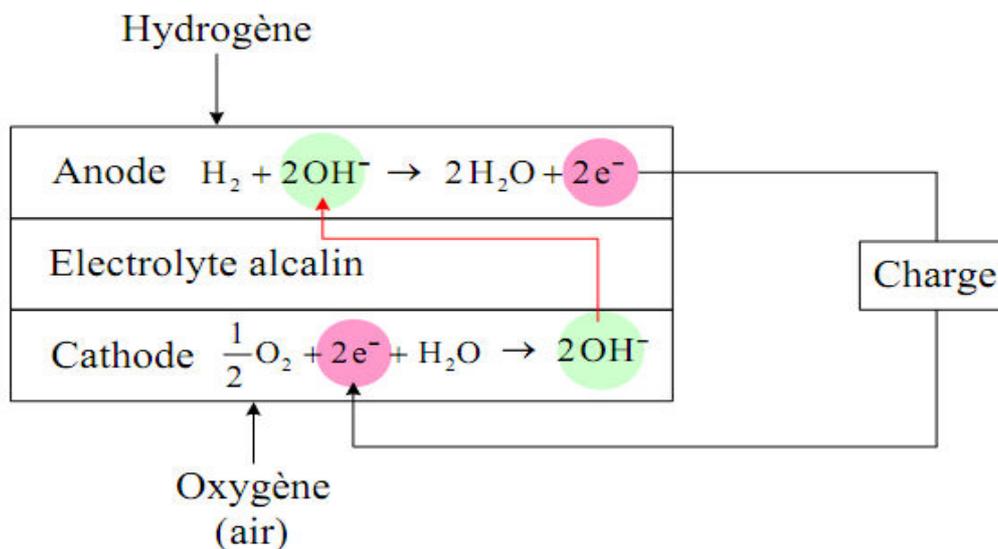


Fig (1-4): Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique.

1.3.2 Différentes technologies de piles à combustible

En règle générale, les piles à combustible sont classifiées selon le type d'électrolyte utilisé, à l'exception des piles de type DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) qui n'est autre qu'une pile PEM utilisant du méthanol comme carburant qui est directement envoyé à l'anode.

La deuxième caractéristique utilisée pour classifier les piles à combustible est leur température de fonctionnement. On distingue les piles à basse température qui englobent quatre technologies à savoir les piles alcalines ou AFC (Alkaline Fuel

Cell), les piles à membrane échangeuse de protons ou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), les piles à méthanol direct ou DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) et les piles à acide phosphorique ou PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell). Les piles haute température fonctionnent entre 600 et 1000°C. Deux technologies ont été développées, les piles à carbonates fondus ou MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) et les piles à oxyde solide ou SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). [4] le tableau (1-1) présente les différents types de piles à combustible et leurs principales caractéristiques.

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Basse Température			Haute Température		
Température	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220°C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbonate fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs kW	200kW à 10MW	1W à 100kW	1kW à 100MW	500kW à 10MW
Rendement Electrique	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	55 – 60%	50 – 55% 70% en cogénération	50 – 60%
Applications	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial, Défense, Equipements portables	Stationnaire Cogénération	Stationnaire, Cogénération
Principaux constructeurs	Ballard Nuvera Axane* Helion* (*français)	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- Westinghouse Sulzer	IFC Hitachi Fuji

Tableau (1.1) : Les différents types de pile à combustible.[5]

1.4 Les applications envisageables pour la PAC

Comme cela a été souligné, la forte modularité de la PAC introduit un vaste champ d'applications potentielles. On distingue trois grands types d'applications :

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

1.4.1 Applications portables

Dans cette famille, on inclut essentiellement la téléphonie mobile (100 mW-1 W), l'ordinateur portable (30-50 W) ainsi que les générateurs autonomes portables (500 W-2 kW). Les deux premières applications connaissent actuellement une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même les plus performantes au Lithium Ion. Ces dernières atteignent aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 140 W/kg, qui n'augmentera plus significativement. La pile à combustible est plus intéressante que les batteries actuelles compte tenu de son autonomie, mais aussi parce qu'aucun système de recharge n'est requis. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C). [3].



Fig (1-5): Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g.

1.4.2 Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation.

Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible [4].

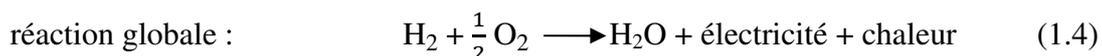
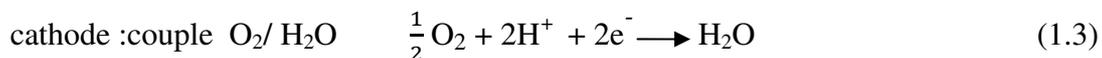
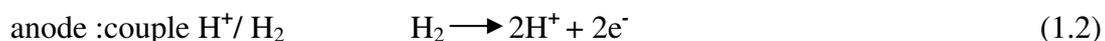
1.4.3 Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante.

1.5 Eléments de technologie de la pile PEM

1.5.1 Principe de fonctionnement de la pile PEMFC

Une pile à combustible de type PEM est constituée d'un empilement de cellules électrochimiques en série. Chaque cellule est le siège d'une réaction électrochimique : inverse de l'électrolyse de l'eau, la réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur selon les équations suivantes :[6]



Cette réaction crée une différence de potentiel entre les électrodes de l'ordre du Volt, différence de potentiel qui est propre au couple rédox que forment H_2 et O_2 . Du fait de ce caractère naturel très basse tension, les constructeurs assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série afin d'obtenir une tension suffisamment élevée pour la traiter, d'un point de vue électrique, avec un rendement satisfaisant. La figure

(1-6) présente un schéma d'une pile à combustible constituée de 3 cellules alimentée en H_2 et en O_2 .

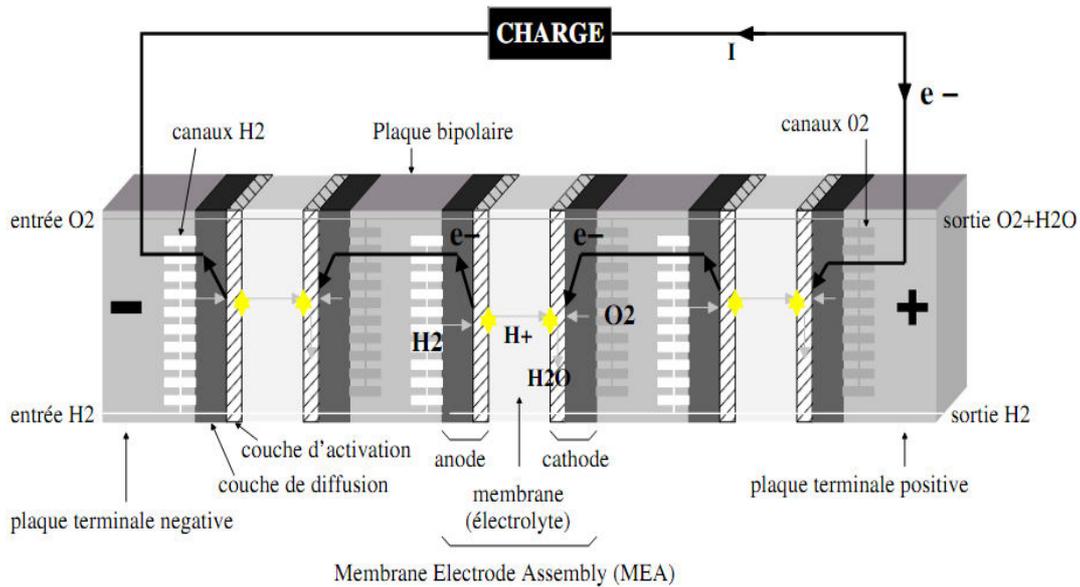


Fig (1-6): Pile à combustible de type PEM alimentée en hydrogène et en oxygène.[5]

1.5.2 Structure du stack PEM

Le cœur d'une pile à combustible (appelé stack [6] est constitué d'un empilement de cellules électrochimiques élémentaires EME qui - assemblées en série (fig 1-7)

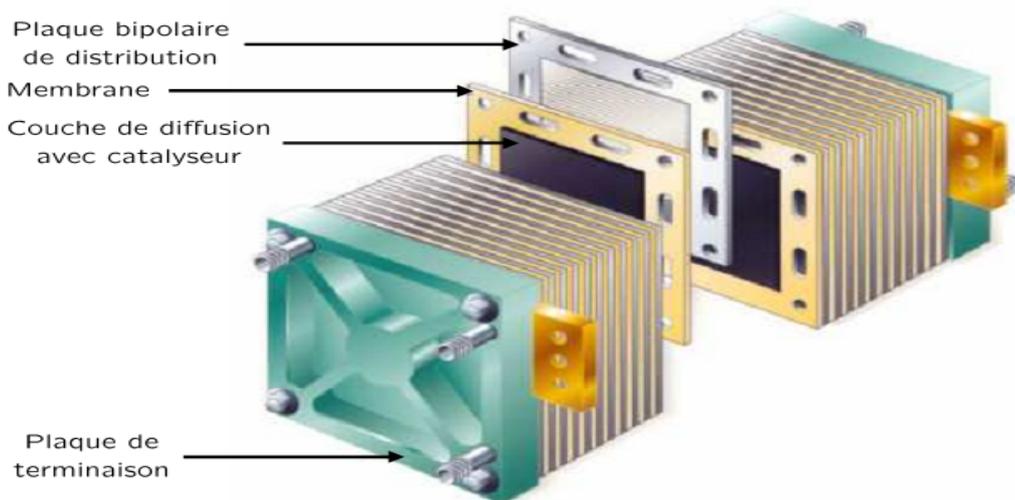


Fig (1-7) : Structure du stack . [7]

La tension théorique à vide d'une cellule élémentaire de pile à combustible idéale est de 1,23V aux conditions standard [1]. Dans une pile à combustible réelle, la

tension mesurée à vide est de l'ordre de 1 V. Celle-ci est de l'ordre de 0,5 à 0,7 V à pleine charge. Pour obtenir une tension élevée, il est donc nécessaire de mettre en série plusieurs cellules en formant un stack. Aujourd'hui on rencontre des stacks comportant jusqu'à 100 à 120 cellules et donc des tensions nominales comprises entre 60 et 80 V. Le courant débité est directement lié à la surface active des cellules et est aujourd'hui de l'ordre de $0,5 \text{ A.cm}^{-2}$ [1]

1.5.3 Eléments de base d'une cellule élémentaire de pile PEM

La cellule de base 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.

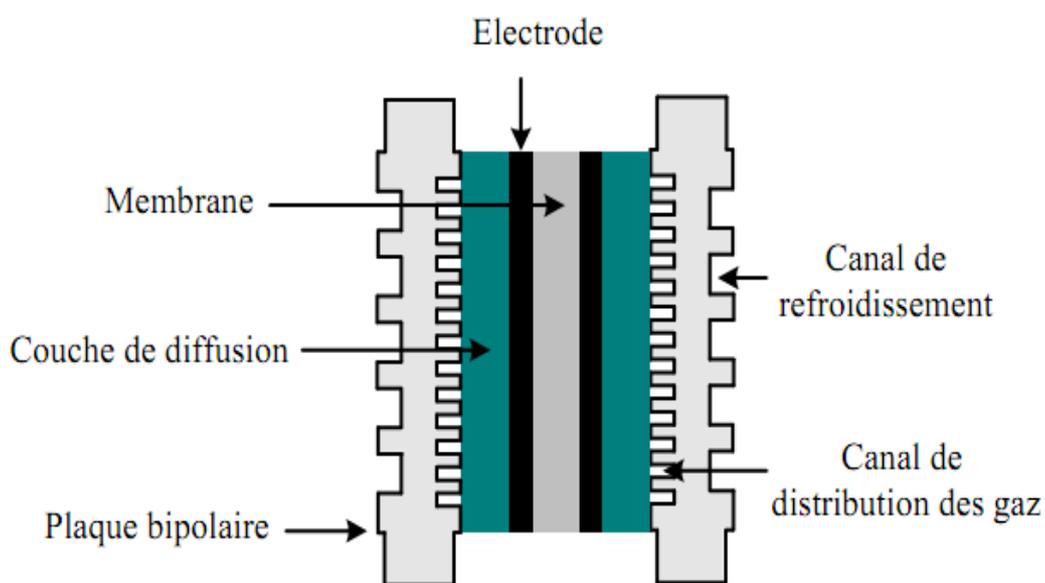


Fig (1-8) : Élément de base d'une cellule de pile à combustible PEM

- a) **Plaques bipolaires** : La tâche principale des plaques bipolaires est d'assurer l'arrivée des gaz à la surface de la couche de diffusion. Elles sont à base de graphite et contiennent des canaux qui permettent le passage des gaz le long de la surface. Sur le dos de chaque plaque, on trouve généralement des canaux conçus pour transporter le liquide de refroidissement du système (figure 1.8). L'architecture des canaux et des circuits de refroidissement fait encore l'objet de nombreuses études

Les plaques bipolaires servent aussi à collecter le courant et à assurer la mise en série électrique des cellules.

- b) Couches 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.
- c) Assemblage Membrane – Electrodes :** 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. Le processus de réalisation conduit à les déposer sur la membrane où elles s'imbriquent fortement. Une fois ce processus réalisé, l'ensemble constitue ce que l'on appelle l'Assemblage Membrane – Electrodes (en Anglais MEA, Membrane Electrode Assembly).

Les travaux actuels portent sur :

- la réduction de la quantité de platine qui est un matériau onéreux ;
- la réduction de l'épaisseur de la membrane qui en s'opposant à la circulation des ions intervient pour une part non négligeable dans la résistance interne du système ;
- la recherche de matériaux de membrane pouvant fonctionner à des températures supérieures aux 40 – 90 degrés actuels.

1.6 Caractéristique tension - courant d'une PAC

L'énergie électrique de la PAC dépend du déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre l'anode et la cathode lors de la réaction chimique. Cette réaction implique une variation d'entropie, ΔS [kJ/(mol K)] et une enthalpie libre appelée énergie libre de Gibbs ΔG [J/mol]. Cette variation d'enthalpie est la partie récupérable du travail sous la forme d'énergie électrique. Une autre partie, $T_{PAC} \Delta S$, est l'énergie transformé en chaleur. Cela est représenté par l'équation suivante. [8]

$$\Delta G = \Delta H - T_{PAC} \Delta S \quad (1.5)$$

Avec : ΔH Variation de l'enthalpie de la réaction ou chaleur de réaction à pression constante, J/mol.

T_{PAC} Température de fonctionnement de la PAC, K. En sachant que ΔG correspond à m_{elec} mols d'électrons (2) mises en jeu lors de la réaction, la tension maximale de la cellule en circuit ouvert, $E_{PAC MAX}$, est donnée par l'équation (1.6).

$$\Delta G + m_{elec} F E_{PAC MAX} = 0 \quad (1.6)$$

Où : F est la constante de Faraday, 96485 C.

La variation de l'enthalpie libre dépend de la température et de la forme, liquide ou gazeuse, de l'eau obtenue. Dans des conditions standards de fonctionnement (pression : 105 Pa et température : 25 °C), la variation d'enthalpie libre est égale à $\Delta G = -237$ kJ pour chaque mole d'hydrogène consommée avec de l'eau liquide. Avec de l'eau gazeuse, sa valeur est égale à 229 kJ/mol H₂. La tension obtenue est :

$$E_{\text{PACMAX}} = - \frac{-237.10^3}{2 \times 96485} = 1.23 \text{ V Eau liquide.} \quad (1.7)$$

$$E_{\text{PACMAX}} = - \frac{-229.10^3}{2 \times 96485} = 1.18 \text{ Eau sous forme de gaz} \quad (1.8)$$

En tenant compte de l'équation (1.2), la valeur de tension maximale peut s'écrire sous la forme de l'équation (1.9)

$$E^0 = E_{\text{PAC_MAX_standard}} + \frac{\Delta S_{\text{standard}}}{2F} (T - 298.15) \quad (1.9)$$

Où : $\Delta S_{\text{standard}}$ et $E_{\text{PAC_MAX_standard}}$ représentant respectivement sont la variation d'entropie standard (-0.164 kJ/(mol K)) et la tension maximale réversible standard (1.23 V). E^0 est la potentielle thermodynamique d'équilibre à une température quelconque (inférieure à 100°C). Cette tension maximale diminue, lorsque la température augmente. Les pressions partielles instantanées des gaz (PH₂ et PO₂) influencent également la différence de potentiel selon la loi de Nerst

$$E_{\text{Rev}} = E^0 + \frac{R \cdot T_{\text{PAC}}}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2}}{P_0} \sqrt{\frac{P_{\text{O}_2}}{P_0}} \right)$$

Où : P₀ est la pression standard, 10Pa, E_{Rev} correspond au potentiel thermodynamique réversible de la réaction, R est la constante de gaz parfait qui vaut 8.314 [J·mol⁻¹·K⁻¹] ou [kg·m²·s⁻²·mol⁻¹·K⁻¹]. Cependant, lorsque la cellule débite un courant, I_{PAC}, cette tension de sortie diminue selon l'équation (1.11). Cela est dû à plusieurs irréversibilités, décrites ci-dessous.

Surtensions d'activation à la cathode η_{act_c} et à l'anode η_{act_a} . Cela résulte du contrôle d'une électrode par une cinétique électrochimique lente. Les surtensions d'activation sont directement liées à la vitesse des réactions électrochimiques. Elles sont plus élevées à la cathode.

Pertes ohmiques. Elles traduisent les résistances au transport des électrons et des protons. Les pertes relatives au transport d'électrons ont lieu dans les plaques bipolaires, les interfaces de contact et dans la partie conducteur électronique des électrodes. La résistance électronique est habituellement constante, tandis que la résistance protonique est proportionnelle au courant et dépend fortement de l'état de la membrane. Les pertes se localisent dans la membrane principalement. Le calcul de ces pertes se fait avec la loi d'Ohm :

$$\text{Pertes ohmiques} = (R_{\text{électronique}} + R_{\text{protonique}}) I_{\text{PAC}}^2 = R_t I_{\text{PAC}}^2 \quad (1.11)$$

Surtension de concentration, η_{con} . Dès qu'une espèce réactive est consommée dans l'électrode, une perte de potentiel se produit due à l'incapacité du matériau de maintenir la concentration. Donc, un gradient de répartition de la concentration de l'espèce existe dans l'électrode volumique. Cette surtension est particulièrement importante pour de fortes densités de courant. Notons que dans ce cas, apparaît également une limitation de potentiel dû au noyage des électrodes.

$$V_{\text{PAC}}(I_{\text{PAC}}) = E_{\text{Re v}} - |\eta_{\text{act_a}}(I_{\text{PAC}})| - |\eta_{\text{act_c}}(I_{\text{PAC}})| - R_t I_{\text{PAC}} - \eta_{\text{con}}(I_{\text{PAC}}) \quad (1.12)$$

En conclusion, la réponse électrique d'une cellule est influencée par tous ces phénomènes. Chacun d'eux est prépondérant selon la valeur de la densité du courant.

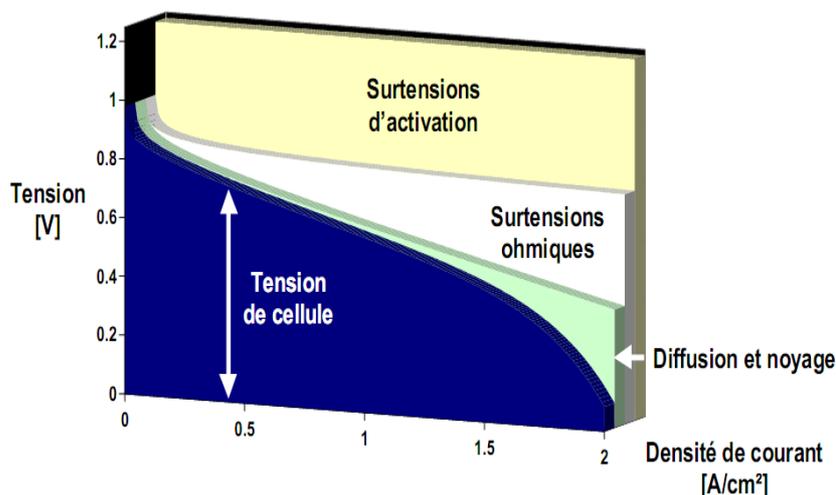


Fig (1-9) : Exemple de courbe de polarisation d'une cellule de pile .

Cette courbe de polarisation permet de constater que la diminution des surtensions à la cathode et de la résistance de la membrane sont des points fondamentaux en vue d'une amélioration des performances.

1.7 Rendement énergétique :

Le rendement énergétique de la PAC est très élevé puisqu'il ne se voit pas limité par le cycle de Carnot. Le combustible est directement transformé en électricité sans passer par le stade thermique. Le rendement est défini par le rapport entre l'énergie électrique produite directement utilisable, W_{elec} ou ΔG , et l'énergie thermique libérée par la réaction chimique, ΔH . Le rendement théorique maximal d'une PAC peut donc s'écrire sous la forme (1.13). [8]

$$\eta_{Theorique} = \frac{W_{Elec}}{\Delta H} = \frac{m_{Elec} \cdot F \cdot E_{PAC_MAX}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T_{PAC} \cdot \Delta S}{\Delta H} \quad (1.13)$$

Ce rendement réversible théorique est très élevé. Par exemple, à 25°C, il peut atteindre 83 % pour de l'eau liquide, et 95% pour de l'eau sous forme gazeuse. Cependant, dans la réalité, cette valeur n'est pas atteignable, car les surtensions et résistances de la PAC font chuter le rendement lorsqu'un courant s'établit. Ce rendement qui est représenté par la tension de sortie est donné par l'équation (1.14).

$$\eta_{reversible} = \frac{E_{PAC}}{E_{PAC_MAX}} \quad (1.14)$$

En conséquence, pour une tension de sortie de 0.7 V à 25 °C et de l'eau sous forme liquide ($E_{PAC_MAX} = 1.23$), la valeur sera $0.7/1.23 = 57 \%$.

En considérant l'énergie et la puissance de la PAC, il faut introduire un autre rendement : le rendement faradique. En effet, le nombre d'électrons réellement échangés, $\eta_{elec_réel}$, n'est pas exactement celui estimé par la consommation en comburant et combustible, η_{elec_the} . Le rendement faradique est calculé à l'aide de l'équation (1.15).

$$\eta_{Faradique} = \frac{\eta_{elec_réel}}{\eta_{elec_the}} \quad (1.15)$$

Cela est dû aux réactions électrochimiques parallèles et aux réactions chimiques entre les espèces réactives catalysées et les matériaux d'électrodes. Pour le cas d'une PEM, alimentée en oxygène et hydrogène, on peut considérer que le rendement faradique est égal à 1.

Dans les cas où le combustible est fourni en excès pour prévenir tout déficit des

réactifs, un autre coefficient affecte le rendement : le **rendement de matière**, $\eta_{\text{matière}}$. La valeur est habituellement de 95%, car on considère que presque tout réagit.

On arrive enfin au **rendement du système**, $\eta_{\text{Système}}$. Le conditionnement de la PAC demande une grande quantité d'énergie qui peut être fournie par la PAC elle-même lors du régime permanent, ou par des sources auxiliaires d'énergie, lors des transitoires. Cette consommation dépend des auxiliaires employés : compresseur, reformeur, ventilateurs, circuit de refroidissement, valves. Il est calculé en utilisant la formule ci-dessous.

$$\eta_{\text{système}} = \frac{P_{\text{net}}}{P_{\text{brute}}} = \frac{P_{\text{PAC}}}{P_{\text{PAC}} + P_{\text{Aux}}} \quad (1.16)$$

Où :

P_{Aux} : Puissance demandée par les auxiliaires.

P_{PAC} : Puissance nette fournie par la PAC.

En définitive, le rendement global du générateur sera calculé par l'équation (1.17) :

$$\eta_{\text{PAC}} = \eta_{\text{Théorique}} \cdot \eta_{\text{Réversible}} \cdot \eta_{\text{Faradique}} \cdot \eta_{\text{Matière}} \cdot \eta_{\text{Système}} \quad (1.17)$$

Si l'on compare cette valeur à celle obtenue pour d'autres sources d'énergie comme le moteur thermique classique, la microturbine ou le générateur diesel, la PAC affiche un net avantage.

Il va sans dire que l'exploitation de la chaleur produite, P_{Chaleur} , conduit à un rendement énergétique global encore plus grand. Cela conduit à une plage de valeurs comprise entre 36 et 80%. L'équation (14) permet d'évaluer la chaleur produite.

$$P_{\text{Chaleur}} = P_{\text{Totale}} - P_{\text{Electrique}} = (E_{\text{MAX}} I_{\text{PAC}}) - (V_{\text{PAC}} I_{\text{PAC}}) = [(E_{\text{MAX}} - V_{\text{PAC}}) \cdot I_{\text{PAC}}] \quad (1.18)$$

1.8 Avantages et problèmes de la PAC

1.8.1 Les avantages :

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [8]

- ✓ Le haut rendement énergétique même à charge partielle. Le rendement électrique dépend du type de pile. Il varie entre 40 % et 70 % sans tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur, humidificateur et convertisseur) qui font baisser ces valeurs. Dans les applications de transport, le rendement d'une pile PEM est compris entre 38 % (reformage du méthanol) et 50 % (hydrogène pur). Cependant, dans les applications stationnaires, le rendement énergétique global est bien plus élevé car l'énergie non convertie sous forme électrique peut être récupérée sous forme de chaleur. On peut atteindre des rendements globaux de 85 % à 90 %.
- ✓ Les faibles émissions sonores car lors de leur fonctionnement, les piles sont silencieuses. Seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes et le système de ventilation produisent un léger bruit. Ceci présente un avantage pour leur insertion en milieu urbain.[10]
- ✓ Les faibles émissions gazeuses (selon le carburant utilisé et son origine). Les piles fonctionnant à l'hydrogène pur ne produisent rien tandis que celles utilisant du méthanol ou de l'éthanol produisent de faibles quantités de CO₂, de CH₄ et de CO.
- ✓ La construction modulaire en fonction de la demande de puissance. Le Stack est constitué de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série. Il est donc possible en adaptant le nombre de cellules et la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles.
- ✓ Les diverses températures de fonctionnement. Les PAC possèdent une large plage de températures de fonctionnement selon leurs types. Ceci permet de couvrir plusieurs domaines d'application. Par exemple, les piles de faible température sont utilisées pour les applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite. En revanche, les piles à haute température sont plus adéquates aux applications domestiques où la chaleur dégagée est utilisée pour l'eau chaude et le chauffage. Elles conviennent aussi aux applications industrielles où la chaleur produite est exploitée pour un couplage avec une turbine.[10]

Malgré l'intérêt qu'elle suscite, la PAC est encore loin d'une véritable percée sur le marché. Sa situation actuelle demande encore plus de recherche et de développement avant d'être commercialiser. En particulier, les piles du type PEM sont les plus concernées par ce développement car, elles sont les plus adaptées aux applications de transport. En effet, parmi les problèmes principaux faisant obstacle au développement des piles PEM on retrouve :

1.8.1 Les inconvénients :

Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires. En effet, ces composants doivent remplir plusieurs fonctions simultanées et doivent résister à de nombreuses contraintes. De plus, les techniques d'usinage des canaux de distribution dans les plaques bipolaires sont très coûteuses.[10]

le poids et le volume. Le poids et le volume qui constituent deux contraintes majeures pour les applications de transport.

Le carburant qui impose soit l'utilisation d'un reformeur dans le cas d'utilisation du méthane, soit la résolution du problème de stockage à bord dans le cas d'utilisation de l'hydrogène. Dans ce dernier cas, la prise en compte de hautes précautions est indispensable afin d'éviter les risques d'explosion et d'inflammabilité.

- ✓ La courte durée de vie des composants du cœur de la pile, surtout la membrane. A l'heure actuelle, la durée de vie de la pile PEM pour les applications de transport est généralement limitée à quelques milliers d'heures (entre 3000 h et 5000 h pour les automobiles). Ceci est dû à une dégradation de ses performances au cours du temps : la pile subit une diminution de la tension et du rendement. Les origines de la dégradation des différentes parties du système, partant des électrodes à la membrane en passant par le catalyseur, sont multiples : agressions mécaniques dues au couple de serrage de la cellule, assèchement de la membrane causé par une sous-humidification des gaz,

utilisation en mode cyclage (démarrages/arrêts) et agressions chimiques (oxydation) causée par la présence de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Les travaux de recherche relatifs à l'amélioration de la durée de vie, s'intéressent soit au développement de nouveaux matériaux capables de résister aux facteurs de dégradation, soit à la réduction des effets néfastes des phénomènes qui affectent la membrane surtout son humidification. En effet, une gestion d'eau adéquate au niveau de la membrane améliore ses conditions de fonctionnement et augmente par conséquent sa durée de vie.

- ✓ La température de fonctionnement qui ne peut pas dépasser $90\text{ }^\circ\text{C}$ pour le Nafion. En effet, nous avons intérêt à avoir des températures de fonctionnement comprises entre $150\text{ }^\circ\text{C}$ et $200\text{ }^\circ\text{C}$ afin d'augmenter l'activité des catalyseurs et d'éviter l'empoisonnement des électrodes par le monoxyde de carbone CO. Le fait de rendre les électrodes insensibles à la présence du CO permet de simplifier le processus de reformage dans le cas d'utilisation du méthane. Cependant, une augmentation de la température du Nafion réduit sa conductivité protonique à cause de son inaptitude à retenir l'eau au dessus de $100\text{ }^\circ\text{C}$.

1.9 Conclusion :

Ce chapitre s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM. Les différents points abordés ont concerné quelques rappels historiques du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement, et la caractéristique statique d'une pile PEM a été rappelée. Enfin les Avantages et problèmes de la PAC

Chapitre 2

systeme pile à combustible

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout particulièrement aux les auxiliaires d'une pile à combustible PEM et puis aux convertisseurs continu-continu non réversible qui peuvent être utilisés comme interface entre une pile à combustible et une charge électrique.

2.2 Description d'un système Pile à Combustible complet

2.2.1 Auxiliaires d'une pile à combustible PEM :

Les auxiliaires d'une pile à combustible PEM sont les différents appareils qui entourent le stack (figure 1). On rencontre généralement :

- un compresseur ou une turbine qui alimente le circuit cathodique en air ;
- un système d'alimentation en hydrogène qui selon que l'hydrogène est fabriqué sur place ou non, comprend dans le premier cas un système de reformage et dans le deuxième cas des réservoirs sous pression et un ou des détendeurs assurant le réglage de la pression de l'hydrogène à celle de fonctionnement de la pile ;
- un ou deux humidificateurs selon qu'un ou deux des gaz d'alimentation sont humidifiés afin de permettre un bon fonctionnement des membranes ;
- différents accessoires destinés à la distribution des gaz (électrovannes, tuyauteries...);
- un circuit de refroidissement qui permet la régulation de la température de fonctionnement de la pile (circuit de refroidissement et de chauffage pour le démarrage, capteurs thermiques...);
- un convertisseur statique qui permet la gestion de l'énergie délivrée par la PAC ;

- un élément de contrôle assurant la gestion des flux de gaz en fonction du courant demandé et la sécurité du système [1]. La présence de ces appareils qui consomment une partie de l'énergie produite par la pile à combustible dégrade le rendement du système. Leur conception est donc souvent un élément clé dans le développement d'un système pile à combustible.

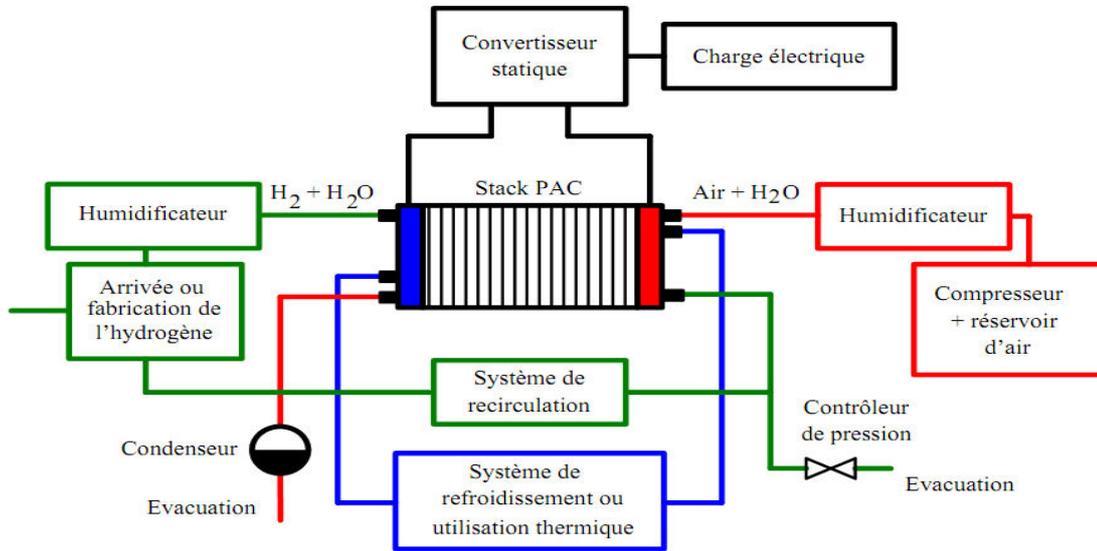


Fig (2-1) : Schéma synoptique d'un système à pile à combustible avec ses principaux auxiliaires. [1]

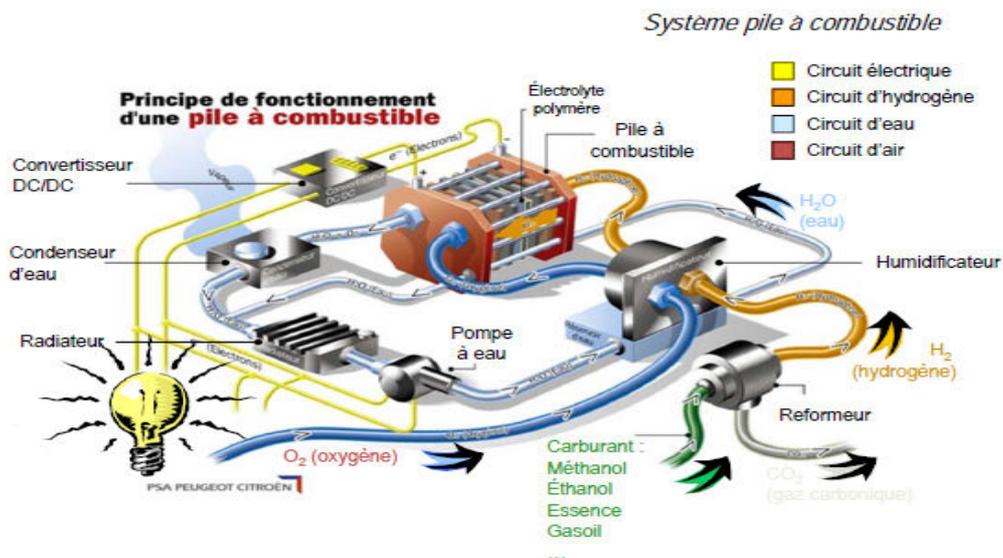
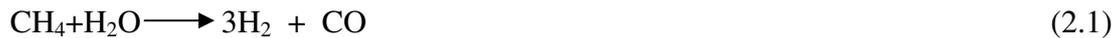


Fig (2-2) : Schéma 3d système pile à combustible.

a) Production du combustible, hydrogène :

L'hydrogène est produit sur place par reformage du gaz naturel. Le gaz naturel est constitué d'une grande partie de méthane et il contient aussi du CO₂ et du soufre. Ce dernier doit être d'abord éliminé par un système de désulfuration. L'opération de reformage se fait en deux étapes principales, la première créant de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (CO) :



la deuxième de l'hydrogène et du CO₂. La deuxième réaction a pour but de supprimer le monoxyde de carbone qui se comporte comme un poison pour les catalyseurs [1] :



De manière très simplifiée, on peut voir sur la figure les différentes parties du système de reformage.

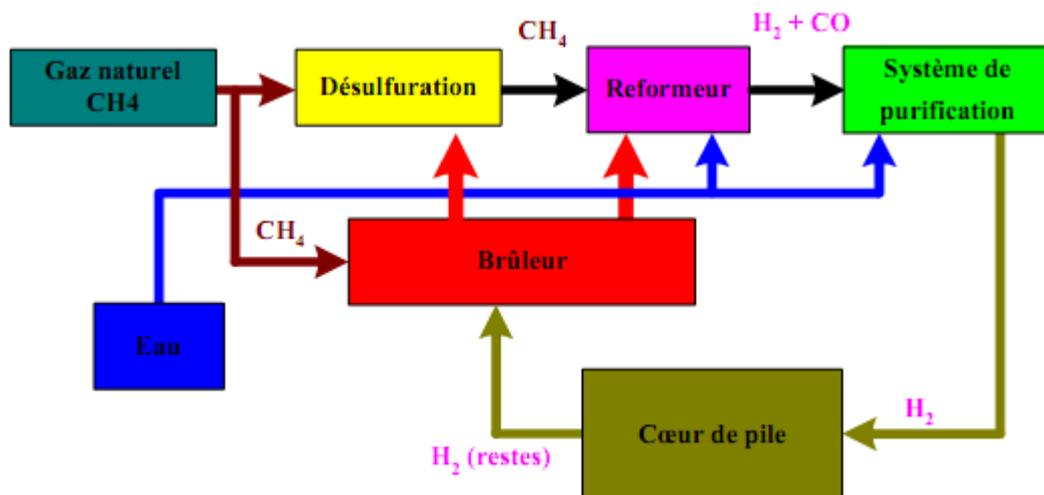


Fig (2-3): Schéma simplifié du système de reformage.[1]

b) Alimentation en hydrogène

Suivant l'application visée, le mode d'alimentation retenu peut différer. L'hydrogène peut être stocké tout simplement dans un réservoir ou être fabriqué à partir d'un hydrocarbure par un processus de reformage. Dans ce dernier cas, la complexité du système croît et la production d'hydrogène dégage du dioxyde de

carbone. Ce type d'alimentation sera certainement utilisé comme solution transitoire avant le « tout hydrogène » car le réseau de distribution des hydrocarbures est déjà présent.

Concernant le stockage de l'hydrogène, il existe plusieurs solutions. La première, consiste à stocker le gaz dans un réservoir à des pressions de l'ordre de 300 bar à 700 bar. Afin de satisfaire les conditions de pression en entrée de la pile (jusqu'à 3 bar), il est nécessaire d'ajouter entre le stockage et la pile, un détendeur permettant de réguler la pression d'hydrogène en entrée de la pile. L'inconvénient d'un tel mode de stockage est que l'énergie utilisée pour comprimer l'hydrogène représente 7% de l'énergie stockée si l'hydrogène est comprimé à 200 bars (et donc plus si la pression est plus élevée).

La deuxième solution consiste à liquéfier l'hydrogène. Cette liquéfaction implique des températures très basses et donc une énergie encore plus conséquente qu'un stockage sous pression. Avec les installations actuelles, l'énergie nécessaire à la liquéfaction représente 40% de l'énergie contenue dans l'hydrogène.

La dernière solution consiste à stocker l'hydrogène à basse pression dans des hydrures métalliques. L'inconvénient d'un tel type de stockage est le temps de recharge du réservoir qui est assez long. D'autre part, la quantité d'hydrogène stockée ne dépasse pas 2 % du poids du réservoir. La pile à combustible peut, dans certains cas, disposer d'une pompe de recirculation d'hydrogène (l'hydrogène non consommé sortant de la pile est réinjecté en entrée) suivant le mode de fonctionnement de la pile. Dans tous les cas, la sortie anodique est équipée de purges permettant d'évacuer l'eau et autres composants tels que l'azote ayant migré de la cathode vers l'anode.[11]

c) Alimentation en air

L'oxygène alimentant la pile à combustible est généralement prélevé dans l'air ambiant afin d'éviter le stockage de l'oxygène. Cependant, l'air ne contient que 21% d'oxygène. Afin d'augmenter la concentration d'oxygène, il est parfois nécessaire (pour les puissances élevées) de comprimer l'air. Dans certains cas, l'énergie disponible dans les gaz de sortie (air appauvri en oxygène) de la pile peut être récupérée par une turbine. Pour les petites puissances, une soufflante peut suffire.

L'utilisation d'un compresseur n'est pas sans conséquences sur le rendement global du système. Celui-ci est alimenté par la pile à combustible et lui prélève une puissance non négligeable qui peut représenter jusqu'à 25% de la puissance

électrique délivrée par la pile. Le compresseur est donc un auxiliaire très important dans la pile et de nombreux verrous technologiques sont à lever dans ce domaine : il doit permettre l'alimentation en air, l'évacuation de l'eau produite sans assécher la membrane de la pile et assurer une bonne dynamique du système (c.-à-d., répondre en temps réel aux sollicitations du système).

d) Circuit de refroidissement

La conversion électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène en électricité produit également de la chaleur. Celle-ci doit être évacuée afin de maintenir la température de la pile constante. L'évacuation de cette chaleur, pour des petites puissances, peut être réalisée avec un ventilateur (convection forcée d'air) qui peut être le même que celui alimentant la pile en air.

Dans le cas des piles de plus fortes puissances, la convection forcée à air ne suffit plus à évacuer la chaleur. On a donc recours à d'autres types de refroidissement plus complexes tel que le refroidissement à eau. Ce système fonctionne en boucle fermée grâce à une pompe qui fait circuler de l'eau déminéralisée dans un circuit secondaire à l'intérieur de la pile. Cette eau est refroidie au moyen d'un échangeur air/eau (radiateur).

e) Circuit d'humidification

Généralement les piles requièrent un circuit d'humidification des gaz afin que la membrane ne soit pas déshydratée (augmentation de la résistance ionique de la membrane) ou que les électrodes ne soient pas noyées en raison d'un excédent d'eau. Ce circuit a donc pour rôle d'humidifier les gaz en entrée de la pile, généralement à partir de l'eau produite par la pile, récupérée au moyen d'un condenseur.

Le contrôle de l'humidification est très délicat. De plus en plus de recherches ont pour objectif de trouver des solutions permettant de s'affranchir d'un tel circuit en augmentant, par exemple, la température de fonctionnement de la pile (membranes haute température) ou de regrouper dans un seul dispositif le compresseur et l'humidificateur (compresseur humidificateur intégrés).

f) Convertisseur statique

Le convertisseur statique permet de mettre en forme l'énergie électrique produite par

la pile à combustible. La tension de la pile, qui est relativement faible, n'est pas constante en fonction du courant délivré. Les convertisseurs sont de type continu-continu, élévateur de tension (faible tension, fort courant) et unidirectionnels en courants ; ils peuvent être réalisés en plusieurs étages. Le convertisseur statique permet généralement de faire l'interface entre la pile et un bus continu où sont connectés, suivant l'application, d'autres composants de stockage énergétique tels que les batteries ou les super condensateurs et d'autres convertisseurs (DC/DC ou DC/AC) qui permettent de faire l'interface entre le bus continu et la charge (p.ex., moteur électrique).

g) Système de contrôle

Comme cela a été vu précédemment, le système dispose d'un grand nombre d'auxiliaires interconnectés et interdépendants. Afin d'assurer un bon fonctionnement du système (rendement global, sécurité de fonctionnement, prise en compte des contraintes), il est nécessaire d'avoir un système de contrôle global permettant d'agir sur les différents sous-systèmes (convertisseur statique, débit des gaz, contrôle du compresseur, pompe à eau nécessaire au refroidissement, température de l'humidificateur, etc.).[11]

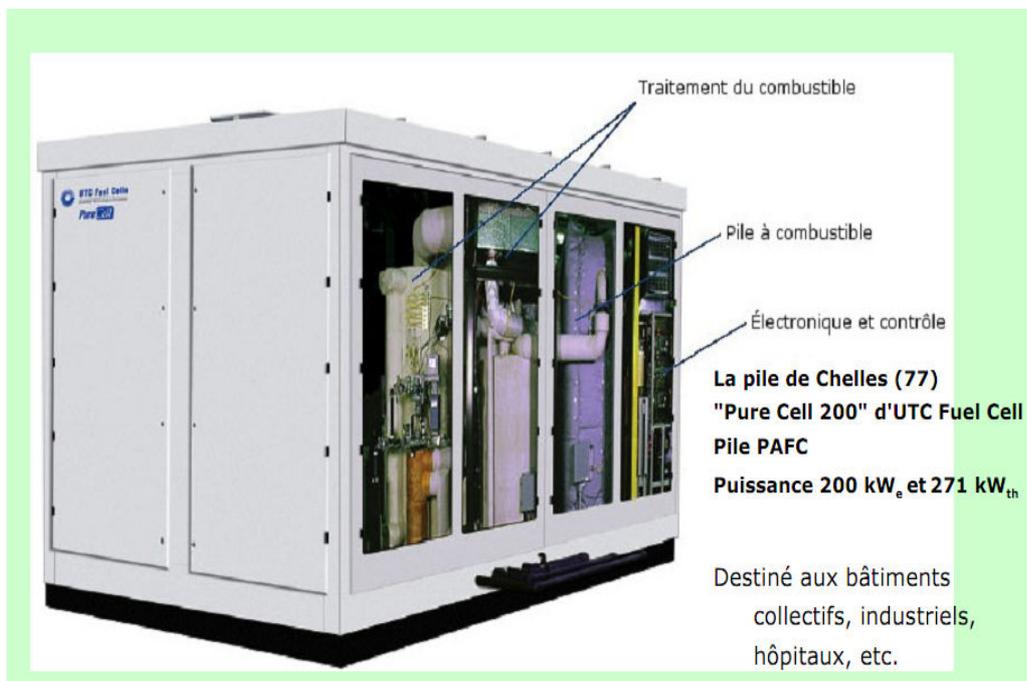


Fig (2-4) : Exemple de système pile à combustible en mode stationnaire[12]

2.3 LES CONVERTISSEURS DC -DC (HACHEURS)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permet tant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé .

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs .

2.3.1 Les Convertisseurs continu-continu non-isolés

Il existe cinq structures principales de convertisseurs continu-continu non isolés dont les schémas sont représentés sur la figure

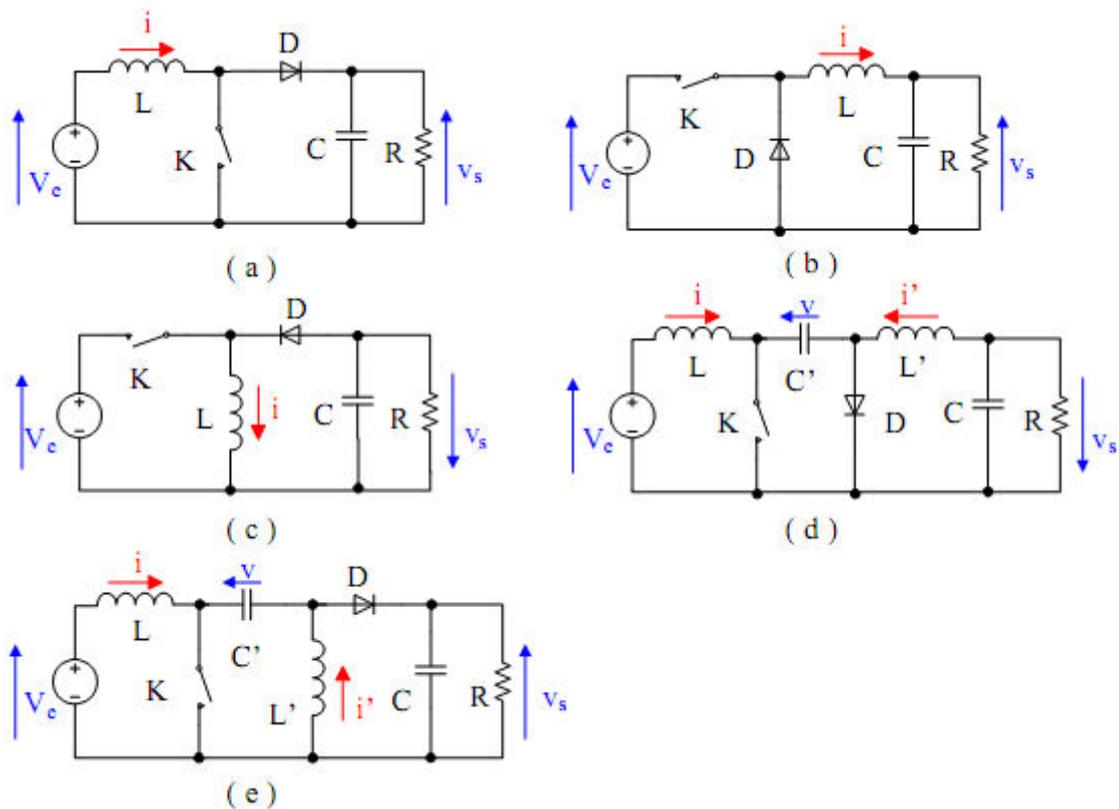


Fig (2-5) : (a) Convertisseur Boost (hacheur élévateur), (b) Convertisseur Buck (hacheur abaisseur), (c) Convertisseur Buck-Boost (hacheur à stockage inductif), (d) Convertisseur Cuk(hacheur à stockage capacitif abaisseur-élévateur-inverseur), (e) Convertisseur Sepic (hacheur capacitif abaisseur-élévateur).[13]

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde

de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.

Trois topologies de base de circuit de conversion (DC– DC) seront décrites dans les paragraphes suivants :

a. Le hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la Fig (2-6) représente le circuit électrique du Boost Au premier temps ($T\alpha$), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [14].

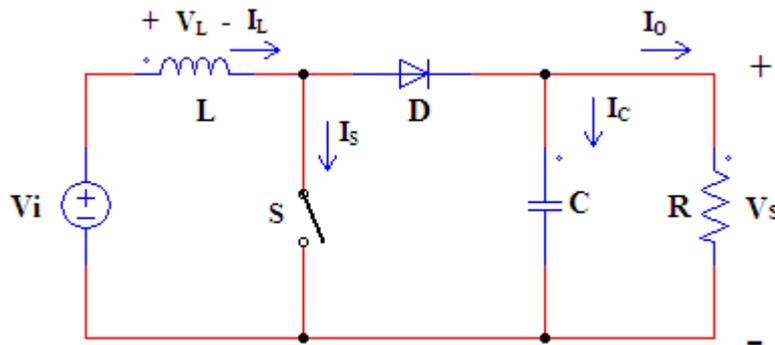


Fig (2-6): Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

La tension et le courant de la charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont donnés par :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} \times V_i \quad (2.3)$$

Et

$$I_o = (1 - \alpha) \times i_L \quad (2.4)$$

b. Le hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la Figure(2-7). les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D), et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge (R) pour un cycle de période de fonctionnement.

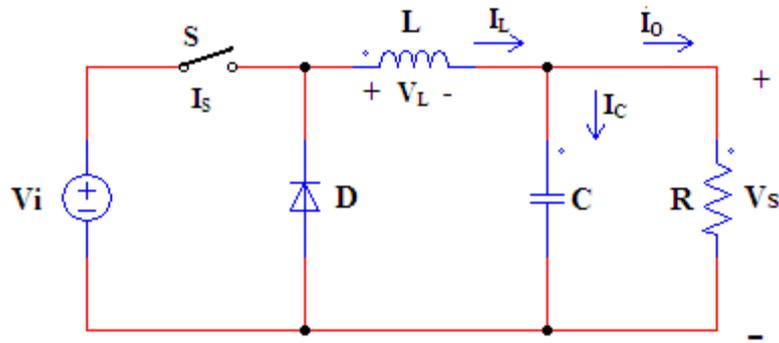


Fig (2-7) : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peuvent se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement.

La tension de la source (Vi) doit être plus grande que la tension (Vs) aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{Vi - Vs}{L} \quad (2.5)$$

I_L : Le courant dans l'inductance

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Dans le premier laps de temps ($\alpha.T$) le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance (L) se charge d'énergie avec augmentation du courant I_L . Dans le deuxième laps de temps ($1-\alpha.T$), l'inductance (L) libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant I_L .

En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement de courant est donné par :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{Vs}{L} \quad (2.6)$$

Lorsque le courant de l'inductance ne se décroît pas à zéro avant la commutation du transistor (S), le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure III.2, et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$, la tension aux bornes de la charge :

$$V = \alpha \cdot Vi \quad (2.7)$$

Dans le mode de conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor (S) et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge.

c. Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la Figure. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.[17]

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$Vs = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times Vi \quad (2.8)$$

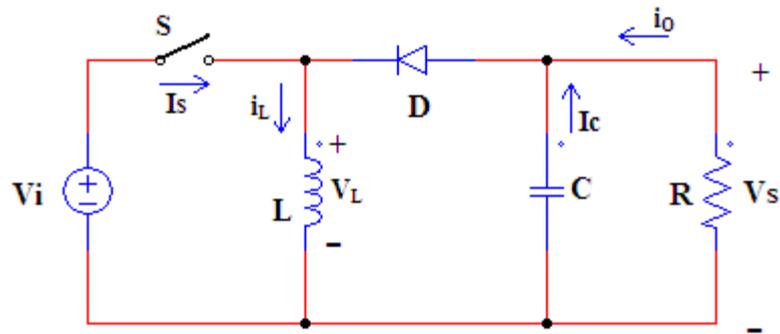


Fig (2-8) : Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.

2.4 Le choix de convertisseur :

Dans notre travail on choisie le hacheur élévateur (boost) qui est permet d'élever la tension de la pile et ainsi de contrôler la tension du bus continu.

	Boost	Buck	Buck-Boost
Gain en tension	$\frac{1}{1-\alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinu

Tableau (2-1) : Comparaison des montages

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une description globale d'un système pile a combustible et ensuite les différents convertisseurs à conversion continu-continu, permettent d'élever la tension de la pile

Chapitre 3

Modélisation l'ensemble PAC et convertisseur DC/DC

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation de convertisseur de type boost (élevateur de tension) et la PAC,. C'est la partie la plus importante de la chaîne de conversion pile charge .Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible et difficilement exploitable malgré d'importants efforts pour empiler en série le plus grand nombre de cellules élémentaires. Si l'on considère à ce jour les limites technologiques, le nombre de cellules que l'on peut mettre en série est de l'ordre d'une centaine. On obtient donc une tension variant entre quelques volts et 100 V. Pour beaucoup d'applications, cette tension est insuffisante. On est alors amené à placer un convertisseur entre la pile et la charge électrique dont le premier rôle est d'élever la tension délivrée par la pile. Cet étage de conversion est, en outre, indispensable en raison de la variation de la tension délivrée en fonction de la charge qui peut atteindre au moins 20 % de la tension nominale.[4].

3.2 Modélisation de l'interface de puissance

La modélisation d'un convertisseur se base sur les lois physiques décrivant leur fonctionnement. Ces équations physiques constituent un modèle de connaissance, on distinguera trois niveaux de ces modèles. L'utilisation de chaque modèle dépendra des objectifs de l'étude.

- Le modèle statique pour le dimensionnement des composantes de l'interface et des grandeurs électriques.
- Le modèle moyen pour l'analyse de régimes permanents et transitoires. Il permet également l'obtention de modèles de réglages et l'analyse de modes de fonctionnement. Ce modèle basé sur les variations fondamentales des grandeurs, réduit le poids de calcul et accélère ainsi les simulations.
- Le modèle instantané ou topologique pour observer le système réel et valider le modèle moyen. Il simule en détail les grandeurs physiques, hautes fréquences incluses.

Pour notre étude, les hypothèses suivantes ont été faites pour la modélisation. Les interrupteurs sont idéaux : quand ils conduisent, leur résistance est nulle. Elle est infinie, quand ils ne conduisent pas. Les commutations sont considérées comme instantanées. Les éléments passifs (résistances de charge ou de perte, inductances et capacités) sont linéaires et invariants.

Les sources de tension maintiennent leur tension continue indépendamment du courant fourni.

3.2.1 Hacheur survolteur

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré dans la figure (3.1). Il est utilisé pour adopter le niveau de tension

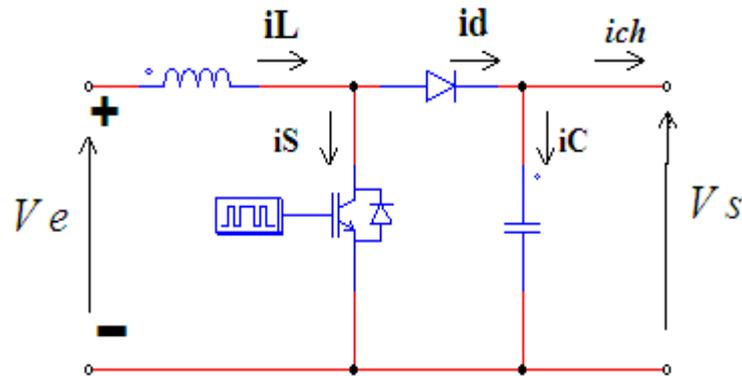


Fig (3-1): schéma de l'hacheur – survolteur (boost).

3.2.2 Modélisation du hacheur survolteur

A. *Le modèle statique :*

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \\ I_e = \frac{I_{charge}}{1 - \alpha} \end{cases} \quad (3.1)$$

B. *Le modèle moyen :*

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande u . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S , que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.[15]

- Lorsque S est fermé :

$$\begin{cases} V_e = L \frac{di_L}{dt} \\ 0 = C \frac{dV_s}{dt} + I_{ch} \end{cases} \quad (3.2)$$

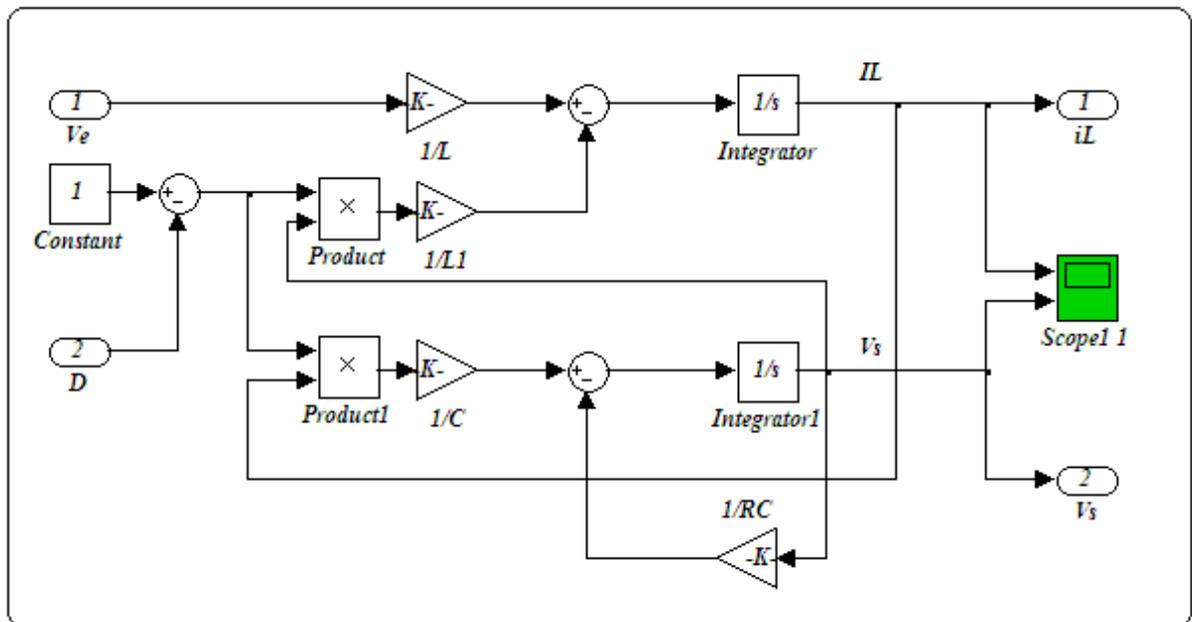
- Lorsque S est ouvert:

$$\begin{cases} V_e = L \frac{dI_L}{dt} + V_s \\ I_L = C \frac{dV_s}{dt} + I_{ch} \end{cases} \quad (3.3)$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $u = 0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$\begin{cases} V_e = L \frac{dI_L}{dt} + V_s (1 - u) \\ (1 - u) I_L = C \frac{dV_s}{dt} + I_{ch} \end{cases} \quad (3.4)$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type *MATLAB SIMULINK*.



Fig(3-2) : Schéma bloc du modèle moyen hacheur-survolteur .

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'état V et I .

Par ailleurs

il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T_d = \frac{1}{f_d}$, c'est-à-dire le rapport cyclique D ($D = T_{on}/T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes. Soit :

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = -(1-D) \frac{V_S}{L} + \frac{V_e}{L} \\ \frac{V_S}{dt} = (1-D) \frac{I_L}{C} - \frac{V_S}{RC} \end{cases} \quad (3.5)$$

Pour mettre en exergue l'exactitude de la modélisation, la figure (2-12) illustre les résultats de simulation issus du modèle moyen et celui du circuit. La figure (2-10) montre l'implantation du hacheur survolteur sur MATLAB/simulink [16].

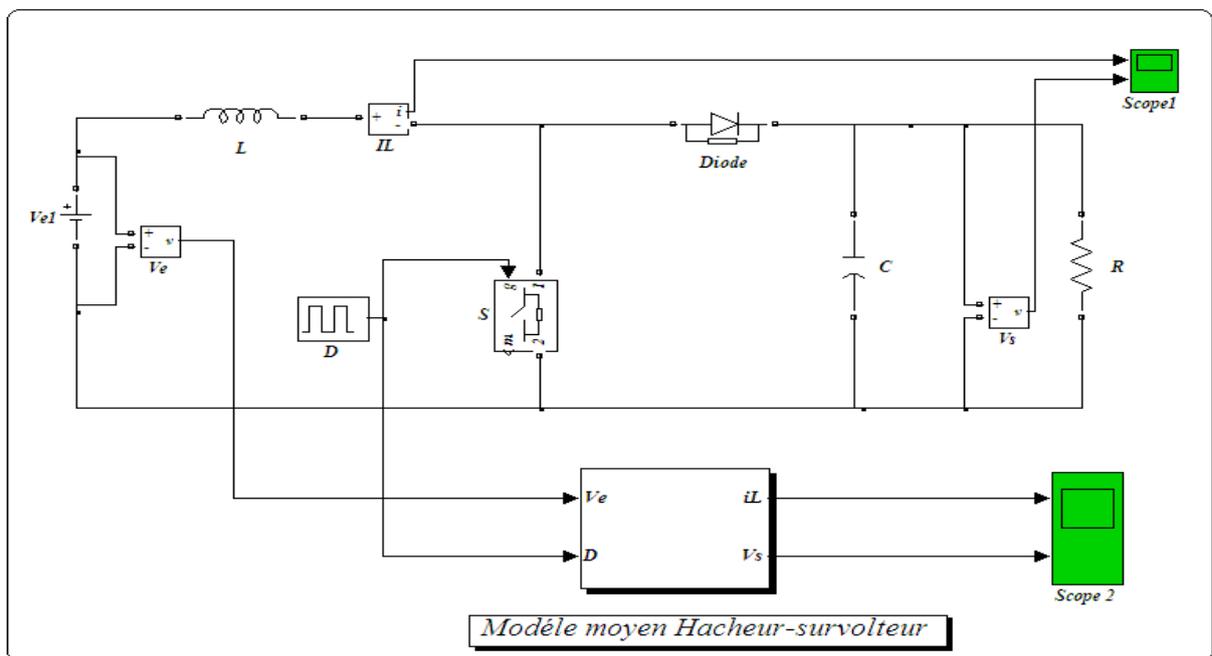


Fig (3-3) : Schéma de simulation du hacheur survolteur (circuit et modèle moyen)

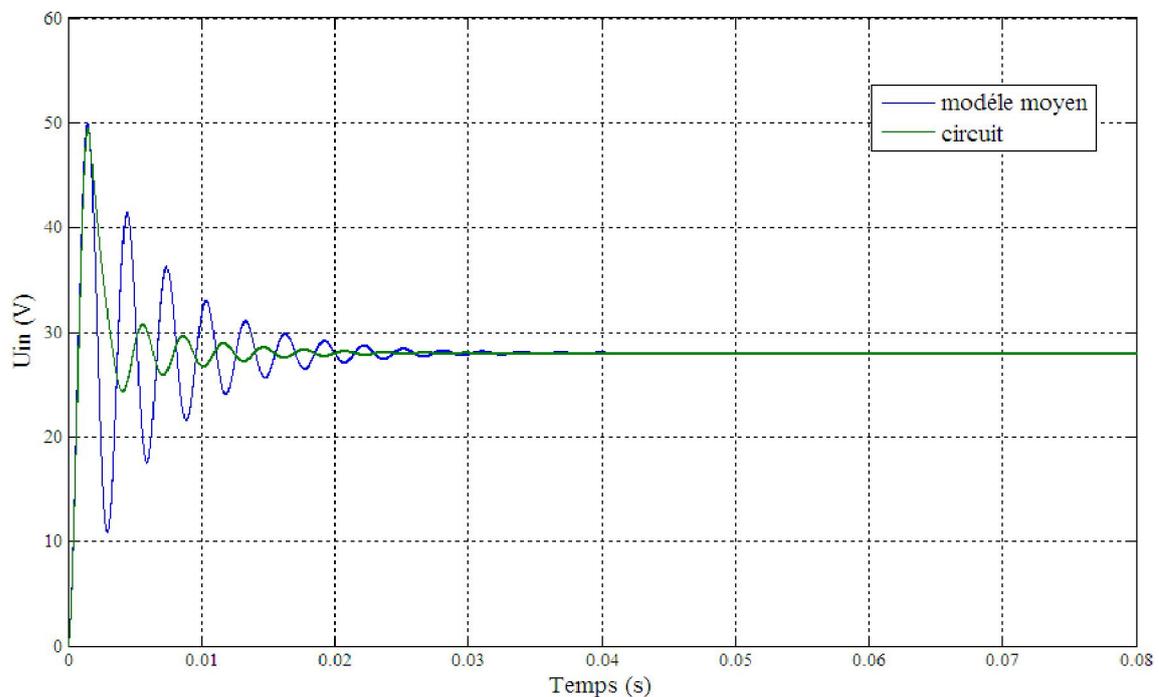
Les paramètres du circuit sont donnés dans le tableau (3-1)

Tension d'entrée	14 (V)
Fréquence de commutation	20(KHZ)
Inductance	55 (μH)
capacité	1000 (μF)
Résistance de charge	3 (Ω)

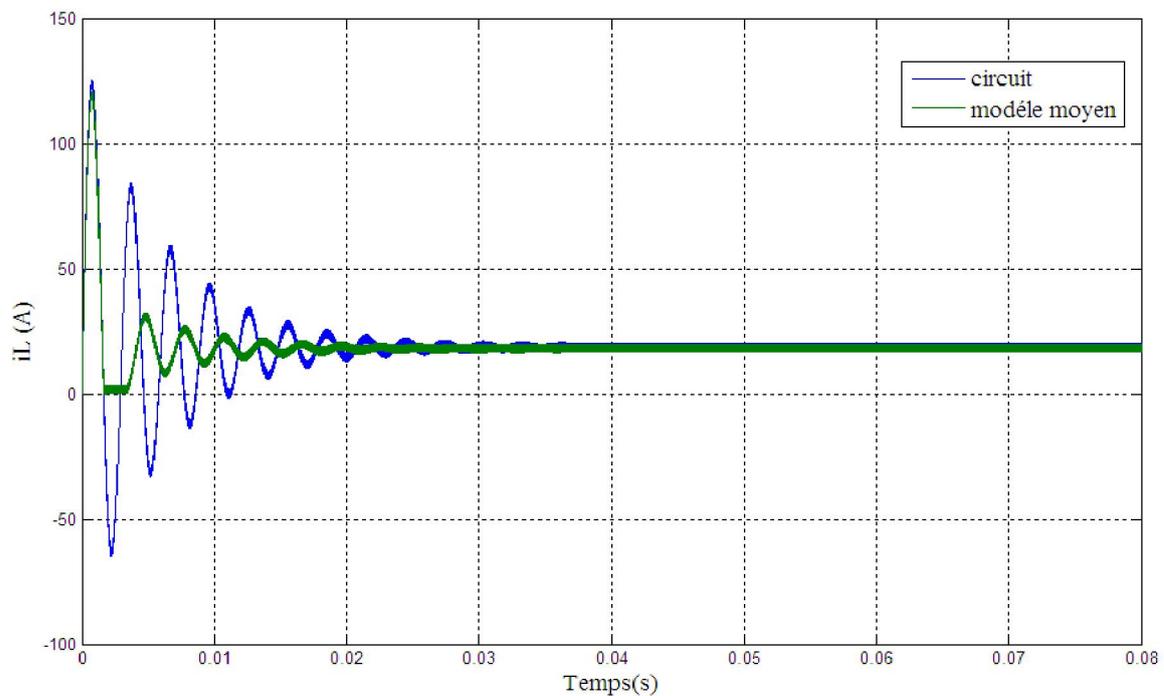
Tableau (3-1) : Paramètres du hacheur survolteur

Sur les figures (3-4) et (3-5) sont représentées la tension de charge et le courant d'entrée respectivement.

D'après ces figures, on peut constater que le modèle moyen reproduit avec exactitude les courbes de courants i_L et la tension V_s du circuit.

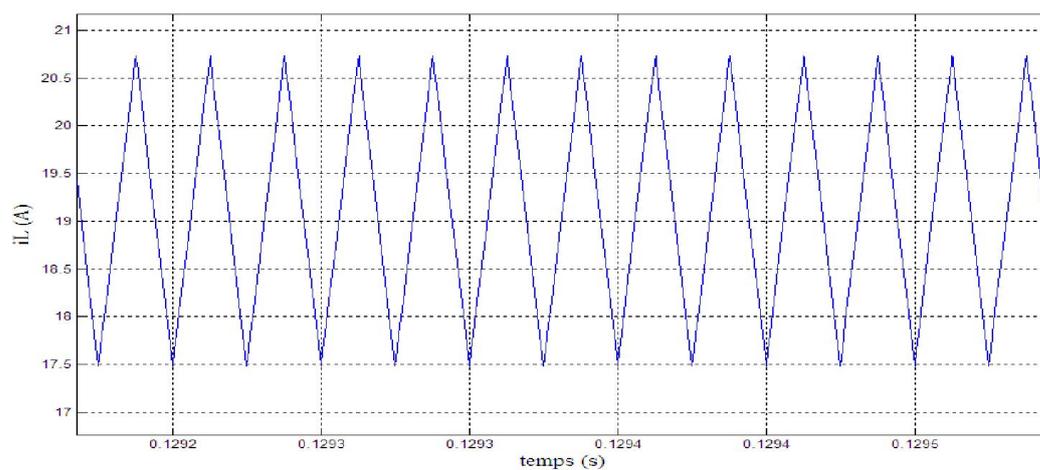


Fig(3-4) : tension de charge $V_s(V)$ (hacheur survolteur).



Fig(3-5) : courant d'entrée $i_L(A)$ (hacheur survolteur).

3.2.3 les Formes d'ondes du hacheur survolteur



Fig(3-6) : le courant dans l'inductance (I_L) en fonction de temps .

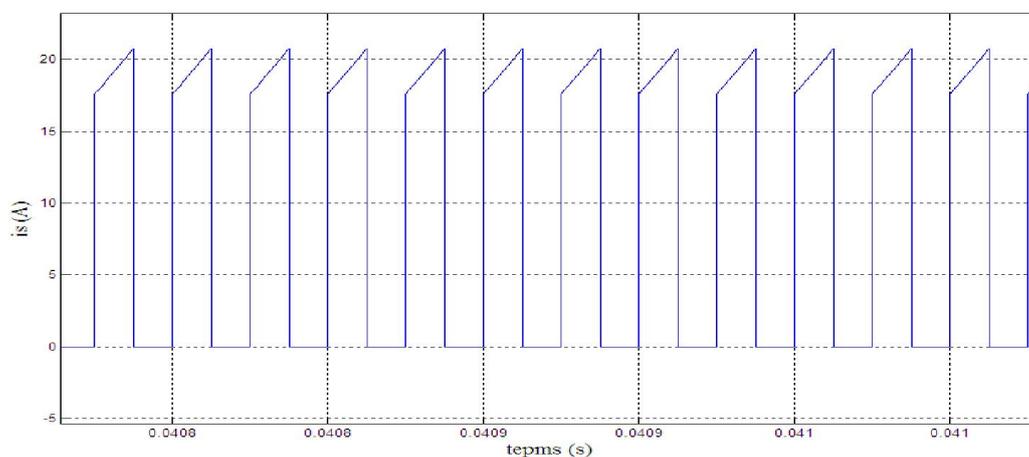
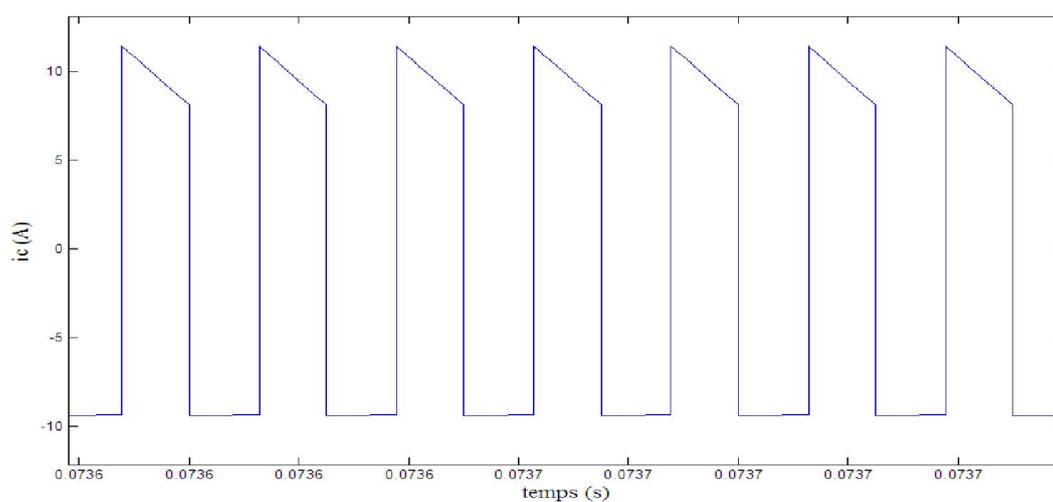


Fig (3-7) : le courant de Switch (I_S) en fonction de temps .



Fig(3-8) : le courant de la capacité (I_C) en fonction de temps

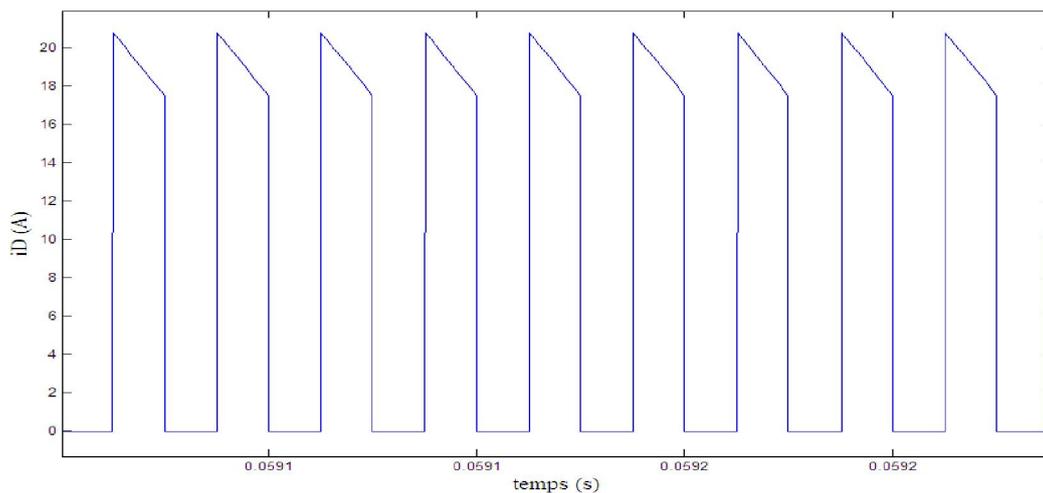
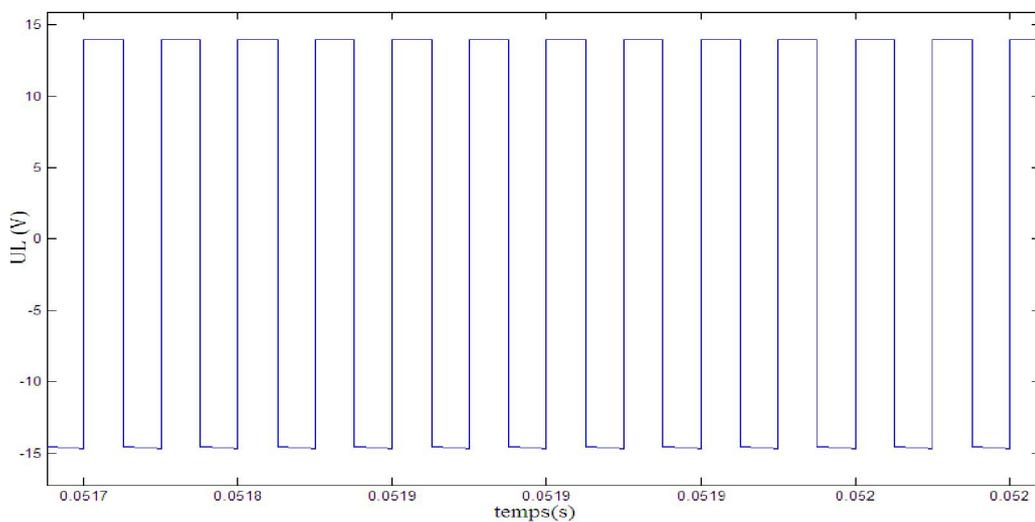
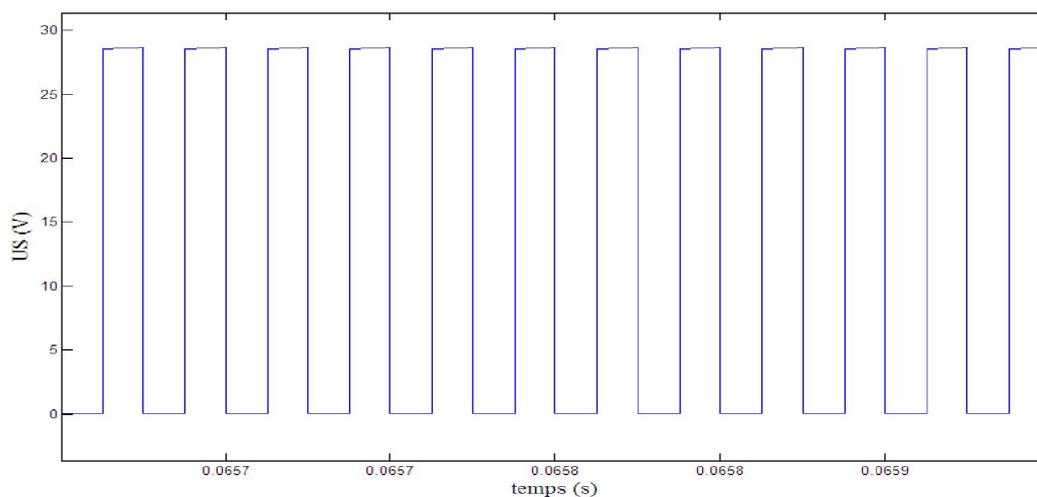


Fig (3-9) : le courant de la diode (I_D) en fonction de temps .



Fig(3-10) : la tension aux borne de la l'inductance (V_L) .



Fig(3-11) : la tension aux borne de Switch en fonction de temps .

3.3 Courbe de polarisation de la pile à combustible :

De nombreux travaux proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM comme la somme de quatre terme : tension théorique, la surtension d'activation V_{act} (ou chute d'activation de la région 1), la surtension ohmique V_{ohm} (ou chute de tension de la région 2) et la surtension de concentration (ou chute de concentration de la région 3) : [9]

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{con}$$

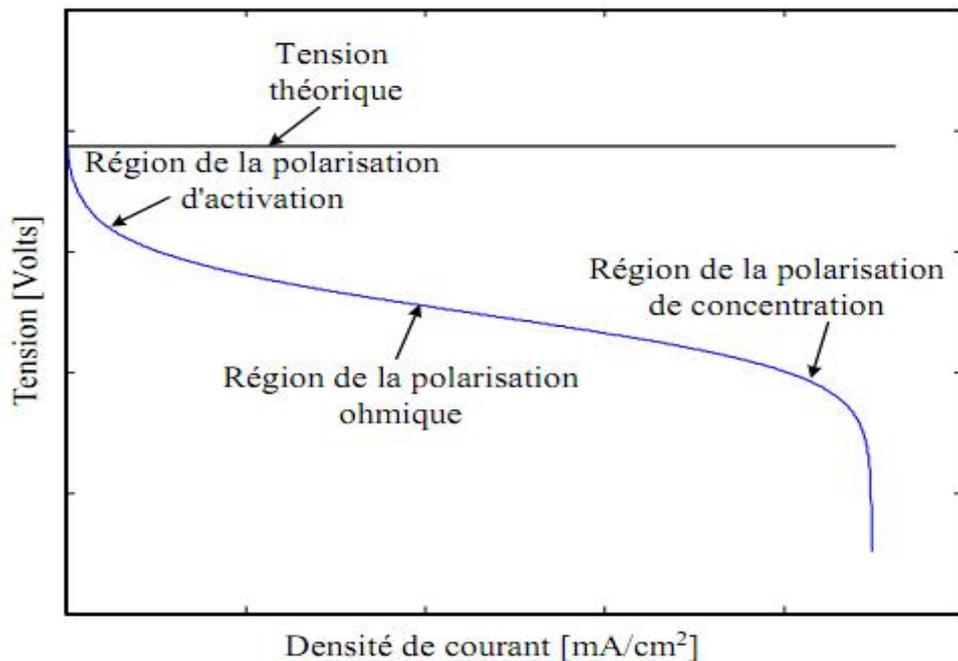


Figure (3-12) : Caractéristiques statique de la pile PEM [4].

3.3.1 Pertes d'activation :

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

$$V_{act} = A \ln \left(\frac{i_{PAC} + i_n}{i_0} \right) \quad (3.6)$$

Ou i_{PAC} est le courant délivré par la pile a combustible, i_0 le courant d'échange caractérisant à vides les échanges électrode-électrolyte, i_n le courant interne

permettant de tenir compte d'une éventuelle traversé de gaz et/ou d'électron à travers l'électrolyte et A la pente de la droite de Tafel .[9]

3.3.2 Pertes ohmiques

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

$$V_{ohm} = R_m (I_{PAC} + i_n) \quad (3.7)$$

Où R_m est la résistance totale de la pile à combustible

3.3.3 Pertes de concentration

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

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse : [9]

$$V_{conc} = -B \ln \left(1 - \frac{I_{PAC} + i_n}{i_L} \right) \quad (3.8)$$

3.4 Modélisation de la pile

La pile à combustible utilisée est une pile à canaux de type PEM, alimentée pour le moment en hydrogène et oxygène purs. Sa puissance brute est de 500 W environ ; elle comporte 14 cellules de surface active 60 cm². La pile est refroidie par des ailettes. Nous utiliserons la pile sur une plage de tension comprise entre 14 V (à vide) et 7 V (à puissance maximale). La pile peut néanmoins débiter un courant de 40 A sous 10V. Nous donnons ci-dessous la courbe de polarisation de la pile mesurée pour des pressions en oxygène et hydrogène de 4 bars.

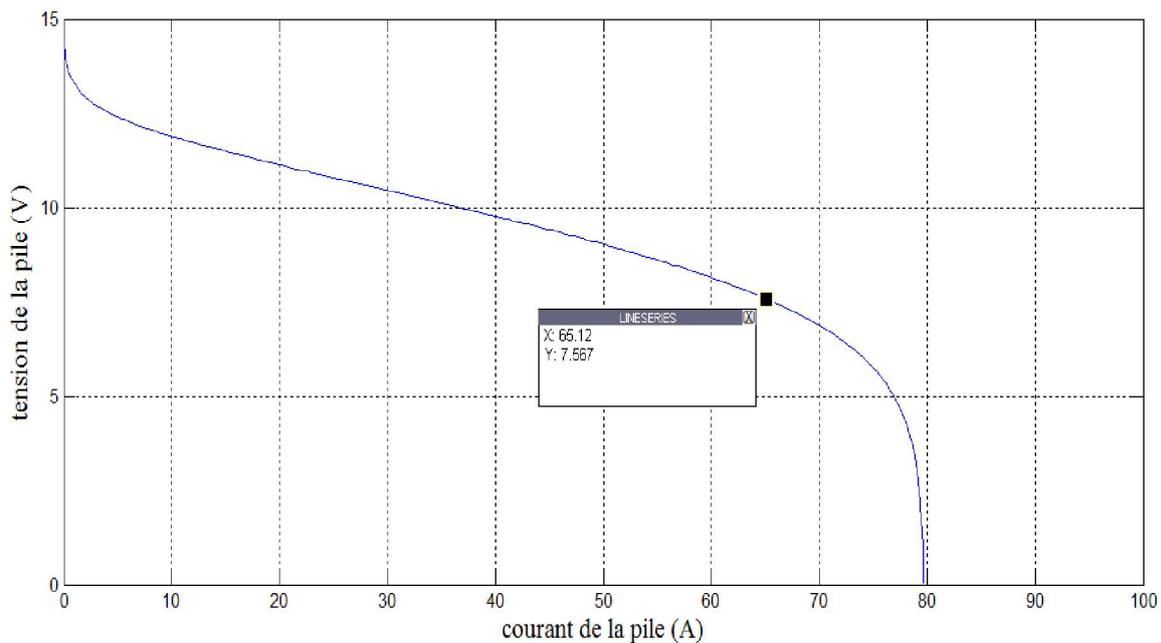
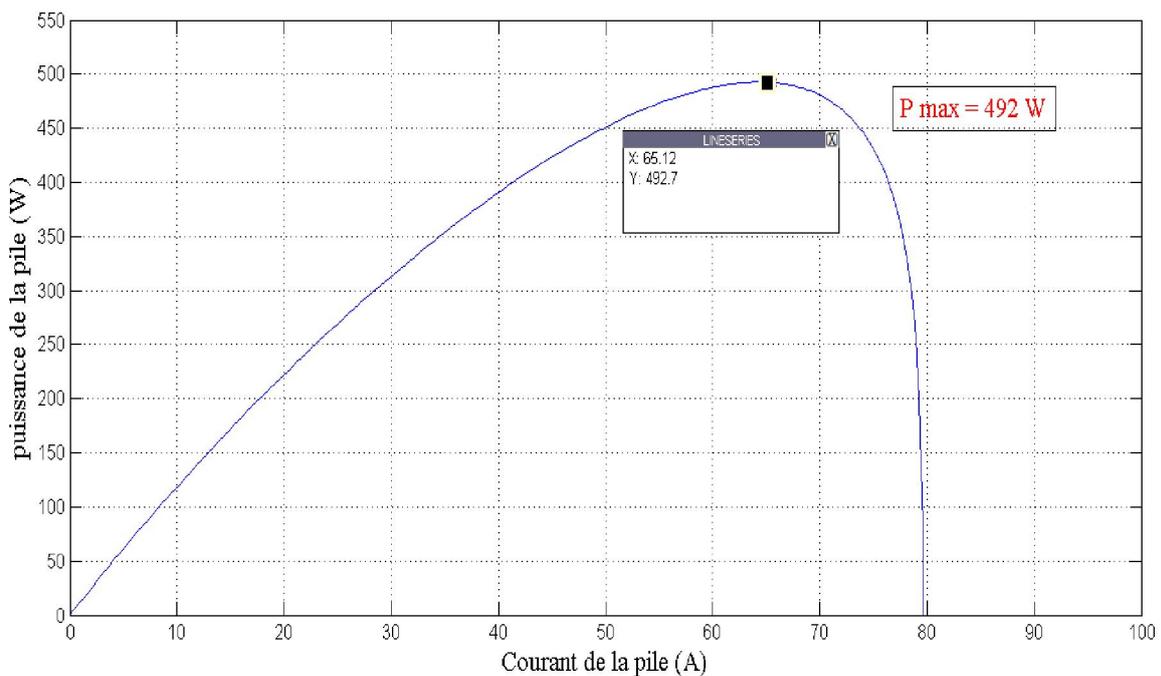


Fig (3.13) : Courbe de polarisation de la pile à combustible .



Fig(3-14) : la puissance de la pile en fonction de courant .

E_{th}	A	i_0	B	R_m	i_n	i_L
16.82 (V)	0.84	5 mA	0.7	0.045Ω	230mA	100(A)

Tableau (3-2) : Paramètres de la pile à 55°C) [1]

3.5 Modèle de convertisseur de pile

Nous présentons figure suivante le schéma de conversion statique utilisé pour réaliser l'interface électronique entre la pile à combustible et le bus continu, conversion continu-continu unidirectionnelle en courant (la pile à combustible n'est pas réversible en courant), de type élévateur pour adapter le niveau de tension de pile (niveau inférieur à 14 V) aux 24 V du bus continu.[17]

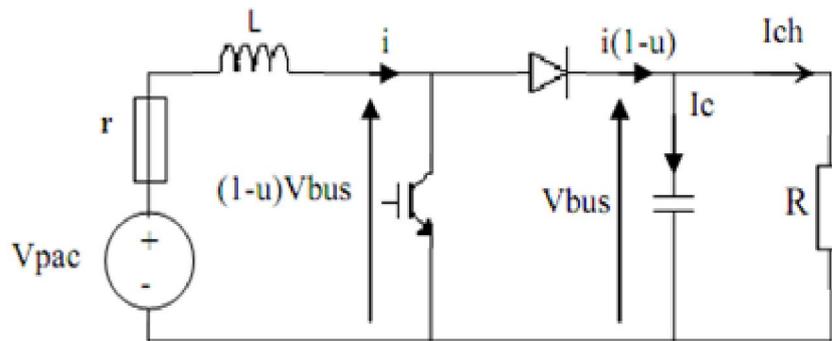


Figure (3-15) : Schéma du convertisseur de pile .

$$\begin{cases} L \frac{diL}{dt} = V_{PAC} - riL - V_{bus}(1 - u) \\ C \frac{dV_{bus}}{dt} = iL(1 - u) - ich \end{cases} \quad (3.9)$$

3.6 Architecture du l'ensemble PAC + Hacheur élévateur :

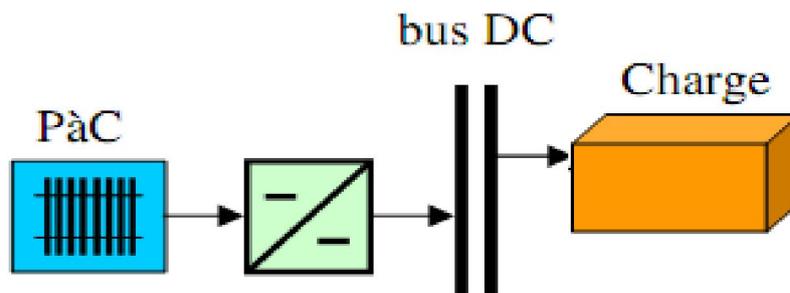


Fig (3.16) : Architecture du l'ensemble PAC et Hacheur élévateur.

Nous présentons ci-dessous, figure (3.18), les résultats d'une simulation effectuée sous Matlab-Simulink en boucle ouvert avec les paramètres suivants :

- charge résistive : 0.99 Ω ,
- fréquence de découpage : 20 kHz,
- rapport cyclique : 0,5. • Inductance : 55 μH . • capacité : 1000 μF .

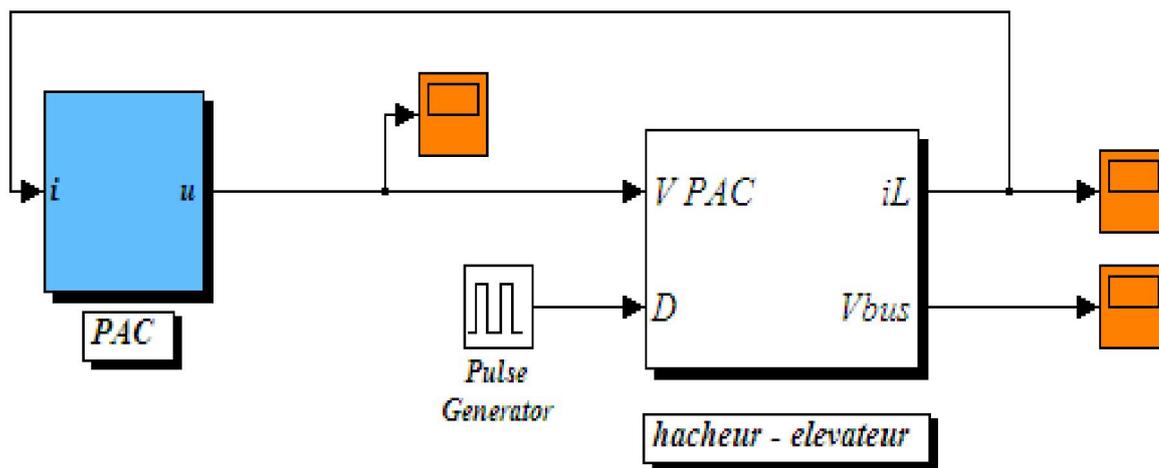
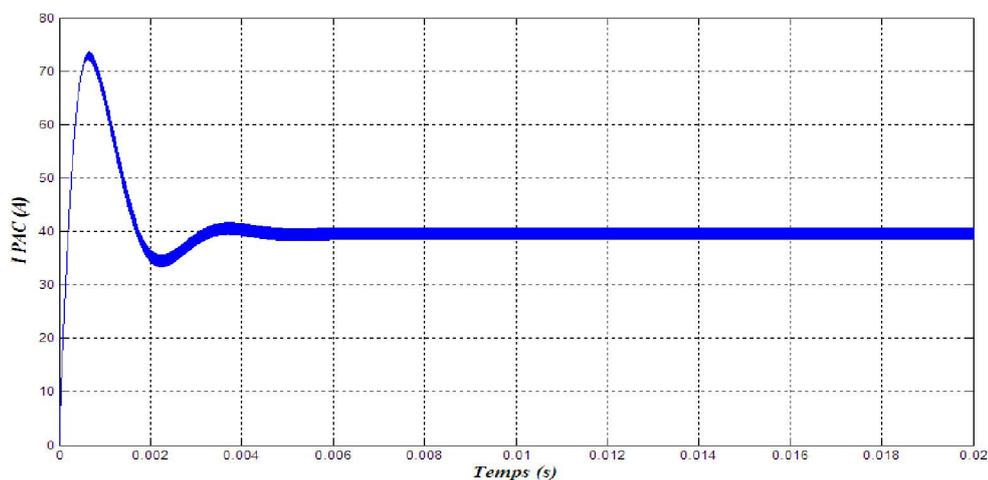
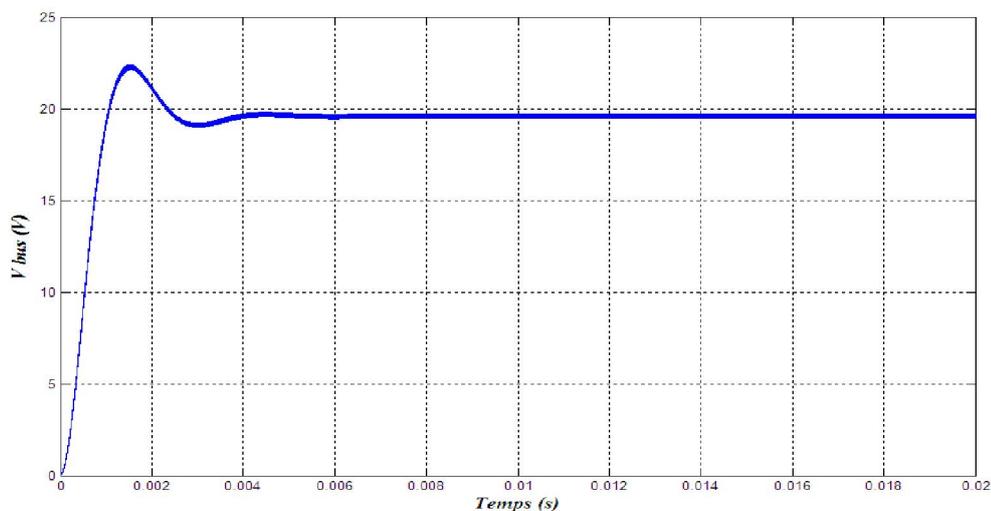


Fig (3.17) : schéma de simulation de l'ensemble PAC + Hacheur élévateur .

Et nous obtenons les résultats suivants :



Fig(3.18) : Le courant de la pac en fonction de temps .



Fig(3.19) : La tension de bus continu en fonction de temps .

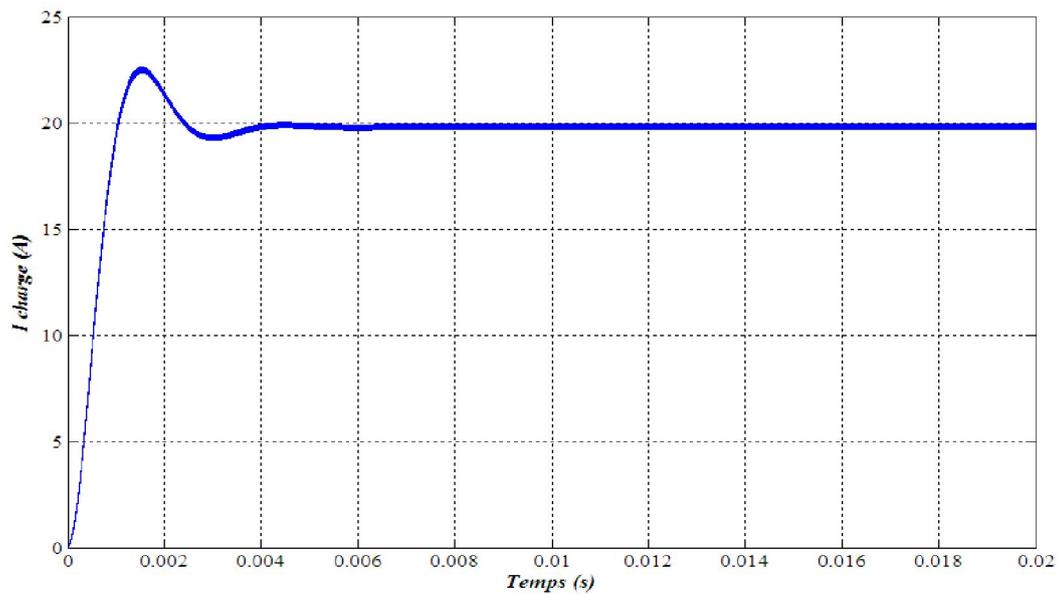


Fig (3.20) : Le courant de la charge en fonction de temps .

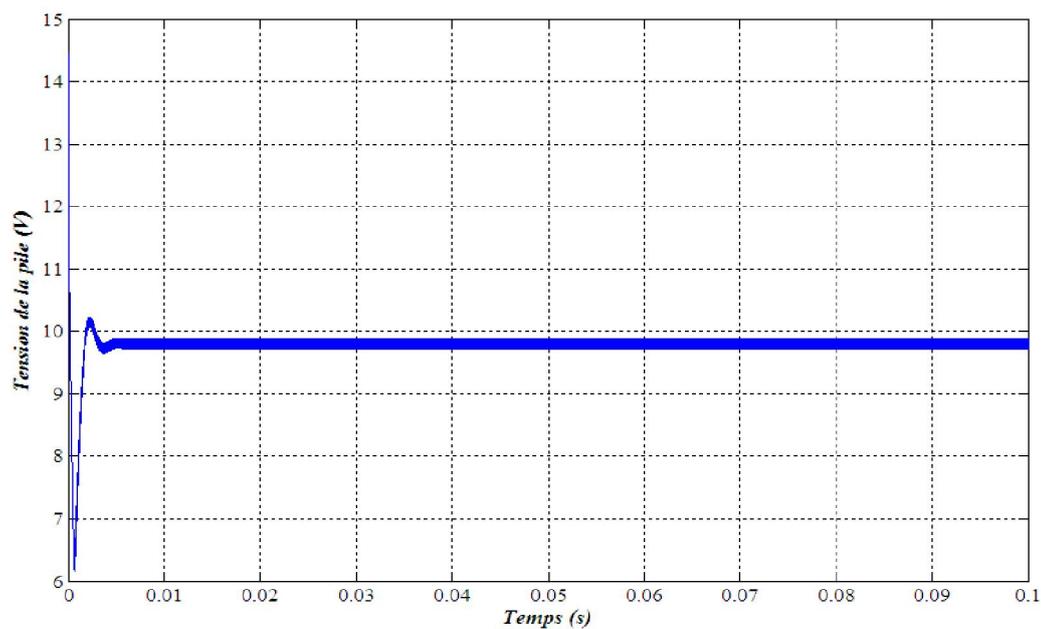
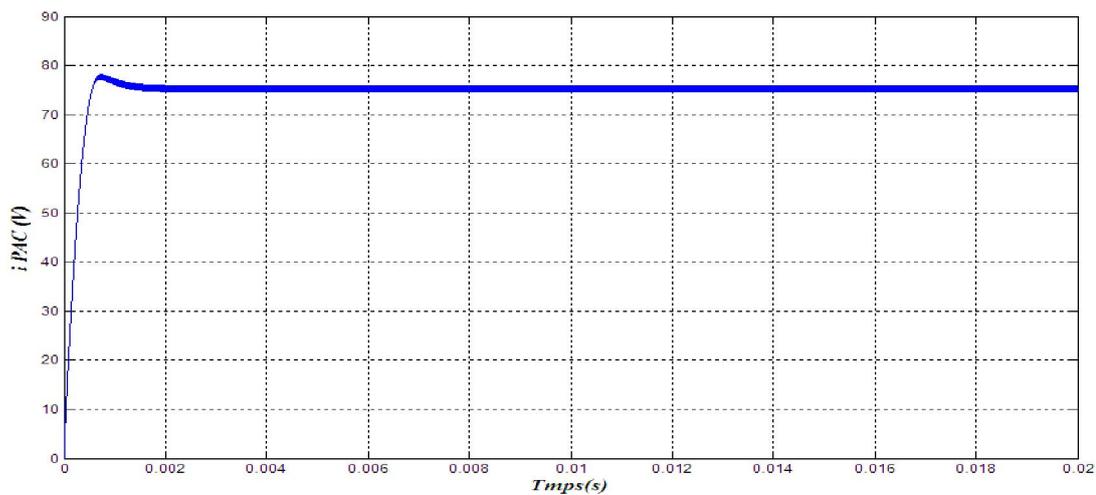
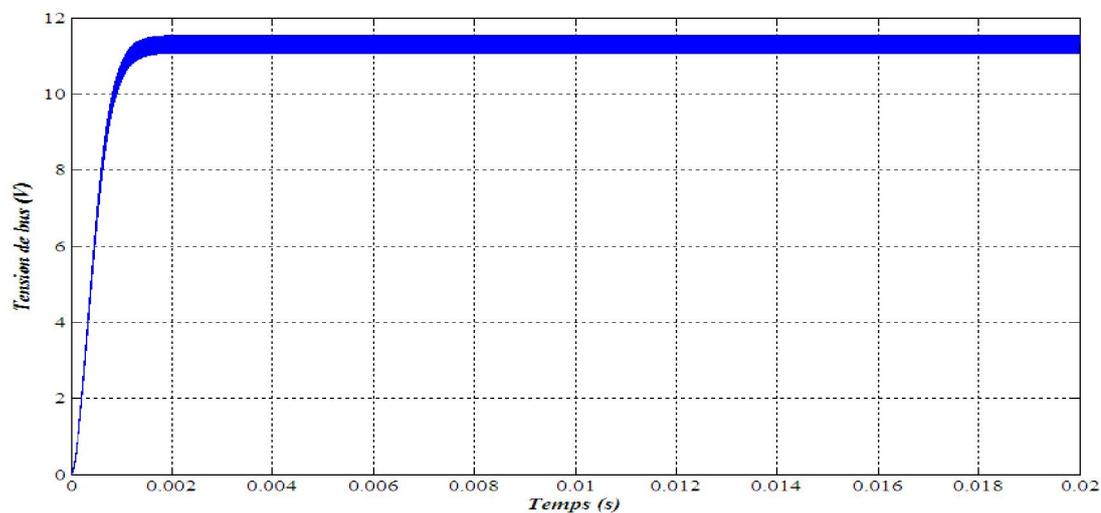
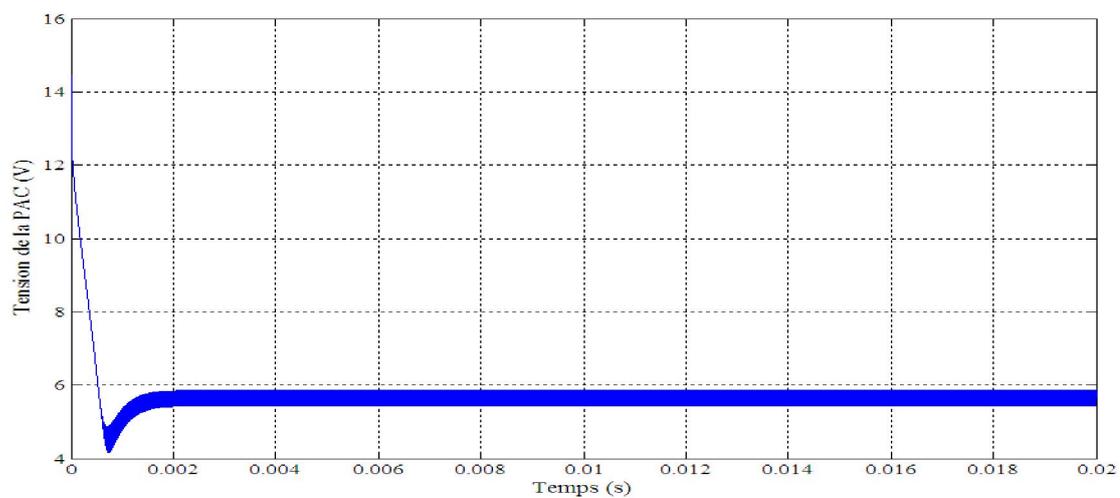


Fig (3.21) : La tension de la PAC en fonction de temps .

En fait maintenant un essai avec les paramètres suivants :

- charge résistive : 0.3Ω ,
- fréquence de découpage : 20 kHz, • rapport cyclique : 0,5.

3.6.1 Les résultats :

*Fig (3.22) : Le courant de la pile .**Fig (3.23) : La tension de bus**Fig (3.24) : La tension de la pile*

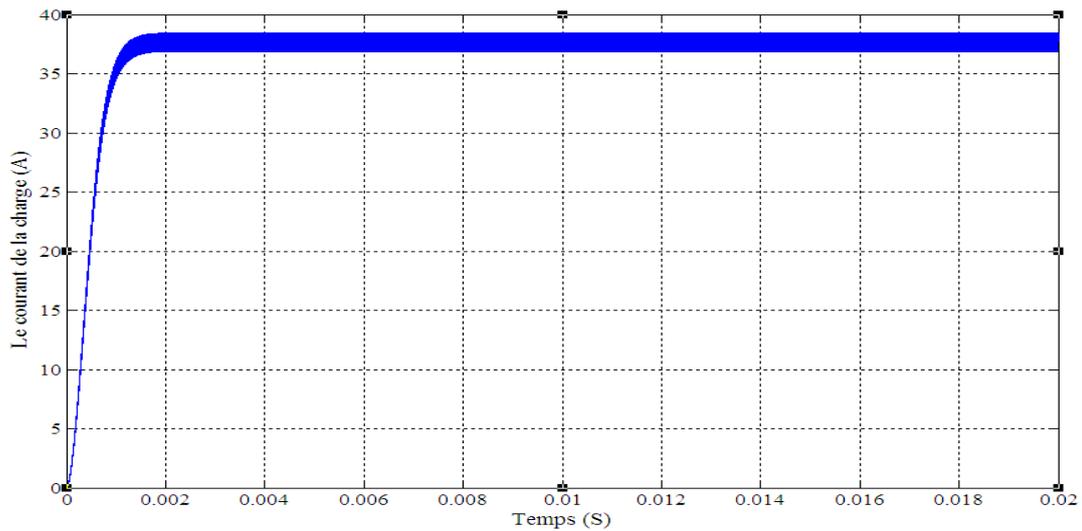


Fig (3.25) : le courant demandé par la charge.

3.6.2 Interprétation des résultats :

On remarque dans cette simulation en boucle ouvert :

L'augmentation du courant demandé par la charge cela provoque l'augmentation du courant de la pile ainsi que la diminution de sa tension, et se ci risque d'engendre la sécheresse dans la membrane. donc la pile va s'endommager dans ce cas en peut dire que le système est instable.

3.7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une modélisation du système global pile à combustible et le convertisseur dc/dc de la PAC Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois les approches de commande suggérées au chapitre suivant sont appliquées.

Chapitre 4

Les stratégies de commande du convertisseur

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre en place une stratégie de commande des convertisseurs statiques et comme tout système à régler possède un régulateur, qu'il soit analogique ou numérique. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux régulateurs. Ces régulateurs ont pour tâche de comparer en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

4.2 Aperçu des stratégies de commande - choix du mode de contrôle

On trouve dans la littérature plusieurs modes de commande des convertisseurs continu-continu qui peuvent être classés en deux grandes familles.

La première rassemble les stratégies de commande par mode de contrôle de la tension où le rapport cyclique du convertisseur est directement contrôlé par un asservissement de la tension de sortie du convertisseur à sa référence. Ce mode de contrôle est réservé à des applications de faibles puissances et présente l'inconvénient majeur de ne pas pouvoir contrôler le courant dans le convertisseur.

La seconde inclut les stratégies de commande par mode de contrôle du courant. Dans ce contrôle, l'asservissement de tension délivre une référence de courant. Une boucle de courant asservit alors le courant dans le convertisseur à cette référence en faisant varier le rapport cyclique.

Dans les deux approches, connaissant le rapport cyclique à imposer, les ordres de commande des interrupteurs sont obtenus par un régulateur MLI. Cette technique consiste à comparer le rapport cyclique désiré à une porteuse triangulaire ou en dent de scie dont la fréquence fixe détermine la fréquence de découpage.[4].

4.2.1 Stratégie de commande de la pac

On cherche à faire délivrer à la pile une puissance constante. Le point de fonctionnement de la PAC peut par exemple être choisi de manière à ce que la PAC délivre toute sa puissance .

a. Etude de la commande par pi + mli

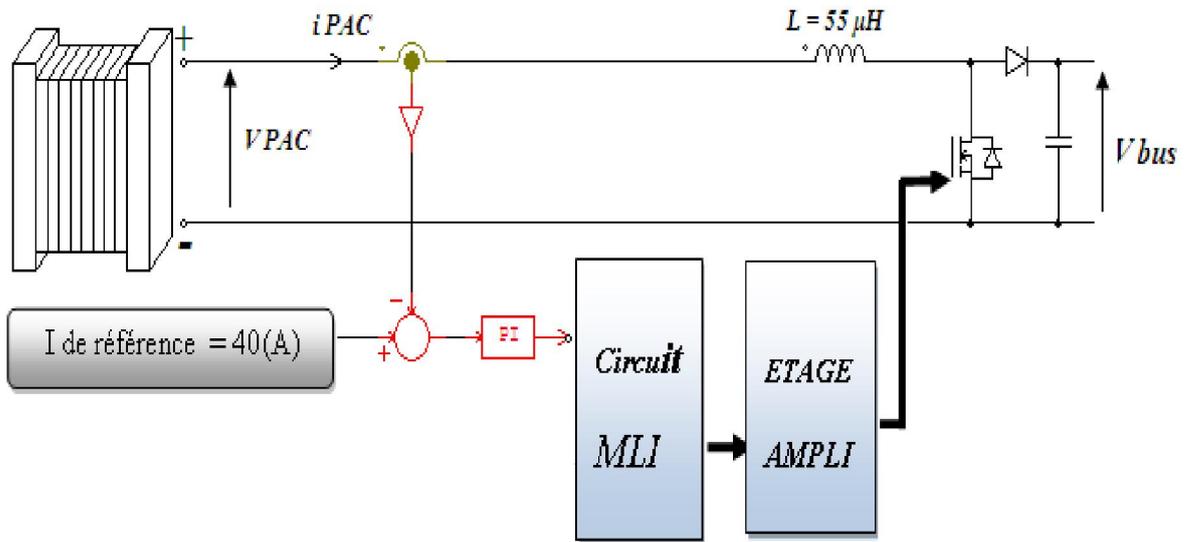


Fig (4-1) : Régulation de courant de la pile (PI+MLI)

a.1 Boucle de courant.

Dans un premier temps, on souhaite vérifier le bon fonctionnement de la Pile à Combustible. Pour cela, on détermine l'équation du courant i_L du hacheur élévateur en considérant la tension de sortie V_{bus} constante. Ensuite, on injecte l'équation de i_L dans le schéma Simulink fournit.

Pour le contrôle du courant, il faut considérer le schéma bloc suivant : [5]

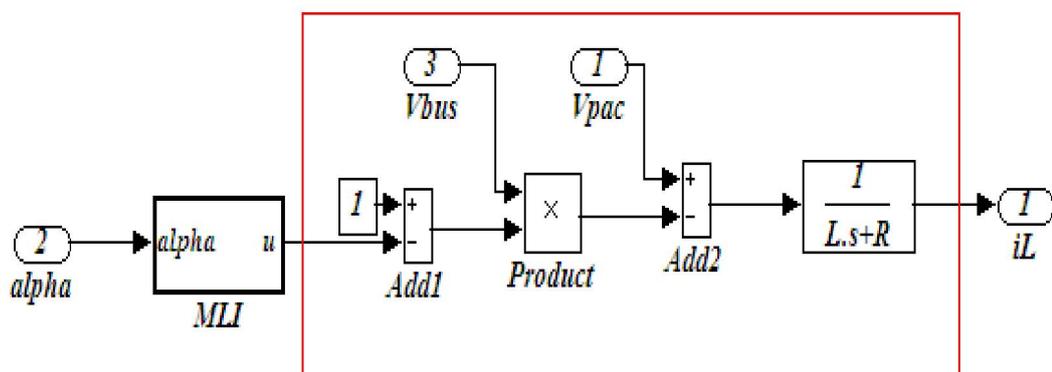


Figure (4-2) : Schéma bloc en courant du convertisseur.

a.2 Correcteur PI :

La commande par PI nous donne le rapport cyclique α , il faut ensuite « construire » la commande u (par comparaison entre un signal triangulaire d'amplitude 1 et une constante d'amplitude α), autrement c'est la fonction MLI (Figure 4-3):[18]

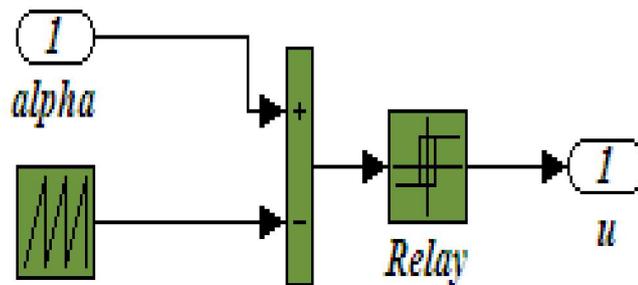
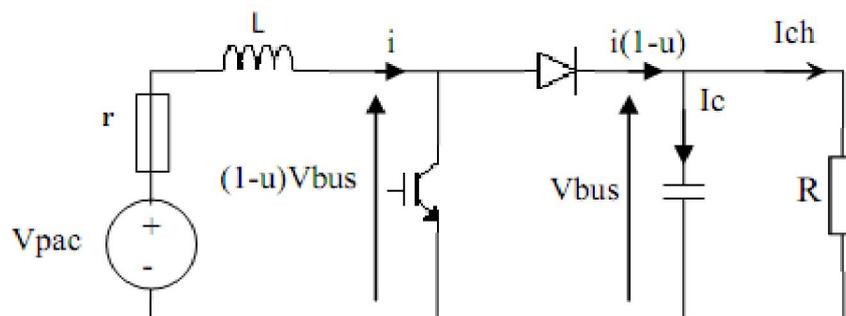


Fig (4-3) : La fonction MLI

Le réglage d'un régulateur PI peut se faire de diverses manières :

- ✓ Placement des pôles
- ✓ Réponse temporelle
- ✓ Réponse fréquentielle

Les paramètres du correcteur PI de la boucle de courant ont été déterminés en calculant la fonction de transfert du système en boucle ouverte et en appliquant la méthode de Compensation de pôle.



$$(1 - u) V_{bus} = V_{PAC} - il(r + Lp) \quad (4.1)$$

$$\frac{V}{V_{\text{réf}}} = V_{\text{bus}} \cdot \left[\frac{1}{r + Lp} \right] \cdot \left[kp + \frac{Ki}{p} \right] \quad (4.2)$$

Calcul de la fonction de transfert en Boucle Ouverte :

$$FT_{BO} = \frac{V}{V_{\text{réf}}} = \frac{V_{\text{bus}} \cdot Ki}{r} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{L}{r} P} \right] \cdot \left[\frac{1 + \frac{Kp}{Ki} P}{P} \right] \quad (4.3)$$

On effectue alors une compensation de pôle. On choisit donc :

$$\frac{kp}{Ki} = \frac{L}{r} = \frac{55 \cdot 10^{-6}}{0,15} = 3,3 \cdot 10^{-4}$$

On obtient ainsi la fonction de transfert en boucle ouverte suivante :

$$FT_{BO} = \frac{V_{\text{bus}}}{r} \cdot \frac{Ki}{p} \quad (4.4)$$

Calcul de la fonction de transfert en Boucle Fermée :

A partir de la fonction de transfert en boucle ouverte, on calcule la fonction de transfert en boucle fermée.

$$FT_{BF} = \frac{1}{1 + \frac{r}{V_{\text{bus}} \cdot Ki} P} \quad (4.5)$$

Cette fonction est de la forme :

$$\frac{1}{1 + \tau \cdot p} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{r}{V_{\text{bus}} \cdot Ki} \quad (4.6)$$

On choisit $\tau = 3 \cdot T_{\text{commande}}$ avec $T_{\text{commande}} = \frac{1}{20^3}$

on trouve $ki = \frac{r}{3 \cdot T_{\text{commande}} \cdot V_{\text{bus}}} = 41.66$

$$Kp = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot Ki = 0,01527 .$$

La figure suivante correspond au schéma Simulink du modèle utilisé pour visualiser la réponse en courant du système.

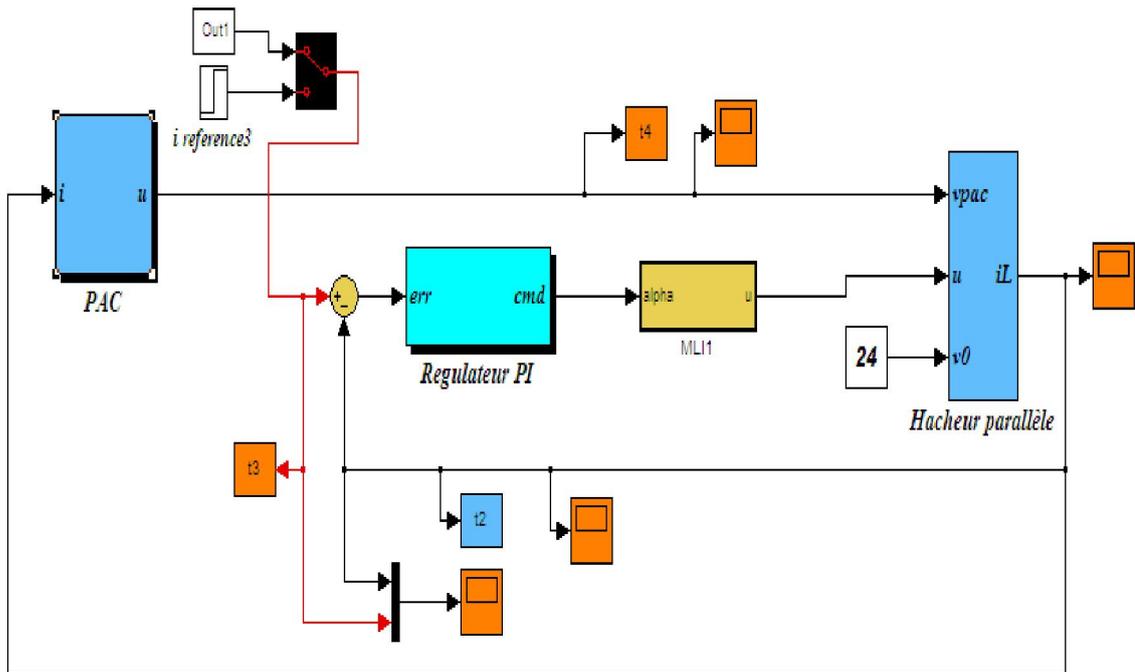


Fig (4-4) : Schéma Simulink du modèle de l'ensemble pile – convertisseur.

Nous présentons, figure (3.5), la réponse simulée (sous Matlab-Simulink) du système régulé à un échelon de courant de référence. On suppose que la tension du bus contenu est fixe (24V). A l'instant $t = 6 \text{ ms}$, la référence de courant de pile augmente en échelon de 0 A à 65 A.

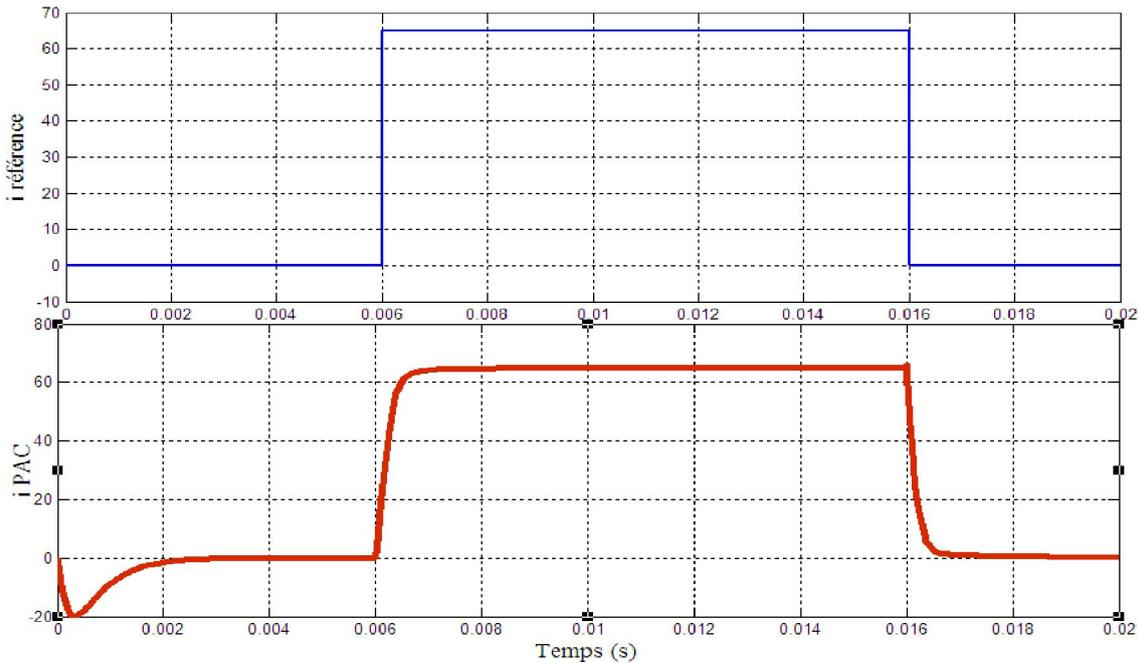


Figure (4-5) : Simulation de la réponse à une consigne de courant en échelon.

On peut observer, sur la réponse en courant du système, un asservissement tout à fait satisfaisant : pas d'erreur statique (conséquence attendue de l'action intégrale du correcteur), dynamique de réponse correcte dépassement modéré, pas d'oscillation.

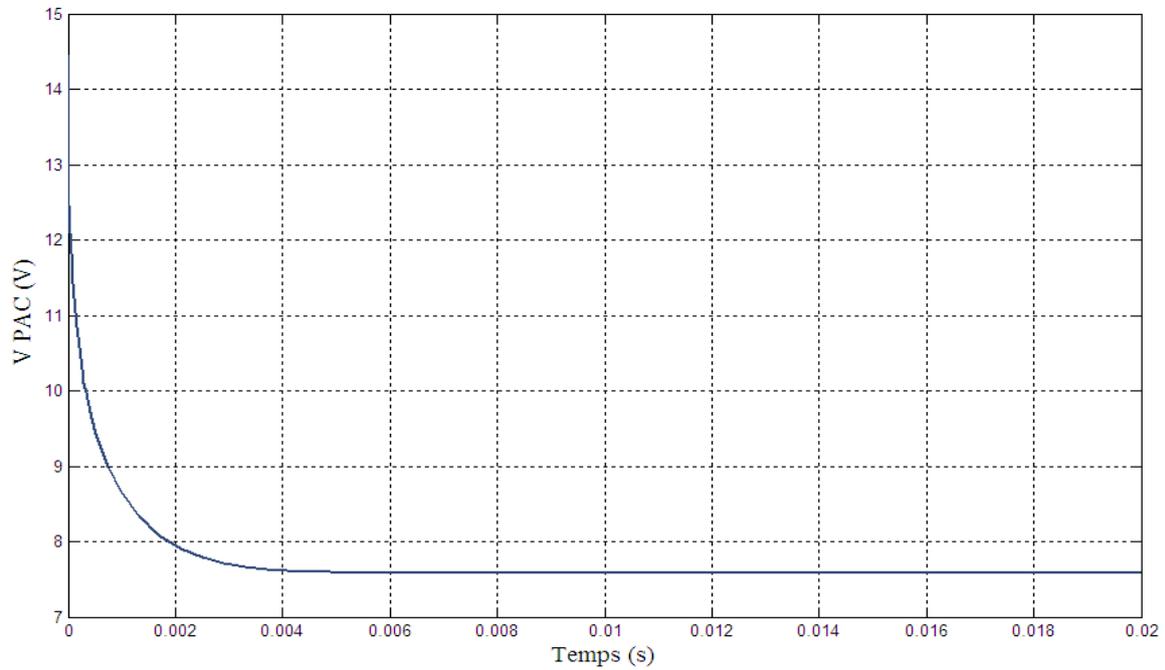


Fig (4-6) : tension de pile en fonction de temps.

b. Etude de la commande par Correcteur Hystérésis

Régulation du courant dans la bobine par hystérésis Cette type de commande fourni directement (u)

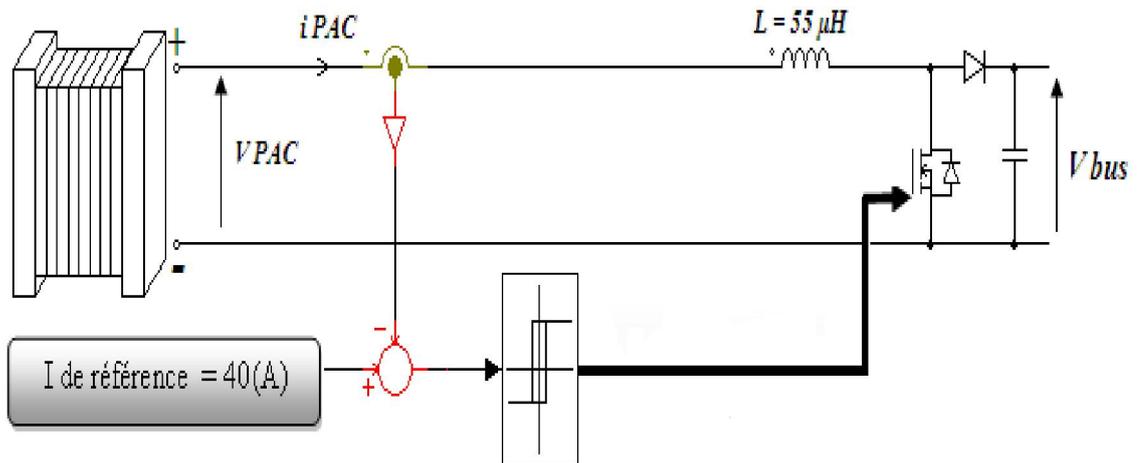


Fig (4-8) : Schéma de Régulation de courant de la pile (hystérésis)

On visualise le courant i_L et sa référence i_{L_ref} : (Les réponses sont en boucle fermé)

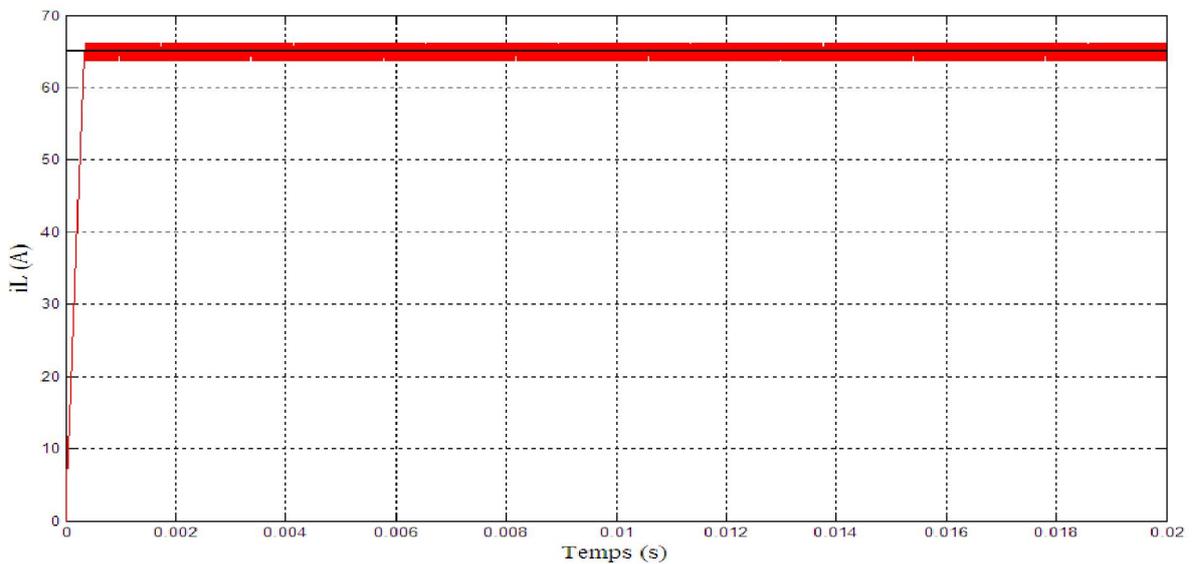
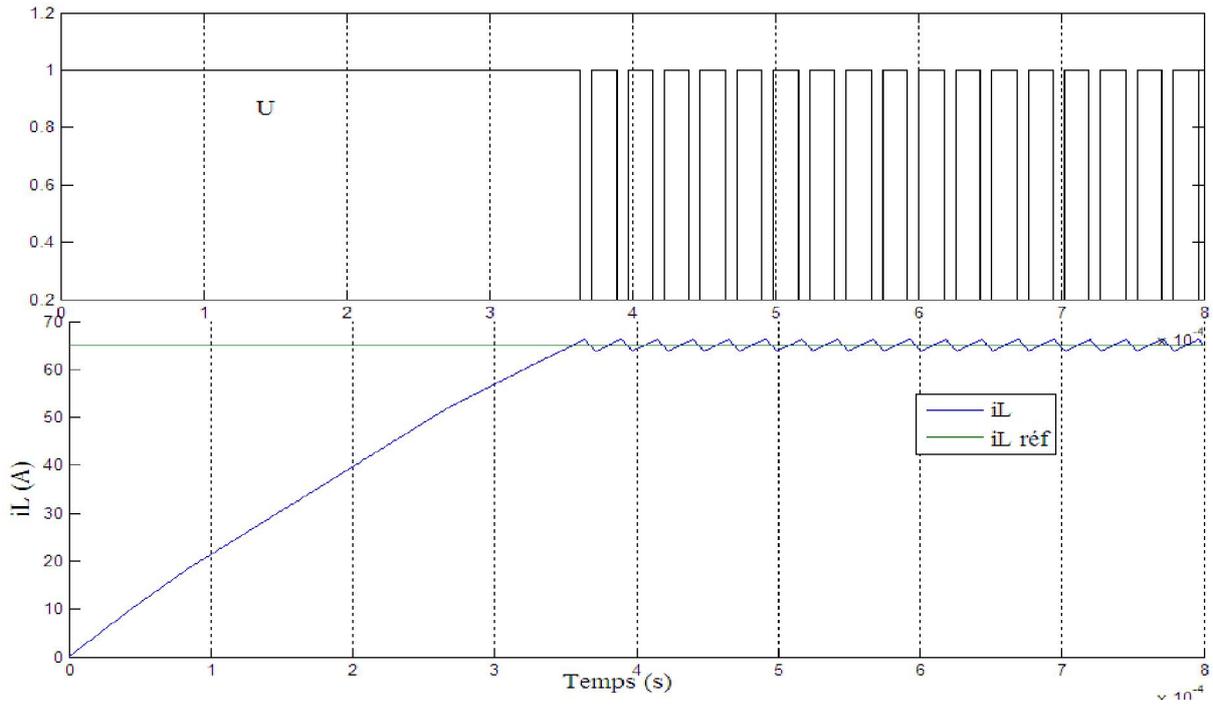


Fig (4-9) : le courant de l'inductance (i_L et i_L référence) en fonction de temps .

On remarque que la réponse est celle d'un système de premier ordre, le temps de réponse de PAC est **0,4ms**.

La commutation ne commence que lorsque $i_L > i_{Lref}$. figure (4-10) .



Fig(4-10) : le courant i_L , i_{L_ref} et la commande u .

On visualise aussi la tension V_{PAC} :

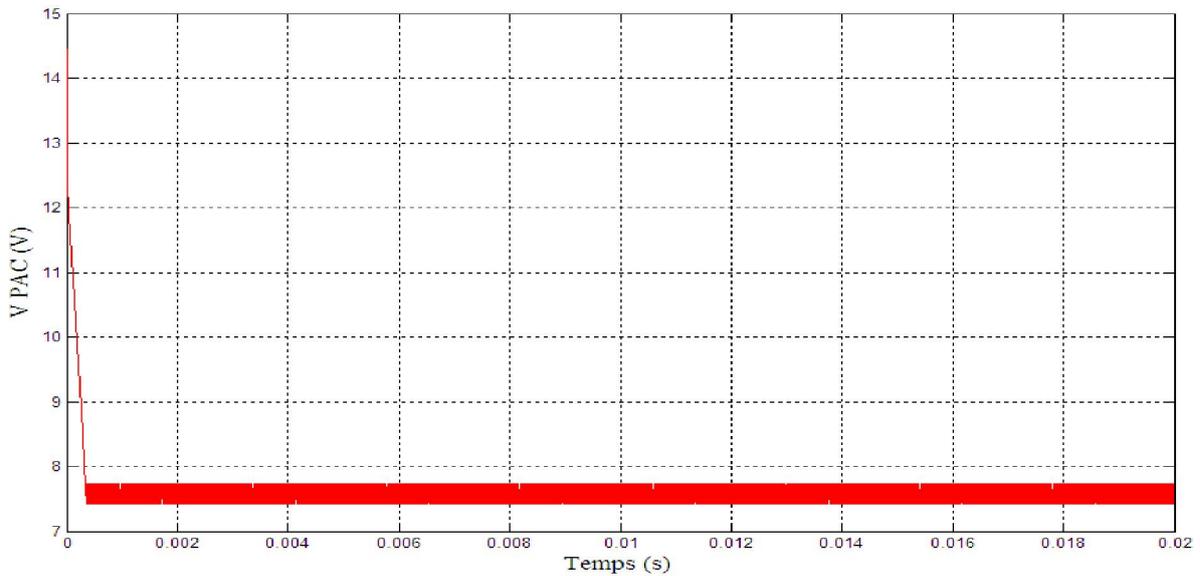


Fig (4-11) : la tension de la pile en fonction de temps .

❖ Le régime permanent du système PAC + Hacheur est atteint en 0.4ms (environ).

D'autre part, on observe une ondulation de l'ordre de 2A pour i_L .

On remarque que le temps de réponse est bien a 0.4ms

Donc à partir de ces 2 figures et en régime établi $I_{PAC} = 65 \text{ A}$, et $V_{PAC} = 7.68 \text{ V}$.

4.2.2 Les résultats :

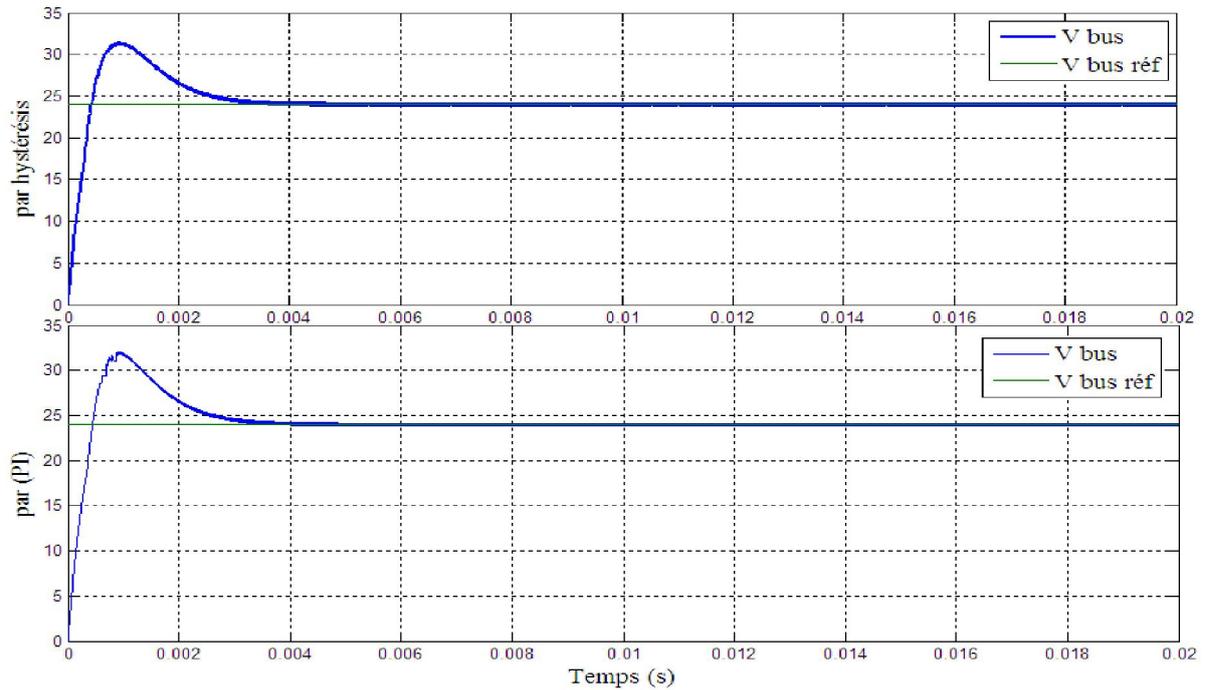


Fig (4-14) : la tension (V_{bus} , $V_{bus_réf}$) en fonction de temps

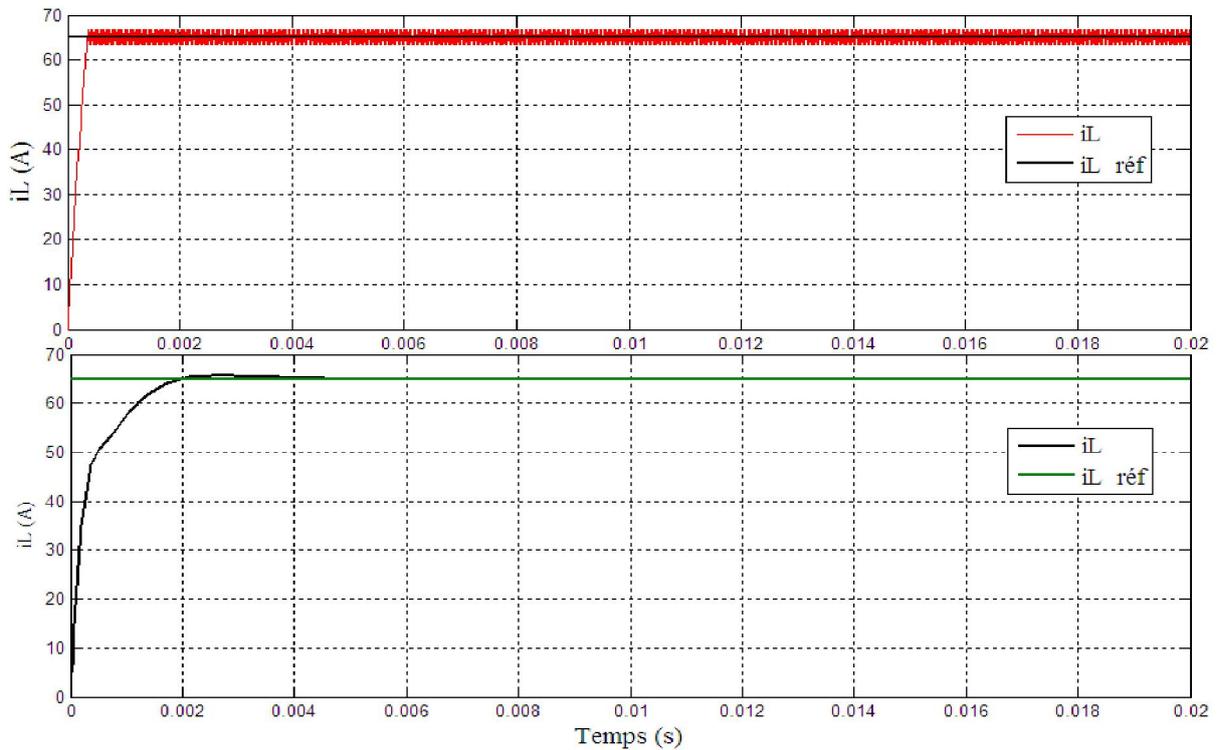


Fig (4-15) : le courant de l'inductance (i_L et i_L référence) en fonction de temps.

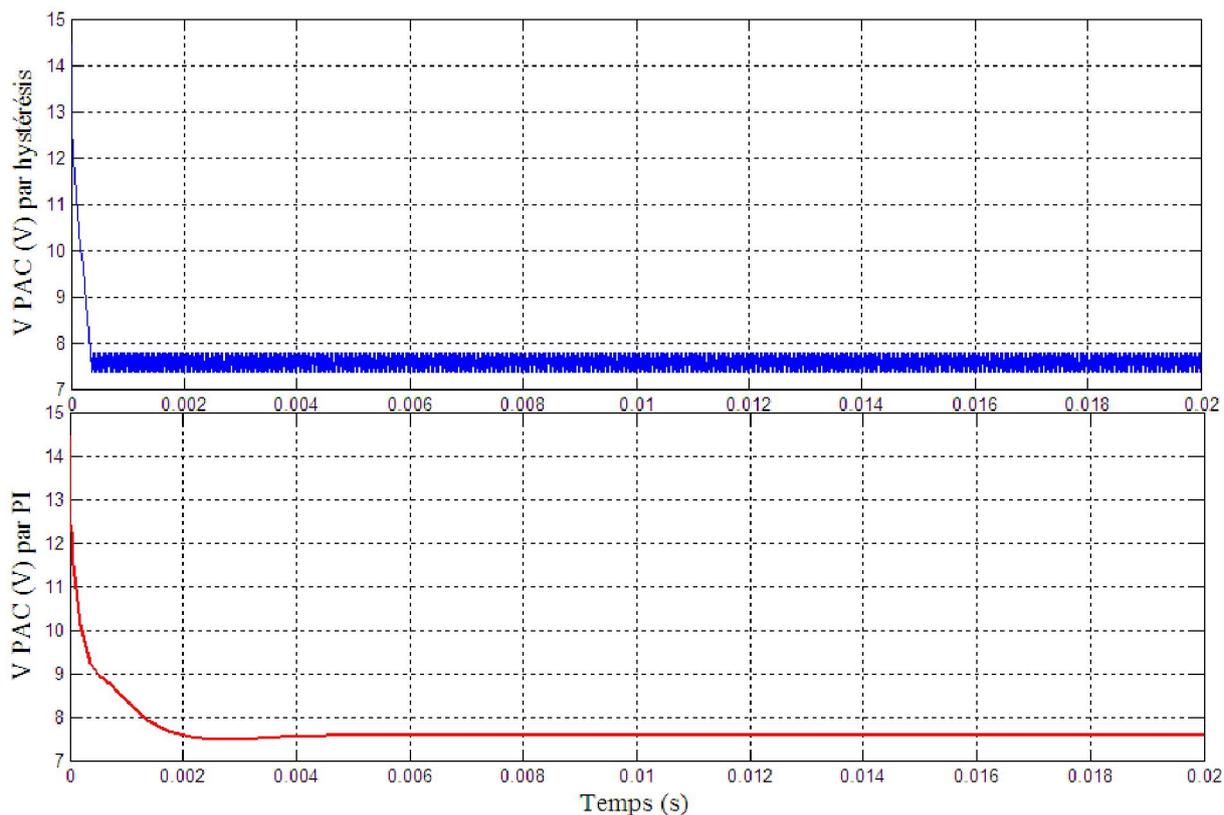


Fig (4-16) : la tension de la Pac en fonction de temps.

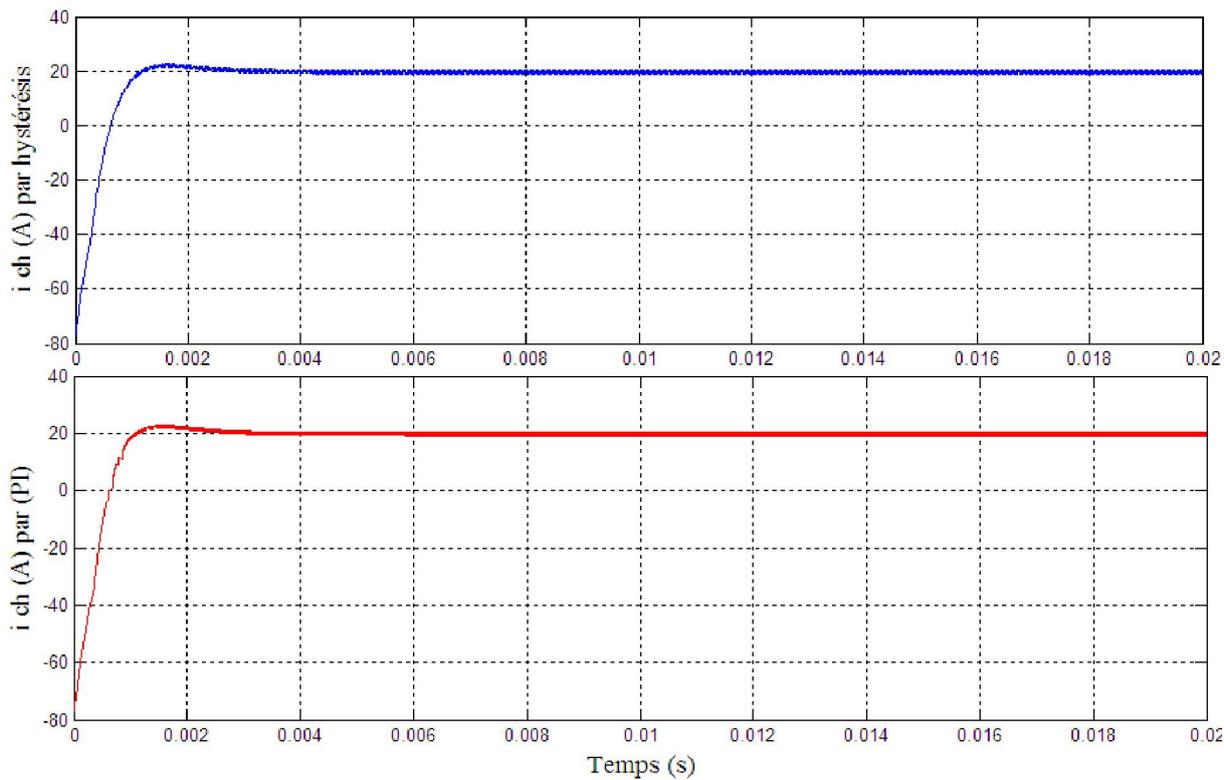


Fig (4-17) : le courant demandé par la charge en fonction de temps.

4.2.3 Interprétation des résultats :

dans la figure (4-14) Grâce à la boucle de régulation de tension la tension de bus se règle automatiquement pour rester au voisinage de la tension de consigne qui est de 24V

dans la figure (4-15) On remarque que la référence du courant de pile est identique à valeur mesurée du courant de pile au régime permanent

dans les figures (4-17) (4-16) On remarque que lorsque on a imposé un courant de référence de pile 65(A) le courant de la charge augmente et la tension de la pile diminue.

On va introduire une perturbation sur le courant et examiner si la régulation de tension fonctionne correctement : [18]

Au temps $t=0.5s$ (on a bien atteint le régime permanent) iL_ref est augmenté de 10%:

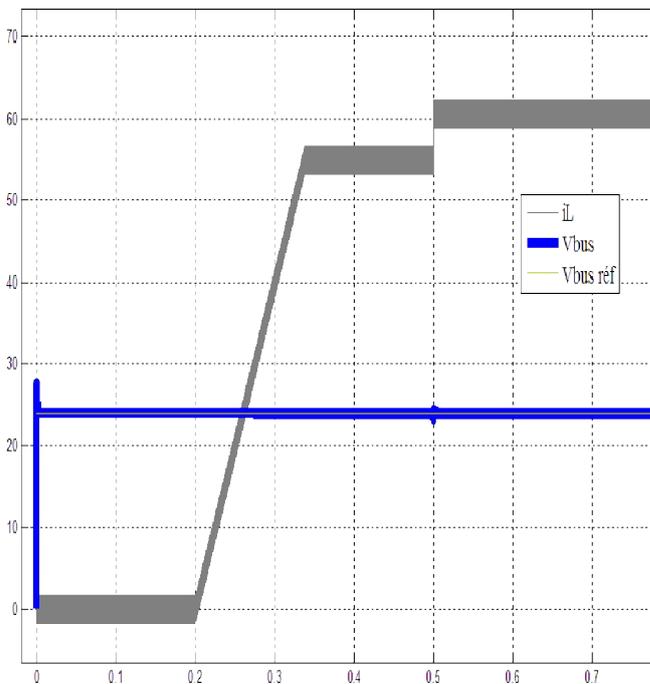


Fig (4-18) : la tension de bus continu

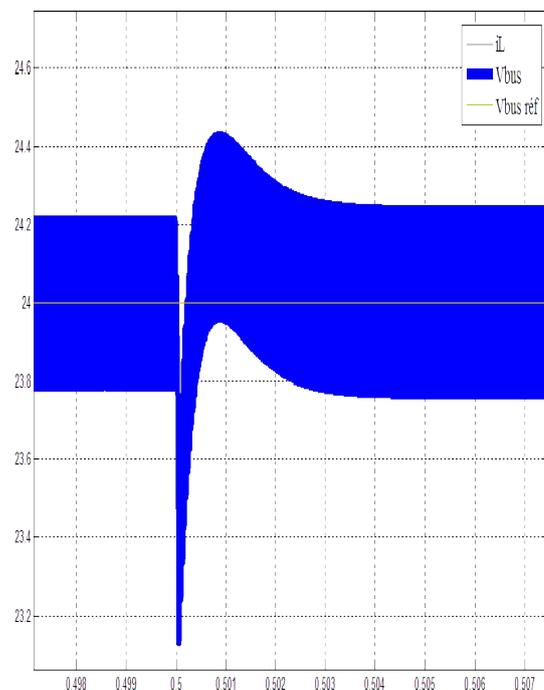


Fig (4-19) : le zoom de Vbus

On remarque que la tension asservit V_0 s'établit rapidement.

Lors de injection de la perturbation sur iL , la tension V_0 chute de 23V de façon quasi instantané, puis elle se stabilise à sa référence assez rapidement. On peut dire que l'asservissement est correct.

4.3 Conclusion

Au vu des résultats de simulation nous pouvons conclure que la stratégie de commande des convertisseurs statiques présentée ici permet bien de satisfaire les demandes énergétiques de la charge.

Pour commander ce système global, nous avons dans un premier temps établi des lois de commandes en tension et en courant des convertisseurs statiques de manière à fixer certaines variables d'état constantes comme la tension du bus ou alors à imposer des trajectoires de référence aux courants.

CONCLUSIN GENERALE

Le principal objectif de cette mémoire était la conception et la simulation d'une régulation de tension d'un bus continu alimenté par une pile à combustible.

Nous avons utilisé un modèle statique de pile a combustible pour voir sa courbe de polarisation. Ensuite nous avons modélisé un convertisseur similaire pour la pile (modélisation mathématique)

La stratégie de régulation de basé sur le contrôle de la tension de bus, et du courant de pile Qui est dans un premier temps (limité à 65 A).

Le régulateur retenu fonctionne à fréquence fixe et englobe les propriétés de deux modes de commande, la commande par hystérisis pour bénéficier de sa robustesse, et la commandes de type PI, afin de pouvoir assurer un fonctionnement correct du système quelle que soit la valeur du rapport cyclique.

Les résultats de simulations présentés ont souligné la lenteur de la réponse de la pile à combustible à des transitoires de courant.

Références bibliographiques



[1] -**Idris SADLI** « modélisation par impédance d'une pile à combustible pem pour utilisation en électronique de puissance » thèse doctorat L'Institut National Polytechnique de Lorraine - 2006.

[2] – **Maker Hattab** « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs » thèse doctorat université de technologie belfort montbeliard-2008

[3]-**Guillaume LEFEVRE** « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible » thèse doctorat Université Joseph Fourier – 2004.

[4]-**Amel LACHICHI** « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant Application aux convertisseurs pour pile à combustible » thèse doctorat Université de Franche-Comté2005

[5]-**Jérôme LACHAIZE** « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction » thèse doctorat l'institut national polytechnique de Toulouse-2004.

[6]-**Guillaume Fontès** « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques » thèse doctorat institut national polytechnique de Toulouse-2005.

[7]-**Nicolas ROMANI** « Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué » thèse doctorat université paris sud-2007.

[8]-**Ianko VALERO EXPOSITO** « interfaçage et contrôle commande de piles a combustible pour applications stationnaires et transport » thèse doctorat université joseph fourier-2004.

[9]-**Phatiphat Thounthong**« Conception d'une source hybride utilisant une pile a combustible et les supercondensateurs », thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine(INPL), 2005



[10]-**Ahmad HADDAD** « Modélisation dynamique non linéaire de la pile à combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans la membrane électrolytique » thèse doctorat Université de Technologie de Belfort-Montbéliard-2009.

[11]-**Benjamin Blunier** « Modélisation de moto-compresseurs en vue de la gestion de l'air dans les systèmes pile à combustible Simulation et validation expérimentale »Thèse de Doctorat-2007.

[12]-**Cours de piles à combustible - EPF** - 5ème année – septembre 2009 - S. Thiers.

[13]-**HUANG Bin** « convertisseur continu-continu a rapport de transformation eleve pour applications pile à combustible » Thèse de Doctorat Institut National Polytechnique de Lorraine-2009.

[14]-**ABBASSEN Lyes** « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de Magister université mouloud mammeri de tizi ouzou-2011.

[15]- **Soltan-BELAKEHAL** «conception et commande des machines à aimant permanents dédiées aux énergies renouvelables ».thèse de doctorat université de Constantine-2010.

[16]- **TIAR Mourad** « Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride » Mémoire de Magister Université Mohamed Khider – Biskra.

[17] **Jacques KAMGA et Idris OUATAH** « conception et simulation d'une source hybride composée d'une pile a combustible et un pack de supercondensateurs » Projet master 1 Université de Franche-Comté 2010.

[18] **Harun TURKER et Bruno HUGUENIN** « Modélisation et commande de structures d'électronique de puissance connexion au réseau d'un système pile à combustible » bureaux d'études université joseph fourier 2009.

[19] **Rémi SAISSET** « Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium -Ion, Véhicule Solaire » Thèse de Doctorat L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2004