



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Présenté par :

DEHANA ABD ELHAMID

&

ZOUAOUI RAMI

THEME :

**Conception d'un émulateur à pile à combustible
de type PEMFC**

Soutenu le : devant la commission d'examen composée de :

<i>Dr TAREK BOUTABBA</i>	<i>Grade</i>	<i>à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Président</i>
<i>Dr DAOUD REZZAK</i>	<i>Grade</i>	<i>à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Encadrant</i>
<i>Dr CHAIBA AZEDDIN</i>	<i>Grade</i>	<i>à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Examineur</i>

Promotion 2021/2022

Résumé

Le sujet de mémoire traite de la modélisation d'un système d'énergie avec piles à combustibles (PàC) de type PEMFC destiné à être intégré dans les véhicules électriques. Le but recherché par la réalisation de cet émulateur (objet matériel qui a le même comportement qu'un système réel) est de développer des lois de commande assurant un bon fonctionnement du système PàC.

Après une étude bibliographique sur les différentes modélisations de cœur de Pile à Combustible (PàC), le choix d'un convertisseur de type Hacheur abaisseur a été retenu et mis en œuvre pour l'émulateur.

Mots Clés : Système Pile à Combustible, Pile à Combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), Hacheur abaisseur, Emulateur, contrôleur PI.

Abstract

This memory deals with modeling of a PEM-Fuel Cell System (FCS) for power generation in an electrical vehicle. The goal of the research is the construction of an emulator of the PEM Fuel Cell stack, that of a device having the same behavior as the real system, and the development of command strategies for the FCS.

After a bibliographical study of the models of a Fuel Cell stack, a Buck DC/DC converter structure has been chosen and then implemented to build the emulator.

Key words: Fuel Cell Systems (FCS), Proton Exchange Membrane Fuel Cell PEM-FC, Buck DC/DC converter, Emulator, PI controller.

ملخص

هذه المذكرة تعالج موضوع نمودجة نظام طاقي باستعمال بطاريات ذات وقود (ب ذ و) من نوع PEMFC موجهة للاستعمال في مجال العربات الكهربائية الهدف من تجسيد هذا المحاكي (هو إنشاء نظام له نفس سلوك النظام الحقيقي) وتطوير قواعد تحكم تضمن العمل الجيد لنظام بطاريات ذات وقود.

بعد دراسة مراجع البحث العلمي على مختلف النماذج لصلب البطارية ذات الوقود (ب ذ و) تم اختيار مهشخافض لتوتر وتم استعماله في المحاكي.

كلمات مفتاحية: نظام البطاريات ذات الوقود، بطاريات ذات الوقود من نوع PEM، مهشخافض لتوتر، مراقب PI

Remerciements

Avant tout Nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au département de Génie industrielle à l'Université Abbes LAGHROUR de Khenchela, sous la direction ce memoire Daoud REZZAK à qui j'exprime ma profonde gratitude pour la qualité de son encadrement, son esprit scientifique, ses aides précieuses. Je le remercie également pour sa disponibilité totale, ses encouragements dans toutes les phases du travail et ses conseils objectifs, tout au long de ce mémoire, qu'il trouve ici ma grande reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à Monsieur Tarek BOUTABBA, Docteur à l'Université d'Abbes LAGHROUR de Khenchela pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire de fin d'étude.

Mes vifs remerciements et ma haute considération vont également à Monsieur Chaiba AZEDDIN, Docteur à l'Université Abbes LAGHROUR de Khenchela pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à ce jury.

Dédicace

À mes très chers parents. Que Dieu les protège.

À mon cher frère et Ma chère sœur.

À ma grande famille.

Et à tous mes amis.

DEHANA ABD ELHAMID

Dédicace

À mes très chers parents. Que Dieu les protège.

À mon cher frère et Ma chère sœur.

À ma grande famille.

Et à tous mes amis.

ZOUAOUI RAMI

Notations :

AFC	: Alkaline Electrolyte Fuel Cell
	: Surface active d'une cellule à pile à combustible
an	: Anode
ca	: Cathode
cl	: Refroidisseur (Cooler)
cp	: Compresseur
cm	: Moteur électrique
CC-CC	: Courant Continu – Courant Continu
DSP	: Digital signal processor
EME	: Electrode-Membrane – Electrode
	: Courant
	: Densité de courant du stack à pile à combustible
i_0	: Densité de courant d'échange
	: Courant limite
	: Densité de courant maximale
in	: Entrée
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell
PCI	: Pouvoir calorifique inférieur
PCS	: Pouvoir calorifique supérieur
PEMFC	: Polymer Exchange Fuel Cell
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell
PTFE	: Polytetra-fluoroéthylène
PAC	: Pile à combustible
	: Pression à l'intérieur de la cathode
	: Pression de saturation de la vapeur
p_{O_2}	: Pressions partielles de l'oxygène à l'intérieur de la cathode
	: Pression anodique
p_{H_2}	: Pression partielle de l'hydrogène
p_{H_2}	: Pression de l'hydrogène à l'anode
	: Pression atmosphérique
	: puissance nette
	: puissance produite par le stack de la pile à combustible
PI	: Contrôleurs Proportionnel Intégrale

st	: stack à pile à combustible
T	: Température
U	: Tension
	: Surtension d'activation
	: Surtension ohmique
	: Surtension de concentration
	: Tension d'une cellule à pile à combustible
	: Tension du stack à pile à combustible
v	: Vapeur
w	: l'eau (Water)
	: rapport cyclique

LISTE DES FIGURES

Figure	Nom de Figure	N° Page
Figure I. 1	Production de l'électricité dans une pile à combustible.	16
Figure I. 2	Vue d'ensemble d'une cellule de pile à combustible.	17
Figure I. 3	Pack de pile à combustible.	18
Figure I. 4	Toyota Mirai, un véhicule hybride à pile à combustible	18
Figure I. 5	Système à pile à combustible	19
Figure I. 6	Tension d'une cellule à PàC en fonction de la densité de courant à température constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars).	23
Figure I. 7	Tension du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars).	24
Figure I. 8	Puissance du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes pressions cathodiques (entre 1 et 3 bars)	24
Figure I. 9	Tension du pack en fonction du courant à pression cathodique constante (2.5 bar) et pour différentes températures (entre 0°C et 100°C).	25
Figure I. 10	Tension du pack pour une pression cathodique de 2.5 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane.	25
Figure II. 1	Diagramme à simuler de l'émulateur à pile à combustible [36, 37]	28
Figure II. 2	Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck	28
Figure II. 3	Convertisseur série durant $G=1$.	29
Figure II. 4	Convertisseur série durant $G=0$.	29
Figure II. 5	Allure de courant inductif pour un hacheur Buck	30

Figure II. 6	Modèle de simulation du convertisseur série	31
Figure II. 7	Tension de sortie V_{st} avec un zoom a $t=0.6s$	32
Figure II. 8	Courant i_L avec un zoom a $t=0.6s$	32
Figure II. 9	Courant i_{st} avec un zoom a $t=0.6s$	33
Figure II. 10	Simulateur de l'émulateur de la PEMFC.	33
Figure II. 11	Courbes de polarisations (tension-courant) de la PEMFC à la sortie du hacheur série V_{st} comparais avec celle de référence $V_{st,ref}$.	34
Figure II. 12	Tensions $V_{st,model}$ et $V_{st,calibrer}$.	34
Figure II. 13	Courant I_s du hacheur série	35
Figure II. 14	Le courant $I_{ch} - I_s$ du hacheur	35
Figure II. 15	La tension $V_{st} dyn - V_{st} réf$	35
Figure II. 16	La tension $V_{st} cal - V_{st} model$	35
Figure II. 17	La tension $V_{st} cal - V_{st} model$	36
Figure III. 1	Schéma synoptique du matérielle de l'émulateur à pile à combustible.	39
Figure III. 2	La bibliothèque Simulink « support package for arduino hardware ».	40
Figure III. 3	Carte Arduino "Méga"	40
Figure III. 4	Schéma électronique du circuit de commande rapprochée.	42
Figure III. 5	Optocoupleur PC815 et 4N35	42
Figure III. 6	Les pattes du LM324	43
Figure III. 7	Photo de la partie Commande réalisé du convertisseur AC-DC et DC-DC	43
Figure III. 8	Photo du hacheur abaisseur réalisé.	45
Figure III. 9	Superposition des caractéristiques courant-tension simulées et	46

	émulées pour une température de 80°C et des pressions cathodiques variables.	
--	--	--

SOMMAIRE

Introduction générale.....	13
 CHAPITRE 01 : MODELISATION DU SYSTEME DE PILE A COMBUSTIBLE	
Introduction.....	15
I.1 TYPES DE PILES A COMBUSTIBLE.....	15
I.2 Fonctionnement d'une pile à combustible de type PEMFC.....	17
I.3 STRUCTURE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE TYPE PEMFC.....	18
I.4 Les piles à combustible dans l'industrie automobile.....	19
I.5 Description d'un système à pile à combustible.....	20
I.6 Modèle de la tension du pack à pile à combustible.....	22
Conclusion	27
 CHAPITRE 02 : SIMULATION D'UN EMULATEUR A PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM-FC	
Introduction.....	29
II.1 Description de l'émulateur a pile a combustible de type PEM-FC simule.....	29
II.2 Modélisation et contrôle du hacheur série (Buck).....	30
II.3 Modélisation du hacheur série.	30
II.4 Dimensionnement de l'inductance L et des capacités C1 et C2.....	31
II.5 Mode de Conduction Continue (MCC).....	32
II.6 Mode de Conduction Discontinue (MCD).....	32
II.7 Ondulation du courant i_L et choix de L.....	33

II.8 Ondulation de la tension de sortie : Vst, choix de C2.....	33
II.9 Simulation du fonctionnement du hacheur série.....	33
II.10 Simulation de l'émulateur à pile à combustible de type PEMFC.....	35
Conclusion.....	39
 CHAPITRE 03: CONCEPTION D'UN EMULATEUR A PILE A COMBUSTIBLE	
Introduction.....	41
III .1 Raisons d'émuler un système énergétique renouvelable.....	41
III .2 Description du banc expérimental.....	43
III .3 Logiciel utilisée pour la programmation de la carte Arduino méga.....	44
III .4 La carte Arduino.....	45
III .5 Conception du hacheur série	46
III .6 Conception de la carte de commande rapprochée.....	46
III .7 Optocoupleur.....	47
III .8 Amplificateurs opérationnels quadruples LM324 et LM324A.....	47
III .9 Conception de la carte de puissance.....	48
III .10 Calcul et choix des composants.....	48
III .11 Les résultats expérimentaux.....	49
Conclusion.....	52
.	52
Conclusion Générale.....	53
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	54
ANNEXES.....	56

***Introduction
Générale***

INTRODUCTION GENERALE

Pendant les dernières décennies il y a eu un intérêt croissant aux systèmes à pile à combustible (PAC) pour la génération d'énergie en vue des applications stationnaires et mobiles [1,2].

Les systèmes à piles à combustible de type membrane échangeuse de protons (PEM) semblent être une des meilleures solutions pour les applications de cogénérations et de transport automobile, en raison de ses densités de puissance élevée, son électrolyte solide, sa basse corrosion et son fonctionnement à basse température.

Nous Cependant, quelques contraintes posées par les systèmes étudiés sont toujours d'actualité, en particulier leurs coûts, leur tailles et poids ainsi que la complexité de leurs auxiliaires.

Un système à pile à combustible est un système complexe, où différents phénomènes physiques se produisent : thermique, électrochimique, électrique ...

En fait la pile à combustible a besoin de plusieurs composants auxiliaires afin de fonctionner correctement, tel que le circuit d'alimentation d'hydrogène pour l'anode, le système de gestion d'air pour la cathode, le système de refroidissement et le système d'humidification. Tous les composants de ces auxiliaires doivent être analysés, conçus et optimisés pour améliorer les performances d'un système à pile à combustible, de sorte que non seulement la pile à combustible puisse être améliorée mais aussi pour l'optimisation des fortes interactions non linéaires entre les différents auxiliaires [3].

Le fait que la durée de vie des piles à combustible soit déterminée par le nombre d'heures d'utilisation, son prix actuel et le cout de l'hydrogène limitent leurs emplois dans l'expérimentation. C'est un problème rencontré à la sortie de la pile à combustible, par exemple lors de la conception et de la vérification des systèmes de l'électronique de puissance composés en général d'un hacheur élévateur associé à un hacheur bidirectionnel (si une source du stockage d'énergie est présente) et un onduleur [1,2].

Actuellement la plupart des systèmes de l'électronique de puissance sont principalement examinés au moyen d'une source constante à courant continu avec un retard de premier ordre. Par ailleurs, les auxiliaires peuvent avoir une taille trop grande, selon les performances de la pile à combustible, engendrant par conséquent des coûts et des espaces associés trop élevés.

En conclusion, les tests du système de contrôle des systèmes de l'électronique de puissance ou même les systèmes de contrôle des auxiliaires peuvent être dangereux pour la PAC et très chers en raison des dommages potentiels.

Toutes les issues des contraintes ci-dessus résumées exigent donc l'utilisation d'un dispositif peu coûteux qui peut se comporter électriquement comme la réelle pile à combustible dont l'essai ne présente pas de risques.

Ces systèmes sont appelés littérairement : les simulateurs en temps réel ou les émulateurs [1,2].

Pour les raisons cités précédemment, notre travail se basera sur trois chapitres qui sont : la modélisation d'une pile à combustible de type PEMFC qui va être traité dans le 1^{er} chapitre. Ensuite, nous allons voir dans le 2^{eme} chapitre la simulation d'un émulateur à pile combustible. Après en va traiter en 3^{eme} chapitre la conception d'un émulateur du système à pile à combustible de type PEM. Finalement en termine par une conclusion général et ontirera quelques perspectives.

Chapitre I:
Modélisation d'un pile à combustible
de type PEMFC.

I. Introduction:

La modélisation des piles à combustible prend une part très importante dans leur développement car elle facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de piles à combustible, chacun a généralement ses propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés.

Les modèles varient en fonction de leur niveau de complexité et des échelles de temps et de distance sur lesquelles se déroulent les phénomènes étudiés. Ils deviennent très, voire trop compliqués (temps de calcul informatique rédhibitoire) lorsque l'on tente de tenir compte de l'ensemble des phénomènes. La modélisation doit donc être faite dans une optique précise, en trouvant un juste équilibre dans le degré de finesse à adopter lors de la description des différents phénomènes et en gardant à l'esprit les limites du modèle [3-5].

Ce chapitre débute par une description des différents types des piles à combustible, puis nous allons voir le principe de fonctionnement, la structure et l'application dans le secteur automobile d'une pile à combustible de type PEMFC.

Ensuite nous proposons un modèle détaillé qui tient compte des différents phénomènes dynamiques comme le transport des charges et de la matière dans les différentes couches de la pile à combustible électrode-membrane-électrode, ainsi que le comportement non linéaire tension-courant de la pile à combustible modélisé par des équations empiriques. Pour assurer un bon fonctionnement de la pile à combustible, des auxiliaires sont indispensables (compresseur, conduite d'alimentation et de retour, refroidisseur, humidificateur et électrovanne d'hydrogène), ces derniers seront aussi décrits et modélisés.

Afin d'adapter la tension de la pile à combustible à celle du Bus continu et de charger le SC à sa tension de référence, un convertisseur DC-DC unidirectionnel en courant de type élévateur est généralement utilisé. Pour cet effet nous présentons son modèle instantané, puis son modèle à valeur moyenne que nous allons utiliser afin de ne pas alourdir la simulation ainsi que le dimensionnement de l'inductance de lissage nécessaire à son entrée.

I.1 Types de piles à combustible :

La pile à combustible (PàC) est un générateur d'électricité transformant l'énergie chimique dégagée d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique en présence d'une chaleur. Dans la plupart des cas, le combustible est l'hydrogène. Les PàCs sont classés selon le choix de l'électrolyte et du combustible utilisé. Le choix de ces deux éléments détermine les réactions aux électrodes et le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionnent la température de fonctionnement de la pile. Le Tableau I.1 énumère les différents types de piles à combustible existantes [6].

	Nom	Electrolyte	Plage de puissance	Température de fonctionnement	Domaines d'applications
PàC à basses températures	DMFC (Direct methanol fuel cell)	Membrane polymère	1mW à 100KW	60-90°C	Portable
	PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell)	Membrane polymère	100W à 500KW	60-90°C	Transport Portable Stationnaire
	AFC (Alcaline fuel cell)	Solution alcaline aqueuse	10KW à 100KW	50-250°C	Transport Spatial
	PAFC (Phosphoric acid fuel cell)	Acide phosphorique	Jusqu'à 10MW	160-220°C	Stationnaire
PàC à hautes températures	MCFC (Molten carbonate fuel cell)	Carbonate fondu	Jusqu'à 100MW	650°C	Stationnaire
	SOFC (Solid oxide fuel cell)	Oxyde solide	Jusqu'à 100MW	750-1050°C	Stationnaire

Tableau I. 1 : Différents types de piles à combustible.

Chaque type de PàC a un domaine d'application privilégié. Parmi les divers types de piles, c'est la pile PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) qui se développe le plus vite [7]. Elle se présente comme le choix le plus adéquat pour des applications dans le domaine du transport et ceci, pour trois raisons essentielles [7] :

- Température de fonctionnement: la pile fonctionne à basse température, (entre 60°C et 90°C), ce qui est adapté à un usage automobile. A haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée.

- Structure solide: sa membrane en polymère solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile; elle empêche notamment les fuites dues aux vibrations.
- Densité de puissance : la propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PàC de type PEMFC répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1kg/kW et 3kg/kW.

I.2 Fonctionnement d'une pile à combustible de type PEMFC :

Dans une PàC de type PEMFC (figure I.1), la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur l'électrode négative d'un réducteur, couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant [6,7]. Elle possède une cathode et une anode séparées par un électrolyte qui assure entre autres le passage du courant par transfert ionique des charges. Comme une pile classique, la pile à combustible consomme son oxydant, l'oxygène (O_2) et son réducteur, l'hydrogène (H_2) et continue de fonctionner tant qu'elle est approvisionnée en hydrogène et en oxygène. Chaque réaction produit de l'eau et libère des électrons et de la chaleur.

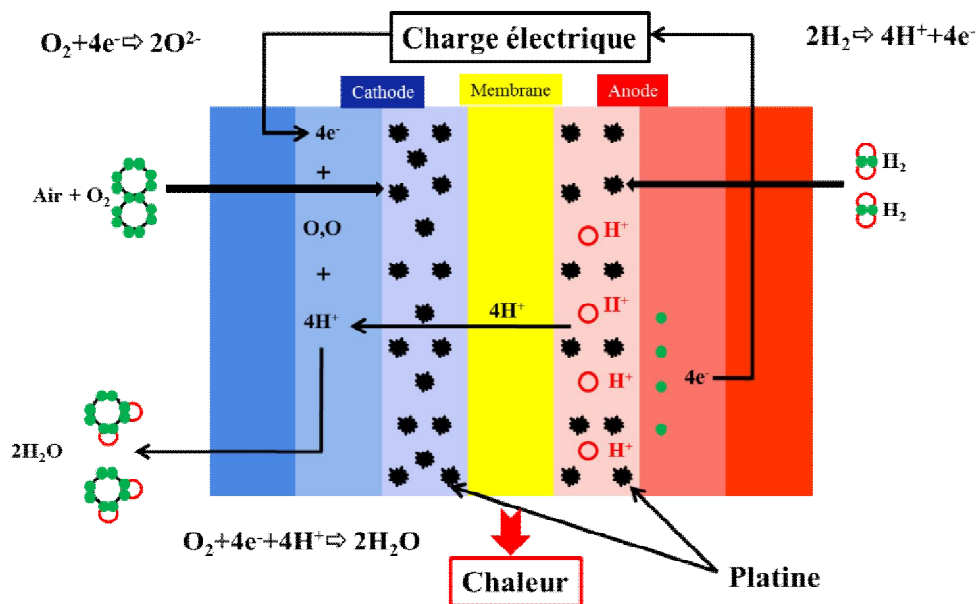
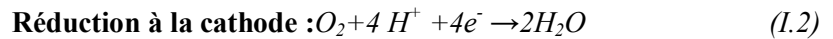


Figure I. 1: Production de l'électricité dans une pile à combustible.

L'efficacité de l'hydrogène provient de sa grande réactivité électrochimique par rapport aux autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. De plus, l'oxygène est l'oxydant le plus commun en raison de son abondance dans l'air. Les équations chimiques d'oxydoréduction sont les suivantes:



En combinant les deux équations de réaction, on obtient la réaction globale:



L'électricité est produite par les deux électrons libérés par la molécule d'hydrogène, lors de l'oxydation à l'anode. Les protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinaient à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont l'eau et la chaleur.

I.3 Structure d'une pile à combustible type PEMFC :

La réaction électrochimique a lieu au sein d'une cellule élémentaire. Cette dernière consiste en un assemblage Electrode-Membrane-Electrode (EME) pressé entre deux plaques bipolaires comme représenté dans la Figure I.2 [6-8].

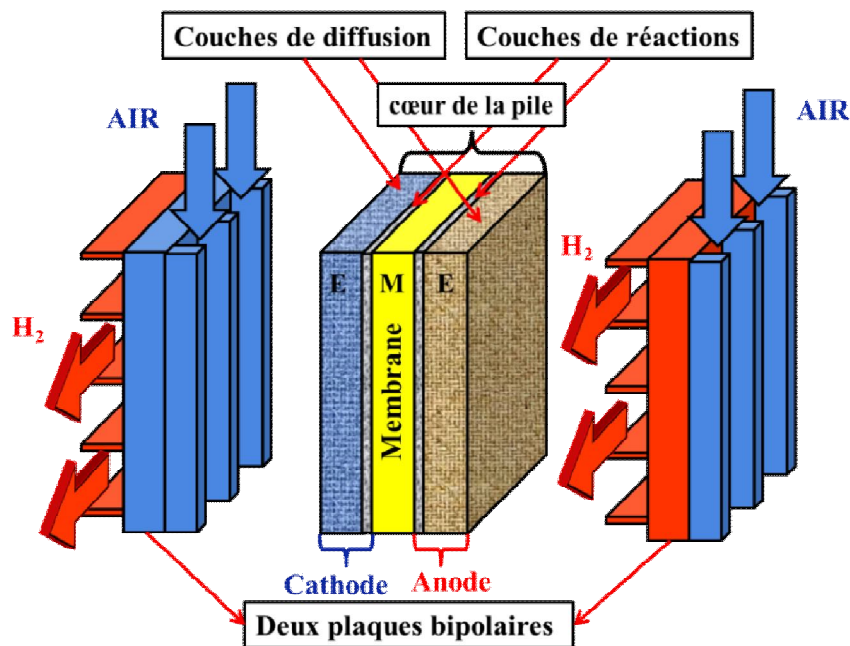
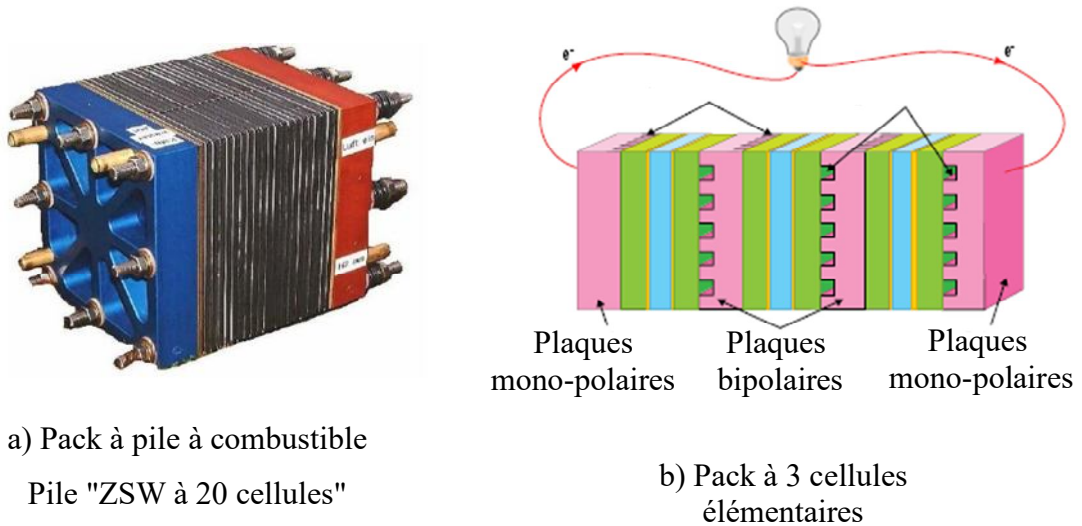


Figure I. 2: Vue d'ensemble d'une cellule de pile à combustible.

La membrane constitue le cœur de la cellule élémentaire ; c'est un électrolyte perméable aux protons d'hydrogène H^+ et imperméable aux gaz.

Un assemblage EME comporte, outre la membrane, deux électrodes : l'anode et la cathode exposées à un flux de gaz qui leur fournit l'apport en réducteur et en oxydant, à savoir l'hydrogène et l'oxygène.

La tension obtenue avec une cellule élémentaire est inférieure à 1 volt, ce qui est insuffisant pour la majorité des applications. Dans le but d'obtenir une source de tension suffisamment élevée, plusieurs cellules sont assemblées en série pour former ce qu'on appelle le pack de pile à combustible (figure I.3).



a) Pack à pile à combustible

Pile "ZSW à 20 cellules"

ZSW : (*Zentrum für Sonnenergie- und Wasserstoff-Forschung*)

b) Pack à 3 cellules élémentaires

Figure I. 3:Pack de pile à combustible.

I.4 Les piles à combustible dans l'industrie automobile :

Comme la production de l'énergie électrique est réalisée sans émissions de gaz à effet de serre, ce type de véhicules est considéré non polluant et apparaît donc comme une solution intéressante de mobilité durable. Plusieurs programmes de véhicules à PàC ont été lancés au début des années 90.

General Motors a démarré son programme en 1990 et a présenté ses premiers prototypes en 1998. Deux concepts baptisés Hy-Wire et Sequel ont été présentés en 2002 et 2005 respectivement [3].

Toyota Motor Corporation a présenté son premier prototype en 1996 en utilisant une base du véhicule RAV-4 LV. En 2002, elle a commercialisé le premier véhicule à PàC : la Toyota FCHV. Parmi les derniers concepts de véhicules hybrides à PàC, la Toyota FCV-R a été présentée au salon de Genève en 2012 [3], en 2015 la Toyota Mirai a été introduite dans le marché américain, allemand, belge, britannique et danois, ce qui a fait progresser la production de cette berline, initialement fixée à 700 unités par an (figure I.4) [3].



Figure I. 4 :Toyota Mirai, un véhicule hybride à pile à combustible.

I.5 Description d'un système à pile à combustible :

Un pack à pile à combustible doit être intégré avec plusieurs composants auxiliaires pour former un système à pile à combustible complet. Le diagramme de la figure I.5 représente un exemple de systèmes à pile à combustible dont les composants auxiliaires fondamentaux sont:

- Le système d'alimentation en hydrogène.
- Le système d'alimentation en air.
- Le système de refroidissement.
- Le système d'humidification.

Dans **la figure I.5** : l'hydrogène est fourni par un réservoir à haute pression et le débit est commandé par une vanne. Puisque le stockage à haute pression agit comme une source de grande énergie, le débit d'hydrogène peut être ajusté rapidement. L'air est fourni par un compresseur utilisé pour augmenter la densité de puissance de tout le système. La figure I.5 représente aussi un système d'humidification externe pour les gaz anodiques et cathodiques [9-13].

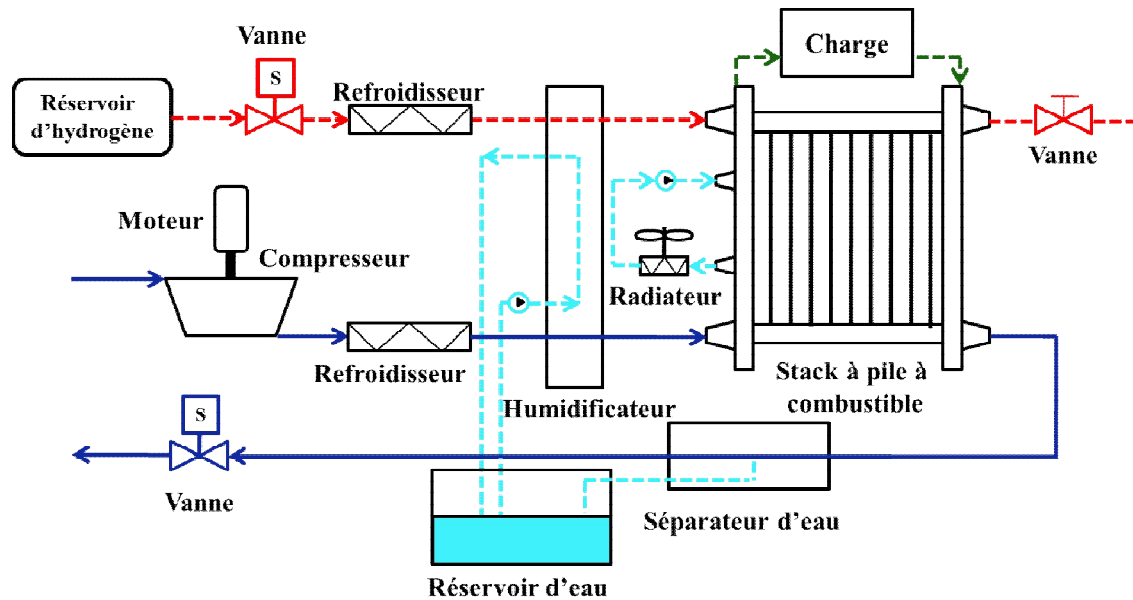


Figure I. 5 : Système à pile à combustible.

La puissance du pack à pile à combustible est le produit de la tension résultante par le courant du pack. La tension d'une cellule est à la fois fonction du courant du pack, des pressions partielles des réactifs sous chaque cellule, de la température d'une cellule et de l'humidité de la membrane [12].

Dans cette thèse, nous considérons que les cellules à pile à combustible sont conçues pour fonctionner de la même façon, on peut alors les étudier de la même manière et les rassembler sous forme d'un pack de plusieurs cellules. Ainsi, toutes les températures des cellules sont considérées identiques (température maintenue constante pour tout le pack à pile à combustible). De plus, si la déshydratation de la membrane survient, elle se produit simultanément en chaque cellule et toutes les cellules sont représentées ainsi par les mêmes courbes de polarisation. Ces hypothèses de l'invariabilité des performances d'une cellule à une autre sont nécessaires pour pouvoir poser des modèles d'ordres réduits pour tout le système.

Pendant que le courant électrique est tiré de la PàC, l'oxygène et l'hydrogène sont consommés et l'eau et la chaleur sont produites. Pour maintenir la pression partielle désirée d'hydrogène, le niveau de celui-ci doit être complété par son circuit d'alimentation, qui inclut le réservoir d'hydrogène à haute pression et une servovalve d'alimentation. De même, le niveau d'air doit être complété par le système d'air afin de maintenir la pression partielle de l'oxygène. Le système d'air se compose d'un compresseur d'air, d'un moteur électrique et de pipes (ou conduites) entre les composants [13].

Le compresseur fournit non seulement le flux d'air désiré mais augmente également la pression atmosphérique ce qui améliore de manière significative la vitesse de réaction au niveau de la cathode, et donc le rendement générale et la densité de puissance. Puisque le flux d'air comprimé quittant le compresseur est à haute température, un refroidisseur d'air est nécessaire pour réduire la température d'air entrant dans le pack.

Un humidificateur est utilisé pour prévenir la déshydratation de la membrane de pile à combustible. L'eau utilisée dans l'humidificateur est fournie à partir du réservoir d'eau. Le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu en accumulant l'eau produite par le pack, qui est transportée avec le flux d'air.

La chaleur excessive libérée dans la réaction de pile à combustible est réduite par le système de refroidissement, qui fait circuler l'eau dés-ionisée à travers le pack à pile à combustible et enlève la chaleur excessive par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur [14-17].

I.7 Modèle de la tension du pack à pile à combustible :

La tension du pack à PàC est calculée en fonction de son courant, de la pression cathodique, des pressions partielles des réactifs, de la température de la pile à combustible et de l'humidité de la membrane. La relation courant-tension est généralement donnée par une courbe de polarisation, qui est tracée comme une tension de cellule, u_{fc} en fonction de la densité du courant, i_{fc} (voir figure I.6 comme exemple). Comme plusieurs cellules sont empilées en série pour former un pack à PàC, la tension totale u_{FC} est obtenue par la sommation des tensions élémentaires des cellules et le courant de pack i_{FC} est égal au courant d'une cellule. La densité de courant est alors définie comme le courant de pack par unité de surface active de la cellule, $i_{fc} = i_{FC}/A_{fc}$. En supposant que toutes les cellules sont identiques, la tension de pack peut être calculée par la multiplication de la tension d'une cellule (u_{fc}) par le nombre de cellules n comme suit :

$$u_{FC} = n \cdot u_{fc} \quad (\text{I. 1})$$

La tension d'une cellule de la pile à combustible est calculée en utilisant des relations physiques et empiriques, elle est donnée par l'expression [1-3] :

$$u_{fc} = E - u_{act} - u_{ohm} - u_{conc} \quad (\text{I. 2})$$

Où : E représente la tension à vide de la pile à combustible (potentiel de Nerst) u_{act} , u_{ohm} , u_{conc} représentent respectivement les surtensions d'activation, ohmiques et de concentration ; elles sont exprimées comme suit :

1. Tension à vide E : Elle est calculée à partir du bilan énergétique entre les réactifs et les produits et la constante de Faraday, comme suit :

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (\text{I. 3})$$

- Où T_{fc} est la température de la pile exprimée en (Kelvin), p_{H_2} , p_{O_2} sont les pressions d'hydrogène et d'oxygène exprimées en bar.

2. Pertes d'activation u_{act} : Elles sont dues principalement aux cinétiques des réactions chimiques [3]. La relation entre les pertes d'activation et la densité du courant est décrite par l'équation de Tafel qui est approximée comme suit [12-17] :

$$u_{act} = u_0 + u_a \left(1 - e^{-c_1 i_{fc}}\right) \quad (\text{I. 4})$$

Où u_0 représente la chute de tension à densité de courant nulle, u_a (volts) et c_1 sont constantes ; ces trois paramètres peuvent être déterminés empiriquement [12-17]:

$$c_1 = 10$$

$$u_0 = 0.279 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \times \dots \left[\ln \left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{0.1173 (p_{ca} - p_{sat})}{1.01325} \right) \right] \quad (\text{I.8})$$

$$u_a = \left(-1.618 \times 10^{-5} T_{fc} + 1.618 \times 10^{-2} \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 + \dots \left(1.8 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.166 \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + \left(-5.8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.5736 \right)$$

3. Pertes ohmiques u_{ohm} : Elles sont dues d'une part à la résistance de contact des différentes couches de la pile et d'autre part à la résistance que rencontrent les particules chargées : les ions H^+ dans l'électrolyte et les électrons e^- dans les électrodes, les plaques bipolaires et les connexions [1-3]. D'après la loi d'Ohm, les pertes ohmiques peuvent être exprimées par la relation suivante :

$$u_{ohm} = i_{fc} \cdot R_{ohm} \quad (\text{I.9})$$

La résistance ohmique R_{ohm} peut être exprimée en fonction de la conductivité de la membrane σ_m

$(\Omega \cdot cm)^{-1}$, sous la forme suivante :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (\text{I.10})$$

Où: t_m et σ_m sont respectivement l'épaisseur et la conductivité de la membrane, sachant que la conductivité dépend à la fois de la teneur en eau de la membrane λ_m et de la température de la pile à combustible T_{fc} . La valeur de λ_m varie entre 0 et 14 pour une humidité relative entre 0% et 100%. La variation de la conductivité de la membrane en fonction de l'humidité et de la température est donnée sous la forme suivante [1-3] :

$$\sigma_m = b_1 \exp \left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right) \quad (\text{I.11})$$

b_2 est une constante et b_1 peut être exprimée en fonction de la teneur en eau de la membrane λ_m , comme suit:

$$b_1 = (b_{11}\lambda_m - b_{12}) \quad (\text{I.12})$$

Les constantes b_{11} , b_{12} et b_2 sont habituellement déterminées empiriquement. Pour la membrane de type Nafion 117 [1-3]: $b_{11} = 0.005139$, $b_{12} = 0.00326$ et $b_2 = 350$.

4. Les pertes de concentrations apparaissent à des densités de courant élevées, la faible vitesse de transport des réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la principale cause de la chute de concentration. Pour calculer ces pertes nous utilisons une équation empirique approximative comme [1-3] :

$$u_{conc} = i \left(c_2 \frac{i_{fc}}{i_{fc\max}} \right)^{c_3} \quad (\text{I. 5})$$

Où: c_2 , c_3 et $i_{fc\max}$ sont des constantes qui dépendent de la température et de la pression partielle des réactifs et peuvent être déterminées empiriquement comme suit [45-48]:

$$c_2 = \begin{cases} \left(7.16 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.622 \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + \left(-1.45 \times 10^{-3} T_{fc} - 1.68 \right) \\ \text{pour } \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) < 2 \text{ atm} \\ \left(8.66 \times 10^{-5} T_{fc} - 0.068 \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + \left(-1.6 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.54 \right) \\ \text{pour } \left(\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) > 2 \text{ atm} \end{cases}$$

$$c_3 = 2$$

$$i_{fc\max} = 2.2$$

Afin de tester les performances du modèle de la tension du pack à pile à combustible, des simulations sous le logiciel Matlab/Simulink ont été effectuées et nous avons relevé les caractéristiques suivantes :

a. La figure I.6 : montre la courbe de polarisation à une température fixe égale à (80°C) et pour différentes pressions cathodiques (entre 1 et 3 bars) pour une seule cellule à pile à combustible

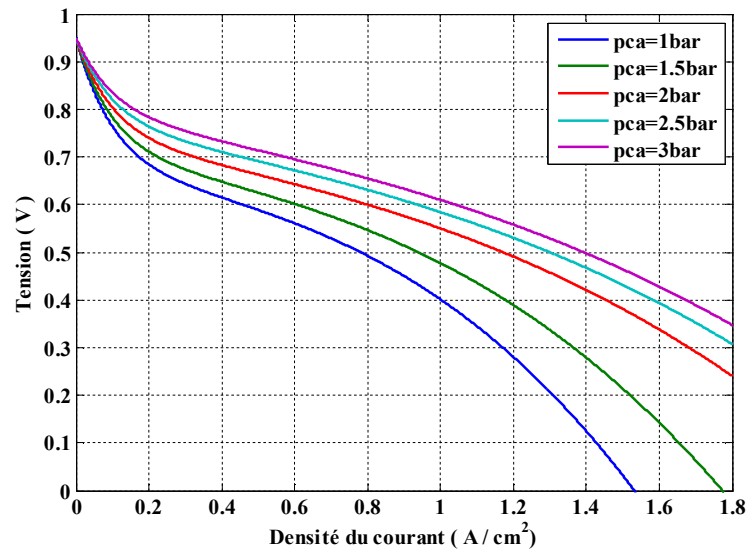


Figure I. 6 :Tension d'une cellule à PàC en fonction de la densité de courant à température constante ($80^{\circ}C$) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars)

b. La figure I.7 : montre la tension du pack à PàC complet ($n = 381$) en fonction du courant ($A_{fc} = 280 cm^2$) à température constante et pour différentes pressions cathodiques ; cette figure montre bien que la caractéristique courant-tension d'une pile à combustible est fortement non linéaire ; nous constatons une très forte chute de tension quand la charge de la pile (courant) augmente, cette chute est non linéaire.

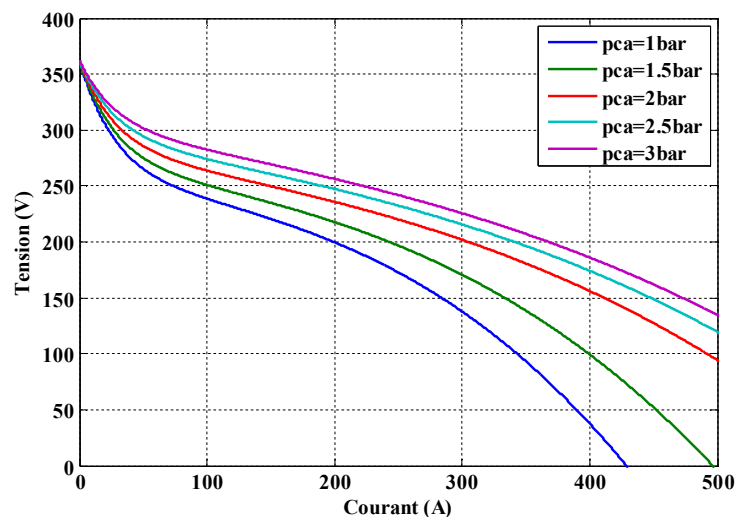


Figure I. 7 :Tension du pack en fonction du courant à température constante ($80^{\circ}C$) et pour différentes valeurs de la pression cathodique (entre 1 et 3 bars).

c. La figure I.8 : présente la puissance du pack en fonction du courant de charge pour différentes pressions cathodiques à température constante ($80^{\circ}C$). On peut considérer une zone de fonctionnement pratiquement linéaire comprise la valeur nulle de la puissance et la puissance maximale.

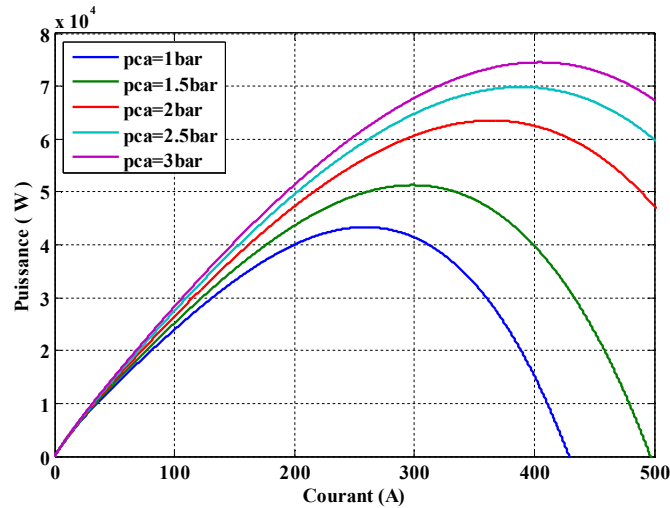


Figure I. 8: Puissance du pack en fonction du courant à température constante (80°C) et pour différentes pressions cathodiques (entre 1 et 3 bars).

d. La figure I.9 : représente la courbe de la tension du pack à pression cathodique constante égale à 2.5 bar et à différentes valeurs de la température de fonctionnement. On remarque que la tension augmente avec la température de fonctionnement, raison pour laquelle on choisit généralement une température de fonctionnement de 80°C. Notons que le compromis nécessaire entre la diminution des pertes et le fonctionnement à une basse température ne permet pas d'adopter la température de 100 °C [3].

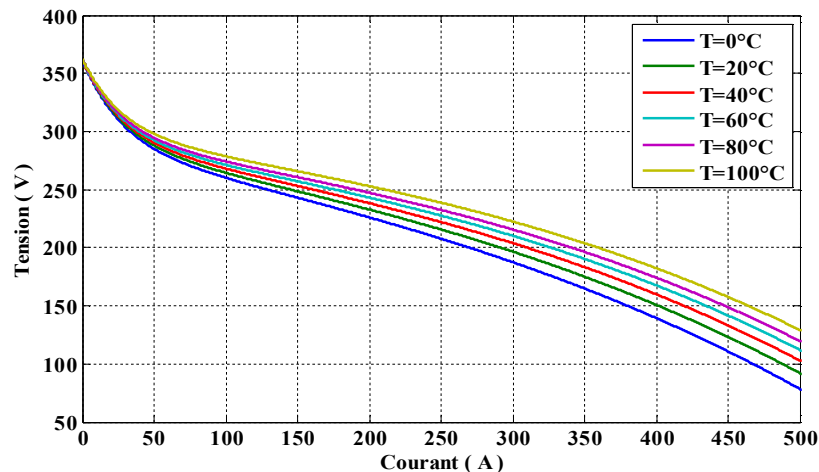


Figure I. 9: Tension du pack en fonction du courant à pression cathodique constante (2.5 bar) et pour différentes températures (entre 0°C et 100°C).

e. La figure I.10: représente l'effet de l'humidité de la membrane sur la tension du pack. A titre indicatif, la courbe en bleu correspond à une membrane humidifiée à 100% et la courbe en

rouge représente une membrane humidifiée à 50%. La tension du pack pour une membrane humidifiée à 50% est inférieure à celle d'une membrane humidifiée à 100%, pour cette raison il faut bien humidifier la membrane en injectant de l'eau avec les réactifs.

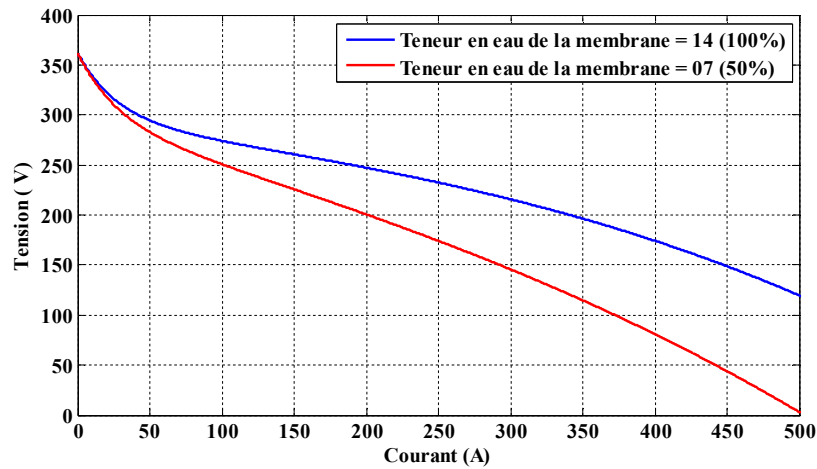


Figure I. 10 :Tension du pack pour une pression cathodique de 2.5 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane.

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'une pile à combustible de type PEMFC, Les piles à combustible sont des dispositifs capables de convertir directement en électricité et en chaleur l'énergie libérée par l'oxydation d'un combustible. L'oxydant est l'oxygène, pur ou dilué dans l'azote. La nature du combustible varie selon l'application considérée.

Chapitre II :
Simulation d'un émulateur à pile à
combustible de type PEM-FC

II. Introduction :

Un émulateur est un dispositif qui reproduit entièrement ou partiellement un milieu de travail, c'est une plate-forme hybride (matérielles-logicielles) capable de copier le comportement des systèmes physiques qu'on peut utiliser à la place du vrai équipement. Il diffère de la simulation, qui est une modélisation dans un environnement logiciel. Parfois un émulateur s'appelle également « système de simulation », qui est une définition ambiguë.

En tout cas, la simulation et l'émulation ont été employées avec succès pendant des années pour améliorer la conception et la gestion des systèmes. Elle aide à maximiser les performances de tout processus avant sa mise en application.

Il est généralement reconnu que le premier vrai émulateur a été fait en 1930 lors des essais de simulation du comportement d'un cockpit.

Ce chapitre est consacré à la simulation d'un émulateur à pile à combustible de type PEM-FC. Bien sûr avant de concevoir l'émulateur à pile à combustible, la simulation de ce dernier sous le logiciel Matlab/Simulink est inévitable et cela pour analyser ces performances, en plus, étudier sa faisabilité. Les résultats trouvés et leurs interprétations sont représentés à la fin de ce chapitre.

II.1 Description de l'émulateur à pile à combustible de type PEM-FC :

Cette section décrit les différents composants qui constituent un émulateur à pile à combustible de type PEM-FC en utilisant un convertisseur de puissance CC-CC contrôlé. Un convertisseur CC-CC peut reproduire exactement la caractéristique courant-tension des différents systèmes renouvelables [3, 12-17].

Le but de l'émulateur de la PEM-FC est de reproduire le modèle de la pile à combustible décrit dans le chapitre I en prenant en considération : la variation de la température de stack, les pressions partielles des réactifs et le courant de charge.

Le principe de fonctionnement d'un émulateur PEM est représenté dans la (Figure II.1). La première partie de ce système donne la tension de sortie de la PEM en fonction de plusieurs paramètres qui caractérisent les conditions de fonctionnement du système à pile à combustible (température, pression, etc.).

La tension de référence V_{stref} est obtenue en utilisant les équations qui représentent le modèle mathématique du système de la pile à combustible données dans le chapitre I.

La deuxième partie de l'émulateur est formée par un convertisseur de puissance matérielle commandé. Le circuit matériel est un convertisseur à CC-CC série (Buck) [18] qui donne la tension de sortie V_{st} et la commande est implémentée pour traiter le signal d'erreur $V_{stref} - V_{st}$ et donner la

valeur exacte du rapport cyclique δ au convertisseur à CC-CC pour que la tension hachée V_{st} suive la tension de référence V_{stref} [1, 19-21].

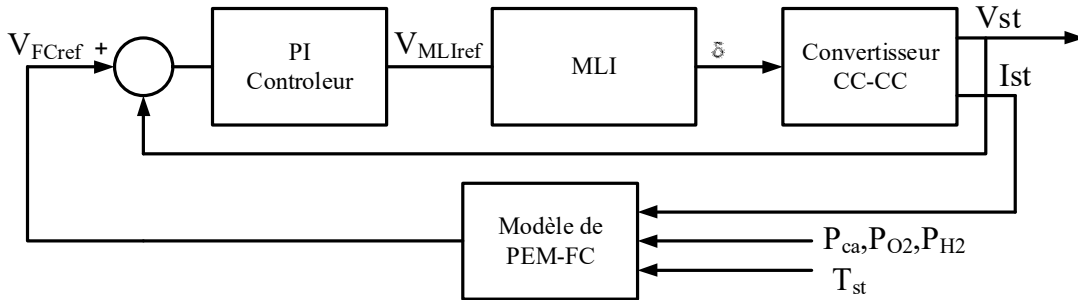


Figure II. 1 : Diagramme à simuler de l'émulateur à pile à combustible [1, 19-21].

II.3 Modélisation et contrôle du hacheur série (Buck) :

Le hacheur série est le composant le plus important dans l'émulateur à pile à combustible à étudier. Pour cette raison une grande partie de ce chapitre est dédié à la modélisation, la commande et la simulation du hacheur série.

II.3.1 Modélisation du hacheur série :

Un convertisseur série, ou hacheur abaisseur, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé pour émuler le comportement non linéaire de la tension de la pile à combustible de type PEM-FC en fonction du courant [18].

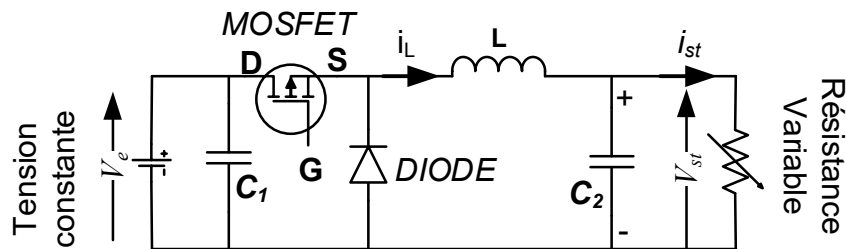


Figure II. 2 :Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.

Si la MOSFET est à l'état passante $G=1$ à $t=t_0$, un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_{st} n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L [18].

$$\frac{di_{st}}{dt} = \frac{V_e - V_{st}}{L} \quad (\text{II.1})$$

Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Si la MOSFET est à l'état bloquée $G=0$ après $t = t_1$, la résistance variable est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée « diode de roue libre ». Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance au blocage de la MOSFET sans la création de surtension. Selon l'équation II.1, le courant décroît, puisque :

$$\frac{di_{st}}{dt} = -\frac{V_{st}}{L} \quad (\text{II.2})$$

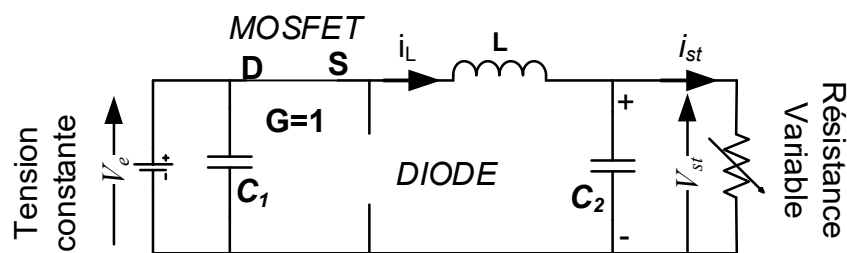


Figure II. 3 : Convertisseur série durant $G=1$.

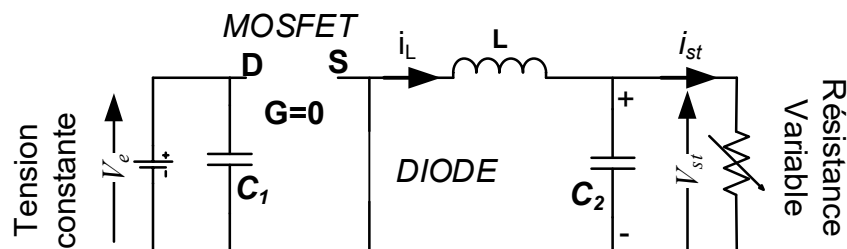


Figure II. 4 : Convertisseur série durant $G=0$.

Le condensateur C_1 permet de réduire les pics du courant tiré du V_e , de soutenir la tension d'alimentation V_e et d'atténuer les bruits. La MOSFET est activé et désactivé avec une fréquence de commutation $f = 1/T$.

La tension aux bornes de la résistance variable présente une ondulation qui peut être lissée par l'ajout d'un condensateur C_2 . Quoiqu'il en soit, la valeur moyenne V_{st} est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'à kHz , l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement.

La tension aux bornes de la résistance variable est donnée par :

$$V_{st} = \frac{t_0}{T} \cdot V_e = \delta \cdot V_e \text{ (II.3)}$$

Avec $T=t_0+t_1$: est la période de commutation. $\delta = \frac{t_0}{T}$ est le rapport cyclique ($0 < \delta < 1$).

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique δ .

On considère ici uniquement le comportement du circuit en Mode de Conduction Continue (MCC).

Une étude plus approfondie sera faite dans les sections suivantes [18-21].

II.3.2 Dimensionnement de l'inductance L et des capacités C₁ et C₂ :

La détermination des valeurs de l'inductance L et les capacités C_1 et C_2 sont très importants car leurs valeurs jouent un rôle primordiale pour la détermination du mode de fonctionnement du convertisseur série. Ces modes sont le mode de fonctionnement continu et le mode de fonctionnement discontinu.

II.3.3 Mode de Conduction Continue (MCC) :

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation et est donc continu.

II.3.4 Mode de Conduction Discontinue (MCD) :

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une période de commutation. Le courant dans l'inductance est discontinu.

II.3.5 Ondulation du courant i_L et choix de L :

Pour assurer que le hacheur série fonctionne en mode de conduction continu et afin de minimiser les ondulations du courant i_L l'inductance L doit être choisi en respectant la condition suivante [18-21]:

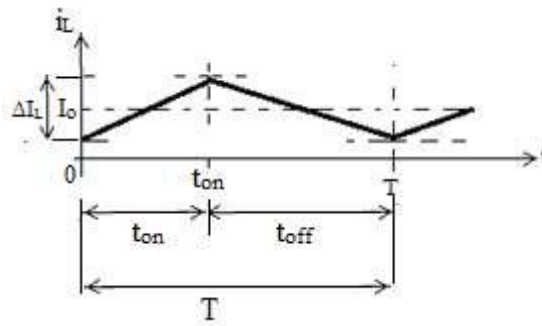


Figure II. 5 : Allure de courant inductif pour un hacheur Buck.

$$\Delta i_L = i_{L_{\max}} - i_{L_{\min}} = \frac{V_e}{L \cdot f} \cdot (1 - \delta) \cdot \delta \quad (\text{II.4})$$

Sachant que l'ondulation du courant est maximale pour $\delta = 0.5$, on peut écrire pour un courant d'ondulation maximum désiré $i_{L_{\max}}$:

$$L \geq \frac{V_e}{4 \cdot f \cdot \Delta i_{L_{\max}}} \quad (\text{II.5})$$

Donc à partir de l'équation précédente on peut conclure que la valeur de l'inductance L a une grande relation avec la valeur maximale de l'ondulation du courant $\Delta i_{L_{\max}}$:

La valeur maximum admissible pour $\Delta i_{L_{\max}}$ résulte d'un compromis :

- Une valeur trop faible de $\Delta i_{L_{\max}}$ conduit à une valeur excessive de l'inductance L .
- Une valeur trop élevée de $\Delta i_{L_{\max}}$ augmente la valeur maximale de courant que la MOSFET et la diode doivent supporter, le maximum correspond en outre au courant que la MOSFET doit pouvoir interrompre.
- Une valeur trop élevée de $\Delta i_{L_{\max}}$ augmente aussi la largeur de la zone correspondant à la conduction discontinue L .

Le choix de la fréquence de commutation f est crucial. Plus elle est grande, plus est petit le noyau de l'inductance et plus sont importantes les pertes par commutation de la puissance.

Dans le cas de notre application qui est l'émulation de la caractéristique tension/courant à la sortie de la pile à combustible $\Delta i_{L_{\max}}$ doit être choisie pour que l'émulateur puisse balayer toute la caractéristique de la pile à combustible. Dans cette application le courant minimum moyen qui peut

être émulé est égal à 0.2A. Donc la valeur maximale de l'ondulation de courant dans ce cas est égale à $\Delta i_{L_{\max}} = 0.4 \text{ A}$.

On fixe tout d'abord la fréquence de travail $F (=1/T=7800 \text{ Hz})$ et on considère que la tension d'entrée $V_e=12\text{V}$.

On obtient à partir de l'équation que L doit être supérieur ou égale à 0.385 mH. Dans cet émulateur la valeur de l'inductance utilisée est égale à 0.42mH.

II.3.6 Ondulation de la tension de sortie V_{st} et choix de C_2 et C_2 :

Dans l'émulateur de la pile à combustible, on rajoute les condensateurs C_1 et C_2 pour que la tension de sortie V_{st} et le courant I_{st} se maintiennent à des valeurs constantes, même pendant l'ouverture de MOSFET.

Pour cela si la valeur de l'ondulation du courant dans l'inductance $\Delta i_{L_{\max}}$ est déterminée, alors la valeur de C_2 peut être établie à partir de l'expression suivante :

$$C_2 \geq \frac{\Delta i_{L_{\max}}}{8 \cdot f \cdot \Delta V_{C_2_{\max}}} \quad (\text{II.6})$$

Dans notre cas $\Delta V_{C_2_{\max}}$ est choisi pour qu'elle soit égale à 2% de la tension max qui peut être délivrée par l'émulateur à pile à combustible. Si la tension max de l'émulateur est égale à 12 V donc $\Delta V_{C_2_{\max}} = 0.24\text{V}$. Donc la valeur de C_2 doit être supérieure ou égale à 27.5 F. Dans cet émulateur la valeur de la capacité utilisée est égale à 100 F.

La capacité C_1 est calculée en respectant la condition suivante [18-21]:

$$C_1 \geq \frac{I_e}{f \cdot \Delta V_e} \quad (\text{II.7})$$

Si $I_e = 5\text{A}$ et ΔV_e égale à 0.24 (2% de 12V) donc C_1 doit être supérieur ou égale à 2.7 mF. Dans ce mémoire C_1 est prise égale à 4.7mF.

II.4 Simulation du fonctionnement du hacheur série :

Une simulation sous le logiciel Simulink a été effectuée pour tester les performances du filtre calculer. Le schéma du hacheur simulé est représenté dans la figure suivante :

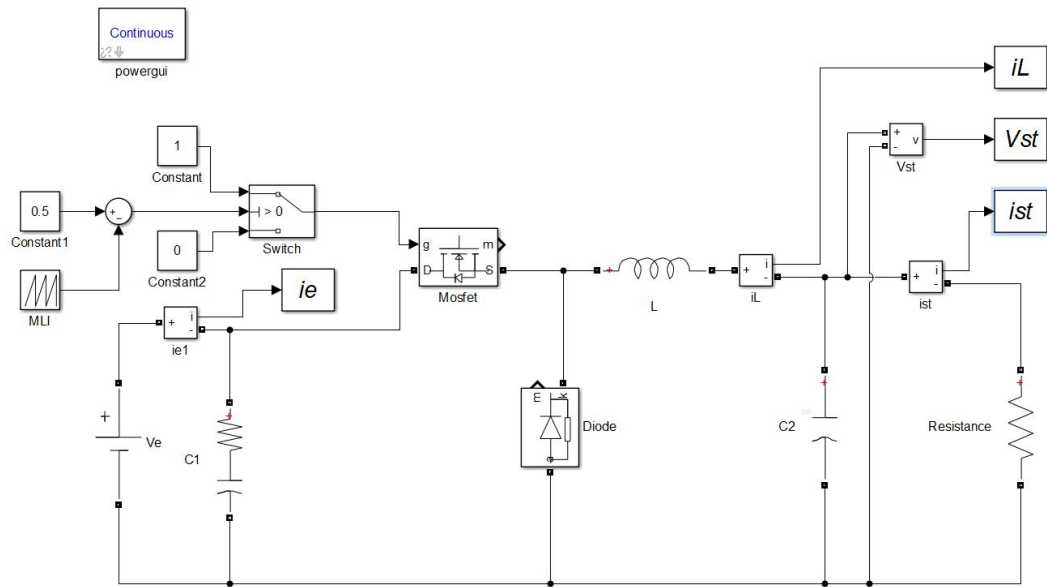


Figure II. 6 : Modèle de simulation du convertisseur série.

La figure II.7 montre la tension de sortie V_{st} à la sortie du hacheurabaisseur avec un zoom de la réponse temporelle à l'instant 0.6s. Le temps de réponse est de l'ordre de 0.002s et les ondulations en tension sont minimales ils sont de l'ordre de 0.18V.

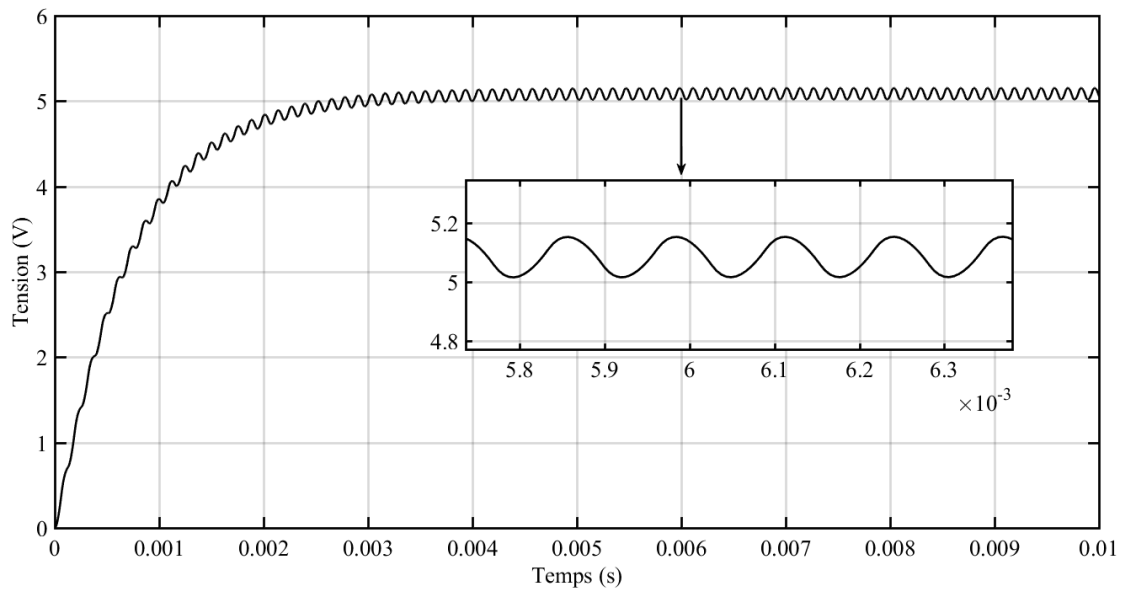
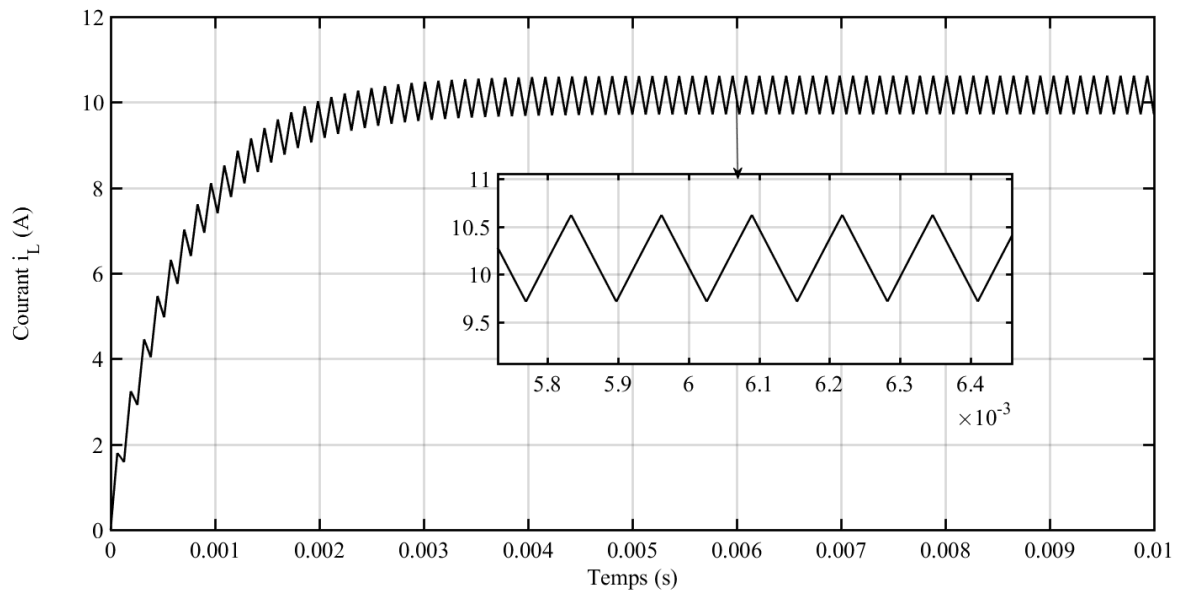


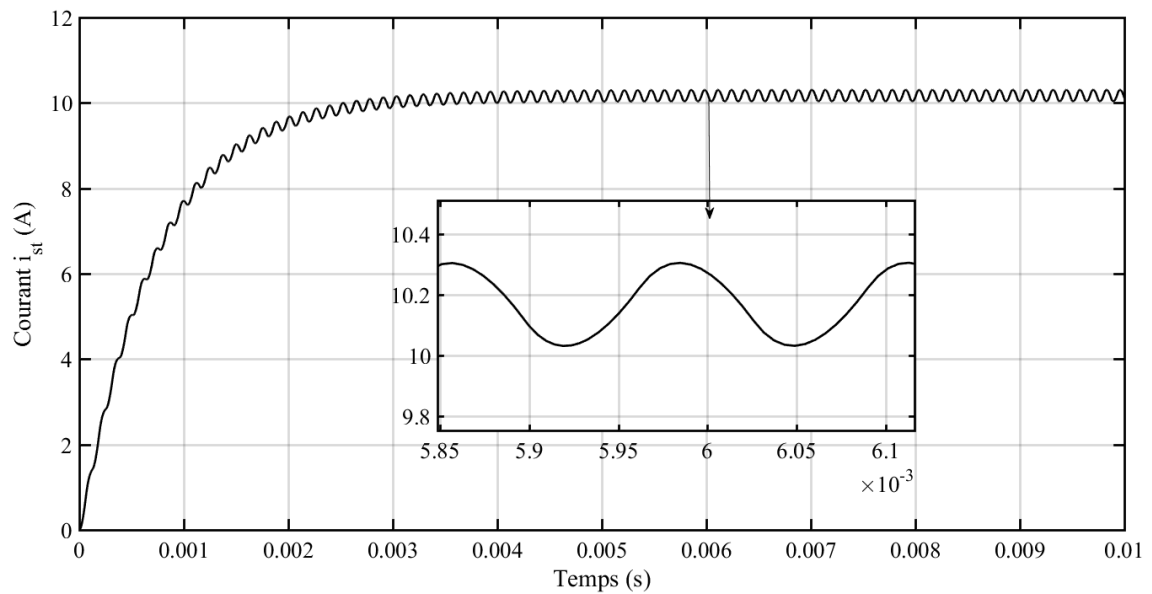
Figure II. 7 : Tension de sortie V_{st} avec un zoom a $t=0.6s$.

La figure II.8 : représente le courant i_L qui traverse l'inductance L avec un zoom de la réponse temporelle à l'instant 0.6s.

Le temps de réponse est de l'ordre de 0.002s et les ondulations du courant sont acceptables ils sont de l'ordre de 0.8A.

Figure II. 8 : Courant i_L avec un zoom a $t=0.6s$.

La figure II.9 : représente le courant i_{st} qui traverse la résistance variable avec un zoom de la réponse temporelle à l'instant 0.6s. Le temps de réponse est de l'ordre de 0.002s et les ondulations du courant sont diminuées à 0.3A.

Figure II. 9 : Courant i_{st} avec un zoom a $t=0.6s$.

II.5 Simulation de l'émulateur à pile à combustible de type PEMFC :

La simulation de l'émulateur à pile à combustible (Figure II.10) a été effectuée sous l'environnement Simulink. Le convertisseur série a une tension d'entrée de 12V et un courant de sortie nominale égale à 9A. L'émulateur proposé est constitué d'une pile à combustible de type PEM de 381

cellules mise en séries, un convertisseur série avec sa commande en tension. Pour rendre les grandeurs de l'émulateur simulé compatible avec les grandeurs du modèle de la PEMFC étudiée la tension qui sort du convertisseur série est multipliée par le calibre de tension inverse qui est égale à $(32.25=1/0.031)$.

La Figure II.10 : et pour augmenter le courant du convertisseur ce dernier est multiplié par un calibre de courant qui est égale à 35 A

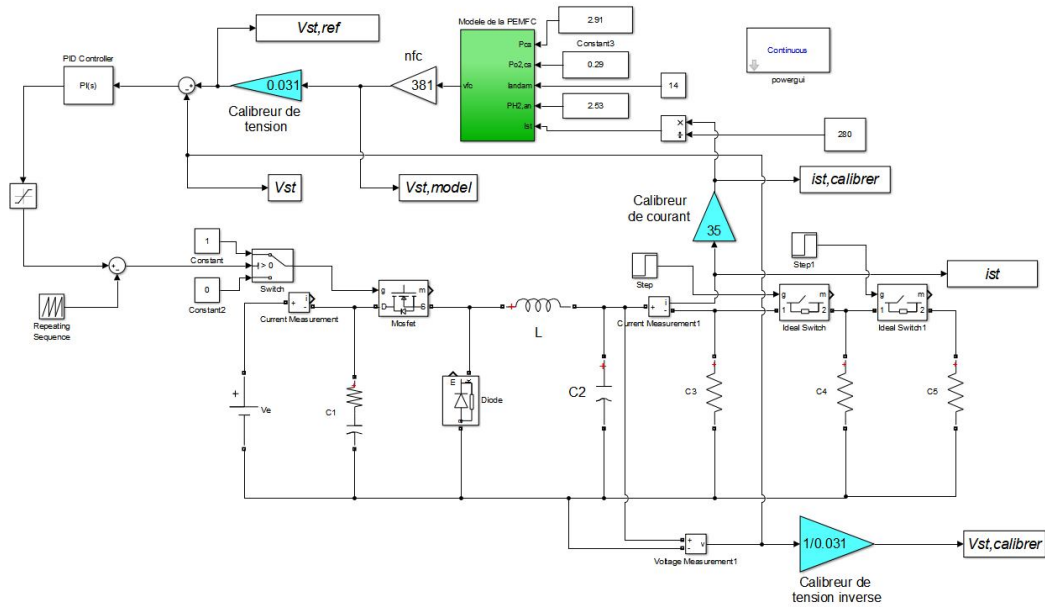


Figure II. 10 : Simulateur de l'émulateur de la PEMFC.

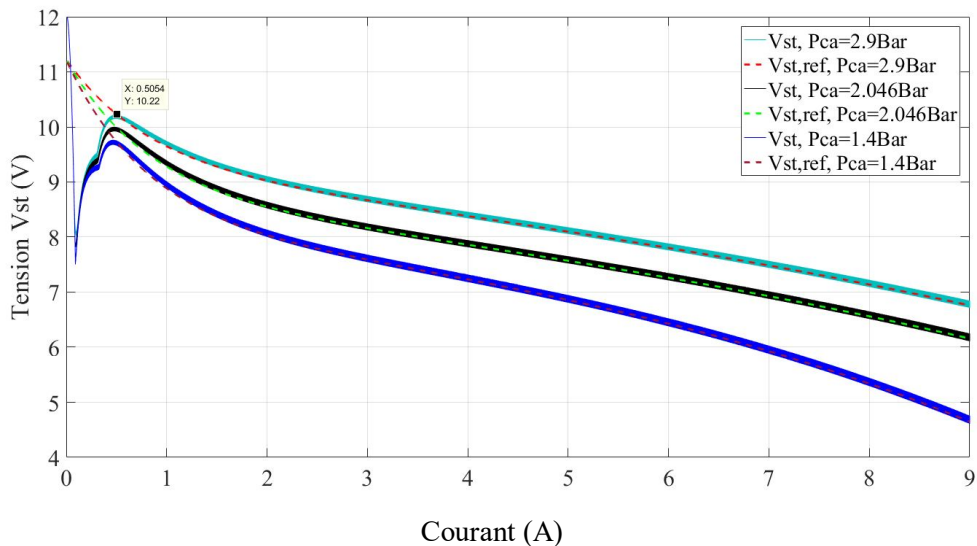


Figure II. 11 : Courbes de polarisations (tension-courant) de la PEMFC à la sortie du hacheur série V_{st} comparais avec celle de référence $V_{st,ref}$.

La figure II.11 : représente les courbes de polarisation tension-courant de la PEMFC pour une température égale à 80°C et pour trois pressions cathodiques qui sont (1.4Bar, 2.046 Bar et 2.9 Bar). Le résultat a montré que la sortie du convertisseur abaisseur reproduit avec une bonne précision la caractéristique statique du modèle de la pile à combustible calibrer en multipliant la sortie du modèle PEMFC par **(0.031)** et cela afin que les grandeurs du modèle de la pile à combustible (tension-courant) peuvent être superposées sur ceux du hacheur série.

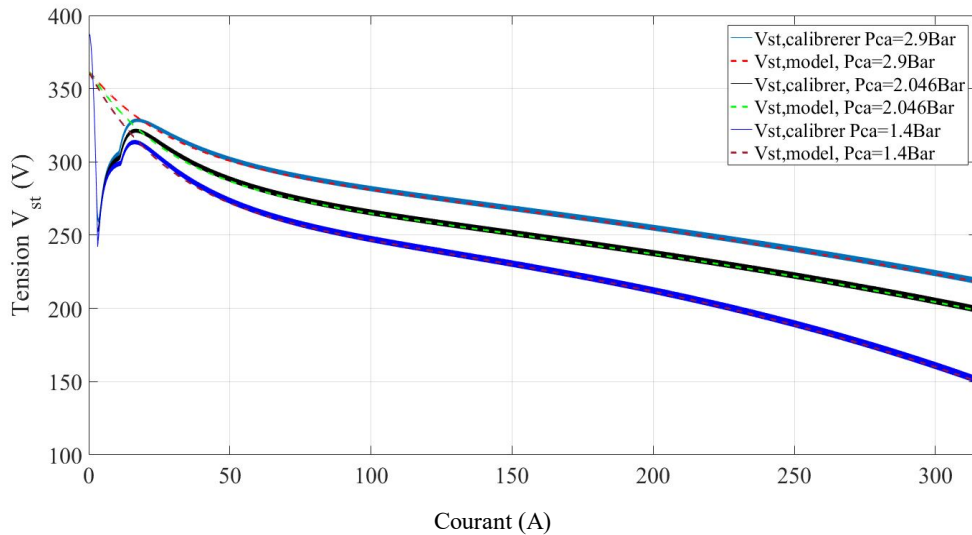


Figure II. 12 : Tensions $V_{st,model}$ et $V_{st,calibrer}$.

La figure (II. 13) : montre que les courbes de polarisations $V_{st,model} = f(i_{st-calibrer})$ sont presque superposées sur la courbe de polarisation à la sortie du hacheur $V_{st,calibrer} = f(i_{st-calibrer})$.

Il y a une légère différence au niveau de la partie des pertes d'activation qui est dû au phénomène de la charge de la capacité.

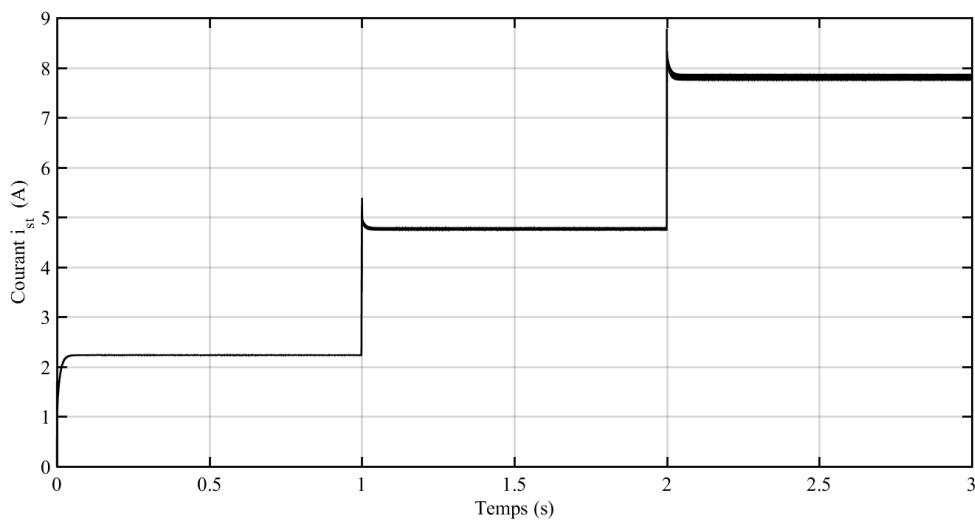


Figure II. 14 : Courant i_{st} du hacheur série.

La figure II. 15 : représente la variation du courant à la sortie du hacheur série (abaisseur).

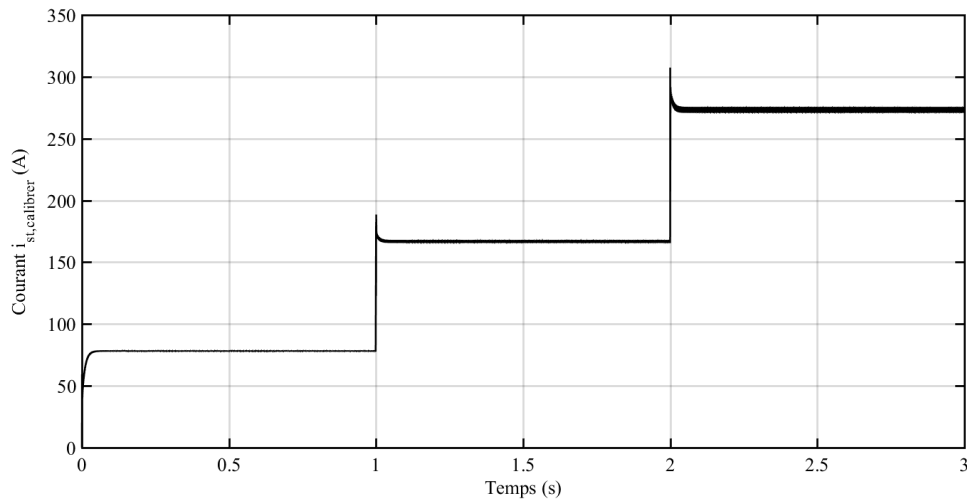


Figure II. 16 : Le courant $i_{st_calibre}$ du hacheur.

La figure II. 14 : illustre la variation du courant $i_{st_calibre}$, c'est le courant à la sortie du hacheur série multiplié par 35. La variation de la charge est assurée par une résistance variable.

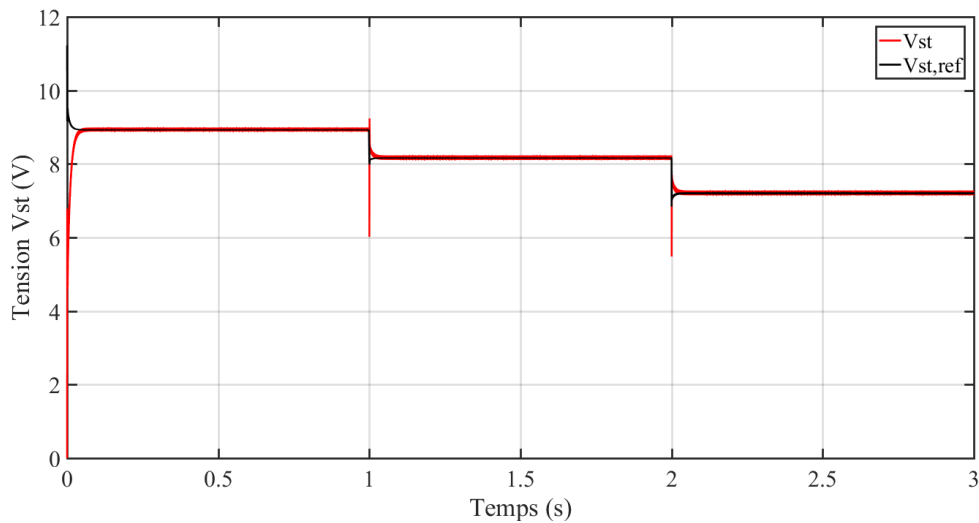


Figure II. 17 : La tension V_{st} , V_{st_ref} .

La figure II. 15 : représente une comparaison entre la variation dynamique de la tension V_{st} à la sortie du hacheur série et la tension de référence V_{st_ref} qui représente la tension à la sortie du modèle à « PàC » multiplié par 0.031. On voit que la tension à la sortie du hacheur suit très bien la tension de référence.

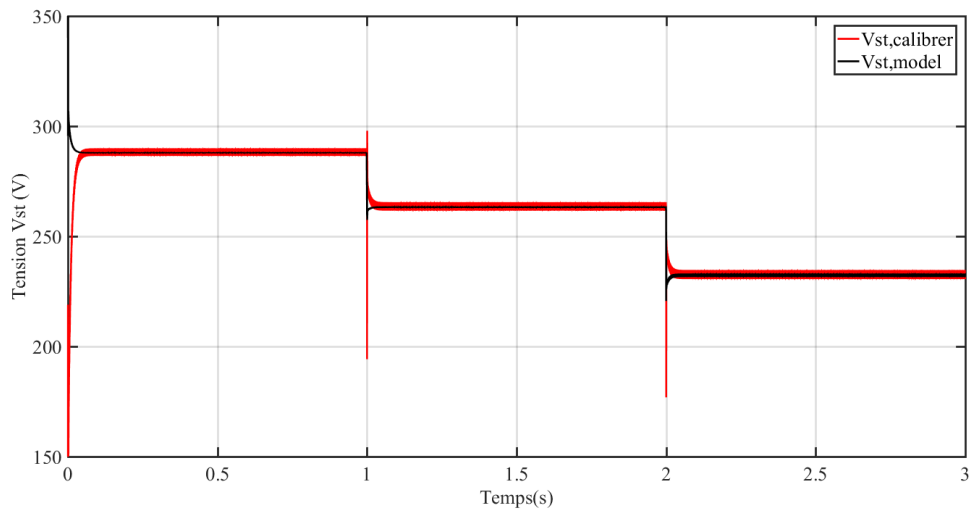


Figure II.16 : La tension $V_{st_calibrer}$ et V_{st_model} .

La figure II. 16 représente une comparaison entre la tension $V_{st_calibrer}$ calibré obtenu à partir de la tension à la sortie du hacheur abaisseur de 0.031 et la tension à la sortie du modèle à pile à combustible V_{st_modele} . On voit que la tension $V_{st_calibrer}$ suit très bien la tension V_{st_modele} .

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une commande linéaire en utilisant un régulateur PI (Proportionnel Intégrale), ce dernier permet de contrôler le convertisseur abaisseur pour simuler un émulateur à pile à combustible de type PEMFC. En plus nous avons effectué le dimensionnement des composant « LC » du filtre de sortie du hacheur abaisseur. Des simulations ont été effectuées afin de tester la faisabilité de notre émulateur et les résultats trouvés sont satisfaisantes.

Chapitre III :

Conception d'un émulateur à pile à combustible

III. Introduction :

Ce chapitre est dédié à la conception d'un émulateur à pile à combustible de type PEM. Le principe de ce dernier est de reproduire les caractéristiques statique et dynamique trouvées dans le chapitre II en utilisant un convertisseur série, une carte Arduino méga, un logiciel de programmation un capteur de tension et un capteur de courant.

En plus nous décrivons en détaille les différents circuits conçu tels que, le circuit de commande rapprochée et le circuit de puissance du convertisseur série.

Les résultats trouvés sont illustrés à la fin de ce chapitre afin de tester les performances de l'émulateur conçu.

III.1 Raisons d'émuler un système énergétique renouvelable :

L'analyse des énergies renouvelables au laboratoire, comme les piles à combustible et les cellules photovoltaïques restent un défi.

Les raisons principales qui justifient l'utilisation d'un émulateur sont :

- Le coût élevé d'une installation du système complet.
- l'espace excessif exigé des auxiliaires.
- la gestion de tout le système : le temps de démarrage et les contraintes de la sûreté et les conditions environnementales.

Pour ces raisons, le coût global pour un système complet est prohibitif pour beaucoup d'Instituts de formation et pour des petites entreprises intéressées par la recherche relative aux énergies renouvelables [1,2, 22-24].

Les simulateurs sont devenus indispensables pour les activités de recherche et de développement et permettent de fournir la flexibilité et l'aide nécessaire durant la phase des essais de divers sous-systèmes.

Les émulateurs sous la forme des plates-formes hybrides matérielles-logicielles sont capables de copier le comportement des systèmes physiques, donc ils peuvent être utilisés au lieu et place du vrai équipement.

On s'attend à ce que les émulateurs à piles à combustible jouent à l'avenir un rôle principal dans le développement de l'électronique de puissance des piles à combustibles, car ils représentent une solution peu coûteuse permettant de reproduire les caractéristiques statiques et dynamiques des piles à combustibles.

En fait, les essais sur une pile à combustible réelle pour la conception et la commande des convertisseurs de l'électronique de puissance tout comme l'optimisation, le diagnostic et l'estimation des paramètres de la pile à combustible ne sont pas toujours facile.

L'émulateur d'une pile à combustible peut être employé pour les buts suivants [1,2]:

- Plusieurs essais peuvent être accomplis avec l'émulateur, avant l'utilisation de la vraie pile à combustible, en tenant compte de la réduction des coûts et de l'optimisation de l'énergie. En fait, l'émulateur représente seulement une fraction de coût de la vraie pile à combustible.
- En raison du prix élevé et la complexité opérationnelle de la pile à combustible, les chercheurs rencontrent des difficultés à développer les systèmes des convertisseurs statiques appropriés, qui se composent d'un hacheur élévateur et d'un hacheur bidirectionnel ou onduleur selon le type de charge qu'il doit alimenter. Avec ce problème, et jusqu'ici, beaucoup de convertisseurs statiques ont été développés et testés avec une source à courant continu constante et non pas avec la vraie pile à combustible. Par conséquent, vu les caractéristiques (V-I) non linéaires de la pile à combustible, les performances et la dynamique réelle des convertisseurs statiques ne peuvent pas être examinées. L'émulateur de la pile à combustible représente une solution qui permet à un système de génération à pile à combustible d'être développé sans l'utilisation d'une pile à combustible réelle : ce qui est recherché pour la première étape de développement.
- La possibilité de développer des technologies synergétiques en même temps.
- La possibilité de développer le système sans utiliser l'hydrogène, qui présente quelques soucis de sûreté et de coût élevé. Par conséquent ces derniers diminuent avec une utilisation limitée de la pile à combustible et la réduction de la consommation d'hydrogène.
- La possibilité de simuler un scénario, d'étudier et évaluer ce qui devrait être attendu de la pile à combustible dans le marché.
- La possibilité de réduire les auxiliaires exigés (réservoirs, pompes, régulateur de pression, etc.) pour le fonctionnement d'une pile à combustible et donc du coût et de l'espace associés excessifs.
- La possibilité de développer l'émulateur pour d'autres modèles de la pile à combustible en changeant seulement le modèle mathématique (logiciel).
- La possibilité de développer l'émulateur pour d'autres tailles et arrangements des piles à combustibles en changeant seulement un seul paramètre.
- La possibilité de connaître les conditions de l'alimentation en hydrogène, les conditions environnementales et les effets secondaires à l'échelle microscopique.

III.2 Description du banc expérimental :

Les composants de notre émulateur à pile à combustible et de l'installation expérimentale sont décrits dans cette section. Le circuit conçu est basé sur le circuit simplifié représenté sur la (figure III.1).

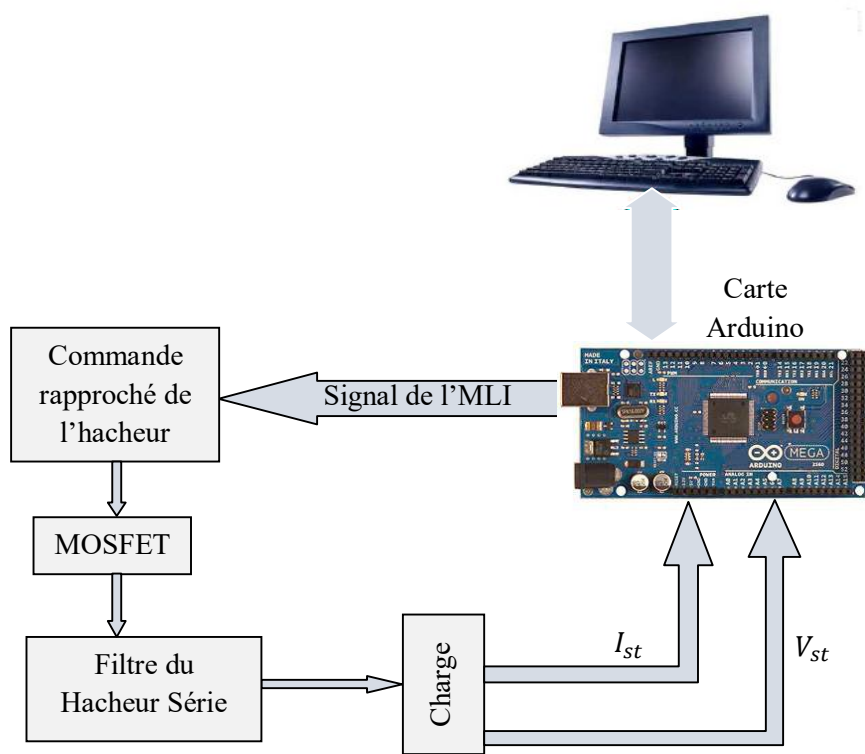


Figure III. 1 : Schéma synoptique du matériel de l'émulateur à pile à combustible.

La tension d'entrée qui est fixée à 12V de l'hacheur série est obtenue en utilisant une alimentation à découpage à courant continu de 12V.

La (figure III.1) montre que le signal de l'MLI à la sortie de l'Arduino est utilisé par le circuit de la commande rapproché pour commander l'IGBT de l'hacheur série.

La tension et le courant de sortie de l'hacheur sont acquis à l'entrée des convertisseurs Analogiques/numériques de la carte Arduino méga. Ces entrées travaillent entre 0 et 5 V.

Les signaux de sortie de l'hacheur transmis vers la carte Arduino sont utilisés pour le contrôle. En effet les lois de contrôles de l'hacheur et le modèle mathématique de la pile PEM sont implémentés

Dans la mémoire de la carte Arduino, le matériel est bouclé par le signal de l'MLI qui est généré par la sortie du l'MLI de la carte Arduino.

III.3 Logiciel utilisée pour la programmation de la carte Arduino méga :

Dans notre cas on a commandé le hacheur abaisseur en utilisant la carte Arduino Mega et le logiciel support package for arduinohardword (figure III.2) téléchargeable et intégrable avec MATLAB/SIMULINK.

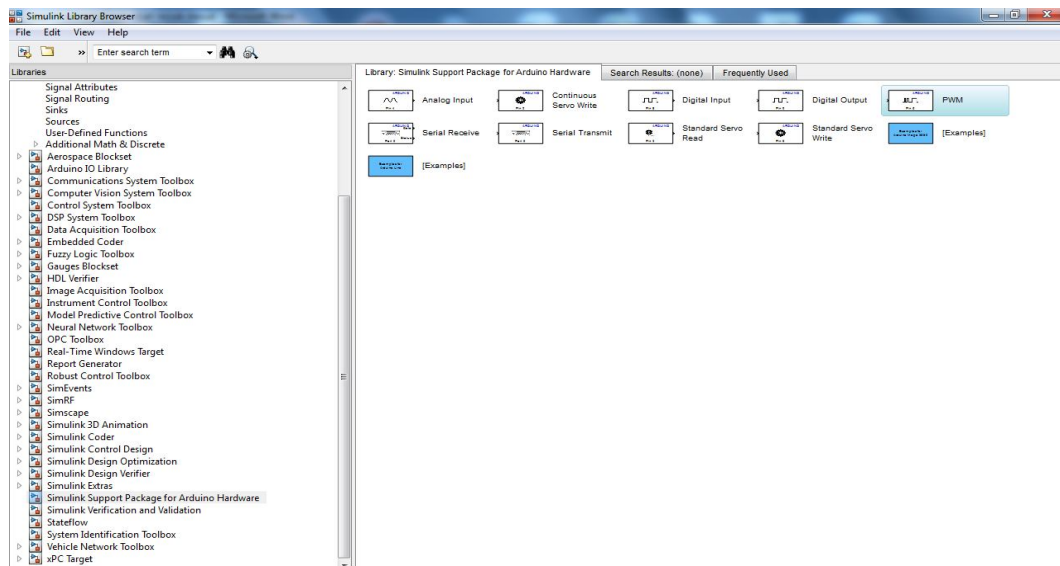


Figure III. 2 : La bibliothèque Simulink << support package for arduinohardword >>.

III.4 La carte Arduino Mega:

La carte Arduino Mega 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega2560 ([fiche technique](#)).



Figure III. 3 : Carte Arduino "Méga"

Cette carte dispose:

- de 54 broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- de 4 UART (port série matériel),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),

- et d'un bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur; Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

La carte Arduino Mega 2560 est compatible avec les circuits imprimés prévus pour les cartes Arduino Uno, Duemilanove ou Diecimila.

Tableau III. 1 : Synthèse des caractéristiques Arduino.

Microcontrôleur	ATmega2560
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	54 (dont 14 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	16 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	256 KB dont 8 KB sont utilisés par le bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	8 KB
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	4 KB
Vitesse d'horloge	16 MHz

III.5 Conception du hacheur série :

Dans la pratique le hacheur série est composé de deux circuits : un circuit de puissance et un circuit de commande rapprochée qui joue le rôle d'interface entre le circuit de puissance et la carte arduinoMega.

III.5.1 Conception de la carte de commande rapprochée :

Les signaux générés à la sortie de la carte ArduinoMega sont trop faibles pour être exploités directement par le circuit de puissance (risque de destruction de la carte Arduino). Ces signaux sont donc isolés par l'optocoupleur et amplifiés par le LM324. Après la sortie est reliée à la MSFET du convertisseur série.

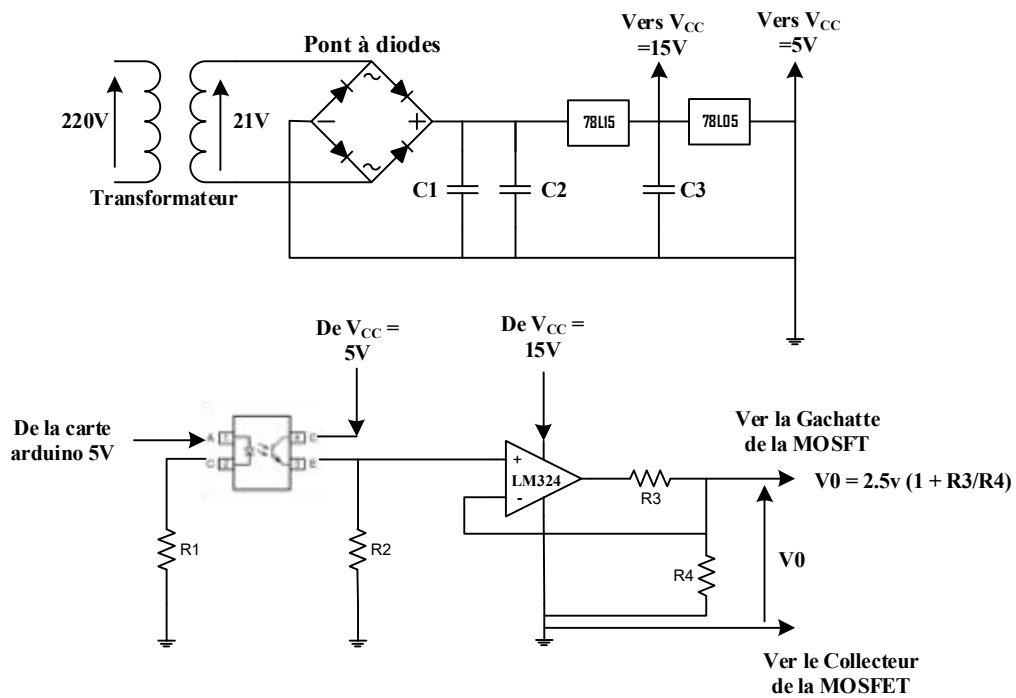


Figure III. 4 : Schéma électronique du circuit de commande rapprochée.

Le circuit d'alimentation du circuit de commande rapprochée est composé par un régulateur de type 7805 pour alimenter l'optocoupleur et un régulateur de type 7815 afin d'alimenter l'amplificateur LM324.

Les valeurs des résistances et des capacités sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 1 : Valeur des capacités et des résistances du circuit de commande rapprochée.

C1	C2	C3	R1	R2	R3	R4
470 F	0.22 F	0.1 F	50Ω	100Ω	10 k Ω	20 k Ω

III.5.1.a Optocoupleur :

Un optocoupleur est un composant ou un ensemble de composants qui permet le transfert d'informations entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre d'un point de vue électrique. La première partie est un émetteur, et la seconde partie est un récepteur. On a utilisé un optocoupleur pour isoler électriquement deux parties électroniques ou électriques entre elles (on parle d'isolation galvanique).

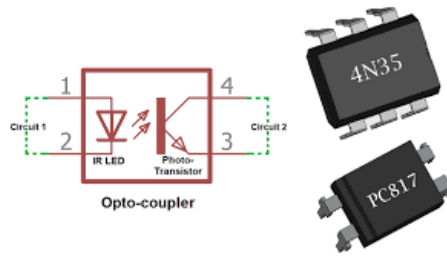


Figure III. 5 : Optocoupleur PC815 et 4N35.

Dans ce mémoire l'optocoupleur de type PC815 a été utilisé avec 1 : anode, 2 : cathode, 3 : émetteur, 4 : collecteur.

III.5.1.b Amplificateurs opérationnels quadruples LM324 et LM324A :

Les amplificateurs opérationnels quadruples LM324/324A, sont utiles dans une vaste gamme d'applications de mise en forme des signaux.

Les AOP LM324 et LM324A sont constitués de quatre amplificateurs opérationnels indépendants compensés à fréquence avec un gain élevé. Ils sont spécifiquement conçus pour fonctionner à partir d'une alimentation simple sur une vaste plage de tensions. Un fonctionnement à partir d'alimentations symétriques est également possible si la différence entre les deux alimentations est comprise entre 3 V et 32 V et que VCC est au moins 1,5 V plus positive que la tension de mode commun en entrée. Le faible courant absorbé est indépendant de l'amplitude de la tension d'alimentation.

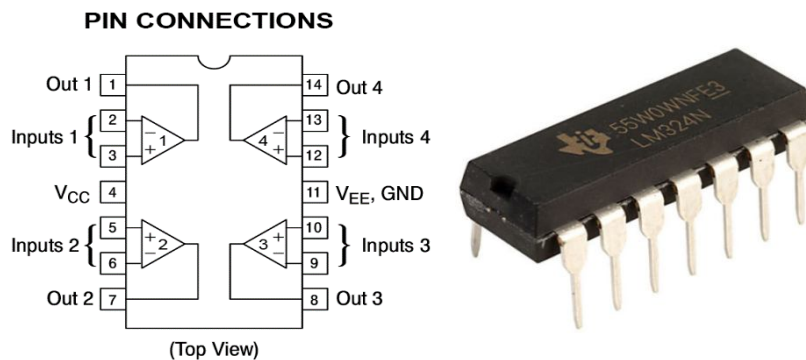


Figure III. 6 : Les pattes du LM324.

La figure III.7 : représente la partie commande réalisée au niveau de l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelable à Ghardaïa. Elle est composée d'une carte Arduino Méga et d'un circuit de commande rapproché.

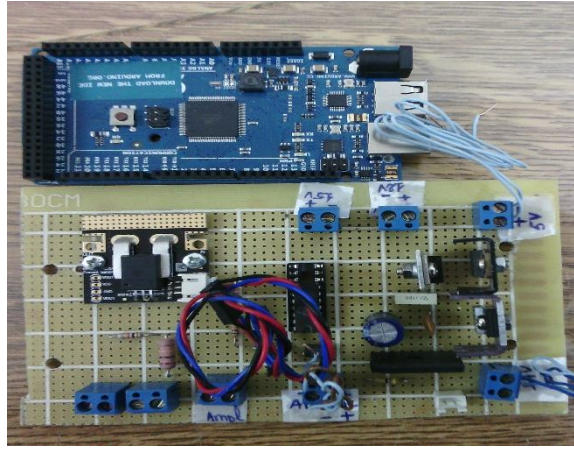


Figure III. 7 : Photo de la partie Commande réalisé du convertisseur AC-DC et DC-DC.

On peut voir aussi la partie mesure composée d'un capteur de courant de type et un diviseur de tension réalisé en utilisant deux résistances.

III.5.2 Conception de la carte de puissance :

Comme vue dans le chapitre précédent la partie puissance de l'hacheur série est composée d'une MSFET, d'une diode rapide, d'une bobine et d'une capacité plus les connexions qui relient ces différents composants entre eux.

III.5.2.a Dimensionnement et choix des composants :

Le dimensionnement et le choix de ces composants est fondé sur un cahier de charge prédéterminé qui sont :

La fréquence de travail fixée à $F (=1/T=7800 \text{ Hz})$, la tension de sortie max est égale à 12 V et le courant max égale à 9A comme vue dans le chapitre II.

1. Inductance :

Pour l'inductance sa valeur est calculée dans le chapitre II elle est égal à 0.42 mH. La section du fil de l'inductance doit être choisi pour supporter un courant max égale à

$$I_{Lmax} = I_{st} + \Delta i_{Lmax} \quad (\text{III.1})$$

2. Condensateur de sortie :

La valeur de la capacité est calculée au chapitre II elle est égale à 100 F. Elle doit aussi supportée la tension maximale à la sortie du hacheur donc la tension nominale du condensateur choisi dans ce travail est égale à 25 V.

3. La diode :

Si cela est possible, on préférera une diode shottky dont la chute à l'état passant est faible pour minimiser les pertes en conduction. Son choix se fait en fonction du courant $I_{crête}$, du courant I_{moyen} susceptible de le traverser et de la tension inverse V_R supportée [23,25],

avec :

$$V_R = V_e = 12V. \quad (III.2)$$

$$I_{dmax} = I_{Lmax} \text{ soit : } I_{dmax} = I_{st} + \Delta i_{Lmax} = 9 + 0.4 \text{ A} = 9.4 \text{ A.}$$

$$I_{dmojen} = (1-\delta) \cdot I_{st}$$

4. Interrupteur MOSFET :

Son dimensionnement se fait en fonction du courant I_{qmax} crête susceptible de le traverser et de la tension drain source $V_{ds,max}$ à supporter [24,25].

$$I_{qmax} = I_{Lmax} = I_{st} + \Delta i_{Lmax} = 9 + 0.4 \text{ A} = 9.4 \text{ A.} \quad (III.3)$$

$$V_{ds,max} = V_e = 12 \text{ V.}$$

On prendra naturellement une marge de sécurité.

Remarque :

On choisit la mosfet de type IRF54 et un diode de type byt30 ,ouavoire annexes 1,2

La figure III.8 : représente une photo du hacheur abaisseur réalisé au niveau de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables à Ghardaïa. Le circuit représenté dans la figure III.8 est utilisé dans l'émulateur de notre pile à combustible de type PEMFC.

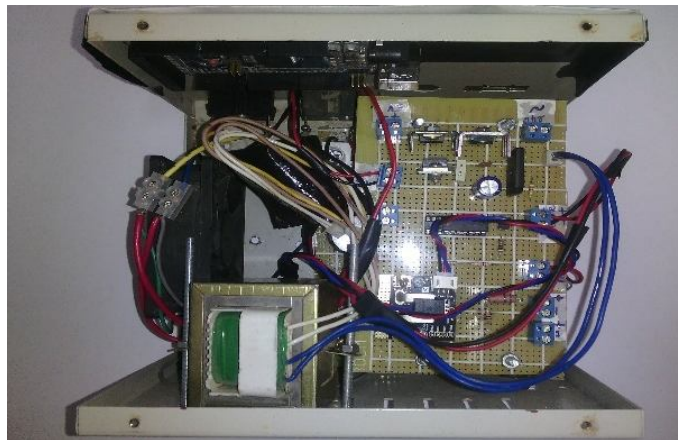


Figure III. 8 : Photo du hacheur abaisseur réalisé.

III.6 Les résultats expérimentaux :

Notre modèle est constitué d'une pile à combustible PEMFC de 381 cellules, la (figure I.7) montre que la tension de la pile à combustible est entre 0 et 381 V. en plus le courant max qui peut être fournie par la PAC est entre 0 et 315 A, notre émulateur à pile à combustible (hacheur abaisseur) a une tension moyenne de sortie qui va de 0 à 12V et un courant de sortie qui va de 0 à 9A.

Pour cette raison et pour rendre les grandeurs de notre émulateur compatible avec les grandeurs du modèle simulé on a multiplié la tension qui sort de convertisseur ADC par un gain de **32.25** et pour augmenter le courant on a multiplié ce dernier par **35**.

Dans notre travail on a émulé la caractéristique courant-tension aux bornes de stack pour une température de 80°C et des pressions variable 1,2 et 3 bars.

Le diagramme de la figure III.7représente les tensions à la sortie de l'hacheurabaisseur. On a émulé pour 3 pressions cathodiques différentes 1,2 et 3 bars, pour chaque pression on a effectué trois essais, pour une résistance qui varie entre 325Ω à 15Ω.

La (figures III.7) représente bien l'influence des pressions sur la tension de sortie de la pile à combustible donc on remarque que si on augmente la pression la tension de la pile à combustible augmente.

On remarque aussi que la tension de la pile à combustible chute en passant d'un courant faible à un fort courant, ce qui explique le non linéarité de notre source de tension (la pile à combustible). Donc on peut compenser la chute de tension de la pile à combustible en augmentant la pression des réactifs.

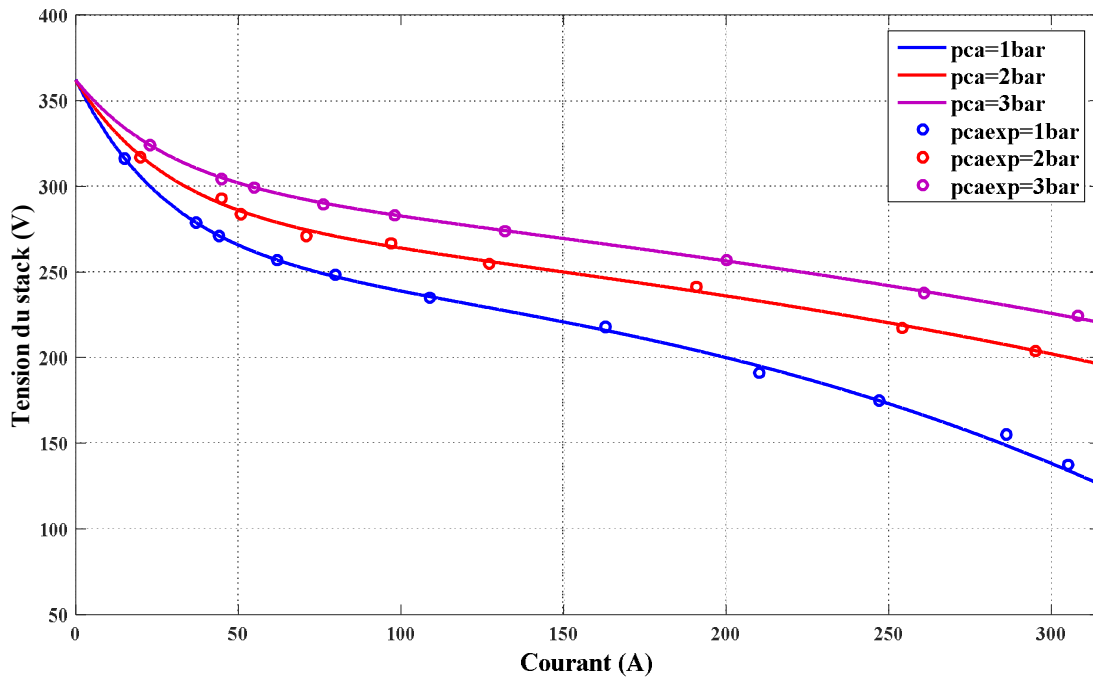


Figure III. 9 : Superposition des caractéristiques courant-tension simulées et émulées pour une température de 80°C et des pressions cathodiques variables.

Les figures III.7. montre aussi une comparaison entre les résultats simulé en trait plein et les résultats émulé en points pour différentes valeurs de la pression cathodique, on remarque que les résultats simulés et émulés sont presque confondus pour les trois pressions, donc le hacheur à quatre quadrants peut émuler la caractéristique non linéaire courant-tension de la pile à combustible.

Les valeurs expérimentales de l'émulateur à pile à combustible sont résumées dans les tableaux suivants :

Tableau III. 2: Tension du stack émulé de la pile à combustible pour $p_{ca} = 1\text{bar}$.

R (Ω)	I mesuré (A)	V mesuré (V)	I émulé (A)	V émulé (V)
325	0,8	9,36	15	317
165	1,6	8,4	37	293
136	1,8	8,16	44	284
96	2	7,76	62	271
76	2,4	7,28	80	267
55	2,8	6,88	109	255
36	4,4	6,48	163	242
26	6	5,92	210	217
21	6,4	5,52	247	204
17	7,2	4,72	286	190
11	8	4	305	173

Tableau III. 3 : Tension du stack émulé de la pile à combustible pour $p_{ca} = 2\text{bar}$.

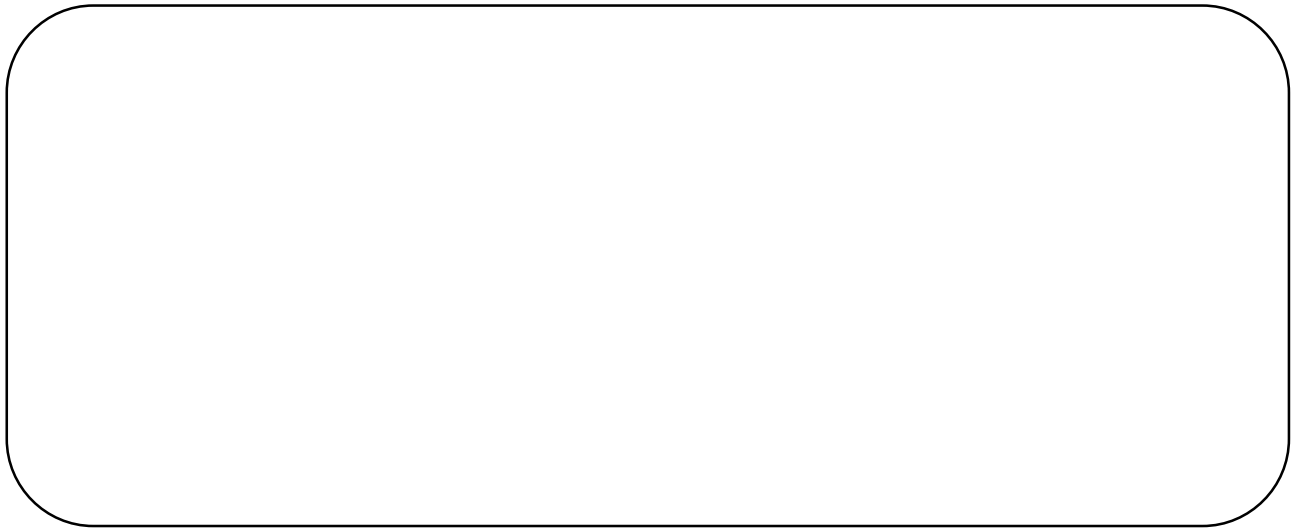
R (Ω)	I mesuré (A)	V mesuré (V)	I émulé (A)	V émulé (V)
325	0,8	9,36	20	317
160	2	8,72	45	293
136	2,2	8,48	51	284
96	2,4	8,32	71	271
76	2,8	8	91	267
55	3,6	7,68	127	255
36	4,8	7,52	191	242
26	6,4	6,8	254	217
21	7,6	6,4	295	204

Tableau III. 4 : Tension du stack émulé de la pile à combustible pour $p_{ca} = 3\text{bar}$.

R (Ω)	I mesuré (A)	V mesuré (V)	I émulé (A)	V émulé (V)
325	0,8	9,36	23	324
160	2	9,2	45	304
136	2,2	9,12	55	299
96	2,4	8,88	76	289
76	2,8	8,56	98	283
55	4	8,16	132	274
36	5,2	7,68	200	257
26	6,8	7,2	261	238
21	8	6,8	308	224

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a conçu un émulateur de pile à combustible et exposé dans une première partie les raisons d'émuler un système énergétique renouvelable (pile à combustible de type PEM dans notre mémoire) Nous avons ensuite donné un descriptif général de notre émulateur de pile à combustible, vu en détail les différents composants de notre émulateur et terminé par des résultats expérimentaux. En conclusion on peut confirmer que le convertisseur statique de type CC-CC (hacheur quatre quadrants dans notre cas) peut émuler la caractéristique non linéaire courant-tension à la sortie de la pile à combustible donc on peut utiliser notre émulateur à la place de la pile à combustible réelle.



CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire on relève l'intérêt et l'objectif d'un émulateur à pile à combustible de type PEMFC pour étudier le comportement ainsi que le contrôle des différentes grandeurs d'une pile à combustible.

Dans le 1^{er} chapitre, la modélisation d'une pile à combustible et une description générale des différents types de pàc, leurs applications et leurs études comparatives nous ont permis de déduire que la pile à combustible de type PEMFC est la plus utilisée, parce qu'elle présente l'avantage d'avoir un temps de réponse très rapide, un rendement électrique très élevé et une faible température de fonctionnement. Pour ces raisons notre choix s'est orienté sur la modélisation d'une pile à combustible de type PEMFC.

Il présente un modèle de la tension de sortie d'un stack à pile à combustible qui contient une équation pour calculer la tension du stack pour un ensemble de conditions de marche (pression, température, pression partielle.)

Le deuxième chapitre, la simulation d'un émulateur de notre modèle à pile à combustible par l'utilisation d'un convertisseur statique à courant continu nous a mené à conclure que ce convertisseur peut reproduire les mêmes caractéristiques que celles d'un stack à pile à combustible.

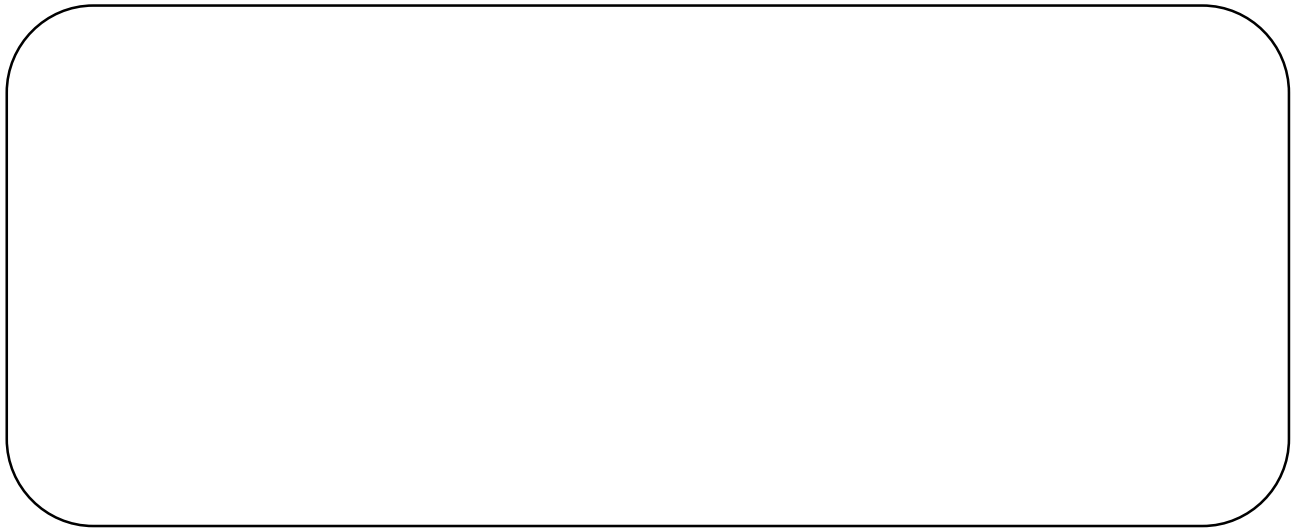
La simulation de notre modèle pour des pressions constantes à température variable nous a permis de constater que la tension du stack croît aussi en fonction de l'augmentation de la température de la pile à combustible : raison pour laquelle nous avons fixé la température de notre pile à 80°C.

Pour le bon fonctionnement de notre pile à combustible un système d'auxiliaires est indispensable.

Dans le troisième chapitre, la conception de l'émulateur de notre modèle à pile à combustible par utilisation d'un convertisseur statique à courant continu nous a mené à conclure que ce convertisseur peut reproduire les mêmes caractéristiques que celles d'un stack à pile à combustible.

Perspectives de notre travail :

- Faire un modèle de tout le système à pile à combustible en tenant compte du modèle thermique (changement de la température).
- Développer notre modèle pour d'autres types de pile à combustible comme : AFC, SOFC, MCFC, etc.
- Comparer nos résultats avec des résultats d'une pile à combustible réelle.
- Ajouter d'autres sources de tension pour aider la pile à combustible à fonctionner correctement en cas de charges critiques en ajoutant des batteries et des supra condensateurs.



LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. REZZAK, «Modélisation et réalisation d'un émulateur de système à piles à combustibles », Mémoire de Magister, Ecole militaire polytechnique, 2011.
- [2] Giuseppe Marsala, «Modelling and Implementation of an Emulator for Fuel Cell Systems Development of Control Strategies and Laws». Thèse de DOCTORAT d'UT, Belfort-Montbéliard.
- [3] D. REZZAK, «Application d'une pile à combustible de type PEM (proton exchange membrane) dans la traction électrique automobile», Thèse de DOCTORAT de l'université de Jijel (2017).
- [4] D. Rezzak, N. Boudjerda «Management and control strategy of a hybrid energy source fuel cell/supercapacitor in electric vehicles». Int Trans ElectrEnergy Syst 2017;27:1e17.
- [5] D. Rezzak, N. Boudjerda, «Robust energy management strategy based on non-linear cascade control of fuel cells-super capacitors hybrid power system», International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45 no. 43, 2020, Doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.250.
- [6] A.J. Appleby and F.R. Foulkes. «Fuel Cell Handbook». Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- [7] Jay TaweePukrushpan, «Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors»Thèse de DOCTORAT, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 2003.
- [8] J.A. Adams, W-C Yang, K.A. Oglesby, and K.D. Osborne, «The development of Ford's P2000 fuel cell vehicle». SAE Paper 2000-01-1061.
- [9] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, and P.R. Roberge, «Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell». Journal of Electrochemical Society, 142(1):9–15, 1995.
- [10] L. Guzzella. «Control oriented modelling of fuel-cell based vehicles». Presentation in NSF Workshop on the Integration of Modeling and Control for Automotive Systems, 1999.
- [11] James Larminie and Andrew Dicks. «Fuel Cell Systems Explained». John Wiley & Sons Inc, West Sussex, England, 2000.
- [12] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou and H. Peng, «Control of Fuel Cell Breathing,» IEEE Control System Magazines, Vol.24, No.2, pp. 30-46, April 2004.
- [13] ArdalanVahidi, AnnaStefanopoulou, Huei Peng, «Current Management in a Hybrid Fuel Cell Power System: A Model Predictive Control Approach» NSF 0201332 and the Automotive Research Center (ARC) under U.S. Army contract DAAE07-98-3-0022.
- [14] Jay T. Pukrushpan, Huei Peng, Anna G. Stefanopoulou, «Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems»Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 126MARCH 2004.
- [15] J. T. Pukrushpan, H. Peng and A. G. Stefanopoulou, «Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model», in Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2002, pp. 1-12.

- [16] Kyung-Won Suh and Anna G. Stefanopoulou «Performance Limitations of Air Flow Control in Power-Autonomous Fuel Cell Systems» IEEE Transactions on Control Systems Technology, VOL. 15, NO. 3, MAY 2007.
- [17] Yiyao A. Chang and Scott J. Moura «Air Flow Control in Fuel Cell Systems: An Extremum Seeking Approach»,IEEE,2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA June 10-12, 2009.
- [18] G.Seguirier.« les convertisseurs de l'électronique de puissance : la conversion continu-continu. Tome 2 »Technique et documentation.
- [19] D. Rezzak, F. Khoucha, MEH Benbouzid, A Kheloui , « Real time emulator of a PEM fuel cell system», International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications-EFEEA'10.
- [20]D.Rezzak, F. Khoucha, MEH Benbouzid, A. Kheloui, A. Mamoune, «A DC-DC converter-based PEM fuel cell system emulator», 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.
- [21] D. Rezzak, K. Touafek, N. Boudjerda, A. Sitayeb, Y. Houam , « Conception and regulation of Battery Charging Using PI Controller», Volume 15, Special issue 2016, 4ème ConférenceInternationale des Energies Renouvelables (CIER-2016). EPET Journal.
- [22] G. Marsala, D. Bouquin, J.T. Pukrushpan, M.Pucci, G.Cirrincione, G. Vitale, A. Miraoui. «A Neural Inverse Control of a PEM-FC System by the Generalized Mapping Regressor (GMR)». 2008 IEEE, 978-1-4244-2279-1/08.
- [23] M. Cirrincione, M. C. Di Piazza, G. Marsala, M. Pucci, G. Vitale, «Real Time Simulation of Renewable Sources by Model-Based Control of DC-DC Converters », ISIE 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK.
- [24] G. Marsala, M. Pucci, G. Vitale, M. Cirrincione, A. Miraoui, , «A prototype of a fuel cell PEM emulator based on a buck converter », Applied Energy, Volume 86, Issue 10, 2009, Pages 2192-2203, ISSN.
- [25]DIMENSION .MILLIMETERSInches. Min,typemaxe.

Annexes

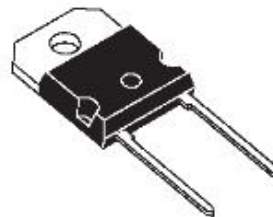


BYT 30P-1000

FAST RECOVERY RECTIFIER DIODE

- VERY HIGH REVERSE VOLTAGE CAPABILITY
- VERY LOW REVERSE RECOVERY TIME
- VERY LOW SWITCHING LOSSES
- LOW NOISE TURN-OFF SWITCHING

Cathode connected to case



SOD93
(Plastic)

SUITABLE APPLICATIONS

- FREE WHEELING DIODE IN CONVERTERS AND MOTOR CONTROL CIRCUITS
- RECTIFIER IN S.M.P.S.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

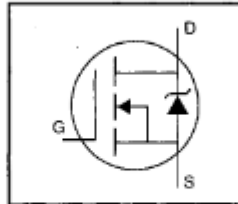
Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{RRM}	Repetitive Peak Reverse Voltage	1000	V
V_{RSM}	Non Repetitive Peak Reverse Voltage	1000	V
I_{FRM}	Repetitive Peak Forward Current	$t_p \leq 10\mu s$	A
$I_{F(RMS)}$	RMS Forward Current	70	A
$I_{F(AV)}$	Average Forward Current	$T_c = 85^\circ C$ $\delta = 0.5$	A
I_{FSM}	Surge non Repetitive Forward Current	$t_p = 10ms$ Sinusoidal	A
P	Power Dissipation	$T_c = 85^\circ C$	W
T_{stg} T_J	Storage and Junction Temperature Range	- 40 to +150 - 40 to +150	$^\circ C$

THERMAL RESISTANCE

Symbol	Parameter	Value	Unit
$R_{th(j-c)}$	Junction-case	1	$^\circ C/W$

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Isolated Central Mounting Hole
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements

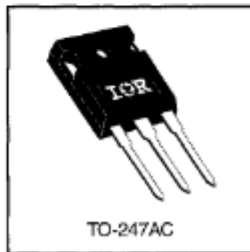


$V_{DSS} = 60V$
$R_{DS(on)} = 0.028\Omega$
$I_D = 57A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	57	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	40	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	230	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	180	W
	Linear Derating Factor	1.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	53	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	4.5	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
T_{STG}			
		Soldering Temperature, for 10 seconds	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1 N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.83	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	