



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

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Réseaux Electrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**BENDIB SAIDA**

Le : dimanche 24 juin 2018

## Etude et validation d'un émulateur pile à combustible type PEMFC

---

### Jury :

Mme. ABDDEIM SABRINA	MCA Université de Biskra	Président
Dr. SAADI RAMZI	MCB Université de Biskra	Encadreur
Mme. HADRI-HAMIDA AMEL	MCA Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2017 - 2018

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



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

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

**MASTER**

*Thème*

... **Etude et validation d'un émulateur pile à combustible type  
PEMFC**

**Présenté par :**

BENDIB SAIDA

**Avis favorable de l'encadreur :**

SAADI RAMZI

signature

**Avis favorable du Président du Jury**

ABDDIEM SABRINA

Signature

**Cachet et signature**

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



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

## *Thème :*

# Etude et validation expérimentale d'un émulateur pile à combustible type PEMFC

Proposé par : **BENDIB SAIDA**

Dirigé par : **SAADI RAMZI**

## **RESUMES (Français et Arabe)**

### **Résumé en français :**

La pile à combustible est un système de production d'énergie, qui tire profit de la réaction chimique entre les deux molécules H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> pour produire de l'électricité au but de minimiser la pollution, le système pile à combustible ont des nombreuses applications de puissance. Ainsi q u on décrit le principe de fonctionnement de la PAC. une approche d'un émulateur de PAC a été faite pour bien comprendre son fonctionnement et son commande par l mode glissant puits l'obtention des résultats des simulations.

### **المخلص:**

خلية الوقود هي نظام توليد الطاقة، الذي يستفيد من التفاعل الكيميائي بين جزيئين H<sub>2</sub> و O<sub>2</sub> لإنتاج الكهرباء من أجل تقليل التلوث، نظام خلايا الوقود لديه العديد من تطبيقات الطاقة. بحيث نوضح مبدأ تشغيل الخلية الوقودين. تم إجراء نهج لمحاكي الخلية الوقودين لفهم تشغيله والتحكم به عن طريق الوضع المنزلق أو نتيجة نتائج المحاكاة.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail:*

*À ma très chère mère.*

*À mon très cher père, qui je ne saurai jamais remercier.*

*À mon marie : Sayah Farid.*

*À mes enfant : Sarah-Nada-Yazan*

*À mes chers frères : Samir et Sami*

*À mes chères sœurs : Bassma et Djohaina*

*À mon belle-mère : Zahia*

*À mes proches et tous mes amis : Hayat-Hafida-Samira-Nawal*

*À tous les membres de la famille **BENDIB***

*À Tous ceux qui me sont chers*

*Bendib Saida*



# **Remerciements**

*Je tiens tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui nous a donné de la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.*

*J'exprime toutes mes profondes reconnaissances à mon encadreur*

***Dr. SAADI RAMZI** pour le temps consacré à mes écouter, mes orienter et mes corriger tout au long de ce projet.*

*Mes vifs remerciements à Monsieur **MOUSSI AMMAR**, Professeur à l'université de Biskra,*

*Je tiens à remercier également les membres de jury :*

***Mme. ABDDEIM SABRINA***

***Mme. HADRI-HAMIDA AMEL***

*Cette occasion, je témoigne ma reconnaissance à toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Je remercie ma famille à qui je n'ai jamais su dire toute l'affection que j'ai pour eux, mon mari, mon père, ma mère, qui ont été et seront toujours présents.*

*A mes côtés, merci pour votre soutien et vos encouragements.*

*J'adresse toute ma gratitude à tous mes ami(e)s et à toutes les personnes qui m'ont aidé.*

*Dans la réalisation de ce travail*

# **SOMMAIRE**

Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralité de pile à combustible</b>	
I.1.Introduction .....	3
I.2.Historique à pile à combustible .....	3
I.3.Domains d’application des piles à combustible .....	5
I.3-1 Applications dans les portables.....	5
I.3-2 Application dans les transports.....	6
I.3.3 Application stationnaires.....	8
I.4.Les différents types de piles à combustible.....	8
I. 5.Pile à combustible de type PEMFC.....	11
I. 6.Principe de fonctionnement d’une pile à combustible.....	12
I.7. Architecteur de la pile à combustible.....	13
I.7.1 Elément de base d’une cellule élémentaire de pile PEMFC.....	13
I.7.1.1Plaque Bipolaire.....	14
I.7.1.2 Couche de diffusion.....	14
I.7.1.3 La membrane.....	14
I.8 Système à pile à combustible.....	15
I.9 Avantages des piles à combustible.....	16
I.10 Inconvénients des piles à combustible.....	16
I.11.Conclusion.....	17
<b>Chapitre II : Etude de l’émulateur pile à combustible</b>	
II.1.Intreduction .....	19
II.2.Raison d’émuler un système pile à combustible.....	19
II.3.Description de l’émulateur pile à combustible.....	20
II.4 Caractéristique tension courant simuler avec Matlab.....	20
II.5.Convertisseur BUCK.....	23
II.5.1.Applications.....	23

II.5.2.Principe de fonctionnement.....	24
II.5.3.Conduction continue.....	24
II.5.4.Conduction discontinue.....	26
II.6. Conclusion.....	28

### **Chapitre III : Commande d’émulateur et résultat de simulation**

III.1 Introduction.....	30
III.2 La commande par mode glissant.....	30
III.3.Principe du réglage par mode glissant .....	30
III.4.Les avantages de la commande par mode glissant.....	31
III.5. Commande par mode glissant d’un convertisseur Buck.....	31
III.5.1 Calcule de la surface de glissement.....	31
III.5.2 Calcule de la loi de commande.....	32
III.5.3 Simulation.....	33
III .6 Présentation des résultats de la simulation.....	34
III .7 Interprétation des résultats.....	37
Conclusion Générale.....	39





## Liste des figures

<b>Fig.I.1</b> premier pile de W Grove1839	<b>3</b>
<b>Fig. I.2</b> Evolution temporel des découvertes (Adapté de J.M. Andujar, F. Segura (2009)) de la pile.	<b>5</b>
<b>Fig.I.3</b> Pile à combustible au méthanol Ultracell	<b>6</b>
.	
<b>Fig. I.4</b> Hyundai ix35 FCEV	<b>6</b>
<b>Fig.I.5</b> Toyota Mirai en 2016	<b>7</b>
<b>Fig. I.6</b> Bus en pile à combustible	<b>7</b>
<b>Fig. I.7</b> Unité de Pile à combustible	<b>8</b>
<b>Fig.I.8</b> Caractéristique des différents types des piles à combustibles	<b>9</b>
<b>Fig.I.9</b> Schéma de principe d'un assemblage de cellules élémentaires	<b>11</b>
<b>Fig.I.10</b> Schéma de principe d'une pile à combustible	<b>12</b>
<b>Fig.I.11</b> Élément de base d'une cellule élémentaire de pile PEMFC	<b>13</b>
<b>Fig.I.12</b> système d'une pile à combustible	<b>15</b>
<b>Fig.II.1.</b> Architecture d'émulateur pile à combustible	<b>20</b>
<b>FigII.2</b> Modélisation et simulation de pile à combustible	<b>22</b>

<b>Fig. II.3</b> caractéristique tension courant simuler avec Matlab	<b>23</b>
<b>Fig. II.4</b> Schéma de base d'un convertisseur Buck	<b>24</b>
<b>Fig.II.5</b> .Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur S	<b>25</b>
<b>Fig.II.6.</b> Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck	<b>26</b>
<b>Fig.II.7.</b> Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck en conduction discontinue	<b>28</b>
<b>Fig. III.1:</b> Structure d'un convertisseur Buck	<b>31</b>
<b>Fig-III.2</b> Schéma de simulation par la commande d'émulate	<b>34</b>
<b>Fig.III.3.</b> La variation de courant de charge	<b>35</b>
<b>Fig.III.4</b> La tension de la modèle simulé de la pile.	<b>35</b>
<b>Fig.III.5</b> La tension de sortie de l'émulateur	<b>36</b>
<b>Fig.III.6</b> L'Erreur entre la tension de la pile et la tension de sortie de l'émulateur	<b>36</b>

## *Liste de tableau*

**Tableau I- 1:** Comparaison entre les différents types de pile à combustible

**10**

*Introduction*

*Générale*

# Introduction Générale

L'énergie est aujourd'hui un problème majeur pour notre civilisation et importance telle que nous en sommes devenus dépendants. La demande croissante nous conduit vers un épuisement certain des ressources naturelles alors qu'en sommes plus que jamais dépendants. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver des alternatives crédibles pour les années futures. Nous assistons ainsi depuis quelque année au développement de nouveaux moyens de production dits (propre) [1].

Ce que fait n'est pas de pollution sans précédent causé par une utilisation exagérée des ressources renouvelable(le soleil, le bois, l'eau, le vent et hydrogène) et les autres produits végétaux sont autant les ressources naturelles.

Comment pouvons-nous définir une pile à combustible ainsi que son principe ?, et à quel avancement l'étude et la validation expérimental de l'émulateur de PEMFC ?

Les sources d'énergies fossiles dégagent les déchets et de gaz toxique (effet de serre) mais les sources d'énergies renouvelable c'est une énergie propre par exemple l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque) l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie biomasse, la géothermie et la pile à combustible, l'hydrogène très important dans la pile à combustible.

L'objectif de ce travail le but de développer d'émulateur une technique de l'étude et validation d'un émulateur pile à combustible type PEMFC. Ce pour cela, nous avons réparti ce travail en trois chapitres essentiels.

Dans le premier chapitre, nous présentons généralité de pile à combustible et domaines d'application et principe de fonctionnement.

Dans le second chapitre, nous avons lieu l'étude de l'émulateur pile à combustible et caractéristique tension courant simuler avec Matlab et représenté la généralité et la modélisation convertisseur Buck.

Dans le troisième chapitre, réalisation la commande de mode glissant d'émulateur et présente le schéma et résultat de simulation

Ce mémoire sera terminé par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

## *Généralité de pile à combustible*

### I.1.Introduction

La pile à combustible est un générateur d'électricité qui transformé l'énergie d'une réaction chimique en courant électrique de façon continue, Elle est considérée comme un convertisseur d'énergie et non une source d'énergie puisque elle convertie l'énergie d'un combustible (hydrogène le procédé de conversion de l'hydrogène en électricité est non polluant car il ne rejette que de l'eau) en électricité et en chaleur.

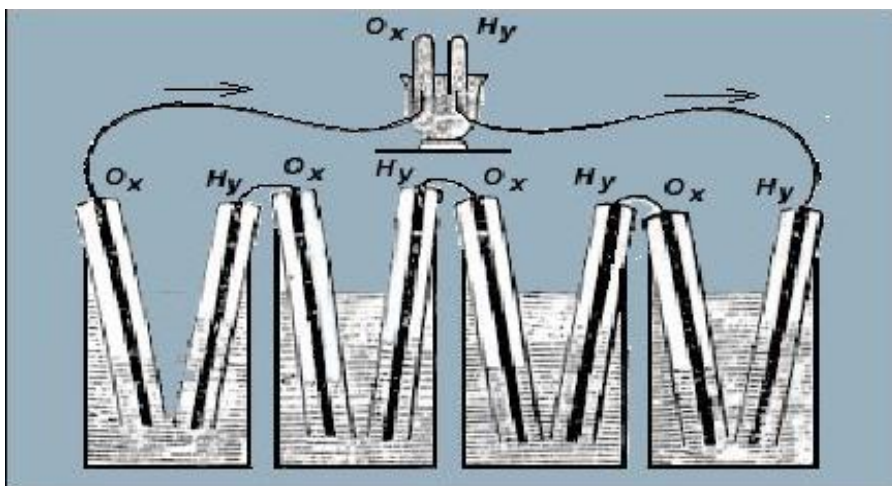
La pile à combustible se différencie par la nature de l'électrolyte, par le niveau de leur température de fonctionnement, par leur architecture et par les domaines d'applications dans lesquels chaque type peut être utilisé [3] .

### I.2.Historique de pile à combustible

En 1806, Sir Humphry Davy réalisait l'électrolyse de l'eau (distillée) obtenant hydrogène et oxygène.

En 1839 **Christian Friedrich Schönbein** découvre le principe de la pile à combustible, il réalise l'électrolyse de l'eau (grâce à un courant électrique il obtient de l'hydrogène) mais s'aperçoit qu'en coupant le courant, ces gaz donnaient lieu à un courant électrique inverse au premier.

En 1839 **William Robert Grove** réalise la première pile à combustible (pile d'hydrogène) en laboratoire pour la figure suivant : (FIGURE 1-1)



**FigI.1** : premier pile de W Grove1839 [6].

En 1939-1953 les travaux de Francis T Bacon permettent la mise en place d'un premier prototype industriel de puissance (de l'ordre du KW).

En 1960 la NASA sort la pile à hydrogène de l'oubli en l'utilisation pour alimenter ses véhicules spatiaux.

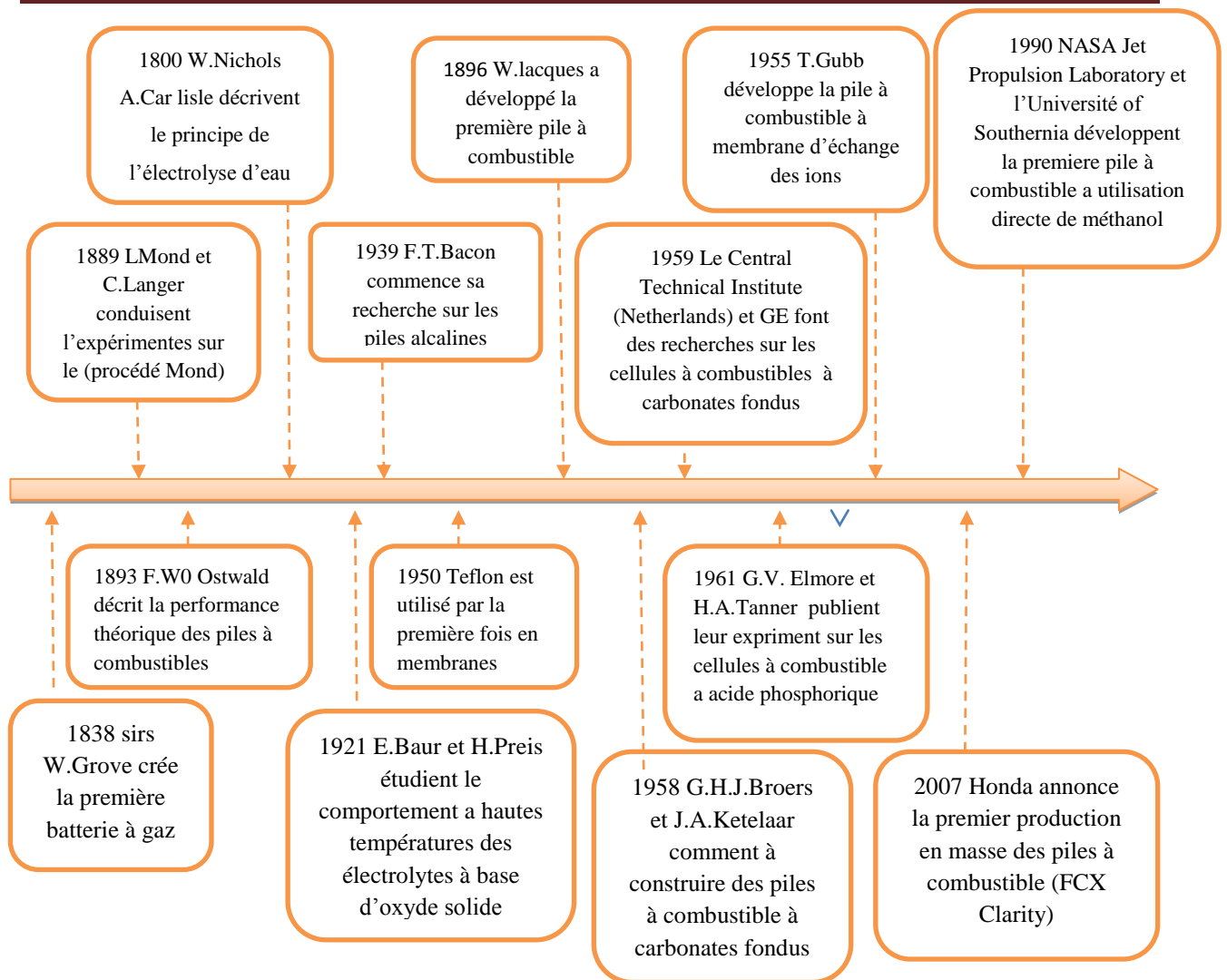
En 1973 suite au premier choc pétrolier il apparait indispensable d'être énergétiquement indépendant .Les recherches sur les piles à combustible reprennent de manière plus importante aux Etats-Unis, au Japon et en Europe grâce à cette prise de conscience.

En 1980 en raison des couts rédhibitoires des catalyseurs et des membranes, l'élan des recherches sur les PAC est freiné.

En 1990 l'aggravation des problèmes environnementaux (notamment le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique) ainsi que les avancées technologiques entraînent un regain d'intérêt pour ces systèmes [4].

En 2011 de puis la start-up new-yorkaise SIGNA Chemiser propose un chargeur de smart phones un peu spécial. Il s'agit d'un chargeur équipé de mini-piles à combustibles appelées Power Trek capable de produire de l'électricité par ajout d'eau [5].





**Fig. I.2 :** Evolution temporel des découvertes (Adapté de J.M. Andujar, F. Segura (2009)) de la pile [13].

### I.3. Domaines d'application des piles à combustible

La pile à combustible PEMFC à basse température para pour les autres types si pour ça il utilisation simple d'un électrolyte solide ne posent pas de problème de fabrication. On distingue habituellement trois grands types d'application

#### I.3-1 Applications dans les portables

La pile à combustible alimenté en hydrogène est destinée à remplacer les batteries de téléphone mobile (la consomme une puissance de 100 mW) et batteries de l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 30W à fin de donne une autonomie supérieur et un rechargement instantané par remplacement du réservoir de carburant.

L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelque secondes et chaque recharge donne 3à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle,

pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEMFC du fait de basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol [6].



**FigI.3** : Pile à combustible au méthanol Ultracell [8].

### I.3-2 Application dans les transports

Pour respecter les contraignantes normes antipollution édictées par les régulateurs, l'avenir de l'automobile sera sans nul doute dans l'électrification des motorisations. Mais que de l'hybride, rechargeable du 100 électrique ou de l'hydrogène

En 2012 premier modèle à hydrogène produit en série, le Hyundai ix35 FCEV offre une autonomie réelle de 500 Km et un plein en moins de 5 mn sur une station publique et des émissions de CO<sub>2</sub> équivalentes à 90g/Km.



**Fig I.4:** Hyundai ix35 FCEV[8].

Fuel Cell Electric Véhicule est disponible à partir de 59700euros , bonus de 6300euros déduit , Outre-Rhin le groupe Volkswagen s'est également essayé à l'hydrogène avec la présentation de deux prototypes en 2014 lors du salon de Los Angeles la premier modèle du genre à être doté d'une transmission intégrale ,l'Audi A7h-tron Quarto n'aurait Honda et Toyota ont également investi dans la pile à combustible , Detroit 2016 reste aussi incertain celui du Mercedes-Benz GLC F-Cell est assuré . Présenté à Stuttgart en juin 2017le premier modèle à hydrogène produit en petite série à tarif proche de 60000 euros dans quelque concession de l'étoile triée sur le volet.



**FigI.5** : Toyota Mirai en 2016 [9].

La société canadienne Ballard power System a fait office de pionnier avec 6 autobus (pile PEM), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago. La compagnie allemande Daimler-Chrysler , sur la base de la même technologie que Ballard a annoncé le lancement d'une présérie de 30 bus , en vue d'une mise en service dans plusieurs villes européennes compte tenu de l'espérance de vie pour ce type de véhicule , les avancés abordé les systèmes fixes . A côté de ces application routières, certains constructeurs pensent à un tramway propre et sans caténaire, En utilisant une pile à combustible [2].



**Fig. I.6** : Bus en pile à combustible [13].

### I.3.3 Application 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. 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. [10]



**FigI.7** : Unité de Pile à combustible [6].

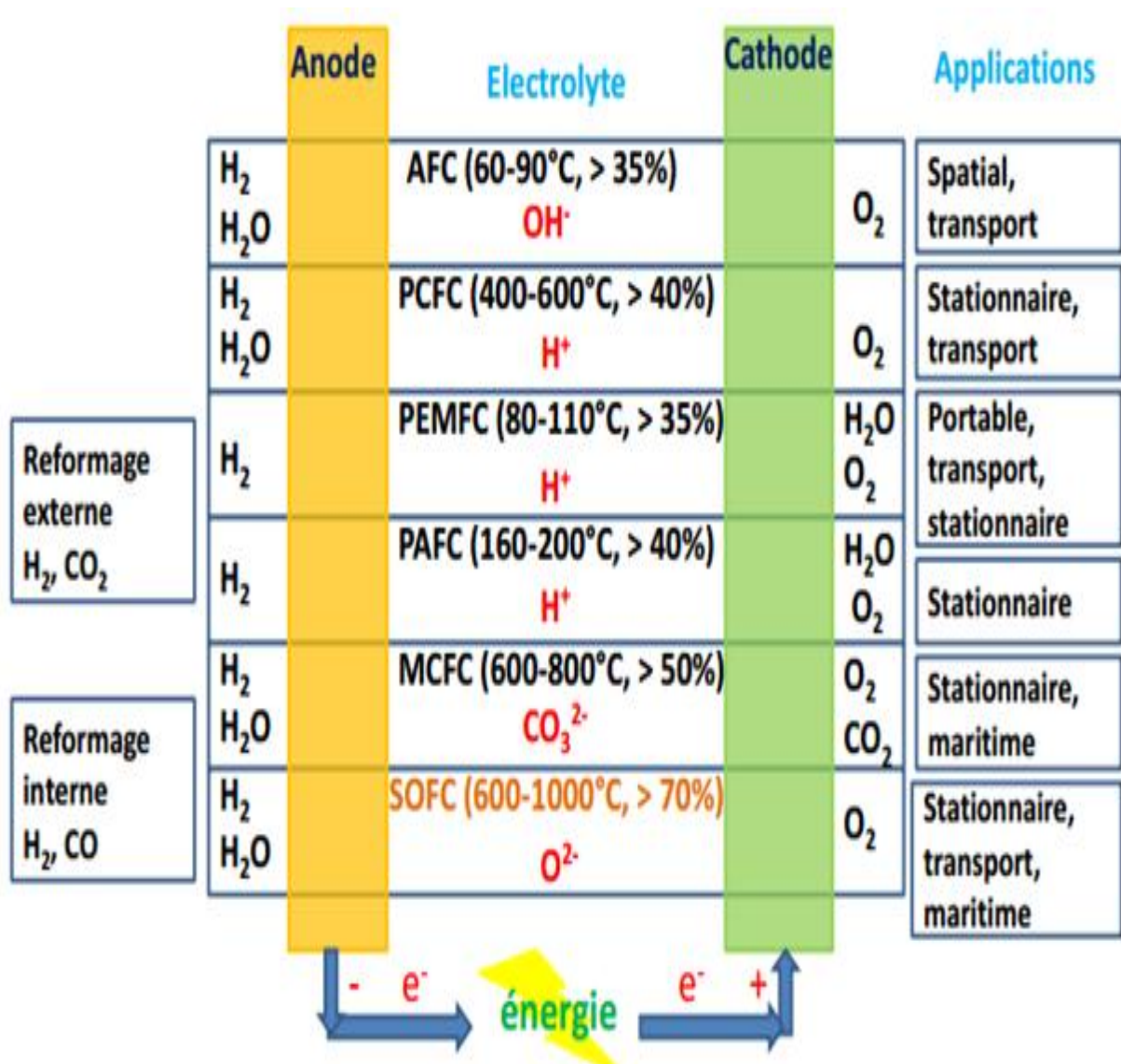
### I.4. Les différents types de piles à combustible

C'est l'électrolyte utilisé qui différencie les piles à combustible et qui donne leur nom aux grandes familles de piles. La température de fonctionnement est aussi un facteur de différenciation et l'on parle de piles à combustible basse température ou haute température. En pratique plus la température de fonctionnement est basse, plus le système est simple à utiliser. Mais en contrepartie plus les catalyseurs sont onéreux et plus le carburant doit être riche en

hydrogène. Chaque type a ses propres caractéristiques chimiques et mécaniques, ainsi qu'une température de fonctionnement

Les principaux types de pile à combustible sont les suivants :

- Les piles alcalines AFC (Alcaline Fuel Cell) ;
- Les piles à céramique conductrice protonique PCFC (Proton Céramic Fuel Cell) ;
- Les piles à membrane polymère PEMFC (proton Exchange Membrane Fuel Cell) ;
- Les piles à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) ;
- Les piles à carbonate fondu MCFC (Molten Carbonat Fuel Cell) ;
- Les piles à oxyde solide SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) ; [1].



FigL.8 : Caractéristique des différents types des piles à combustibles [12].

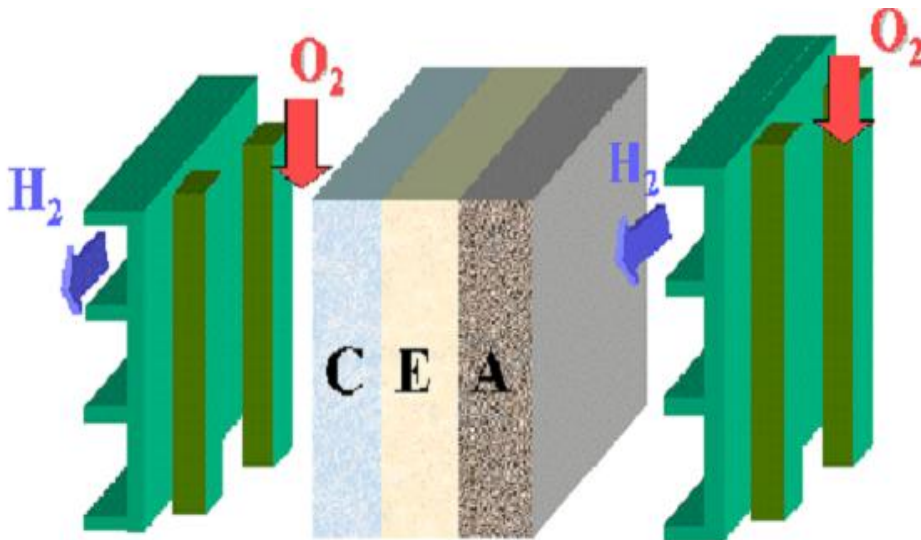
Abréviation Caractéristique	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOF
Nom en Anglais	Alkaline Ful Cell	Proton exchange membrane FC	Direct méthanol Ful Cell	Phosphorique acide Ful Cell	Molten carbonate Ful Cell	Solide oxide Ful Cell
Électrolyte	Solution KOH (liquide)	Membrane polymère (solide)	Membrane polymère (solide)	Acide phosphorique (liquide)	Li <sub>3</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice de LiAlO <sub>2</sub> (liquide)	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (solide)
Catalyseur	Pt	Pt	Pt	Pt	Carbonates de lithium ou de potassium	Ni
Ion mobile dans l'électrolyte	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sup>-2</sup>
Température	60-80 °C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
	Piles à combustible à faible température				Piles à combustible à forte température	
Combustible	H <sub>2</sub> pur	H <sub>2</sub> pur ou reformé	H <sub>2</sub> pur	H <sub>2</sub> pur ou Reformé	H <sub>2</sub> pur ou Reformé	H <sub>2</sub> et CO pourou Reformé
Oxydant	O <sub>2</sub> pur	Air	Air	Air	Air	Air
Domaine d'application	Spatial, transport (sousmarin)	Electronique portable, transport, cogénération	Electronique portable	Transport, cogénération	Cogénération Production généralisée d'électricité	Cogénération Production généralisée d'électricité, transport
Rendement Electrique	55-60%	32-40%	15-25%	40-45%	50% 55% avec réutilisation de la chaleur	45-50% 60% avec réutilisation de la chaleur

**Tableau I- 1:** Comparaison entre les différents types de pile à combustible [1].

### I. 5.Pile à combustible de type PEMFC

Les piles à combustible à membrane échangeuse (ou d'échange) de protons, connues aussi sous le nom de piles à combustible à membrane électrolyte polymère (ou PEMFC selon l'acronyme des expressions anglaises "proton exchange membrane fuel cells ou polymère électrolyte membrane fuel cells) sont les piles les plus utilisées dans les secteurs d'activité. La principale caractéristique de la PEMFC, est l'utilisation d'une membrane organique qui d'une part est sélective aux protons et d'autre part joue le rôle d'électrolyte et de séparateur physique entre les deux électrodes d'une cellule élémentaire. [3]

PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), elle intéresse également les industriels pour des applications stationnaires (centaines de kW), portables (jusqu'à 100W) et transportables (de l'ordre de 100kW). Cette technologie retient l'attention pour trois raisons essentielles. Sa température de fonctionnement, relativement basse (<100°C), d'environ 80°C, Elle est ensuite insensible à la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air.[13]



**FigI.9** : Schéma de principe d'un assemblage de cellules élémentaires

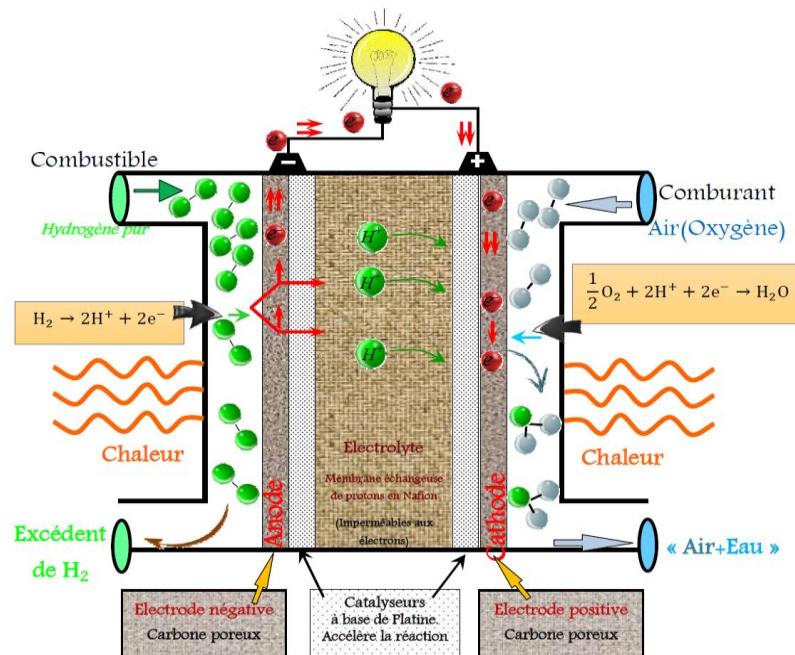
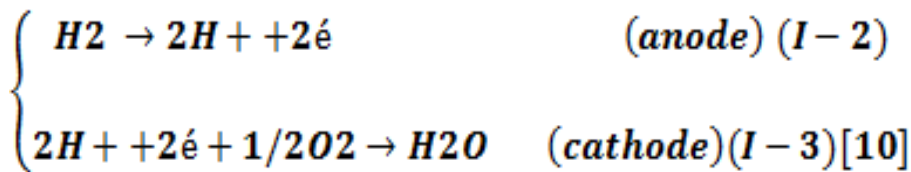
. Cathode/Électrolyte/Anode et inter connecteurs [14].

I. 6.Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique .Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :



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



FigI.10 : Schéma de principe d'une pile à combustible [3].

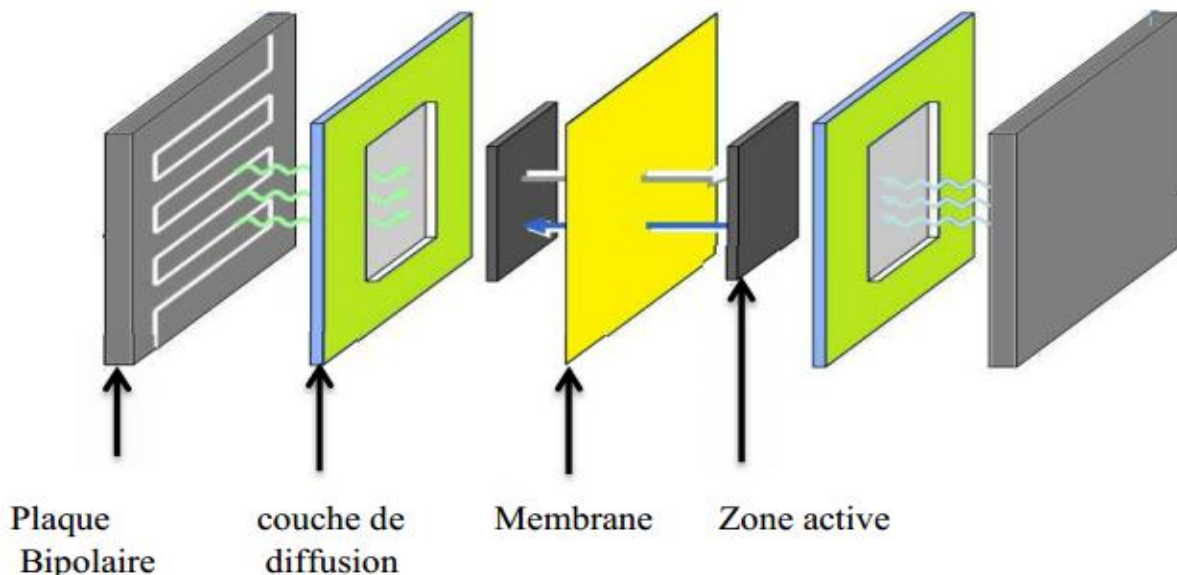


### I.7. Architecteur de la pile à combustible

La tension théorique à vide d'une cellule élémentaire de pile à combustible idéale est de 1,23V aux conditions standard. 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 stock. Aujourd'hui on rencontre des stocks 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 A.cm<sup>-2</sup> [11].

#### I.7.1 Elément de base d'une cellule élémentaire de pile PEMFC

Chaque cellule de la pile est constituée de deux plaques bipolaires et d'un Assemblage Membrane Électrodes (MEA). Les deux plaques bipolaires assurent la distribution des gaz réactifs jusqu'aux les électrodes et collectent le courant électrique produit. L'assemblage électrode membrane est le cœur de la cellule, il est constitué d'une membrane polymère conductrice de protons et imperméable aux gaz et aux électrons, de deux couches actives AL où est dispersé le catalyseur, et de deux couches de diffusion de gaz GDL, comme représenté sur la Figure ( I.10).[13]



**FigI.11** : Elément de base d'une cellule élémentaire de pile PEMFC [6].

### I.7.1.1 Plaque Bipolaire

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 I.10). 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 [11]. Les plaques bipolaires ont des rôles multiples dans la pile :

- Distribuent le carburant et l'oxydant dans la cellule ;
- Séparent les différentes piles dans le stack;
- Rassemblent le courant ;
- Portent l'eau loin de chaque cellule ;
- Humidifient les gaz, et maintiennent les cellules fraîches [1].

### I.7.1.2 Couche de diffusion

Doit ensuite être supportée par un distributeur de gaz dimensionné de manière à répartir uniformément les gaz de réaction sur les deux électrodes avec le minimum de pertes de charge: hydrogène à l'anode et oxygène ou air à la cathode. Il s'agit généralement d'une structure en canaux (canaux de section voisine du mm<sup>2</sup>) intégrée dans le support d'électrode ou parfois, d'une mousse métallique [15].

### I.7.1.3 La membrane

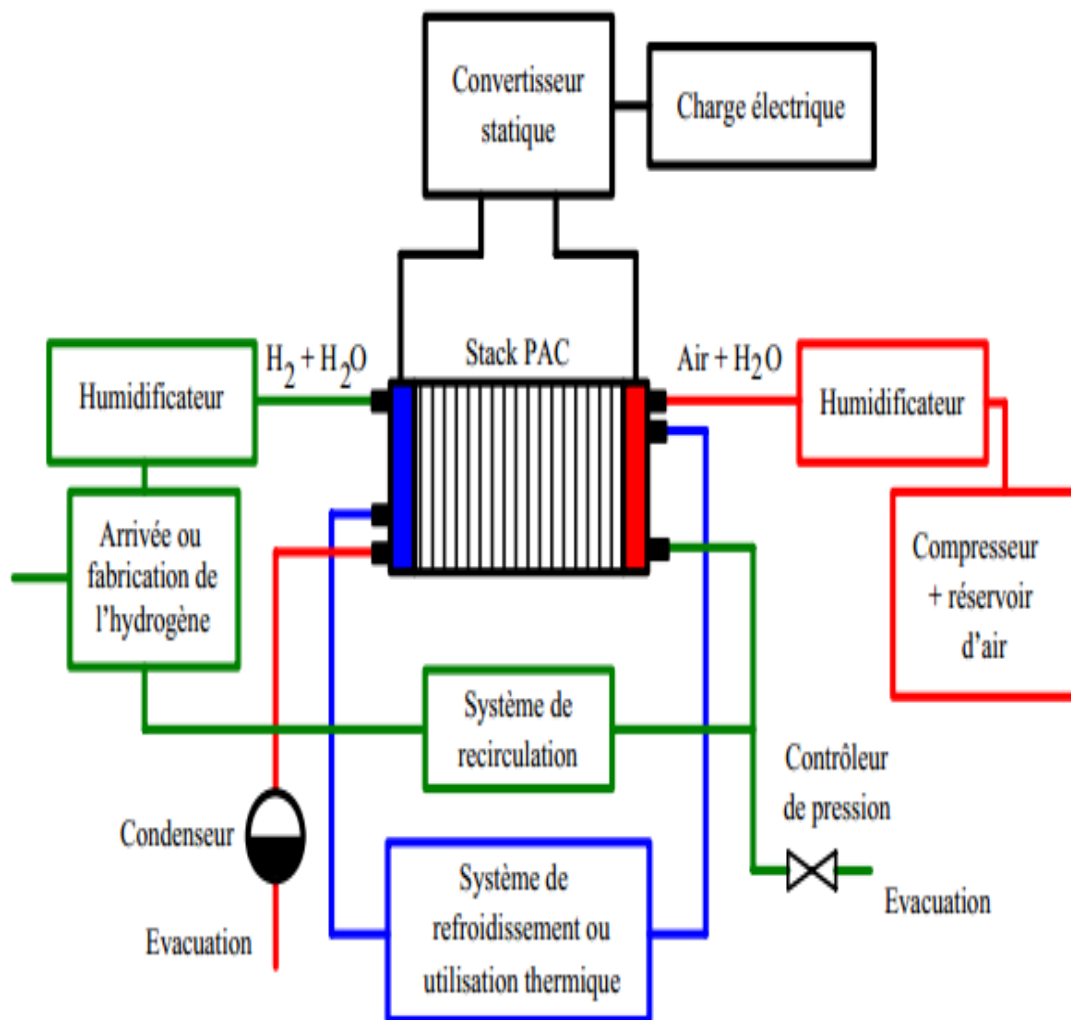
Les membranes conductrices protoniques constituent le cœur des piles à combustible de type PEMFC, leur importance est évidente puisque ce sont leurs propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, combustible de la pile, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à haute densité de courant et sont principalement associées aux membranes (rapport d'épaisseur sur conductivité protonique) [14].

Les membranes possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement de terminaison -SO<sub>3</sub>H ou COOH, permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode [16].

### I.8 Système à pile à combustible

La tension maximale théorique de cellule d'une pile à combustible est environ 1.23V, sa capacité de courant dépend de la surface cellulaire.

Pour obtenir des niveaux de tension et de courant qui sont bien adaptés pour les applications plusieurs piles à combustibles sont reliées en série. Cet ensemble est appelé empilement de pile à combustible. Nécessité pour son fonctionnement l'ajout de plusieurs appareils auxiliaires destinés à l'alimentation et au conditionnement des gaz, à la gestion de l'humidification de la membrane et au contrôle de la température de fonctionnement du système.[6] La figure suivante présente le système d'une pile à combustible.



**Fig.I.12** système d'une pile à combustible [6].

### I.9 Avantages des piles à combustible

Les avantages, sont variés, les plus communs pour les différents types sont suivants :

- **Efficacité** : les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée. Un autre indice pour cela est que les petits systèmes peuvent être tout aussi efficaces que les grands. Ceci est très important dans le cas des petits systèmes locaux de production d'énergie nécessaire à la production combinée de chaleur et systèmes d'alimentation.
- **Simplicité** : Les éléments d'une pile à combustible sont très simples, avec peu ou pas de pièces mobiles. Cela peut conduire à une grande fiabilité et à long terme des systèmes durables.
- **Faibles émissions** : Le sous-produit de la réaction principale des piles à combustible, lorsque l'hydrogène est le combustible, est l'eau pure, ce qui signifie qu'une pile à combustible peut être essentiellement «zéro émission». Ceci est Leur principal avantage lorsqu'elles sont utilisées dans les véhicules, puisqu'il ya une exigence de réduction de véhicule émissions, et même de les éliminer dans les villes. Toutefois, il convient de noter que, Actuellement, les émissions de CO<sub>2</sub> sont presque toujours impliqués dans la production d'hydrogène ce qui est nécessaire en tant que combustible.
- **Silence** : Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement. Ceci est très important tant dans les applications portables que dans les productions combinées locales d'énergie et de chaleur.[1]

### I.10 Inconvénients des piles à combustible

- Coût trop élevé de production et de maintenance ;
- Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement ;
- Durée de vie trop faible ;
- Gestion thermique délicate ;
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène [17].

## **I.11.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons discuté la généralité de pile à combustible, puis son principe de fonctionnement et les différents de types de pile à combustible. On a abordés l'historique de développement des piles à combustible et l'architecture de ses systèmes.

Les pile PEMFC son faible poids et sa température de fonctionnement, et lieu les avantage et les inconvénients de la pile à combustible.

# *Chapitre II*

## *Etude de l'émulateur pile à combustible*

### II.1.Introduction

L'intérêt d'un émulateur de pile à combustible est de pouvoir tester un système pile dans des conditions de fonctionnement réelles, voire extrêmes, sans avoir recours à une pile à combustible. L'utilisation d'un émulateur présente plusieurs avantages par rapport à l'utilisation d'une pile réelle:

- 1) il permet d'émuler au moyen d'un même dispositif différents types de pile à combustible, par exemple, de quelques watts à une puissance qui peut atteindre 15 kilowatts pour une application de transport;
- 2) il permet de simuler des scénarios extrêmes (court-circuit, surchauffe, etc.), sans endommager la pile à combustible ;
- 3) il peut s'intégrer dans un banc d'essai de pile à combustible, afin d'évaluer ou caractériser les choix des technologies et des architectures des auxiliaires;
- 4) il permet de travailler de manière sécurisée tout en minimisant l'utilisation du circuit d'hydrogène.

Afin de réaliser l'émulateur, il est nécessaire de développer un modèle représentant au mieux le comportement réel d'une pile à combustible. Ce modèle mathématique est le noyau de l'émulateur. Il sera implanté dans un processeur temps réel. Il devra, à partir des conditions physiques de la pile, simuler le comportement de la pile avec des erreurs de calcul acceptables par rapport à une pile à combustible réelle. [18]

### II.2.Raison d'émuler un système pile à combustible

L'étude des piles à combustibles, reste toujours d'actualité le recours aux émulateurs peut être justifié par les raisons suivantes:

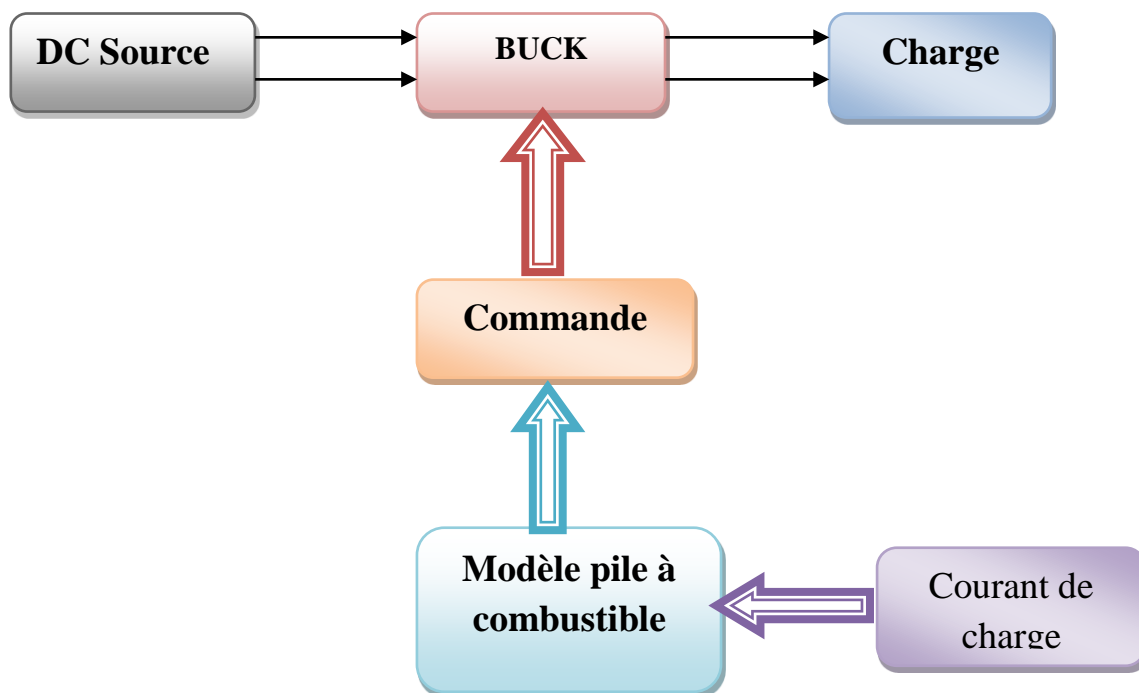
- Coût trop élevé de production et de maintenance ;
- Durée de vie trop faible ;
- Gestion thermique délicate ;
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène [1].

Pour ces raisons, le coût global d'un système complet est prohibitif pour beaucoup d'instituts de formation tout comme pour des petites entreprises intéressées par la recherche relative.

### II.3. Description de l'émulateur pile à combustible

D'objectif principal de la réalisation de l'émulateur de pile a combustible est de reproduire la caractéristique  $V=f(I)$  d'un module pile à combustible quelconque.

On peut remarquer sur cette caractéristique que l'on a, à vide, une tension plus faible que la valeur théorique, puis une chute de tension rapide à faible valeur de courant, ensuite une zone de décroissance linéaire et enfin une chute rapide de la tension à fort [22].



**FigII.1** : Architecture d'émulateur pile à combustible

### II.4 Caractéristique tension courant simuler avec Matlab

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Dans ce travail, nous avons utilisé des piles à combustible PEMFC, le modèle électrochimique (Amphlett *et al.*) le plus utilisé dans la littérature qui décrit la courbe de tension d'une pile PEMFC et prévoit ces polarisations. La modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM figure(2) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide  $E_0$ , la surtension d'activation  $V_{act}$  (ou chute



## CHAPITRE II :ETUDE DE L'EMULTEUR DE PILE A COMBUSTIBLE

---

d'activation de la région 1), la surtension ohmique  $V_{ohm}$ (ou chute ohmique de la région 2) et la surtension de concentration  $V_{conc}$ (ou chute de concentration de la région 3) :

$$V_{FC} = E_0 - V_{act} - V_{ohm} + V_{conc} \quad (\text{II.1})$$

$$V_{act} = A * \log(i_{fc} - i_n / i_0) \quad (\text{II.2})$$

**$i_{fc}$** : Le courant deliver par la PAC,

**$i_0$**  : Le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte,

**$i_n$**  : Le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz,

$$V_{ohm} = R_m * (i_{fc} - i_n) \quad (\text{II.3})$$

**$R_m$** : La résistance totale de la pile à combustible,

$$V_{conc} = B * \log \left[ 1 - \frac{(i_{fc} - i_n)}{i_{Lim}} \right] \quad (\text{II.4})$$

**B**: Constante de transport ou de transfert de masse,

**$i_{fc}$**  : La densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm<sup>2</sup>),

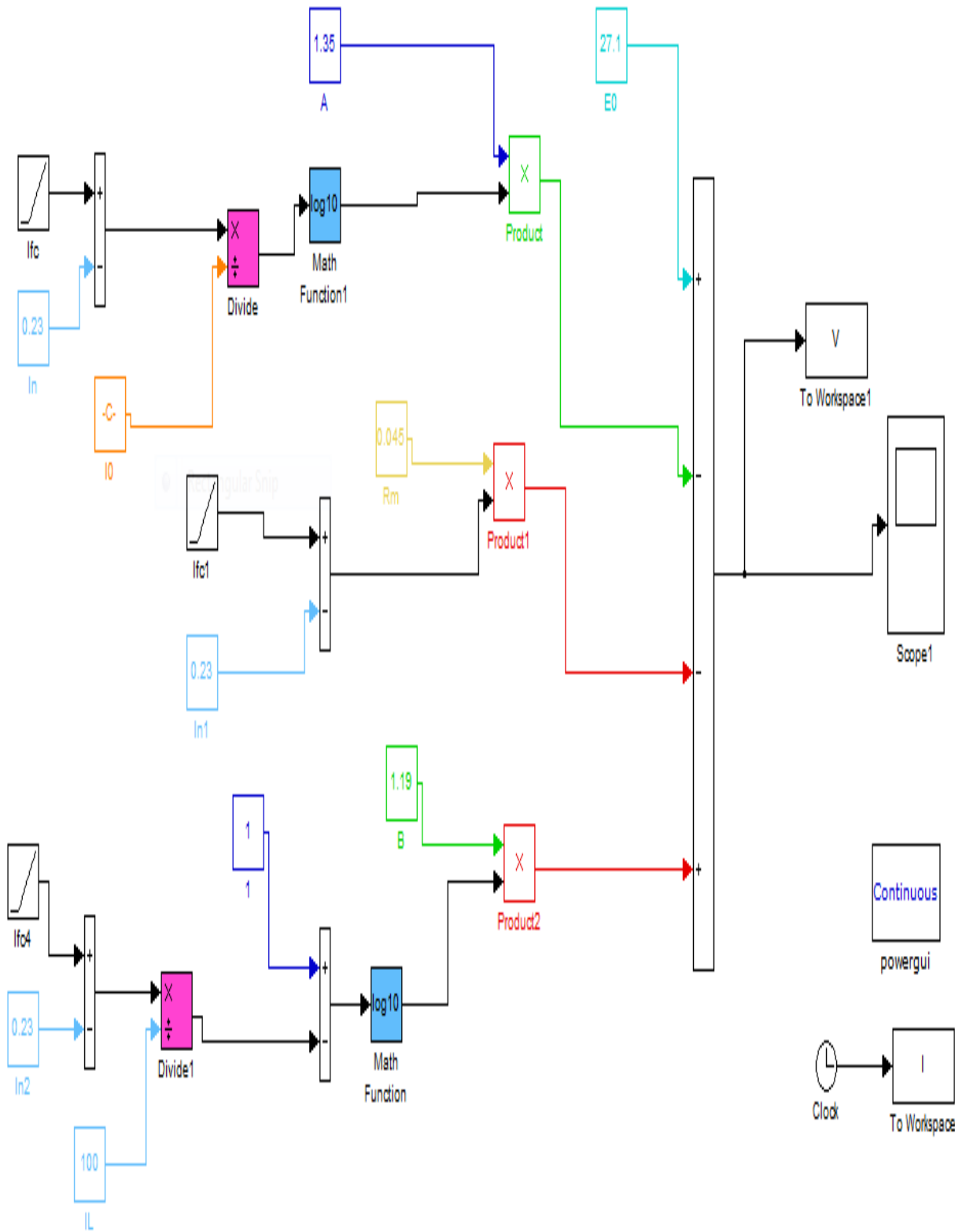
**$i_{lim}$**  : La densité de courant limite,

Les paramétrés de pile

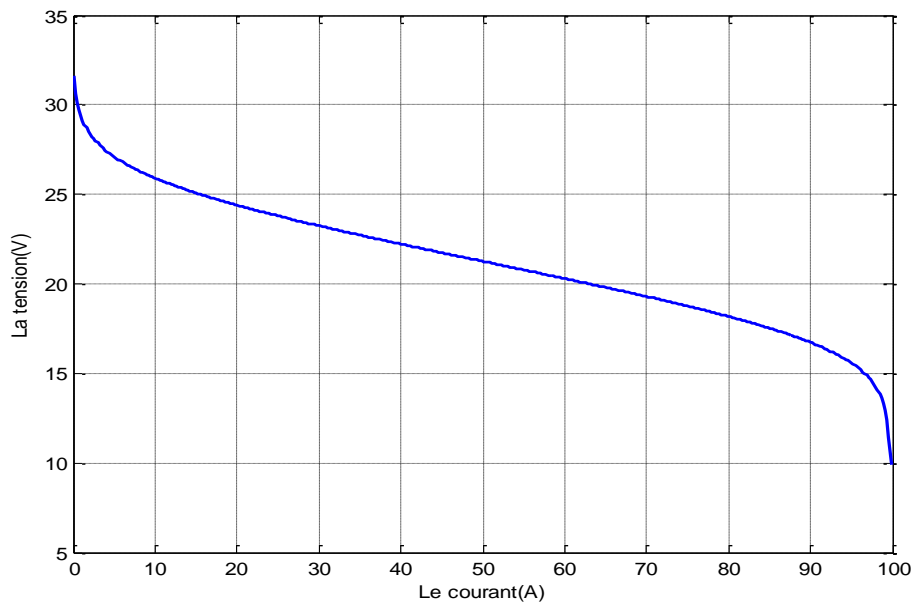
- $E=27.1$  V (à 5°C),
- $A=1.35$  V,
- $i_0=6.54$  mA,
- $i_n=230$  mA,
- $R_m=0.045$  Ω,
- $B=1.19$  V,

$i_L=100$  A, le temps de simulation (1s)

# CHAPITRE II : ETUDE DE L'EMULTEUR DE PILE A COMBUSTIBLE



**FigII.2 :** Modélisation et simulation de pile à combustible



**FigII.3 :** Caractéristique tension courant simuler avec Matlab

On remarque dans cette courbe obtenue par simulation est conforme et superpose a la pile à combustible obtenue expérimentale, donc notre type ou bien notre modèle est faible par ce que PEMFC c'est la meilleure main de chaleur.

### II.5.Convertisseur BUCK

Un convertisseur Buck, ou hacheur série (abaisseur de tension) est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

#### II.5.1.Applications

La façon la plus simple de réduire une tension est d'utiliser un diviseur de tension, mais les diviseurs de tension, dissipant sous forme de chaleur l'excès de tension, possèdent un faible rendement ce qui est rédhibitoire pour les applications d'électronique de puissance. Un convertisseur Buck possédant un fort rendement (jusqu'à 95%), et offrant la possibilité de réguler la tension de sortie, est donc plus adapté pour les applications d'électronique de puissance comme la réduction des 12-24V fournis par une batterie d'ordinateur portable vers les quelques Volts nécessaires au processeur.

#### II.5.2.Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (voir fig. II. 5) :

## CHAPITRE II : ETUDE DE L'EMULTEUR DE PILE A COMBUSTIBLE

Dans l'état passant, l'interrupteur S (voir fig. II. 4) est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut :

$$V_L = V_i - V_o \quad (\text{II-5})$$

Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut :

$$V_L = -V_o \quad (\text{II-6})$$

Le courant traversant l'inductance décroît.

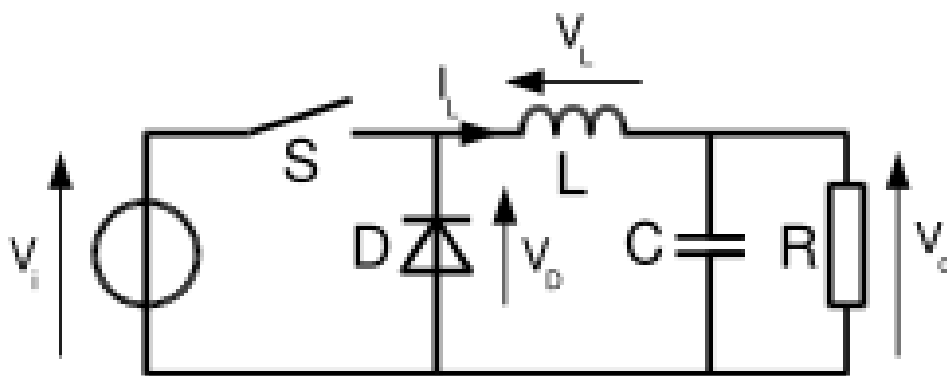


Fig. II.4. Schéma de base d'un convertisseur Buck [19].

### II.5.3. Conduction continue

Quand un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue, le courant \$I\_L\$ traversant l'inductance ne s'annule jamais. (La fig II.6) montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur Buck.

Le taux d'accroissement de \$I\_L\$ est donné par : [25]

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II-7})$$

Avec \$V\_L\$ égale \$V\_i - V\_o\$ pendant l'état passant et \$-V\_o\$ durant l'état bloqué. Par conséquent, l'augmentation de \$I\_L\$ durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha \cdot T} dI_L = \int_0^{\alpha \cdot T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (\text{II-8})$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée par :

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_{\alpha \cdot T}^T dI_L = \int_{\alpha \cdot T}^T \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} \quad (\text{II-9})$$

## CHAPITRE II : ETUDE DE L'EMULTEUR DE PILE A COMBUSTIBLE

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2}L \times I_L^2 \quad (\text{II-10})$$

En conséquence, le courant  $I_L$  traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (\text{II-11})$$

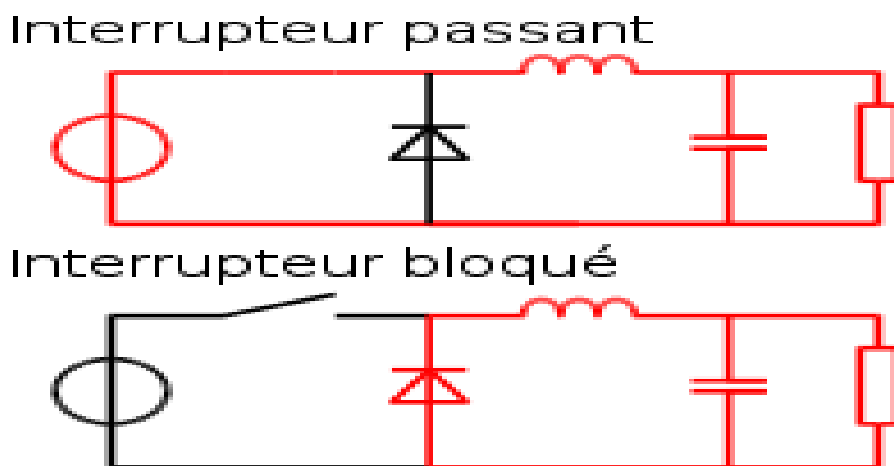
En remplaçant  $\Delta I_{L_{on}}$  et  $\Delta I_{L_{off}}$  par leur expression, on obtient :

$$\frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} - \frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} = 0 \quad (\text{II-12})$$

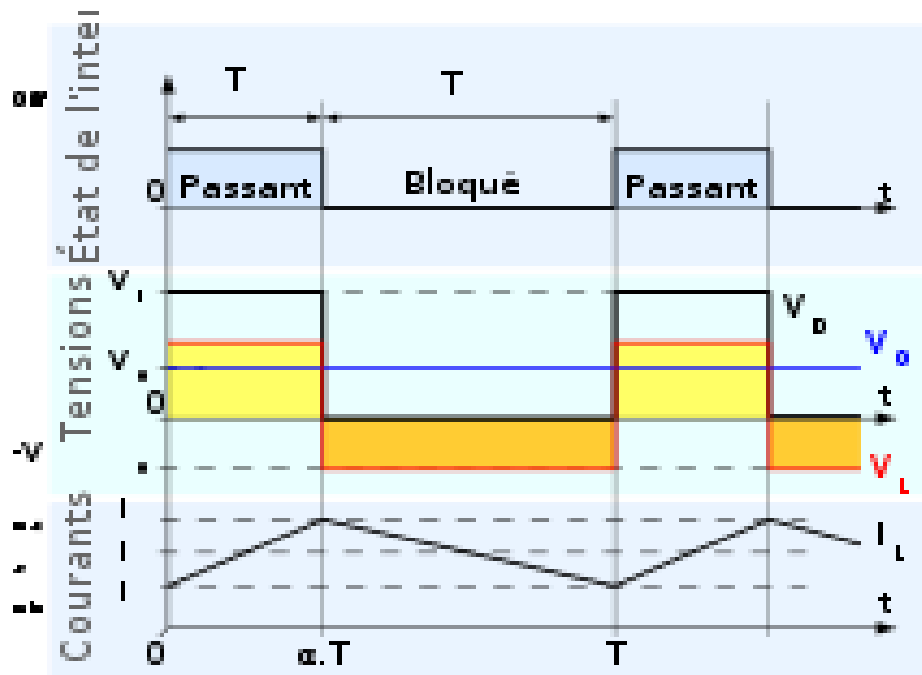
Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_o = \alpha \cdot V_i \quad (\text{II-13})$$

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie  $V_o$  est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle parfois de dévolteur.[24]



**FigII.5** : Les deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état De l'interrupteur S [20].



**Fig.II.6.** Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck [21].

### II.5.4. Conduction discontinue

Dans certains cas, la quantité d'énergie demandée par la charge est assez faible pour être transférée dans un temps plus court qu'une période de commutation. Dans ce cas, le courant traversant l'inducteur s'annule pendant une partie de la période. La seule différence avec le principe de fonctionnement décrit précédemment est que l'inductance est complètement déchargée en début de cycle (voir les formes d'ondes sur la fig.II.5). Bien que faible, la différence entre conduction continue et discontinue a un fort impact sur la formule de la tension de sortie. La tension de sortie peut être calculée de la façon suivante :

On considère toujours que le convertisseur a atteint le régime permanent. L'énergie stockée dans les composants est donc la même en début et en fin de cycle (elle est nulle dans le cas de la conduction discontinue). Cela engendre aussi que la tension moyenne aux bornes de l'inductance ( $V_L$ ) est nulle. Ceci se traduit sur la (fig.II.5), par une égalité de l'aire des rectangles jaune et orange :

$$(V_i - V_o) \alpha \cdot T - V_o \cdot \delta \cdot T = 0 \quad \text{(II-14)}$$

On peut en déduire la valeur de  $\delta$  :

$$\delta = \frac{V_i - V_o}{V_o} \alpha \quad \text{(II-15)}$$

En supposant que le condensateur de sortie est suffisamment important pour maintenir la tension de sortie constante pendant un cycle de commutation, le courant de sortie délivré à la

## CHAPITRE II : ETUDE DE L'EMULTEUR DE PILE A COMBUSTIBLE

charge ( $I_o$ ) est constant. Cela implique que le courant traversant le condensateur est de valeur moyenne nulle. Par conséquent, nous avons :

$$\bar{I}_L = I_o \quad (\text{II-16})$$

Avec  $\bar{I}_L$  le courant moyen traversant l'inductance. Comme on peut le voir sur la (fig.II.5), le courant  $I_L$  traversant l'inductance est de forme triangulaire. Par conséquent, la valeur moyenne de  $I_L$  peut donc être calculée géométriquement de la façon suivante :

$$\bar{I}_L = \left( \frac{1}{2} I_{L_{\max}} \cdot \alpha \cdot T + \frac{1}{2} I_{L_{\max}} \cdot \delta \cdot T \right) \frac{1}{T} = \frac{I_{L_{\max}} (\alpha + \delta)}{2} = I_o \quad (\text{II-17})$$

Le courant dans l'inductance est nul en début de cycle puis augmente pendant  $\alpha \cdot T$  jusqu'à atteindre  $I_{L_{\max}}$ . Cela veut dire que  $I_{L_{\max}}$  est égale à :

$$I_{L_{\max}} = \frac{V_i - V_o}{L} \alpha \cdot T \quad (\text{II-18})$$

En remplaçant  $I_{L_{\max}}$  dans les relations précédentes par son expression, on obtient :

$$I_o = \frac{(V_i - V_o) \alpha \cdot T (\alpha + \delta)}{2L} \quad (\text{II-19})$$

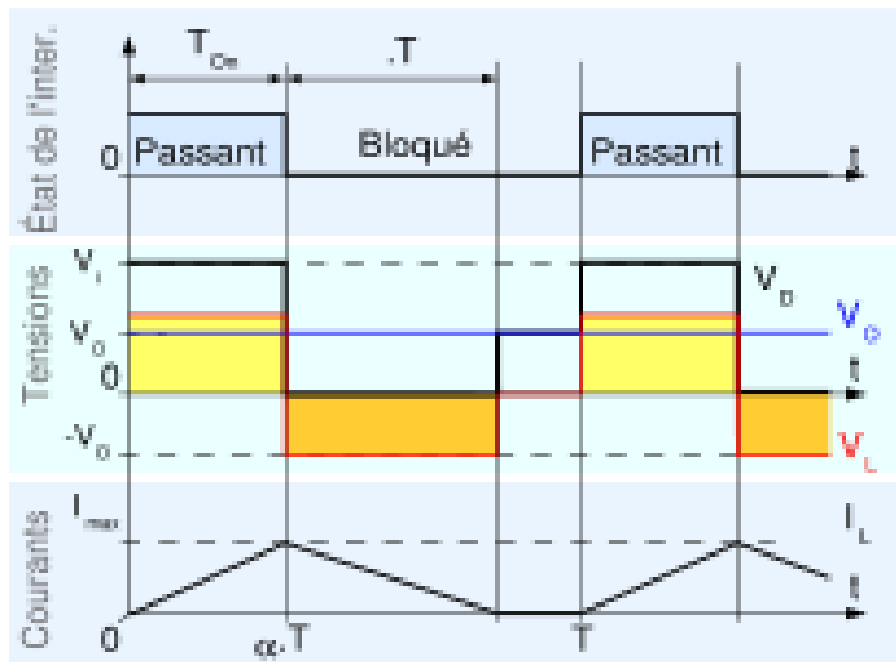
On remplace  $\delta$  par son expression :

$$I_o = \frac{(V_i - V_o) \alpha \cdot T \left( \alpha + \frac{V_i - V_o}{V_o} \alpha \right)}{2L} \quad (\text{II-20})$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$V_o = V_i \frac{1}{\frac{2L \cdot I_o}{\alpha^2 \cdot V_i \cdot T} + 1} \quad (\text{II-21})$$

On peut voir que l'expression de la tension de sortie est bien plus compliquée que celle obtenue pour la conduction continue. En effet, la tension de sortie dépend non seulement de la tension d'entrée ( $V_i$ ) et du rapport cyclique  $\alpha$  mais aussi de la valeur de l'inductance ( $L$ ), de la période de commutation ( $T$ ) et du courant de sortie ( $I_o$ ).



**Fig.II.7.**Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck en conduction discontinue [21].

### II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la raison d'émuler un système pile à combustible, et simulation d'architecteur d'émulateur pile à combustible et le caractéristique tension-courant

Simuler avec Matlab et lieu une méthode générale de modélisation des convertisseurs Buck.



# *Chapitre III*

## *Commande d'émulateur et résultats de simulation*

### **III.1 Introduction**

L'objectif principal de la commande est de maîtriser l'évolution d'une ou plusieurs grandeurs physiques à partir d'une ou plusieurs variables de contrôle et ceci dans un environnement perturbé. Ces perturbations sont de nature externe (perturbation sur la mesure, perturbation sur la commande...) ou interne au système (erreur du modèle, incertitude paramétrique) et généralement non mesurable [26].

La commande de processus se fait par l'introduction dans la chaîne de commande d'un algorithme de contrôle ayant des performances satisfaisantes pour s'affranchir des perturbations

### **III.2 La commande par mode glissant**

La commande par mode de glissement (en anglais : Sliding mode CONTROL), est un mode de fonctionnement particulier des systèmes de réglage à structures variables (S.S.V). Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation. Toute repose donc sur le choix approprié de cette surface de commutation appelée encore surface de glissement. Les configurations de base et les conditions d'existence des régimes glissants seront nommées. La formulation de la surface de glissement par une contre réaction d'état linéaire sans et avec intégrateur sera notamment présentée. En dernier, nous exposerons la synthèse de la loi de commande par la méthode d'imposition des pôles en boucle fermée [23].

### **III.3.Principe du réglage par mode glissant**

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu' au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. Parmi les propriétés des modes glissants :

➤La trajectoire d'état du système en mode de glissement appartient à une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état, par conséquent l'ordre des équations différentielles régissant le fonctionnement du système en mode de glissement est réduit.

➤La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.

➤ La dynamique du système en mode de glissement est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement [24].

#### III.4. Les avantages de la commande par mode glissant

Cette commande présente les caractéristiques suivantes :

➤ La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations ;

➤ Il suffit de connaître une borne pour  $v$ , ce qui simplifie le réglage ;

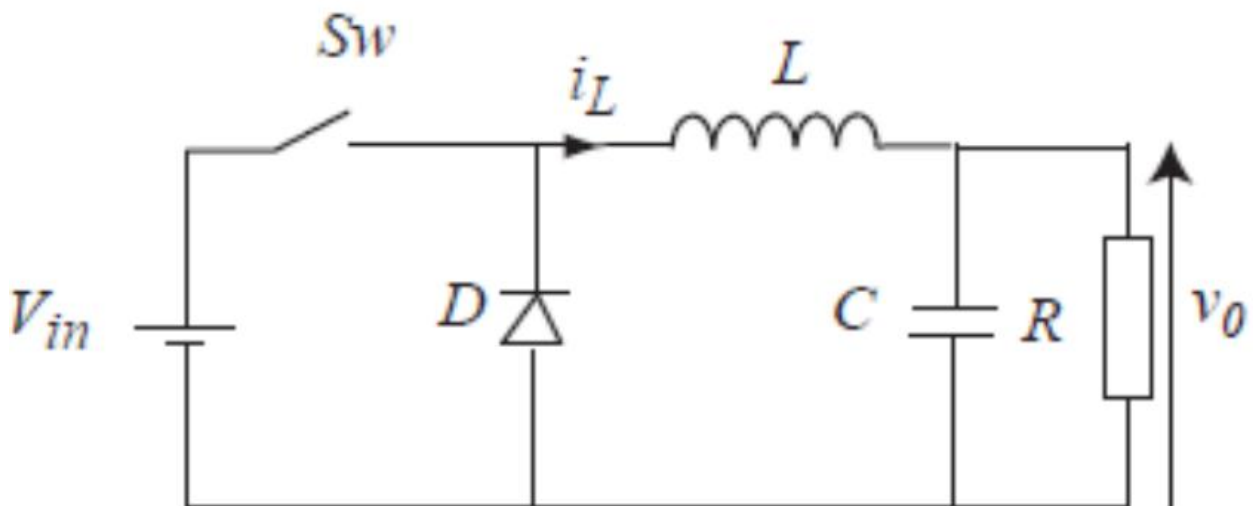
➤ Le choix de la surface de commutation est assez libre ;

➤ La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de  $v$  [25].

#### III.5. Commande par mode glissant d'un convertisseur Buck

##### III.5.1 Calcul de la surface de glissement

Pour notre cas, nous avons opté pour un convertisseur Buck. Pour cela, nous avons considéré la surface de glissement  $S$  suivante:



FigIII.1: Structure d'un convertisseur Buck [25].

$$S = ke + e \tag{III-18}$$

Où :

k est le coefficient de glissement et 'e' est l'erreur de tension de sortie définie comme suit:

$$e = Vref - V0 \tag{III-19}$$

En prenant en compte le modèle mathématique du convertisseur Buck, la surface peut être exprimée comme suit:

$$S = k(Vref - V0) \tag{III-20}$$

$$S = k(Vref - V) - (V0) \tag{III-21}$$

$$S = k(Vref - V0) - \left(\frac{1}{C}iL - \frac{1}{RC}V0\right) \tag{III-22}$$

$$S = -\frac{1}{C}iL + \left(\frac{1}{RC} - k\right)V0 + kVref \tag{III-23}$$

Et sa dérivée est donné par:[25]

$$\dot{S} = \left(\frac{1-kRC}{RC^2}\right)iL - \left(\frac{L-kRLC-R^2C}{R^2C^2L}\right)V0 - \left(\frac{Vin}{LC}\right)U \tag{III-24}$$

### III.5.2 Calcul de la loi de commande

L'étape suivante consiste à concevoir l'entrée de commande de sorte que les trajectoires de l'état soient entraînées et attirés vers la surface de glissement, puis rester glissante sur elle pour tout moment ultérieur. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le signal de la commande par mode glissant se compose de deux éléments d'une composante non-linéaire et une composante équivalente. L'organe de commande constitue l'équivalent d'une entrée de commande qui, lorsqu'on excite le système, produit le mouvement de ce dernier sur la surface de glissement lorsque celui-ci est allumé et chaque fois qu'il est en marche. L'existence du mode de glissement implique que :

$$uep = \alpha1iL - \alpha2V0 \tag{III-25}$$

Tel que :

$$\alpha1 = \frac{L-kRC}{RCVin} \tag{III-26}$$

Et

$$\alpha_2 = \frac{L - kRLC - R^2 C}{R^2 C V_{in}} \quad (\text{III-27})$$

Prenons la fonction de Lyapunov  $V$  positif définie comme suite :

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{III-28})$$

La dérivée de par rapport au temps doit être définie négative pour assurer la stabilité du système et pour rendre la surface  $S$  attractive. Cette condition conduit à l'inégalité suivante:

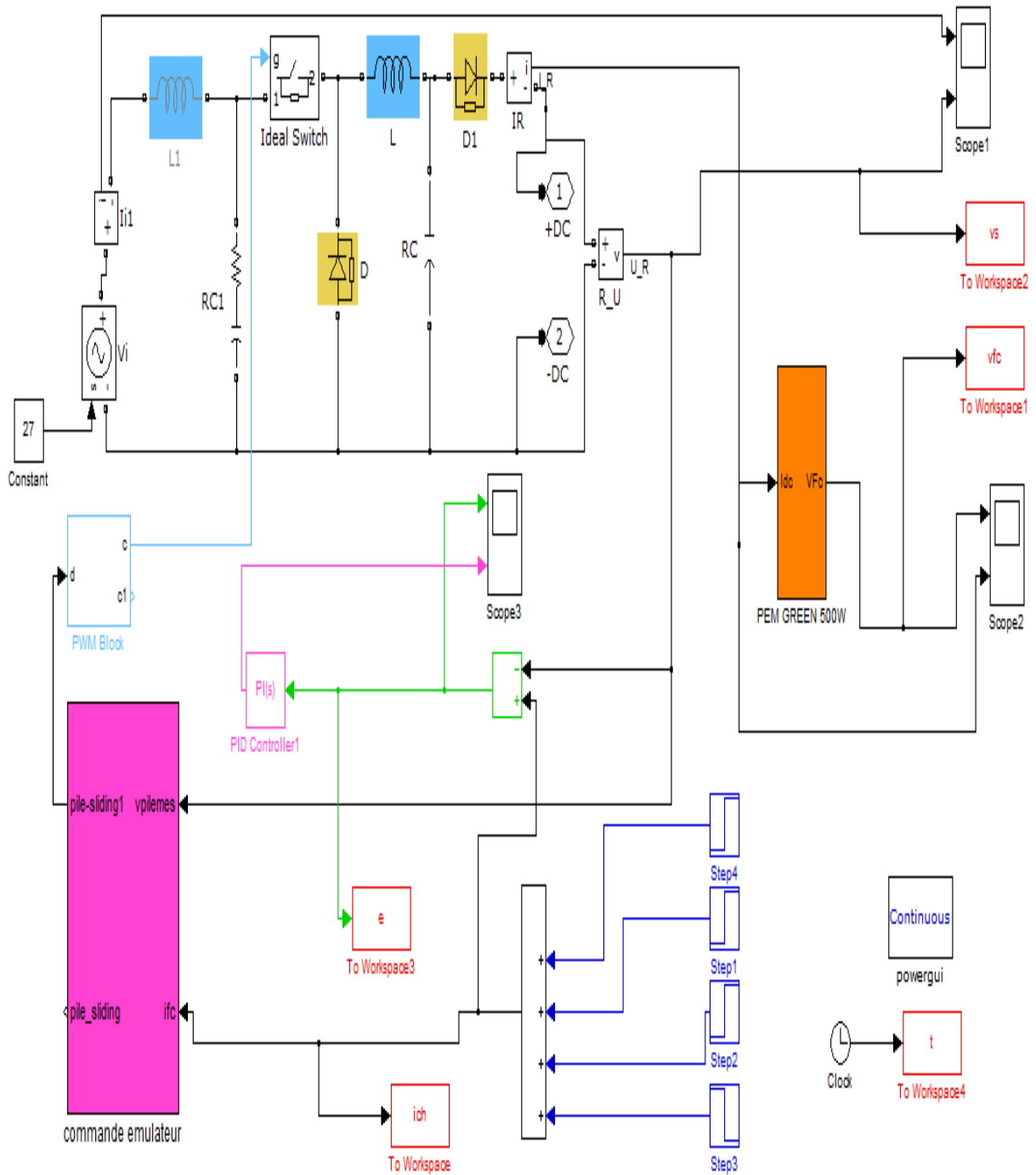
$$\dot{S} = \dot{\left( -\frac{V_{in}}{LC} un \right)} < 0 \quad (\text{II-29})$$

Pour satisfaire cette condition, la composante de commande non linéaire peut être définie comme suit:

$$un = \text{sign}(s) \quad (\text{III-30}) [25].$$

### III.5.3 Simulation

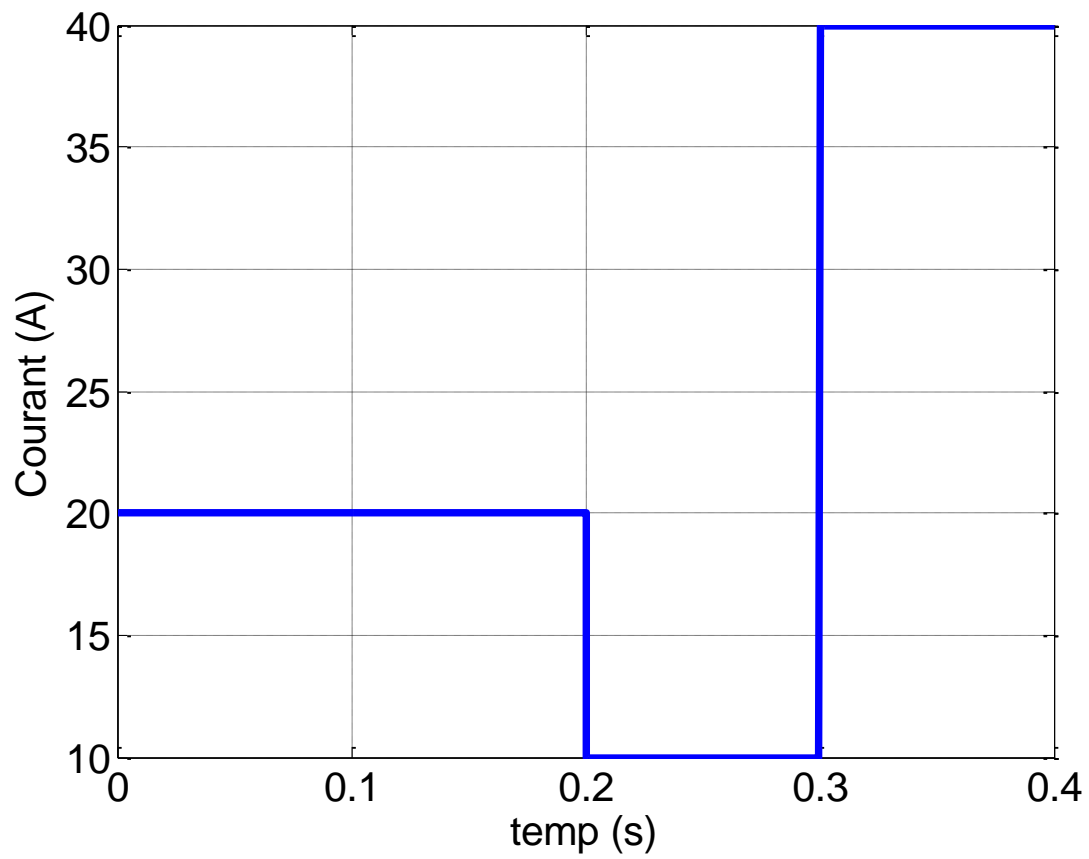
Le schéma bloc de la commande par mode glissant appliquée au convertisseur Buck est présenté par la figure suivante :



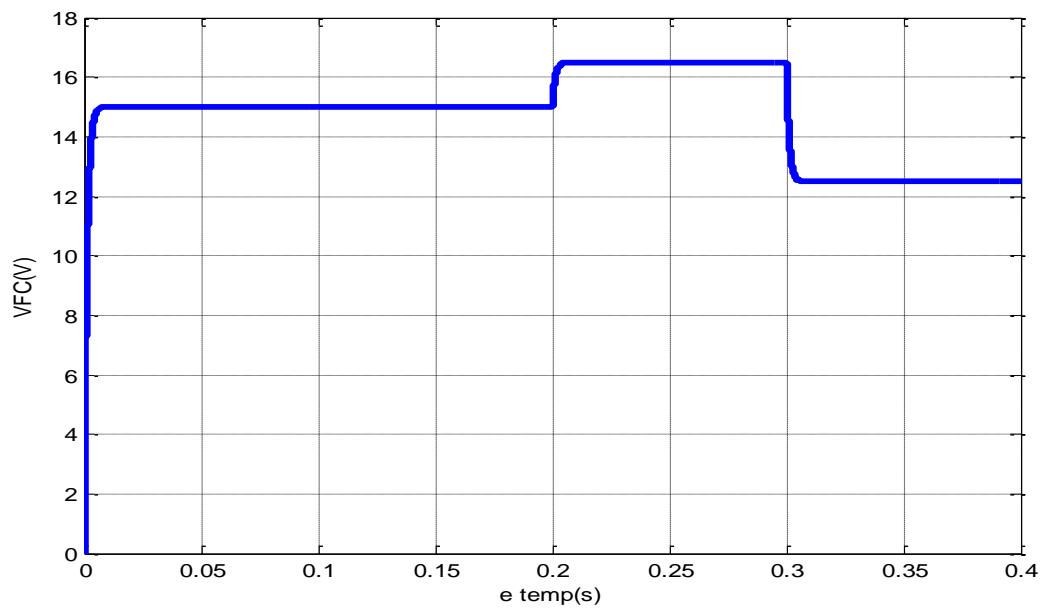
FigIII.2 : Schéma de simulation par la commande d'émulateur

### III .6 Présentation des résultats de la simulation

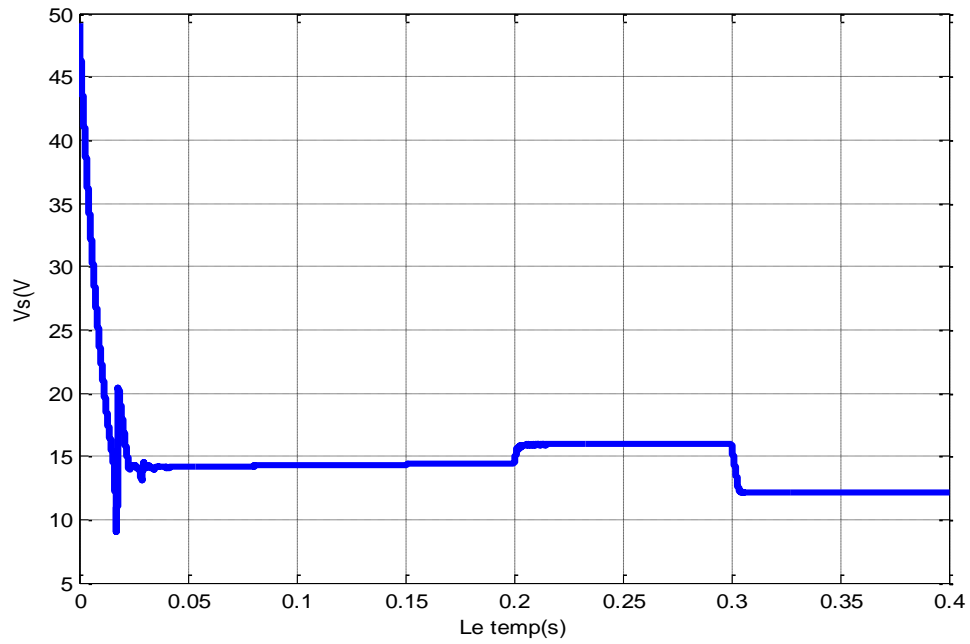
Les figures suivantes montrent l'évolution de la tension de sortie ( $v_s$ ), et la tension de la pile ( $V_{fc}$ ), du courant de charge ( $ich$ ) et l'Erreur ( $e$ ).



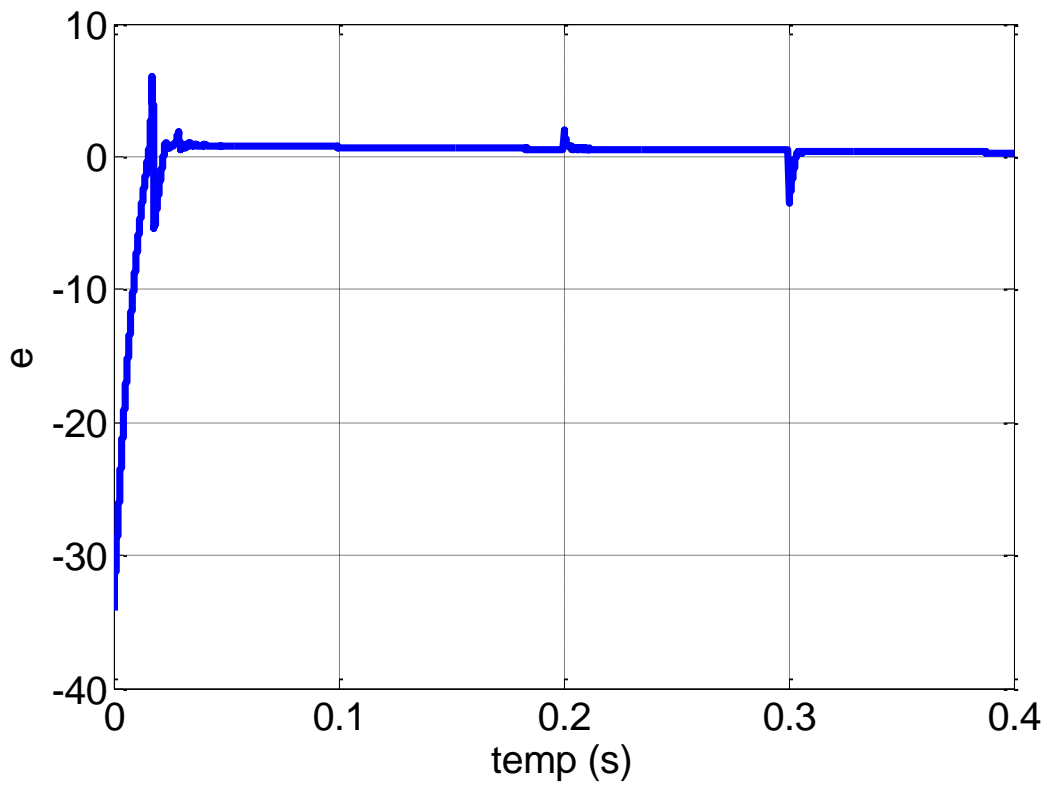
FigIII.3 : La variation de courant de charge



FigIII.4 : La tension de la modèle simulé de la pile.



FigIII.5 : La tension de sortie de l'émulateur.



FigIII.6 :L'Erreur entre la tension de la pile et la tension de sortie de l'émulateur



### **III .7 Interprétation des résultats**

La figure III-3 représente trois variations positive de la charge à partir de 10A à 40 A pour vérifier le bon fonctionnement de l'émulateur proposé et la figure III-4 montre la tension de sortie de la modèle simulé de la pile après les différents variations de charge.

La figure III-5 représente le comportement de la tension de sortie de l'émulateur après les tests de variation de charge et la figure III-6 démontre l'erreur entre la tension simulée par le modèle statique et la tension de sortie d'émulateur.

De l'analyse des figures, on peut observer que la commande présente des bonnes performances dynamiques lors de variation de la charge avec négligeable oscillations, un temps de réponse rapide et très faible dépassement cela implique le bon fonctionnement de l'émulateur avec la commande proposée.

### **III.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande par mode glissant et les résultats simulation et ceux de simulation issus de l'émulateur de pile à combustible, Afin de valider notre travail, nous avons effectué plusieurs mesures qui émulent plusieurs scénarios de fonctionnement tout en les comparant avec les résultats de simulation.

*Conclusion*

*Générale*

## *Conclusion Générale*

L'objectif de ce travail était l'étude et simulation d'un émulateur de pile à combustible. Ceci était dans le but de disposer d'un outil pour le but d'émuler la caractéristique tension-courant d'une pile à combustible, permettant d'effectuer des travaux de recherche expérimentaux sans avoir besoin d'un module de pile à combustible. Malgré les caractéristiques énergétiques et environnementales intéressantes ainsi que la diversité de technologie, la PAC, comme les autres sources d'énergie non conventionnelles, n'est pas une bonne source électrique. En effet, ses caractéristiques électriques, en générale.

Le présent mémoire a été entamé par une description générale d'une pile à combustible, leurs applications, leurs actualités et perspectives. Le deuxième chapitre a été consacré aux modules pile à combustible: Modélisation et Caractéristiques tension-courant, modèle et le convertisseur Buck. Afin de tester le comportement de l'émulateur. Et on finit par une présentation du convertisseur utilisé qui est un hacheur Buck.

Au dernier chapitre on a présenté la commande par mode glissant et les résultats de simulation issus des essais effectués sur notre émulateur. Et afin d'approuver la conformité des caractéristiques de ce dernier avec celles d'un vrai la charge de module de pile à combustible, les résultats obtenus ont été, aussi, présentés dans ce chapitre.

# *Bibliographie*

## ***RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

- [1] BELKACEM BOUZDA SIHAM (Etude des phénomènes des écoulements des gaz dans les canaux dans un pile à combustible de type PEMFC) thèse de Magister en physique de l'Université Batna(2011).
- [2] BEN AHHMED YOUNESSE (Etude et simulation d'une alimentation stabilisée à base d'une pile à combustible) thèse de Master Gien électrique de l'Université Biskra.
- [3] cours : professeur ABOUBOU ABDENNACER L'Université Biskra. (1Master 2016/2017)
- [4] <http://pile a combustible-Free-Fr /histories-htm>
- [5] <http://www.antodeclies.com ticle/4782-quel-avenir pour la pile à combustible. Html>
- [6] SAADI RAMZI (Convertisseurs Base Tension (42V ; 540V) ; Application Source Hybride Utilisation Une pile à Combustible) thèse de doctorat L'Université Biskra 2015.
- [7] <http://avionduuture.e-monsite-dons-l-avion/les-pile-a-cobustible-html>
- [8] <http://sr.wikibidia-org/wikilphoto pile combustible.>
- [9] Content: //downloads/all-downloads 174.
- [10] SAMAH SAKER (Modélisation et contrôle du système P a C convertisseurs et super condensateur) thèse de Magister Electrotechnique de l'Université Biskra.
- [11] Idris SADLI (MODELISATION PAR IMPEDANCE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE) thèse de doctorat L'Université de Bejaia 2006
- [12] IBTISSAM KEHEL (Développement et Caractérisation de nouveaux matériaux d'électrodes pour P à C a oxyde solide(SOFC) des titanates de lanthanes de structure cuspidine aux cobaltites) thèse de doctorat L'Université des sciences et technologies LILLE 2015.
- [13] Coure SAADI AICHA (1MASTER) de l'Université Biskra2017/2018
- [14] K.KORESCH ET G.SIMADRA (Fuells cellus and Their Application).edVCH(1996)
- [15] -<http://www2.dupont.com/FuelCells.US/products/nafion.html>.
- [16] 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) DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE Ecole doctorale : Systèmes 2004.
- [17] Guillaume-Conception de convertisseur statique pour l'utilisation de (P a C) thèse de doctorat université Joseph Fourier
- [18] Fei GAo, benjamin blunier, David bouQuAiN, Abdellah eL-mouDNi, Abdellatif miraoui(Émulateur de piles à combustible pour applications de Hardware-in-the-Loop) UTBM, Laboratoire systèmes et transports (SeT)

- [19] Convertisseur BUCK-wikiwand.com
- [20] Fr.wikipedia.org.(convertisseur Buck-wikipédia)
- [21] Convertisseur wikipedia (en.wikipedia.org)
- [22] HAFIAN Hicham (Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSPACE1103) thèse de Magister de Machines électrique et commande des systèmes l'Université Batna(2013).
- [23] H.MAKER (Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super condensateurs) thèse de doctorat L'Université Belfort Montbéliard, 2008.
- [24] M.Sosse Alaoui ; « Commande et observateur par mode glissant d'un système de pompage et d'un bras manipulateur ;Thèse de doctorat ;Maroc ;2009.
- [25] MERABET ABD ELWEHAB ET KHOULALENE YOUGHOURTA (COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT D'UN CONVERTISSEUR DC/DC) thèse de Master Gien électrique Option : Automatismes Industrielle L'Université de Bejaia 2013.
  
- [26] M.Girard; Electronique industrielle ; La bayeusaine graphique ; 1992.