

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : MACHINES ÉLECTRIQUES



## *Mémoire de Master*

*En vue de l'obtention du diplôme de master en génie électrique*

### *Commande robuste d'un convertisseur FIBC à quatre bras pour l'application PàC*

Réalisé par: **Lotfi GAREH**

Soutenue publiquement le:02/06/2016

**Devant le jury composé de:**

Ramzi SAADI	MAB	Université de Biskra	Président
Mohamed Yacine HAMMOUDI	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Okba KRAA	MAB	Université de Biskra	Examineur

*Année Universitaire 2015/2016*

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : **Machines électriques**



*Mémoire de Fin d'Etudes*

*En vue de l'obtention du diplôme:*

***Master***

***Thème***

***Commande robuste d'un convertisseur FIBC à quatre bras pour l'application PàC***

Présenté par

**Lotfi GAREH**

Avis favorable de l'encadreur:

*Cachet et signature*

DÉDICACE

*À mes très chers parents,  
À mes amis, surtout- Mekkaoui Hichem et Bernaui Taha ,  
À mes frères (Salim et Hamza) et sœurs,  
À La mémoire de mes grand parents,  
Et À tous ceux qui comptent pour moi.*

## REMERCIEMENTS



Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude et reconnaissance à mon directeur de mémoire, monsieur Mohamed Yacine HAMMOUDI enseignant chercheur à l'université de Biskra pour. leur disponibilité, soutien et surtout patience ont été des éléments déterminants dans la réussite de ma mémoire.

J'adresse mes respectueux remerciements aux membres du jury :

Monsieur Ramzi SAADI, MAB à l'université de Biskra, de m'avoir fait l'honneur de présider ma mémoire. Monsieur Okba KRAA, MAB à l'université de Biskra.

Je souhaite également exprimer mes remerciements aux collègues et aux amis ainsi qu'à ma famille (mes parents, mes frères Salim et hamza , et mes soeurs ) pour leurs encouragements et soutien. Merci à tous !!

*L*es travaux présentés dans ce mémoire portent sur la commande robuste d'un système non linéaire représenté par la technique des petits signaux, celle-ci permet de réécrire notre système sous forme d'une fonction de transfert, et par la suite, l'utilisation de l'approche  $H_\infty$  a nous permet de construire notre contrôleur. Le convertisseur proposé est de type FIBC quatre bras a pour but d'élever la tension de sortie d'une pile à combustible, cette dernière considérée comme une source d'énergie prometteuse dans les applications des véhicules électriques et la production décentralisée.

Un banc d'essai à puissance réduite a été réalisé, dans un environnement d'une carte dSPACE au laboratoire MSE afin de valider la stratégie de commande proposée.

**Mots-Clés:** Convertisseur continu-continu, convertisseur FIBC à quatre bras, pile à combustible, commande par  $H_\infty$ .

*T*his work deals with the control of a nonlinear system, First, based on the small signals approach, we rewrite the nonlinear system as a transfer function, then, the robust controller synthesis with repet to perturbations and unknown inputs is afterward. The proposed converter is the four phases floating interleaved boost converter, our goal, is the control of the DC-bus of the system (fuel cell-FIBC).

**Key-words:** DC-DC converter, four phases floating interleaved boost converter, fuel cell,  $H_\infty$  control.

Commande robuste d'un convertisseur FIBC à quatre  
bras pour l'application PàC

Lotfi GAREH

June 2, 2016

# TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction Générale</i>	1
<b>1 Généralités sur la pile à combustible</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.2 Historique et principe de fonctionnement	3
1.3 Les différents types des piles à combustible	6
1.4 La pile à membrane polymère (PEMFC)	7
1.4.1 Constitution d'une pile PEMFC	8
1.5 Système pile à combustible	10
1.6 Convertisseur statique	11
1.7 Système de contrôle - commande	12
1.8 Comparaison entre PAC et d'autres sources	12
1.9 Avantages et inconvénients des piles à combustible	13
1.10 Applications des piles à combustibles	14
1.10.1 Applications portables	14
1.10.2 Applications stationnaires	15
1.10.3 Applications dans le transport	16
1.11 Modélisation de pile PEM	17
1.12 Conclusion	18
<b>2 Convertisseur DC-DC</b>	<b>19</b>
2.1 Introduction	19
2.2 Hacheur basse tension non-isolé	19

2.2.1	Convertisseur élévateur BOOST . . . . .	20
2.2.2	Convertisseur abaisseur-élévateur $\langle\langle BUCK - BOOST \rangle\rangle$ . . . . .	23
2.2.3	Convertisseur $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$ en cascade . . . . .	25
2.2.4	Convertisseur Double $\langle\langle BOOSTDual \rangle\rangle$ entrelacé (FIBC) à quatre bras . . . . .	26
2.3	Modélisation du convertisseur <i>FIBC</i> à 4 bras: . . . . .	27
2.4	Conclusion . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Commande par <math>H_\infty</math> d'un FIBC à 4 bras</b>	<b>29</b>
3.1	Introduction . . . . .	29
3.2	La commande par la technique $H_\infty$ . . . . .	29
3.2.1	Principe de l'approche par $H_\infty$ . . . . .	30
3.3	Stabilité et robustesse d'un système asservis . . . . .	32
3.4	Choix des fonctions de pondération . . . . .	34
3.5	Commande FIBC à quatre bras . . . . .	35
3.6	Résultats de simulation de la commande $H_\infty$ . . . . .	36
3.6.1	<i>Essai en charge:</i> . . . . .	36
3.6.2	Essai avec défaut: . . . . .	42
3.7	Conclusion . . . . .	44
	<i>Conclusion Générale</i>	<b>45</b>



## LISTE DES FIGURES

1.1	Expérience de Sir W. Grove en 1839 . . . . .	4
1.2	Fonctionnement de principe d'une pile à combustible. . . . .	5
1.3	Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température. . . . .	6
1.4	Exemple d'assemblage d'une cellule élémentaire . . . . .	8
1.5	Système pile à combustible avec ses principaux auxiliaires . . . . .	11
1.6	Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie [KC00] . . . . .	13
1.7	Pile à combustible au méthanol Ultracell. . . . .	15
1.8	Pile à combustible au méthanol Ultracell. . . . .	16
1.9	Tucson ix 35 de Hyundai Motor Group . . . . .	17
1.10	Caractéristique statique de pile PEM. . . . .	18
2.1	(a) Convertisseur BOOST. . . . .	20
2.2	Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur BOOST . . . . .	22
2.3	(a) Convertisseur BUCK-BOOST. . . . .	23
2.4	Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur BUCK-BOOST . . . . .	24
2.5	Convertisseur BOOST en cascade. . . . .	26
2.6	Convertisseur double BOOST dual entrelacé FIBC à quatre bras. . . . .	27
3.1	Représentation standard d'un système . . . . .	30
3.2	Schéma représentatif d'une boucle de suivi . . . . .	32
3.3	S/KS mixed-sensitivity minimization in standard form(tracking) . . . . .	33
3.4	Structure de contrôle . . . . .	35

3.5	Correcteur $H_\infty$ final . . . . .	35
3.6	Schéma du contrôle d'un convertisseur FIBC à 4 bras . . . . .	36
3.7	les valeurs singulier de l'ensemble (commande-système) $G_{vx}$ . . . . .	37
3.8	les valeurs singulier de l'ensemble (commande-système) $G_{ix}$ . . . . .	38
3.9	Tension de sortie de (FIBC)à 4bras. . . . .	38
3.10	courant de la charge de (FIBC)à 4bras. . . . .	39
3.11	courants des inductance de (FIBC)à 4bras. . . . .	39
3.12	la puissance de la charge. . . . .	40
3.13	tension de la PàC . . . . .	40
3.14	courant de la PàC . . . . .	41
3.15	la puissance de la PàC . . . . .	41
3.16	Tension de sortie de (FIBC)à 4bras. . . . .	42
3.17	courant de la charge de (FIBC)à 4bras. . . . .	43
3.18	courants des inductance de (FIBC)à 4bras. . . . .	43

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Notre travail a été réalisé au sein de laboratoire MSE ( Modélisation des Systèmes Energétiques), il consiste à l'implémentation d'une commande robuste de type ( $H_\infty$ ) d'un convertisseur DC-DC pour les applications pile à combustible.

Actuellement l'industrie et les travaux de recherche s'orientent dans les différents secteurs vers les énergies renouvelables et particulièrement autour la pile à combustible grâce a sa faible taux d'émission de gaz polluant.

Une pile à combustible convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique a travers une réaction d'oxydoréduction sans aucun processus thermique ou mécanique.

L'association (Pile à combustible-convertisseur DC/DC) est une étape indispensable pour élever la tension produite à la sortie de la pile jusqu'au niveau du bus continu.

Notre objectif consiste à la conception d'un contrôleur robuste tout en assurant les bonnes performances de l'ensemble (commande-système) dans la présence des perturbations extérieures (charge, ainsi défauts).la stratégie de commande consiste de garantir la poursuite du bus continu et les courant des linges simultanément, cette stratégie contient deux sous contrôleurs pur deux fonctions de transfert. En effet, quelques tests expérimentaux abordent la commande par l'approche ( $H_\infty$ ) appliqué au convertisseur de type FIBC à quatre bras avec un banc d'essai de puissance réduite.

Les travaux présentés dans ce mémoire s'articulent autour de trois chapitres. Une revue bibliographique constitue le premier chapitre, où une généralité sur les piles à combustible, ainsi sa modélisation basé sur le modèle statique a été présenté.

Le second chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs DC-DC basse tension pour les applications pile à combustible et en particulier l'hacheur de type FIBC à quatre bras,

ainsi l'utilisation de la théorie des petits signaux pour la linéarisation du système.

Le dernier chapitre est consacré à l'application de la technique ( $H_\infty$ ) pour construire le contrôleur robuste appliqué au système étudié. Des résultats de simulations et pratiques ont été présentés. Enfin, une conclusion générale résumant le travail.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉS SUR LA PILE À COMBUSTIBLE

### 1.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter brièvement dans la première partie, le principe de fonctionnement d'une pile à combustible et leurs principales caractéristiques, ainsi que leur avantages et inconvénients. Puis nous mettrons l'accent sur le principe de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (*PEM*) et finir par le système complet avec l'ensemble des auxiliaires nécessaires. Dans la deuxième partie, un modèle statique de pile type *PEMFC* est fourni.

### 1.2 Historique et principe de fonctionnement

Le principe de la pile à combustible (*PAC*) a été découvert par Sir William Grove. Celui-ci expérimente en 1839 la première cellule électrochimique figure (1.1) fonctionnant avec de l'hydrogène comme carburant et des électrodes de platine poreux en milieu d'acide sulfurique, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible [SAA15] [Rom07]. Il a appelé ce dispositif une batterie à gaz.

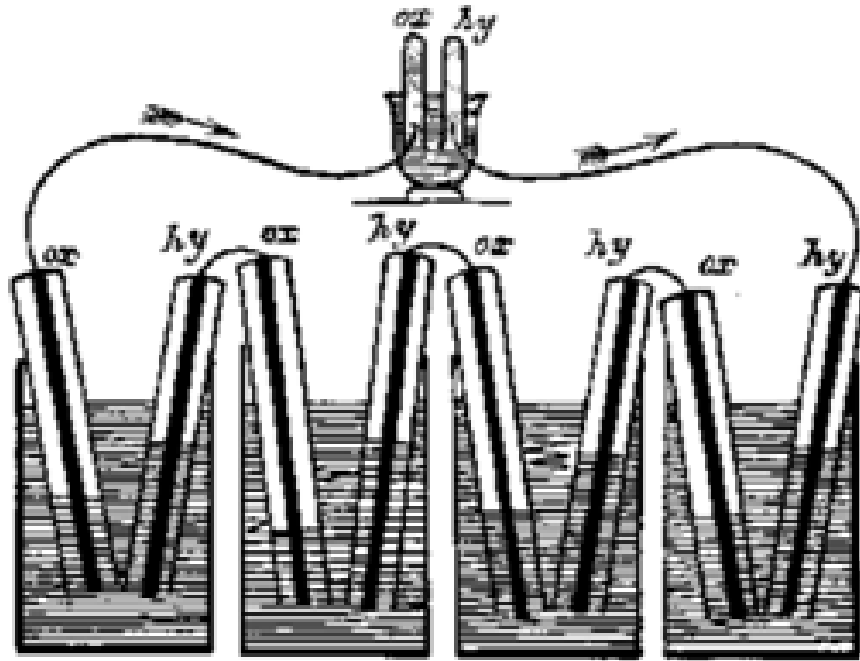


Fig 1.1: Expérience de Sir W. Grove en 1839

La *PAC* a connu une renaissance au début des années 60 lorsqu'un nouvel organisme gouvernemental des USA, la "National Aeronautics and Space Administration" (NASA), cherchait comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La NASA avait déjà éliminé, premièrement les batteries, car elles étaient trop lourdes, deuxièmement l'énergie solaire car elle était trop chère et enfin l'énergie nucléaire car trop risquée, et cherchait une source alternative. La *PAC* est apparue comme une solution possible. La NASA a alors attribué un certain nombre de contrats de recherche pour développer cette solution. Cette recherche amené au développement de la première membrane échangeuse de protons ou "membrane d'électrolyte polymère" [Coo02].

Depuis la fin des années 80 - début des années 1990, de nombreux acteurs s'y intéressent de nouveau : entreprises, centres de recherche, universités et gouvernements. Des prototypes ont été réalisés : véhicules, chargeurs de batterie de portable, systèmes de génération de chaleur et d'électricité, mais les piles sont encore une technologie en développement.

La pile à combustible est un système électrochimique (générateur d'énergie) qui convertit directement l'énergie chimique d'une réaction d'oxydation d'un combustible en énergie électrique. A la différence des moyens traditionnels de production de l'énergie, son rendement ne dépend pas du cycle de Carnot. Par ailleurs, le combustible est fourni en continu à la différence des piles traditionnelles (piles au Zinc). On peut ainsi obtenir

du courant de façon continue. Comme dans une batterie, la cellule élémentaire est constituée de 3 éléments : deux électrodes séparées par un électrolyte (solide ou liquide). L'une des électrodes (anode) est alimentée par un combustible (hydrogène, méthanol,...), l'autre (cathode) par un comburant (oxygène). L'électrolyte assure la diffusion d'un ion intermédiaire de la réaction d'oxydation du combustible figure (1.2), la diffusion électronique étant assurée dans le circuit métallique de la pile produisant ainsi un travail électrique.

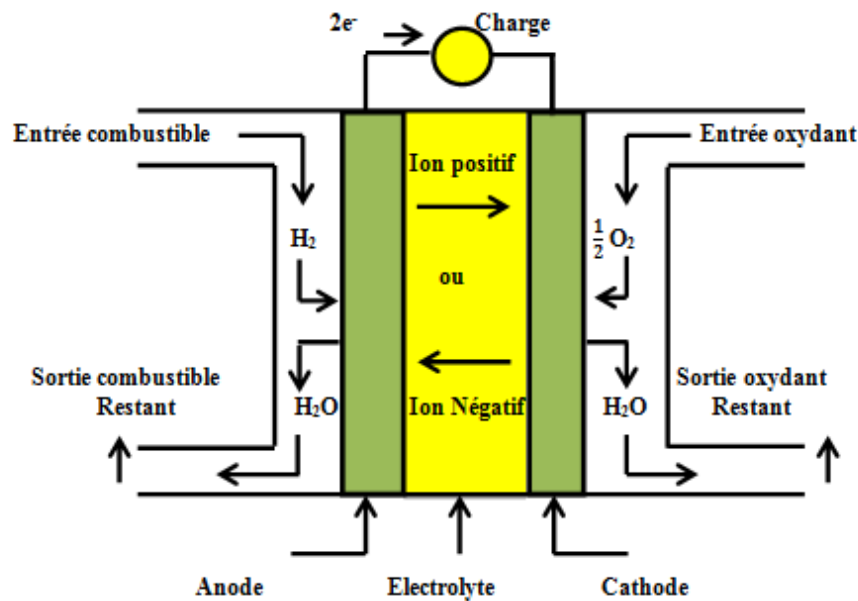


Fig 1.2: Fonctionnement de principe d'une pile à combustible.

Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis à l'anode, pour l'hydrogène et à la cathode, pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte [TZ99] [TRD06]. Certains PAC fonctionnent à haute température, d'autres à basse température, les types d'électrolytes utilisés peuvent être solides ou liquides. Les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible avec un électrolyte solide et fonctionnent à basse température sont destinées aux applications automobiles. Enfin une pile à combustible peut fonctionner avec une variété de carburants et d'oxydants. le carburant le plus efficace reconnu est l'hydrogène parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et

son abondance dans l'air [Tho05].

### 1.3 Les différents types des piles à combustible

En règle générale, les différents types des piles à combustible sont classées, d'une part selon la nature de leur électrolyte et d'autre part selon le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans les quels chaque type peut être utilisé [CGJ04]. Il existe actuellement six types de piles à combustible :

- \_ Les piles à membranes polymère échangeuse de protons ( *PEMFC* ProtonExchange Membranes Fuel Cell).
- \_ Les piles au méthanol direct ( *DMFC* Direct Methanol Fuel Cell).
- \_ Les piles à acide phosphorique ( *PAFC* Phosphoric Acid Fuel Cell).
- \_ Les piles alcalines ( *AFC* Alkaline Fuel Cell).
- \_ Les piles à oxydes solides ( *SOFC* Solid Oxide Fuel Cell).
- \_ Les piles à carbonates fondus ( *MCFC* Molten Carbonate Fuel Cell).

La figure (1.3) représente une classification des différents types de pile à combustible en fonction de la température.

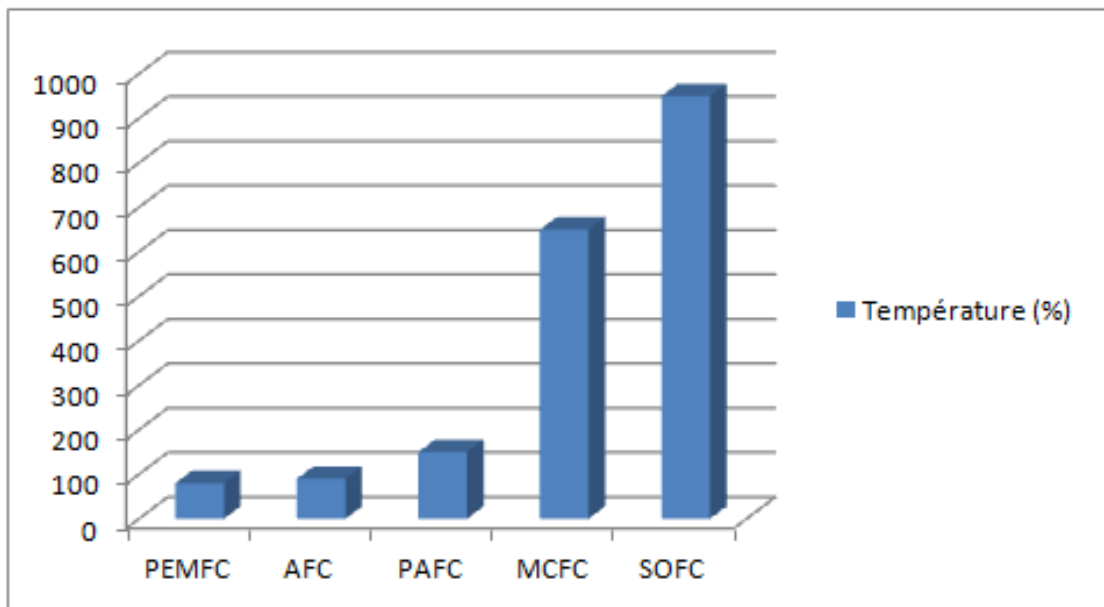


Fig 1.3: Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température.



## 1.4 La pile à membrane polymère (PEMFC)

Parmi les différents types de piles à combustible couramment développées, c'est la filière dite « acide à polymère solide » qui a été retenue par presque tous les acteurs de programmes automobiles dans le monde [EGE09]. Généralement appelée *PEMFC*, elle intéresse également les industriels pour des applications stationnaires (centaines de kW), portables (jusqu'à 100W) et transportables (de l'ordre de 100KW) [dB05]. Cette technologie retient l'attention pour trois raisons essentielles.

- \_ Leur faible température de fonctionnement, permettant un démarrage rapide, une plus grande souplesse de fonctionnement et une meilleure gestion thermique (moins de chaleur à évacuer) ;

- \_ Elles ne sont pas sensibles à la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air, contrairement à la filière alcaline ;

- \_ Durée de vie sensiblement supérieure aux filières à électrolyte liquide à cause de sa technologie solide de électrolyte polymère, ainsi qu'à une industrialisation plus simple.

Mais elles présentent encore des problèmes qui doivent être réglés :

- \_ Elles sont très sensibles au monoxyde de carbone (CO) ;

- \_ Leur faible température de fonctionnement ne permet pas de bien valoriser la chaleur (notamment dans le cas d'applications stationnaires);

- \_ Le catalyseur (Platine) coûte cher, de même que les plaques bipolaires et la membrane.

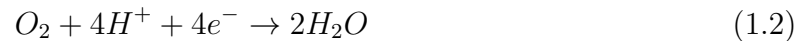
Une cellule élémentaire de pile à combustible de type *PEM* est généralement constituée de plaques bipolaires de graphite, conductrices de l'électricité, qui sont pressées contre l'assemblage membrane-électrodes [Han08]. L'assemblage membrane-électrode forme le cœur électrochimique du système. Sur l'anode, l'hydrogène est dissocié en présence catalytique suivant la réaction :



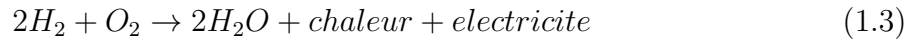
Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons, produisant ainsi de l'électricité à travers une charge (par exemple un moteur électrique).

Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et

donnent de l'eau selon la réaction de réduction suivante :



La réaction globale s'écrit donc :



Cette réaction est donc inverse à celle de l'électrolyse de l'eau. En pratique, une cellule élémentaire fournit à ses bornes une tension ne dépassant pas 1 V. Pour obtenir une tension plus importante, ces cellules élémentaires sont assemblées les unes aux autres en série ou en parallèle pour former la pile

### 1.4.1 Constitution d'une pile PEMFC

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode- membrane- électrode

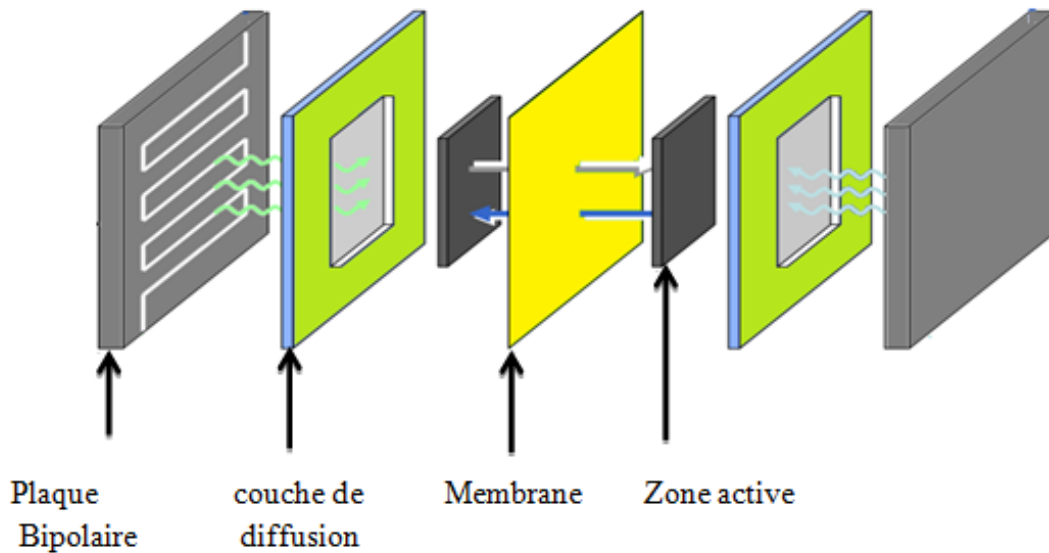


Fig 1.4: Exemple d'assemblage d'une cellule élémentaire

#### 1.4.1.1 La membrane

Pour les piles PEMFC, l'électrolyte est une membrane polymère ionique de type acide. Son rôle essentiel est d'assurer de manière sélective le passage de protons depuis l'anode,

lieu de leur production, vers la cathode, lieu où ces protons s'associent aux ions oxyde pour former de l'eau [SAA15].

#### 1.4.1.2 Les électrodes

Les électrodes sont le lieu des réactions électrochimiques: une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces réactions ont normalement une cinétique très lente, qui dépend de plus de l'état de surface des électrodes et de la facilité avec laquelle les réactions se réalisent donc Les électrodes doivent offrir la plus grande surface d'échange possible avec les gaz. Elles sont constituées d'un feutre ou d'un papier de carbone (100 à 300  $\mu m$  d'épaisseur) dont la face en contact avec l'électrolyte est enduite d'une pâte contenant du carbone platiné, d'un polymère hydrophobe : du poly-tétrafluoroéthylène ( *PTFE* ou Téflon).

#### 1.4.1.3 Couche de diffusion

La couche de diffusion de gaz est construite à partir d'un matériau poreux, ce qui assure de nombreuses fonctions différentes: diffuse les réactifs vers les catalyseurs, évacuer l'eau produite et permettre le transfert des électrons de l'anode vers la cathode. Le gaz dans le canal atteint les sites catalytiques à travers cette couche poreuse. Dans le même temps, l'eau produite lors de la réaction électrochimique est partiellement évacuée pour alimenter les canaux dans le sens inverse. Ils doivent donc être à la fois conducteurs et poreux.

#### 1.4.1.4 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires ont pour assurer la distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode et ce sont aussi des collecteurs de courant. Les électrons produits par l'oxydation de l'hydrogène traversent le support d'anode puis la plaque, passent par le circuit extérieur et arrivent du côté de la cathode. Les éléments *EME* (électrodes-membrane) sont accolés et connectés les uns aux autres par l'intermédiaire de ces plaques, les plaques positives étant au contact des plaques négatives. A ces plaques s'ajoutent deux plaques terminales à chaque extrémité de la pile. Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant, une imperméabilité aux gaz et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de la pile (eau, acide,

oxygène, etc.). Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, disponibles commercialement, mais à des prix élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, permettent difficilement d'envisager une fabrication industrielle. C'est pourquoi, de nombreux développements sont entrepris, notamment vers deux nouveaux concepts de plaques bipolaires : les composites organiques et les tôles métalliques [Lac05] .

## 1.5 Système pile à combustible

La tension maximale théorique de cellule d'une pile à combustible est environ 1.23V [ASC04]. 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 combustible sont reliés en série. Cet ensemble est appelé empilement de piles à combustible ou pile stack. Un stack de pile à combustible nécessite 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 [ASC04] [OIV<sup>+</sup>09] figure(1.5).

Généralement, un système pile à combustible est constitué d'un coeur de pile, de l'alimentation en hydrogène, de l'alimentation en air, d'un circuit de refroidissement, d'un circuit d'humidification, d'un convertisseur statique et enfin d'un système de contrôle. Les auxiliaires d'une pile à combustible consomment une partie non négligeable de l'énergie produite par celle-ci, entraînant ainsi la dégradation de rendement du système. Leur conception est donc souvent un élément très important dans le développement d'un système pile à combustible.

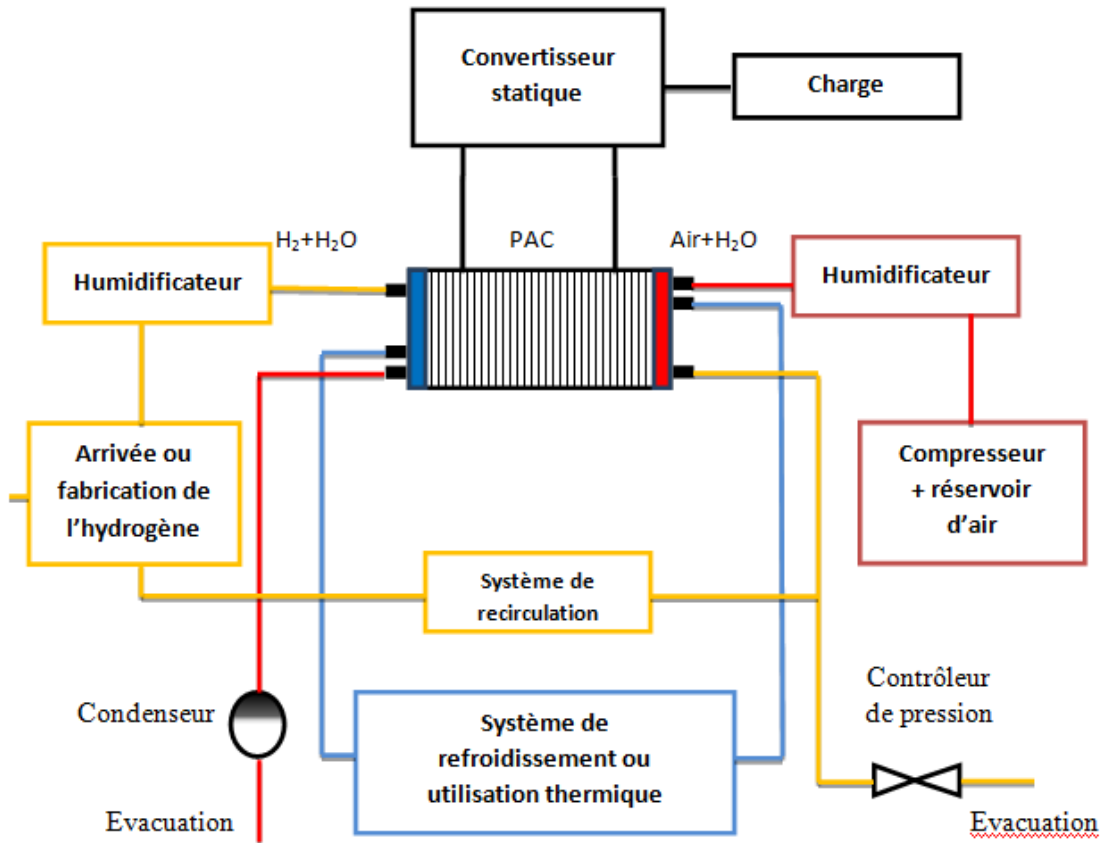


Fig 1.5: Système pile à combustible avec ses principaux auxiliaires

## 1.6 Convertisseur statique

Le convertisseur statique, est l'élément principal dans notre travail de recherche. Il a pour objet de stabiliser l'énergie générée par la PAC afin de transformer celle-ci, d'une source variable à un générateur de tension contrôlée [ATBTB10]. La tension de la pile, relativement faible, varie en fonction du courant débité. Un convertisseur statique est donc nécessaire pour faire l'interface entre la pile et le bus continu. Pour cet objectif, le convertisseur choisi dépend du cahier des charges et est généralement de type continu-continu, élévateur de tension et unidirectionnel en courant. Selon l'application, des sources auxiliaires comme les super-condensateurs et les batteries, peuvent être utilisées pour compenser le courant de la PAC lors des dynamiques rapides de la charge et lors du démarrage

## 1.7 Système de contrôle - commande

Il ne faut pas oublier l'existence de ce système car il décide du bon fonctionnement de l'ensemble du système PAC. Son rôle est de contrôler les flux d'énergie de la PAC par le débit de combustible et de carburant, de contrôler l'énergie entre la PAC et la source auxiliaire ainsi que d'asservir la tension désirée par la charge en assurant la sécurité de fonctionnement de tout le système [PSP04].

## 1.8 Comparaison entre PAC et d'autres sources

Les piles à combustible, batteries, condensateurs et les supercondensateurs sont tous des dispositifs d'énergie. Les piles à combustible et les batteries reposent sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. La différence entre les deux est qu'une pile nécessite des réactifs externes pour fournir l'énergie, contrairement à une batterie. De ce fait, alors qu'une batterie peut être déchargée, une pile à combustible n'a jamais à faire face à une telle situation. Les Condensateurs reposent sur la séparation physique de la charge électrique à travers un diélectrique au milieu, tel qu'un film de polymère ou une couche d'oxyde. Chaque type de dispositif offre une combinaison différente de la densité de puissance et la densité d'énergie. Les supercondensateurs reposent sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateurs, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte [Aya04]. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique.

Les comparaisons habituelles des dispositifs d'énergies utilisent la représentation du diagramme de Ragone figure (1.6). Il s'agit d'un moyen de comparaison surtout intéressant pour les applications dans lesquelles la masse est un critère très important, mais dans le contexte de traitement de l'énergie électrique, la durée de vie et le coût total (investissement, énergie perdue et vieillissement en recyclage) constituent des critères encore plus importants.

Sur le diagramme de Ragone, les différents dispositifs d'énergie électrique dans le plan

puissance spécifique-énergie spécifique sont représentés. Ce digramme montre que les piles à combustibles présentent les énergies spécifiques les plus élevées par rapport aux autres dispositifs. Néanmoins, leur puissance spécifique reste très limitée (quelques dizaines de  $W.Kg^{-1}$ ), et leur irréversibilité en courant interdit la récupération d'énergie [SAA15].

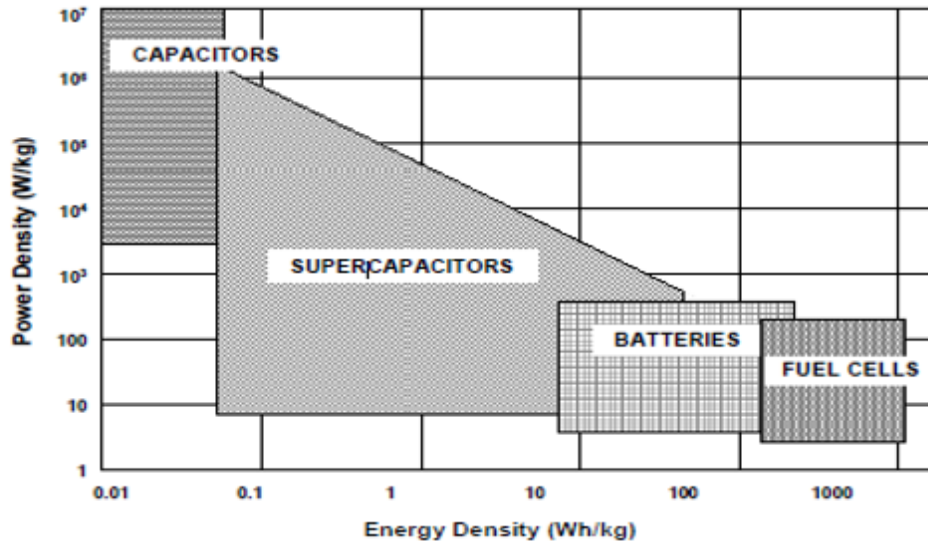


Fig 1.6: Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie [KC00]

## 1.9 Avantages et inconvénients des piles à combustible

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, notamment l'automobile.

Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages:

- des rendements énergétiques élevés même à charge partielle: de 40% à 70% électrique, plus de 85% en tout (électricité et chaleur) [JO02].
- de faibles émissions sonores.
- peu d'émissions (en particulier en termes de CO, Nox, CnHm et particules, mais elles dépendent du combustible utilisé et du type d'application). Ce qui en fait un atout dans la lutte contre la pollution, en particulier la limitation des gaz à effet de serre.
- elles sont de construction modulaire (cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue).
- diverses températures de fonctionnement: cela permet d'utiliser la chaleur en couplant avec une turbine ou pour des applications allant de l'eau chaude à la vapeur.
- pas de parties rotatives (donc pas d'usure mécanique pour le coeur de la pile).

Cependant de nombreux points faibles sont encore à régler :

- le coût : c'est le plus gros problème actuellement. Dans les applications automobiles, le prix des piles est 100 fois supérieur à celui assurant la compétitivité et de 20 à 50 % trop élevé pour les applications stationnaires. Pour la pile PEMFC, les éléments onéreux sont la membrane, les électrodes, le catalyseur, et les plaques bipolaires.
- le poids et le volume: si ces deux aspects ne sont pas une contrainte pour les applications stationnaires, elles le sont pour les applications portables et surtout automobiles.
- la durée de vie: elles doivent durer plus de 40000h dans les applications stationnaires [BMP<sup>+</sup>07], et quelques milliers d'heures pour les applications automobiles.
- la gestion thermique du module pile à combustible : dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage). Cela impose donc un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur.
- le carburant : idéalement, le meilleur carburant est l'hydrogène, mais comme aucune infrastructure adéquate (production, transport, distribution et stockage) n'existe actuellement, on pense à d'autres carburants pour obtenir ensuite l'hydrogène par reformage.

## 1.10 Applications des piles à combustibles

On distingue habituellement trois grands types d'applications :

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

### 1.10.1 Applications portables

Dans cette famille on inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance de l'ordre de 100mW) et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 30W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol [Fre12]. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et



chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

La technologie qui est utilisée est la pile PEMFC du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. L'engouement pour ce secteur est tel qu'aujourd'hui de nombreux congrès internationaux ne traitent que de ce sujet : on en est actuellement au stade des prototypes.



Fig 1.7: Pile à combustible au méthanol Ultracell.

### 1.10.2 Applications stationnaires

La décentralisation de la production d'énergie électrique est un secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux USA. Dans ce domaine, l'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (*NDLR* immeubles et industries ) les puissances mises en jeu sont dans la gamme  $200kW$  - quelques *MW* et la production individuelle (*NDLR* les maisons ) les puissances mises en jeu sont dans la gamme  $1 - 5kW$ . La PAC est très attendue dans ce domaine et contribuera pour une part importante dans la production décentralisée, la méthode de production de l'électricité de l'avenir [Bis06]. Toutefois, actuellement, la commercialisation de la PAC ne vise que des utilisations finales et non des grands systèmes pour la vente au réseau de distribution. Il y a plusieurs raisons à cela : d'une part, le coût reste encore élevé par rapport à d'autres moyens de production d'énergie électrique qui demandent souvent de grandes puissances.

D'autre part, elle devient beaucoup plus fiable à petite taille et sa possibilité de production conjointe d'électricité et de chaleur est bien adaptée aux besoins de l'habitant

d'un petit quartier. Par conséquent, les principales applications stationnaires se trouvent dans les secteurs commercial, industriel et résidentiel. Les stations à puissances supérieures de quelques centaines de kilowatts sont très rares.



Fig 1.8: Pile à combustible au méthanol Ultracell.

### 1.10.3 Applications dans le transport

La PAC est un marché à fort potentiel dans le domaine d'application du transport . Grâce à ses caractéristiques intéressantes et au développement rapide de la technologie hybride dans les véhicules. Utilisant l'hydrogène comme combustible, le rendement du moteur électrique à *PAC* est bien meilleur que les moteurs à l'essence. D'autre part, la faible émission des gaz de la *PAC* lui apporte une position très concurrente alors que la pollution de l'air est devenue un problème important, surtout dans les grandes villes. De plus, les moteurs silencieux sont un argument supplémentaire pour le transport urbain.

L'augmentation continue du nombre de nouveaux systèmes nous permet d'avoir une vue optimiste de ce secteur. D'après les experts de l'industrie automobile, on espère qu'un million de voitures à *PAC* seront commercialisées en 2025



Fig 1.9: Tucson ix 35 de Hyundai Motor Group

Hyundai Motor Group est le premier constructeur qui a pu fabriqué plus de 1000 véhicules à pile à combustible le Tucson ix 35 figure (1.8) dans l'année 2012 ; la majorité est destinée à l'Europe. Le coût de production est de 88 500 \$ (environ 71 000 euro) mais le prix de vente est sensiblement plus bas du fait des diverses subventions publiques connues ou attendues pour ce type de véhicule propre. Hyundai prévoit une production annuelle de 10 000 véhicules à partir de l'année 2016.

## 1.11 Modélisation de pile PEM

La caractéristique statique de pile à combustible est présentée par la courbe de polarisation figure (1.10) . La figure représente la tension tracée en fonction du courant d'une seule cellule d'une pile type PEM à basse température à 60° C. Au point où le courant est égale à zéro, la valeur de tension représente la tension du circuit ouvert de la pile à combustible. Dans les piles à combustible réelles, cette tension en circuit ouvert est légèrement inférieure à la tension thermodynamique théorique de la pile. Cette différence est généralement due à des pertes internes dans les piles à combustible réelles.

Pendant le fonctionnement de la pile à combustible, trois zones de perte peuvent être identifiées à partir de la figure (1.10) : zone des pertes d'activation, zone de pertes ohmiques et les pertes de concentration.

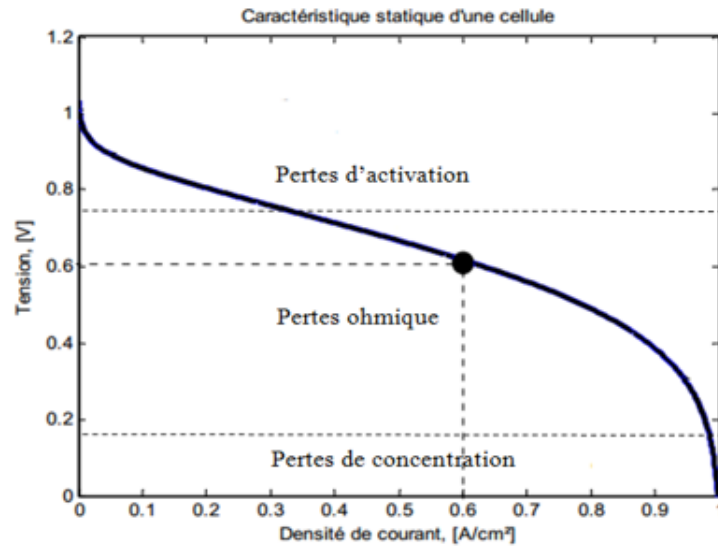


Fig 1.10: Caractéristique statique de pile PEM.

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Il existe un grand nombre de travaux [BHGW10] [SBAA13] qui proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM. Nous exposons, dans ce qui suit, trois modèles les plus utilisés, afin de modéliser la pile PEM:

- le modèle statique de Larminie et Dicks [LDM03],
- le modèle d'Amphlett et al [ABM<sup>+</sup>94]
- le modèle de Chamberlin-kim [KLSC95].

## 1.12 Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a présenté un état de l'art sur les piles à combustible, puis son principe de fonctionnement et les différents types existants, suivit d'une comparaison entre elles. Un bref aperçu a été mentionné sur les auxiliaires des piles, qui contribuent au bon fonctionnement de ces dernières.

## 2.1 Introduction

La pile à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible. Une seule cellule produit environ une tension de un volt. Afin d'augmenter cette tension à la sortie de la pile, plusieurs cellules sont empilées.

Le *FC* stack a une durée de vie et une fiabilité réduite et dépend de la cellule la plus faible. Afin de maintenir la fiabilité et la durée de vie à une limite raisonnable, la tension de sortie de l'empilement de piles à combustible est limitée . Pour beaucoup d'applications, cette tension est insuffisante. On est alors amené à placer un convertisseur *DC/DC* entre la pile et la charge électrique dont le rôle est d'élever la tension délivrée par la pile. Cet étage de conversion est, en outre, indispensable en raison de la variation de la tension délivrée en fonction de la charge.

## 2.2 Hacheur basse tension non-isolé

Nous allons nous intéresser dans cette partie de travail, aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  [SAA15]. Plusieurs variantes existent à savoir:

1. Le  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  classique.
2. le  $\langle\langle BUCK - BOOST \rangle\rangle$ .

3. le  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  entrelacé.
4. le double  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  dual entrelacé FIBC.

Ces structures, quant à elles, répondent bien aux contraintes de gamme de puissance de *PAC*.

### 2.2.1 Convertisseur élévateur BOOST

La première topologie est un convertisseur élévateur de tension  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$ , la tension de sortie est supérieure à sa tension d'entrée. Le convertisseur élévateur conventionnel est largement employé dans la correction du facteur de puissance (*PFC*) en raison de sa simple structure. La figure (2.2) ci-dessous, montre le convertisseur élévateur avec son taux de conversion et ses formes d'onde de l'état d'équilibre en mode de conduction continue (*CCM*) [SAA15].

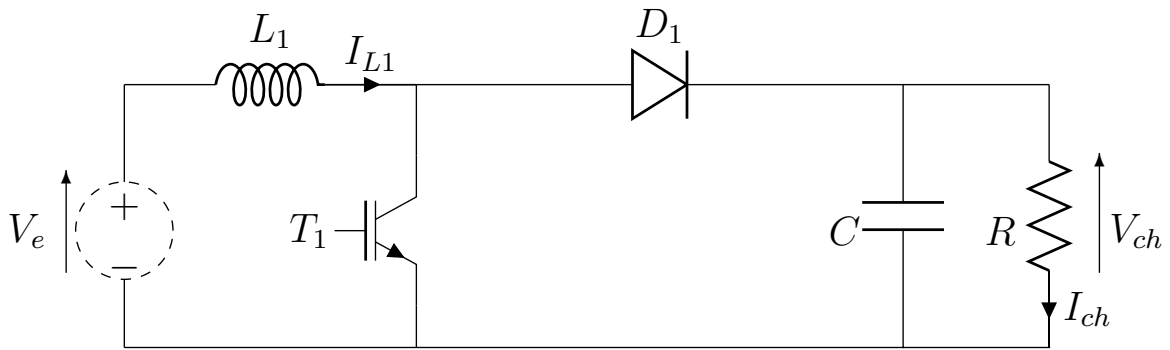
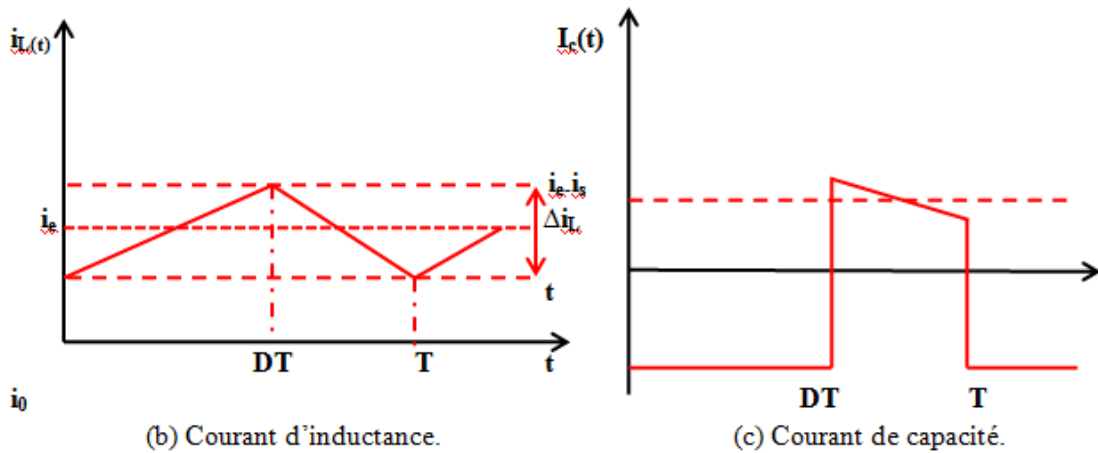
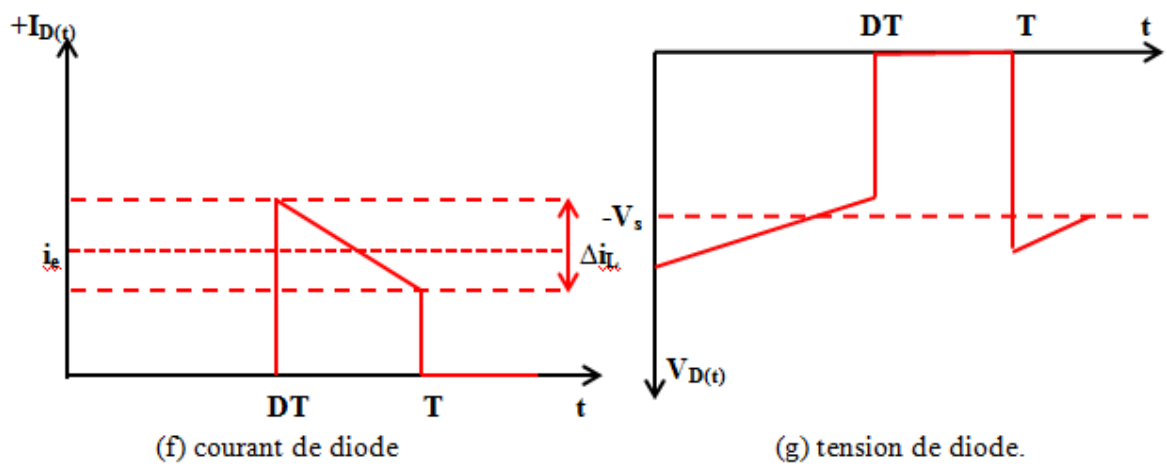
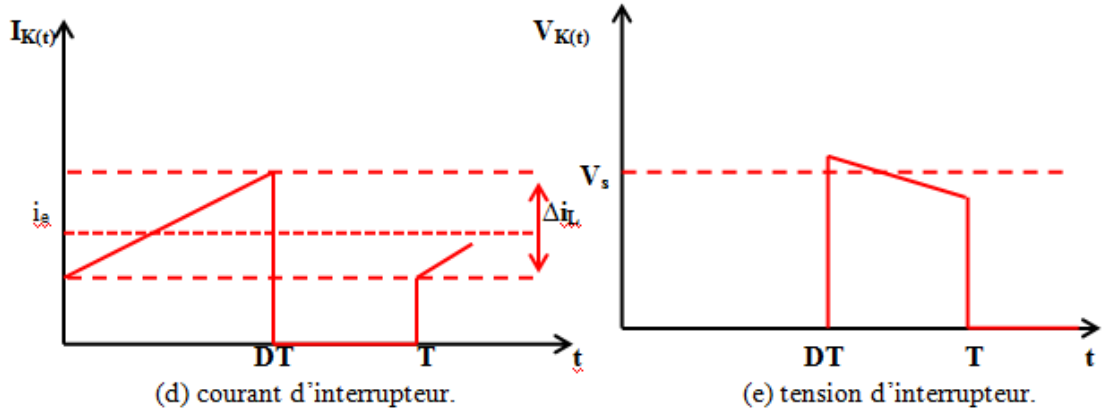
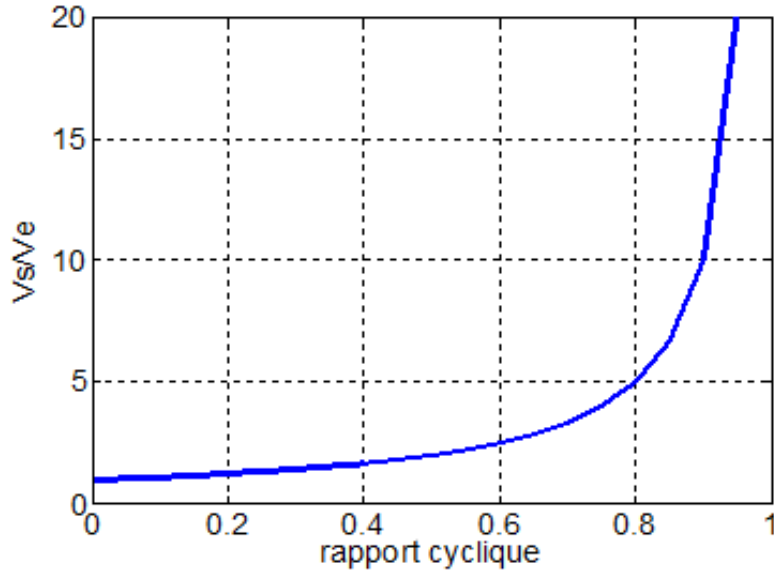


Fig 2.1: (a) Convertisseur BOOST.







(h) rapport de tension.

Fig 2.2: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur BOOST .

Le gain en tension du convertisseur élévateur, l'ondulation de courant d'inductance et l'ondulation de tension de sortie sont définis par les relations suivant :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-D} \quad (2.1)$$

$$\Delta_{iL} = \frac{D.V_e}{L.f} \quad (2.2)$$

$$\Delta V_s = \frac{D.I_s}{Cf} = \frac{D.V_e}{(1-D).RCf} \quad (2.3)$$

D'où  $D$  est le rapport cyclique,  $f$  est la fréquence de découpage et  $R$  est la charge équivalente. Par définition,  $D$  est compris entre 0 et 1, et si le rapport cyclique est supérieur à 0,5 ; la tension de sortie est toujours supérieure à la tension  $V_e$  d'entrée, le montage est élévateur en tension [SAA15].

Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{I_s}{1-D} \quad (2.4)$$



### 2.2.2 Convertisseur abaisseur-élevateur $\langle\langle BUCK - BOOST \rangle\rangle$

Ce convertisseur est appelé abaisseur-élevateur par son aptitude à fournir une tension plus faible ou plus élevée que celle appliquée à son entrée, cette valeur de tension dépend de la valeur du rapport cyclique. La figure (2.4) ci-dessous, montre le convertisseur  $\langle\langle BUCK - BOOST \rangle\rangle$ , son gain en tension et les formes d'onde de l'état d'équilibre de CCM.

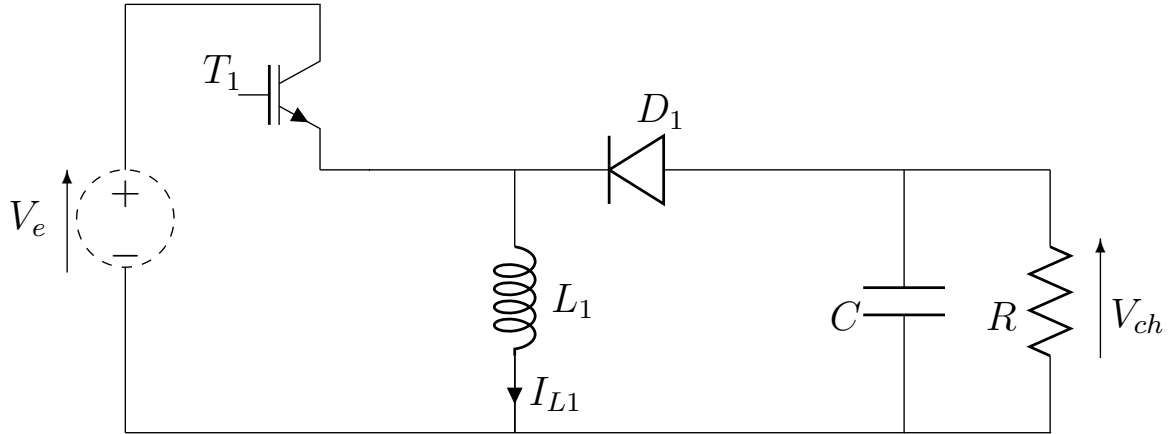
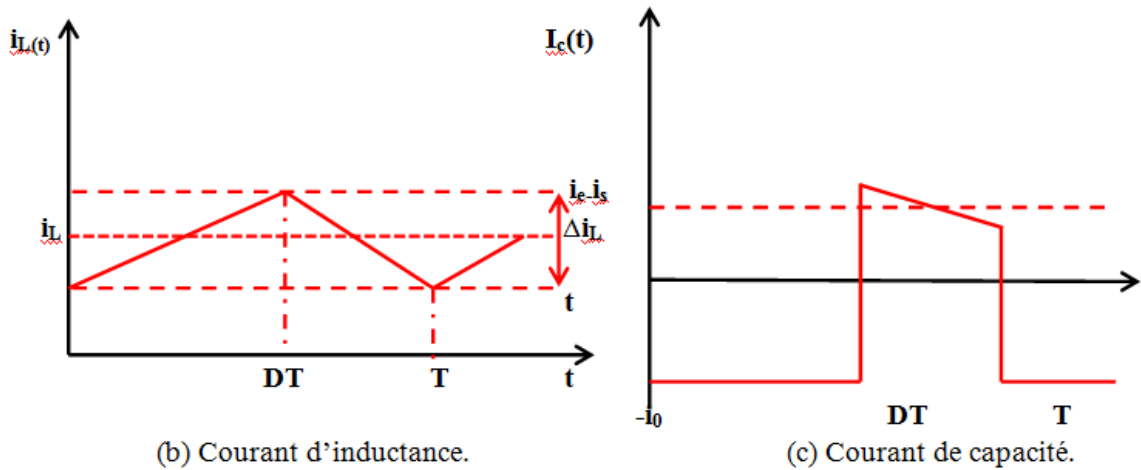


Fig 2.3: (a) Convertisseur BUCK-BOOST.



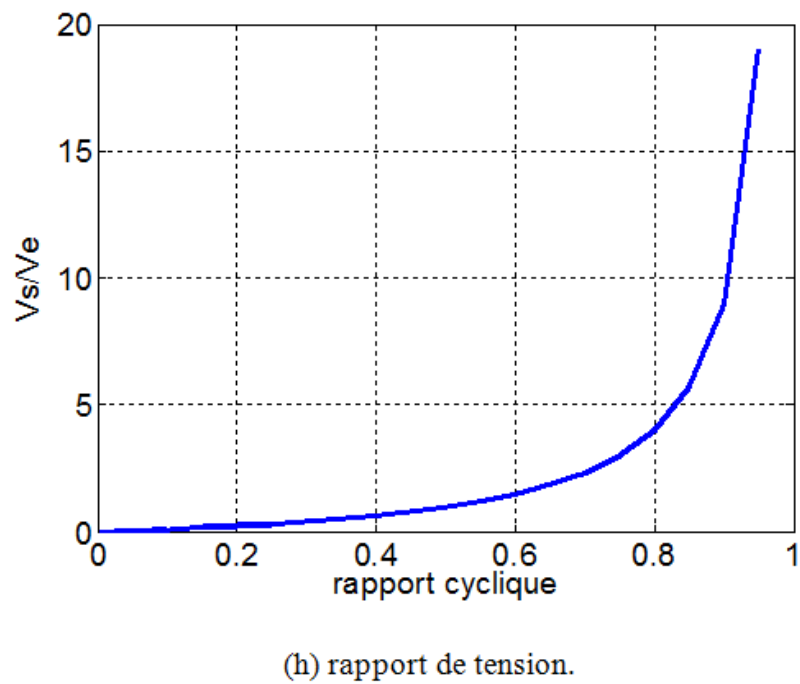
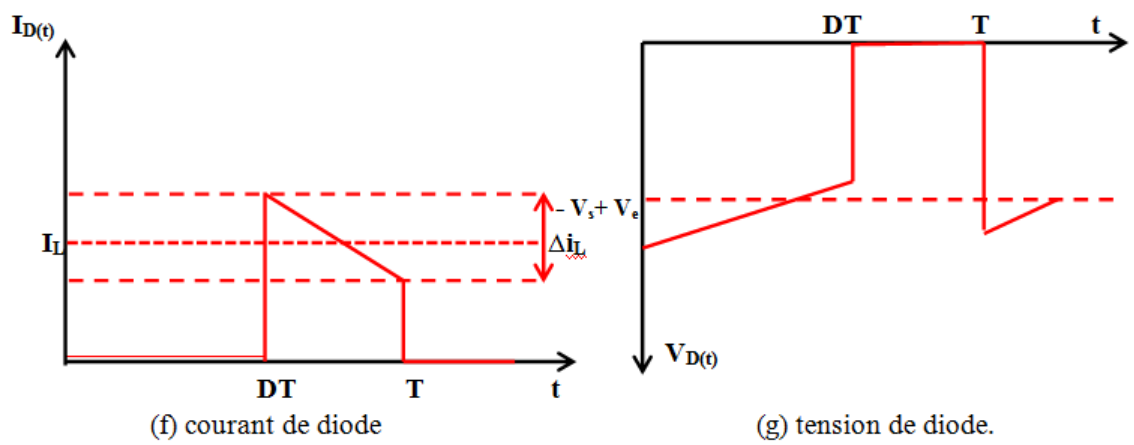
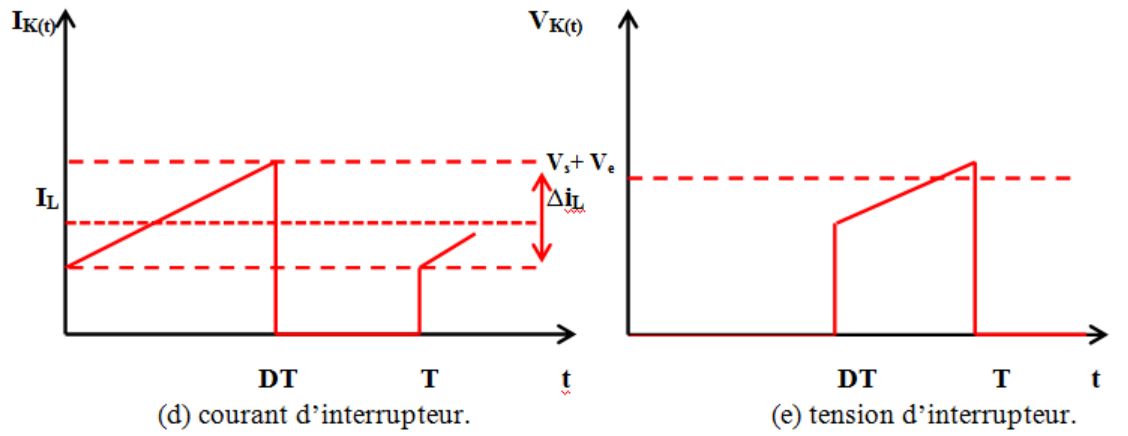


Fig 2.4: Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur BUCK-BOOST .

Le gain en tension du convertisseur abaisseur-élevateur, l'ondulation de courant d'inductance et l'ondulation de tension de sortie sont définis par les relations suivantes :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{D}{1-D} \quad (2.5)$$

$$\Delta i_L = \frac{D \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (2.6)$$

$$\Delta V_s = \frac{D \cdot I_s}{C \cdot f} = \frac{D^2 \cdot V_e}{(1-D) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (2.7)$$

D'où  $D$  est le rapport cyclique,  $f$  est la fréquence de découpage et  $R$  est la charge équivalente. Par définition,  $D$  est compris entre 0 et 1, et si le rapport cyclique est supérieur à 0,5 ; la tension de sortie est toujours supérieure à la tension  $V_e$  d'entrée.

Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{I_s \cdot D}{1-D} \quad (2.8)$$

### 2.2.3 Convertisseur $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$ en cascade

Le gain en tension du convertisseur  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  peut être augmenté pour satisfaire la condition de haut gain en tension en utilisant une structure en cascade. Le convertisseur  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  en cascade est représenté sur la figure (2.5) .

D'où  $n$  est le nombre de  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  connectés en série (nombre d'étages). Les contraintes de tension du premier étage sont faibles, donc il peut fonctionner avec une fréquence de découpage élevée afin d'améliorer la densité de puissance. Le second étage peut travailler avec une fréquence de découpage faible pour réduire les pertes de commutation [LC08] [Hua09].

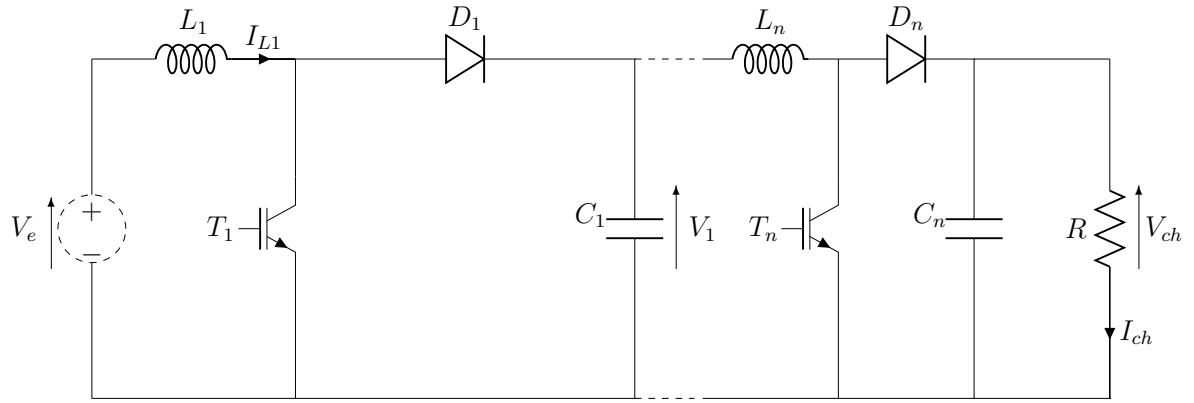


Fig 2.5: Convertisseur BOOST en cascade.

Le rapport de tension du convertisseur correspond au produit du rapport de tension des  $n$   $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  élémentaires. On peut donc obtenir ainsi un rapport de tension très élevé. le rapport de tension théorique ainsi réalisé est défini par la relation suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \prod_{j=1}^n \frac{1}{1 - D_j} \quad (2.9)$$

Le rapport de transformation peut donc être élevé. Cependant, l'augmentation du nombre de convertisseurs en cascade augmente l'ordre du système et augmente la difficulté de contrôle de celui-ci.

#### 2.2.4 Convertisseur Double $\langle\langle BOOSTDual \rangle\rangle$ entrelacé (FIBC) à quatre bras

. Le schéma électrique de principe de ce convertisseur est présenté sur la figure (2.6). Il est nommé aussi BOOST flottant entrelacé [BBFL06] [CAY<sup>+</sup>11]. Il se compose de deux  $\langle\langle BOOST \rangle\rangle$  dont les entrées sont communes, mais dont les sorties sont séparées par la charge. Les commandes des interrupteurs sont décalées de  $T/4$  de façon régalerere avec le même rapport cyclique pour chaque phases. [SAA15].

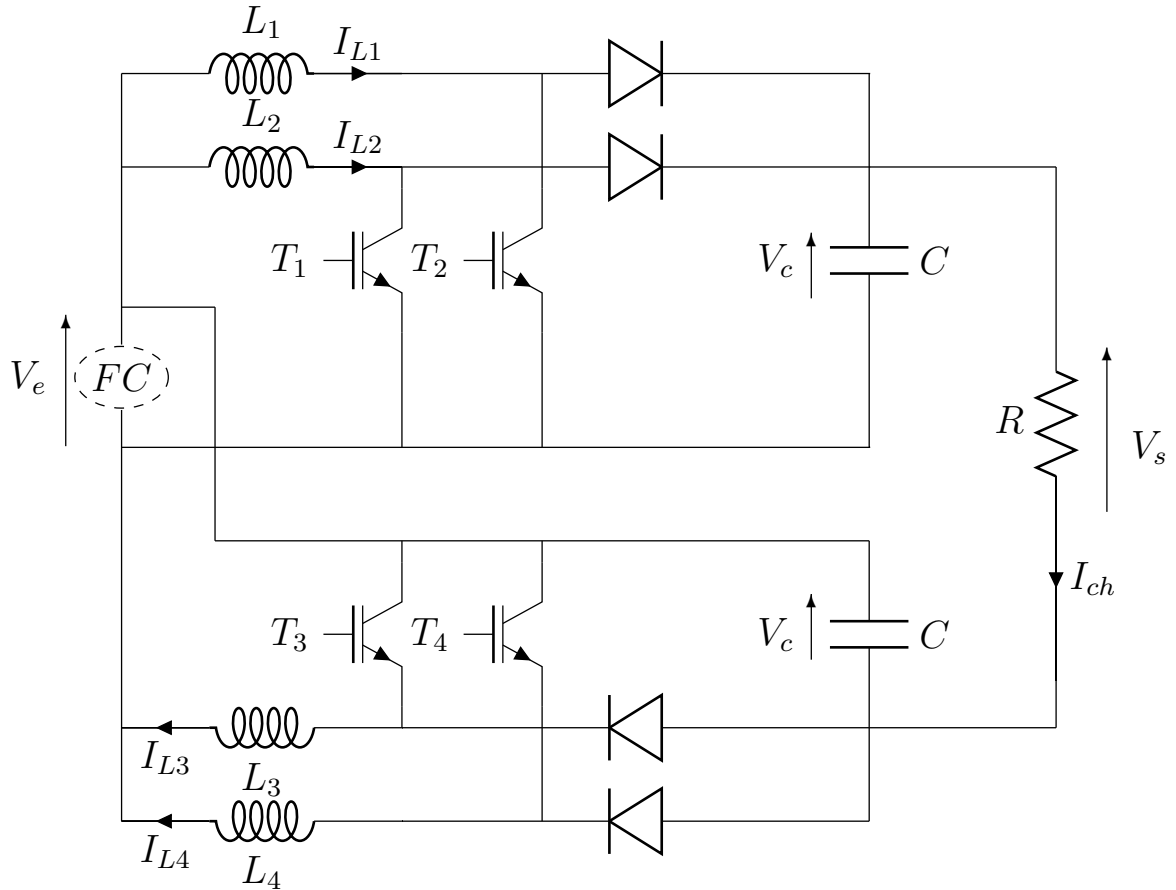


Fig 2.6: Convertisseur double BOOST dual entrelacé FIBC à quatre bras.

Le rapport cyclique  $D$  et le gain en tension du FIBC à quatre bras sont données par :

$$D = \frac{V_s - V_e}{V_s + V_e} \quad (2.10)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1 + D}{1 - D} \quad (2.11)$$

### 2.3 Modélisation du convertisseur *FIBC* à 4 bras:

Afin de concevoir notre commande du convertisseur proposée, la modélisation du système est une étape indispensable [SAA15]. D'après le schéma électrique de la structure du convertisseur, les équations différentielles sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} 2L_1 \cdot \frac{dL_1}{dt} = (D_1 + 1) \cdot V_e + (D_1 - 1) \cdot V_s - 2r_{L1} \cdot I_{l1} \\ 2L_2 \cdot \frac{dL_2}{dt} = (D_2 + 1) \cdot V_e + (D_2 - 1) \cdot V_s - 2r_{L2} \cdot I_{l2} \\ 2L_3 \cdot \frac{dL_3}{dt} = (D_3 + 1) \cdot V_e + (D_3 - 1) \cdot V_s - 2r_{L3} \cdot I_{l3} \\ 2L_4 \cdot \frac{dL_4}{dt} = (D_4 + 1) \cdot V_e + (D_4 - 1) \cdot V_s - 2r_{L4} \cdot I_{l4} \\ C_a \cdot \frac{dV_{ca}}{dt} = -I_{ch} + (1 - D_1) \cdot I_{L1} + (1 - D_2) \cdot I_{L2} \\ C_B \cdot \frac{dV_{cb}}{dt} = -I_{ch} + (1 - D_3) \cdot I_{L3} + (1 - D_4) \cdot I_{L4} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Par l'introduction de la technique des petits signaux, on peut linéariser notre système autour ces points de fonctionnements, alors Les deux fonctions de transfert en boucle ouverte dans le domaine de Laplace du convertisseur étudier sont données par [GGND13] :

$$G_{ix}(s) = \frac{\frac{2(D+3)}{1-D} \left(1 + \frac{RC}{D+3}\right) s}{2R(1-D)^2 + 2Ls + RLCs^2} \quad (2.13)$$

$$G_{vx}(s) = \frac{2R(1-D)V_{in} - \frac{2RLs}{1+D}}{2R(1-D)^2 + 2Ls + RLCs^2} \quad (2.14)$$

### Remarque:

L'objectif principale est de contrôler le bus continu et les courants des lignes, c'est pour cela il faut construire deux contrôleur pour les deux fonctions de transfert.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures des convertisseurs DC/DC pour les applications piles à combustible. Nous avons présenté aussi leurs principes de fonctionnement, Les convertisseurs non isolés, sont les plus prisés, vu leurs rendement important, leurs faible poids et surtout facile à commander . Ces convertisseurs généralement recommandés pour les applications moyenne puissance comme les véhicule électrique .

## CHAPITRE 3

# COMMANDE PAR $H_\infty$ D'UN FIBC À 4 BRAS

### 3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a déterminé la structure de convertisseur FIBC pour les applications piles à combustible, il s'agit d'une mise en parallèle de deux convertisseurs. Nous présentons dans ce chapitre la modélisation et la commande par l'approche ( $H_\infty$ ) du convertisseur proposé, la modélisation en « petits signaux », bien connue sous le nom de « small-signal average model », a été appliquée pour rendre le système non linéaire sous la forme linéaire. La commande proposée est réalisée par simulation et validée expérimentalement, en utilisant un prototype à échelle réduite.

### 3.2 La commande par la technique $H_\infty$

La notion  $H_\infty$  a été encadré par G. Zames en 1976 , les origines de cette approche sont beaucoup plus vieux et remontent aux années 1960, lorsque Zames découvre le théorème du petit gain . Après plus de 30 ans, le problème  $H_\infty$  a été résolu par P. Apkarian et D. Noll en 2006 [AN06]. Dans ce chapitre, nous présentons le problème de contrôle par l'approche  $H_\infty$ .

### 3.2.1 Principe de l'approche par $H_\infty$

Le problème de la commande par  $H_\infty$  peut être énoncé comme suit; soit la structure dans la Figure (3.1), cette représentation connue sous la dénomination ( Problème standard ), apporte à la fois le système à commander et le correcteur associé. Où  $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ ,  $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ ,  $z(t) \in \mathbb{R}^{n_z}$  sont les vecteurs d'entrées de commande, les sorties mesurées, et les sorties à contrôler respectivement.  $W(t) \in \mathbb{R}^{n_w}$  sont les entrées exogènes (consigne, perturbation, ...).

Le bloc  $P(s)$  représente le modèle nominal pondéré et  $K(s)$  le contrôleur recherché. Soit la fonction de transfert en boucle fermée, couramment notée  $T(P, K)$  et dite la transformation fractionnaire linéaire du transfert entre l'entrée  $w$  et la sortie  $z$ . Le problème  $H_\infty$  consiste à concevoir une commande assurant la stabilité interne du système bouclé  $T(P, K)$  ainsi que l'atténuation de l'influence des perturbations sur la sortie  $z$  du système à contrôler [ÅH06].

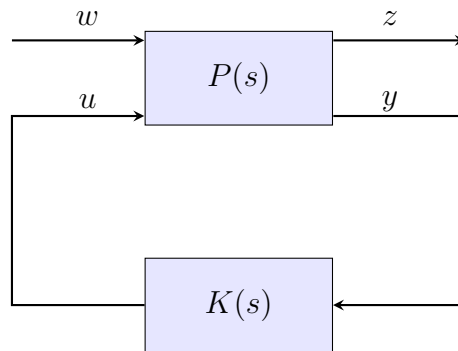


Fig 3.1: Représentation standard d'un système

La synthèse d'une loi de commande consiste alors à déterminer la plus faible valeur notée  $\gamma$  pour laquelle il existe un correcteur  $K(s)$  stabilisant le système de manière interne minimisant la norme  $H_\infty$  du transfert  $T(P, K)$  tel que:

$$\|T_{w \rightarrow z}(P, K)\|_\infty \leq \gamma \quad (3.1)$$

Le modèle nominal pondéré  $P(s)$ , et le contrôleur  $K(s)$  sont représentés dans l'espace d'état comme suit [SP07] [BS13] :



$$P : \begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \\ z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{cases} \quad (3.2)$$

$$P(s) : \left[ \begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] \quad (3.3)$$

$$K : \begin{cases} \dot{x}_K = A_Kx_K + B_Ky \\ u = C_Kx_K + D_Ky \end{cases} \quad (3.4)$$

$$K(s) : \left[ \begin{array}{c|c} A_K & B_K \\ \hline C_K & D_K \end{array} \right] \quad (3.5)$$

Où  $x(t) \in \mathbb{R}^{n_p}$ , et  $x_k(t) \in \mathbb{R}^k$  sont les vecteurs d'état du système et du contrôleur respectivement.

Généralement  $D_{22} = 0$ , dans ce cas, la fonction  $T_{w \rightarrow Z}(P, K)$  en boucle fermée sera exprimé par:

$$T_{w \rightarrow Z}(P, K) : \left[ \begin{array}{c|c} A(K) & B(K) \\ \hline C(K) & D(K) \end{array} \right] \quad (3.6)$$

Où

$$A(K) = \begin{bmatrix} A + B_2D_KC_2 & B_2C_K \\ B_KC_2 & A_{21} \end{bmatrix}, B(K) = \begin{bmatrix} B_1 + B_2D_KD_{12} \\ B_KD_{21} \end{bmatrix}, C(K) = etc \quad (3.7)$$

Finalement, pour une fonction de transfert stable  $T(s)$ , le  $H_\infty$  norme est définie comme suit:

$$\|T\|_\infty = \max \bar{\sigma}(T(j\omega)) \quad (3.8)$$

où  $\bar{\sigma}(M)$  est la valeur singulière maximale d'une matrice complexe.

Un système asservi est robuste s'il est stable d'une manière interne et externe, tout en assurant des bonnes performances, en présence des différents types de perturbations

[HUY<sup>+</sup>13]. La stabilité externe exige que toute entrée bornée  $r(t)$  devra produire une sortie bornée  $y(t)$ .

En termes de fonction de transfert, la stabilité externe se traduit par la stabilité de la fonction de transfert en boucle fermée  $T$ , tandis que la stabilité interne requiert la stabilité des quatre fonctions de transfert  $S, KS, GS$  et  $T$ , tel que :

$S$ : la fonction de sensibilité.

$T$ : la fonction complémentaire.

La stabilité de la boucle fermée peut être analysée par le théorème du petit gain.

### 3.3 Stabilité et robustesse d'un système asservi

Soit le schéma classique d'un système  $G(s)$  bouclé par un correcteur  $K(s)$  représentée par la Figure(3.2).

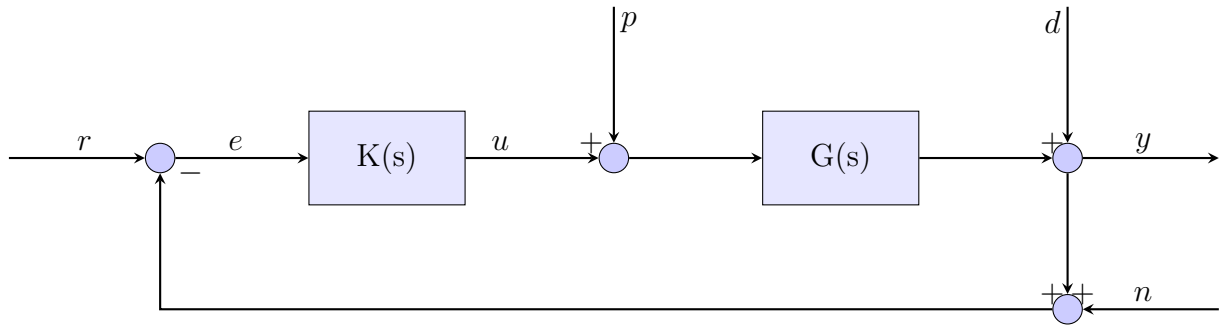


Fig 3.2: Schéma représentatif d'une boucle de suivi

Dans cette boucle, on considère les signaux d'entrée comme la référence  $r(t)$ , les diverses perturbations en entrée et en sortie  $p(t)$ ,  $d(t)$  et  $n(t)$  le bruit de mesure. Les signaux de sortie sont l'erreur de suivi de référence  $e(t)$ , la commande  $u(t)$  délivrée par le correcteur  $K(s)$  et la sortie de système  $y(t)$ . La matrice de transfert entre les perturbations  $d$  et  $p$  d'une part et la sortie  $y$  et la commande  $u$  d'autre part peuvent être facilement obtenus sous la forme matricielle suivante [Ebs14] [Sal07]:

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I - G(s)K(s))^{-1} & (I - G(s)K(s))^{-1}G(s) \\ K(s)(I - G(s)K(s))^{-1} & (I - G(s)K(s))^{-1}G(s)K(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(s) \\ p(s) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & GS \\ KS & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(s) \\ p(s) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

L'équation (3.11) met en valeur deux fonctions de transfert, la fonction de sensibilité  $S(s)$  et la fonction de sensibilité complémentaire  $T(s)$  tel que  $S(s)+T(s)=I$ . Elles sont définies par:

$$S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}, T(s) = (I - G(s)K(s))^{-1}G(s)K(s) \quad (3.11)$$

Un système asservi est robuste s'il est stable de manière interne et externe, tout en assurant des bonnes performances, en présence des différents types d'incertitudes.

- Pour obtenir un bon rejet de perturbation à partir de dans la région des basses fréquences, il faut la fonction de sensibilité  $S = (I + PK)^{-1}$  petites à  $w \rightarrow 0$ .
- Pour limiter l'excitation des bruits, il faut Faire la fonction de transfert en boucle fermée petite dans les hautes fréquences, Ceci peut être réalisé en faisant  $T = I - S = I - (I + PK)^{-1}$  petites à  $w \rightarrow 0$ .

On peut convertir le problème de conception d'un contrôleur robuste au problème de contrôle standard comme illustré dans la figure (3.3)

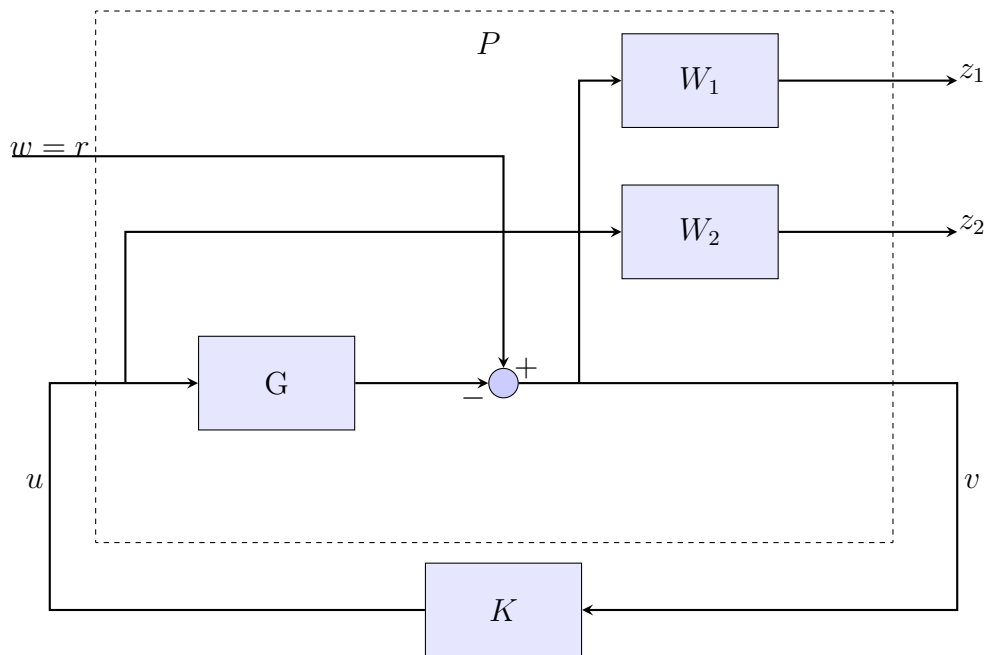


Fig 3.3: S/KS mixed-sensitivity minimization in standard form(tracking)

### 3.4 Choix des fonctions de pondération

La difficulté dans cette approche, réside dans le choix de ces fonctions de pondérations, qui est très important pour la conception de la commande. Le choix des fonctions de pondérations prè et post compensateur  $W_1$  et  $W_2$  se fait à partir des contraintes imposées par le cahier de charge. Très souvent, on spécifie les gabarits des quatre blocs  $S$ ,  $G_\Delta K$ ,  $KS$  et  $G_\Delta S$  donnés par (3.3).

Il est important de noter que les transferts en boucle fermée donnés par (1.46) ne sont pas indépendants entre eux et que pour un transfert donné, le correcteur ne pourra pas agir sur tout le domaine fréquentiel de ce transfert. Considérons par exemple les transferts  $S$  et  $T$ , tel que  $S + T = I$ , donc une fois que  $S$  est fixé,  $T$  l'est aussi et vis versa. De plus il existe un lien profond entre le comportement de la boucle ouverte et celui de la boucle fermée. Généralement la boucle ouverte doit satisfaire les contraintes suivantes [AN06] [Ebs14]:

La fonction de transfert de la boucle ouverte présente un gain suffisamment élevé en basses fréquences,  $|KG_\Delta| \gg 1$ , pour minimiser l'erreur statique et assurer un bon suivi de référence en obtenant alors de bonnes performances.

Le bon rejet de bruit de mesure et des perturbations dues aux dynamiques négligées demande de la matrice de transfert en boucle ouverte un gain faible en hautes fréquences,  $|KG_\Delta| \gg 1$ , pour assurer la robustesse du système.

Finalement ce type de contrainte conduit à l'analyse donnée par le tableau suivant:

Fonctions	Basse fréquence	Haute fréquence
$G_\Delta K$	$\gg 1$	$\ll 1$
$S$	$1/G_\Delta K$	1
$G_\Delta S$	$1/K$	$G_\Delta$
$KS$	$1/G_\Delta$	$K$
$T$	1	$G_\Delta K$

Tableau 3.1: Gabarit fréquentiel des différents transferts en boucle fermée

On remarque bien que le correcteur n'a aucune influence sur  $KS$  et  $T$  en basses fréquences et sur  $S$  et  $GS$  en hautes fréquences. Il sera donc impossible d'agir sur ces transferts à l'aide du correcteur dans tout le domaine fréquentiel et quelle que soit la méthode utilisée .

Si les filtres de pré et post-compensation sont respectivement  $W_1$  et  $W_2$ , le modèle pondéré  $G_\Delta$  peut être défini sous la forme suivante:

$$G_\Delta(s) = W_1(s)G(s)W_2(s) \quad (3.12)$$

La structure du modèle pondéré et de son contrôleur est celle de la Figure(3.4)

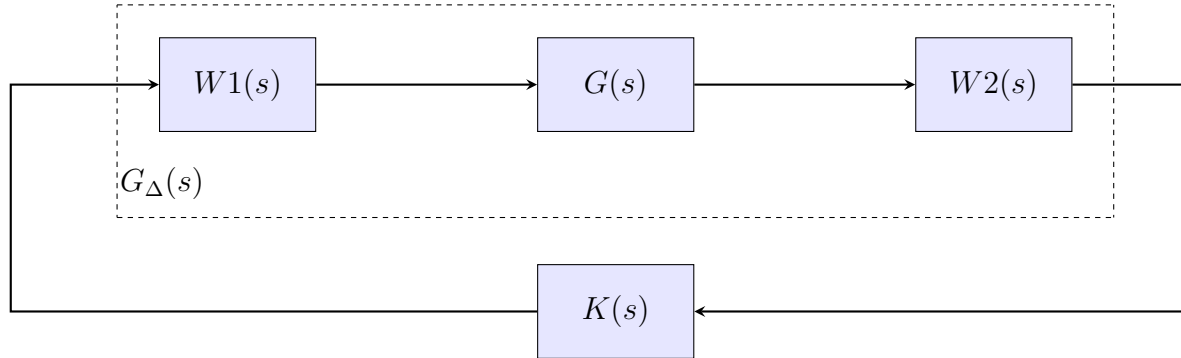


Fig 3.4: Structure de contrôle

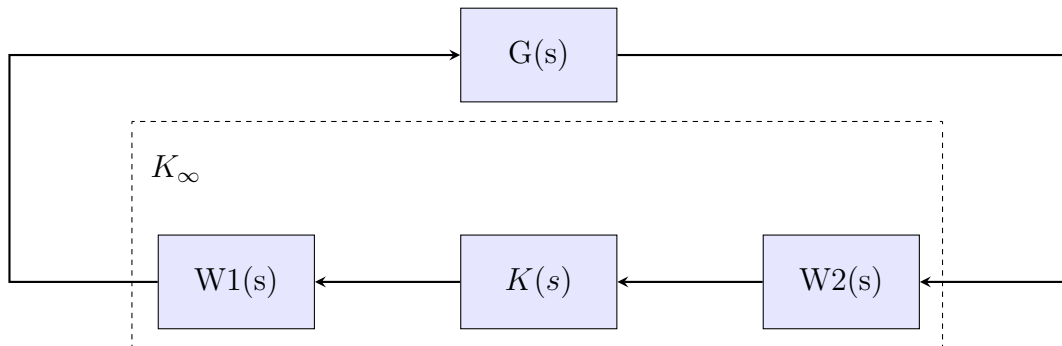


Fig 3.5: Correcteur  $H_\infty$  final

La synthèse du correcteur  $K(s)$ , montré par la Figure(3.4), est déduit par la minimisation de la norme  $H_\infty$  de la matrice de transfert.

Le Régulateur  $K(s)$  sera donc capable de stabiliser le modèle élargi donnée par (3.12)

Le contrôleur  $K_\infty(s)$ , pour asservir le modèle  $G$ , est donc obtenu avec la combinaison des fonctions de pondération  $W_1$  et  $W_2$  tel que:  $K_\infty(s) = W_1(s)W_2(s)K(s)$  figure(3.5).

### 3.5 Commande FIBC à quatre bras

Pour établir les objectifs de la commande de notre système, il faut que le contrôleur conçu vérifié les points suivants:

- La tension de sortie du convertisseur doit être régulée à chaque instant quelque soit les variations de charge.
- Garantir la stabilité et les performances dynamiques, quand le système fonctionne en boucle fermée.

### 3.6 Résultats de simulation de la commande $H_\infty$

Afin d'illustrer les performances de la commande basée sur la technique  $H_\infty$ , proposés dans la partie précédente, des simulations du système expérimental (emulateur PàC-FIBC-Charge) ont été réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink .

La figure (3.6) illustre le schéma du contrôle de l'ensemble étudié.

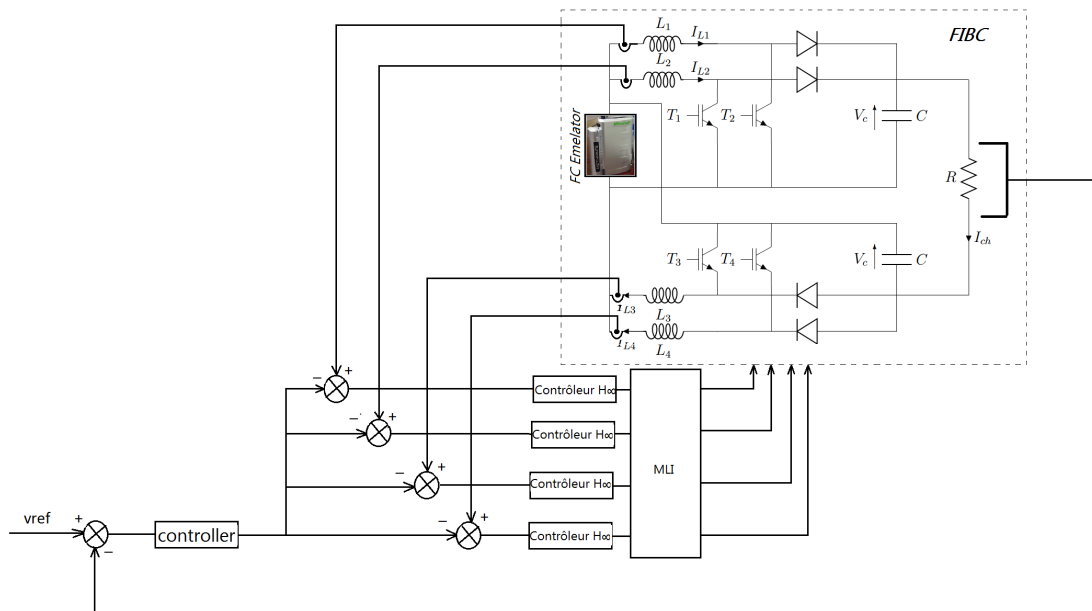


Fig 3.6: Schéma du contrôle d'un convertisseur FIBC à 4 bras .

#### 3.6.1 Essai en charge:

Dans ce test on va simulé le système étudié pour analyser son comportement à un régime avec une perturbation extérieur.

Les figure(3.7-3.8) représente les valeurs singulières de l'ensemble (Contrôleur-système).

Les figures (3.9-3.15) présentent les résultats de simulation de la commande par  $H_\infty$  appliquée au convertisseur étudié. Nous remarquons que la réponse de l'ensemble(contrôleur-convertisseur) est très satisfaisante avec une bonne dynamique . En régime permanent,

aucune erreur statique n'est à signaler.

la figure (3.9) représenté la tension du bus-continu du convertisseur. Le test est effectué avec un changement brusque de la charge ( 100% de la charge initiale) comme illustré dans la figure (3.10), le résultat obtenu montre l'efficacité de la commande proposée vis-à-vis la présence des perturbations, les courants des lignes sans montrés dans la figure (3.11).

Les figures (3.13-3.15), représentent la tension, le courant ainsi la puissance de la pile à combustible, respectivement.

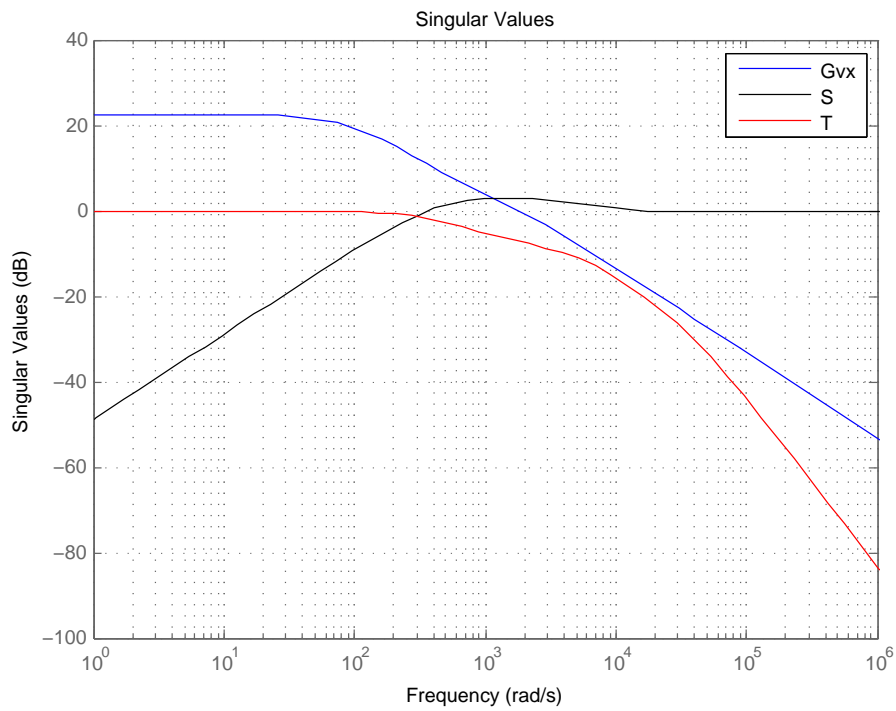


Fig 3.7: les valeurs singulier de l'ensemble (commande-système)  $G_{vx}$  .

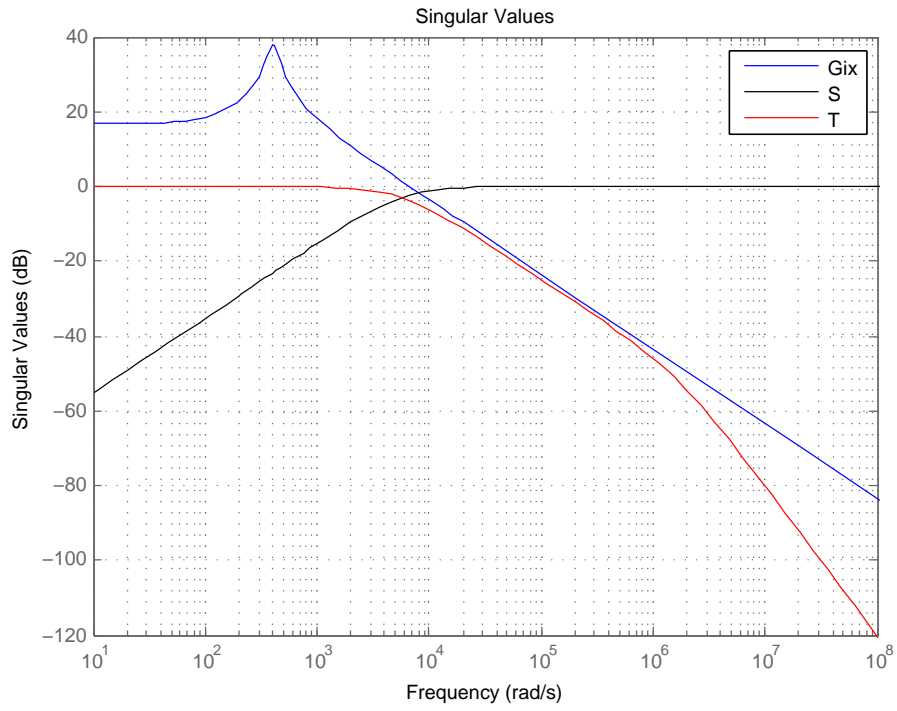


Fig 3.8: les valeurs singulier de l'ensemble (commande-système) Gix .

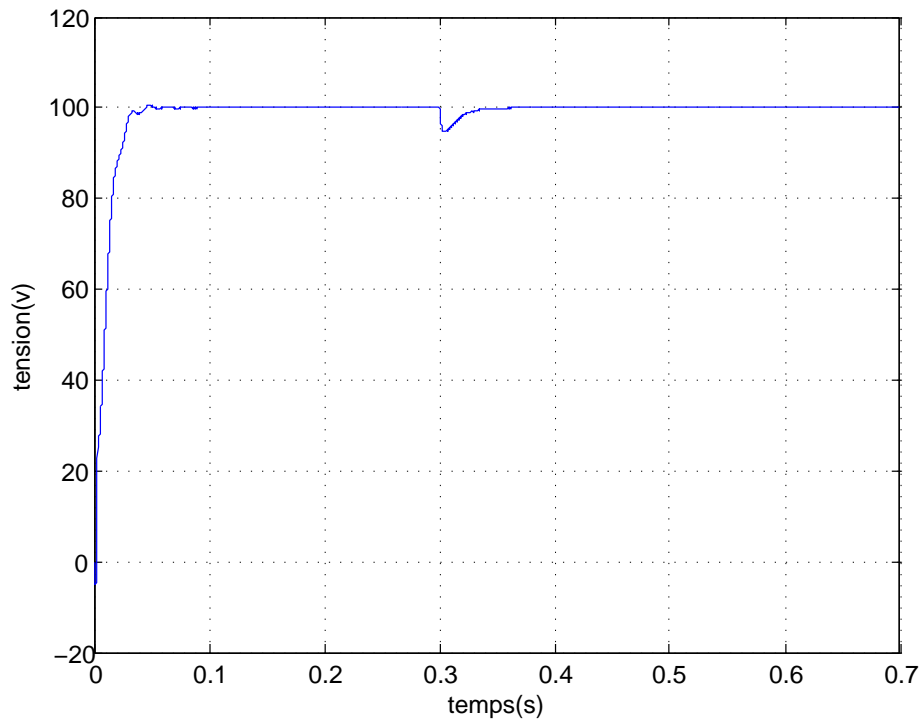


Fig 3.9: Tension de sortie de (FIBC)à 4bras.



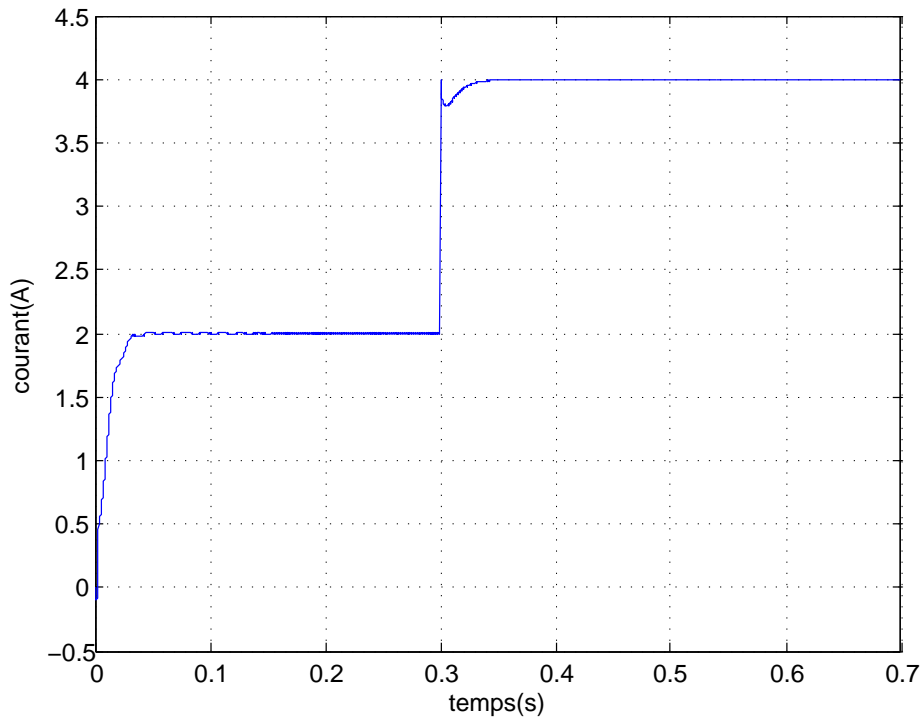


Fig 3.10: courant de la charge de (FIBC)à 4bras.

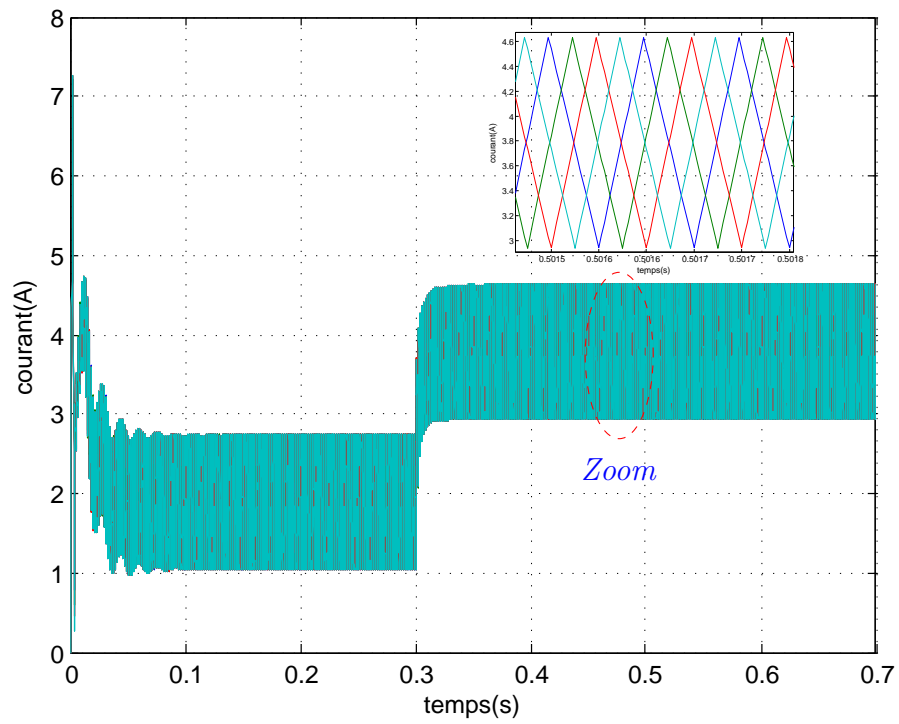


Fig 3.11: courants des inductance de (FIBC)à 4bras.

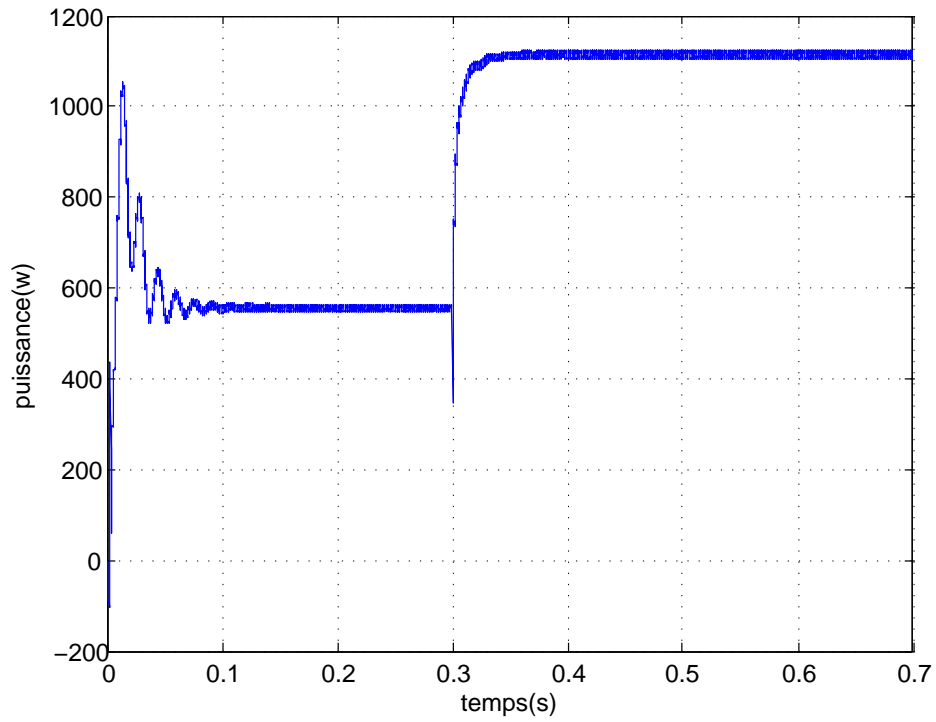


Fig 3.12: la puissance de la charge.

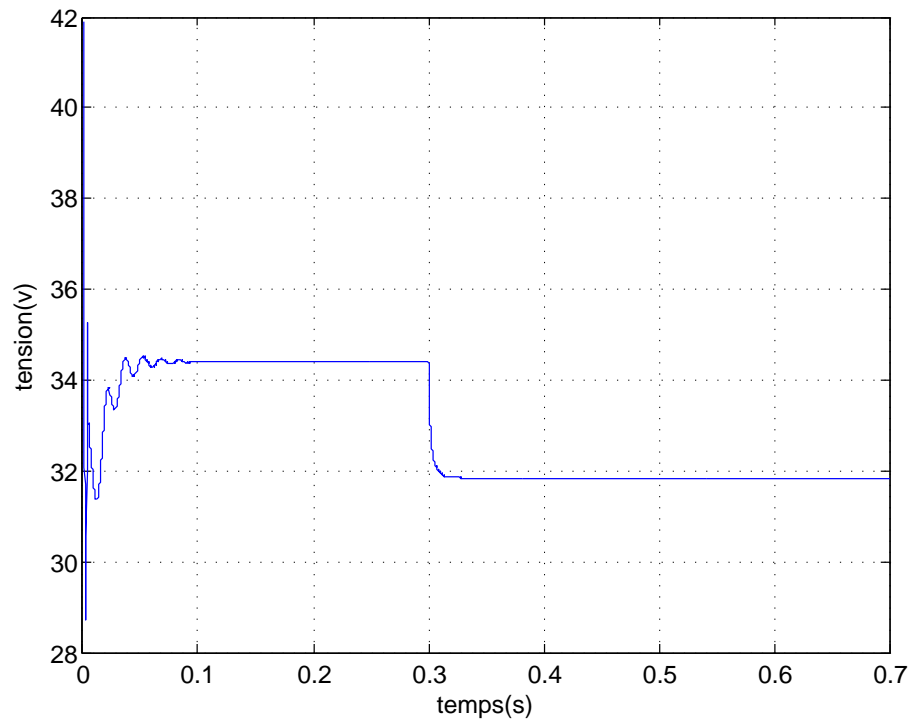


Fig 3.13: tension de la PàC .

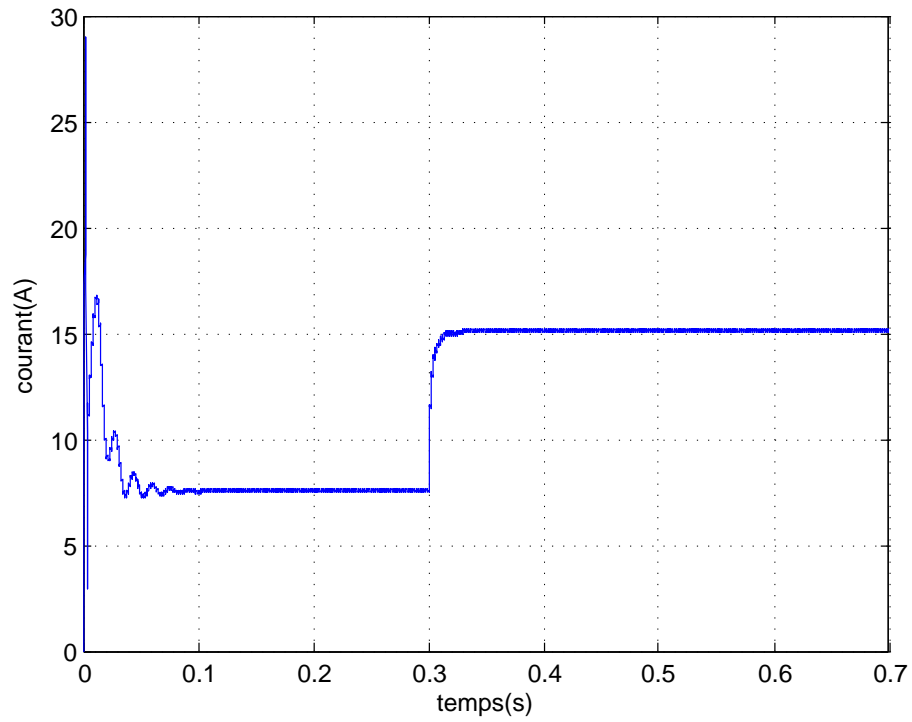


Fig 3.14: courant de la PàC .

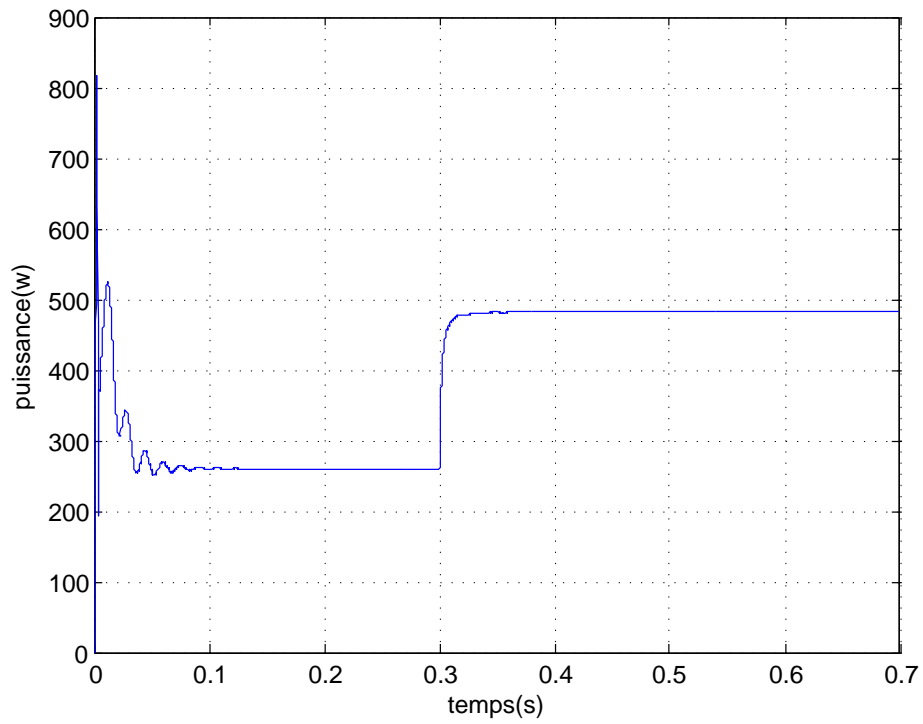


Fig 3.15: la puissance de la PàC .

### 3.6.2 Essai avec défaut:

Dans ce deuxième test on va effectué un défaut au niveau deux bras du convertisseur dans les moments  $0.2s$  et  $0.4s$ , respectivement.

Les figures (3.16-3.18) présentent les résultats de simulation de la commande par  $H_\infty$  appliquée au convertisseur FIBC quatre bras dans le cas des défauts. Nous remarquons que la réponse est très satisfaisante avec une bonne dynamique . En régime permanent, aucune erreur statique n'est à signaler.

Les courants des lignes sont montrés dans la figure (3.18), la puissance de la charge est de  $1.2\text{ KW}$ .

Dans ce deuxième test essai on diminue deux bras (court-circuit) de quatrième et deuxième bras.

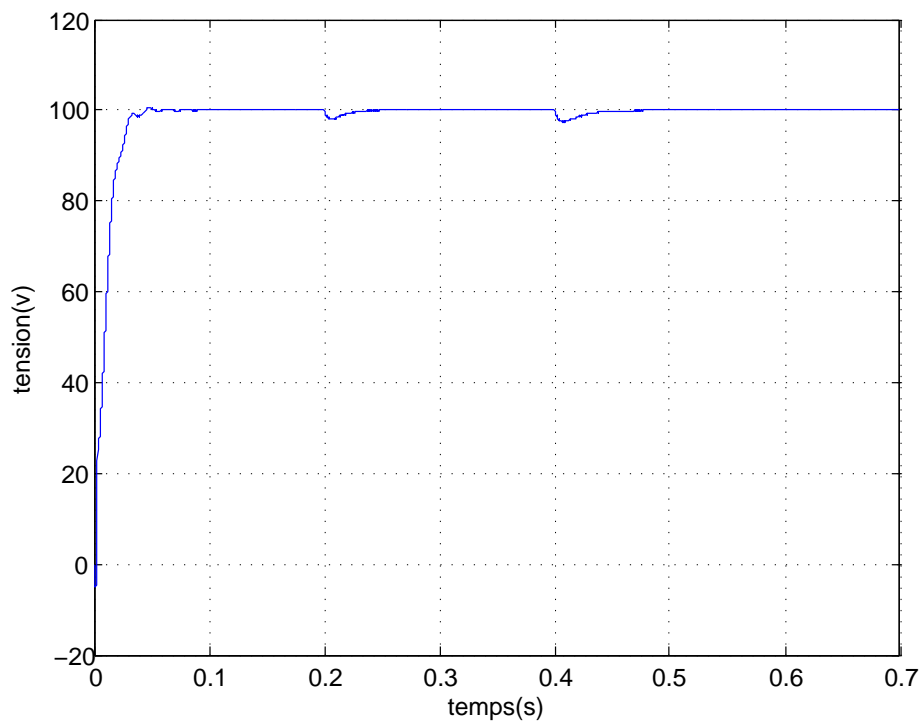


Fig 3.16: Tension de sortie de (FIBC)à 4bras.

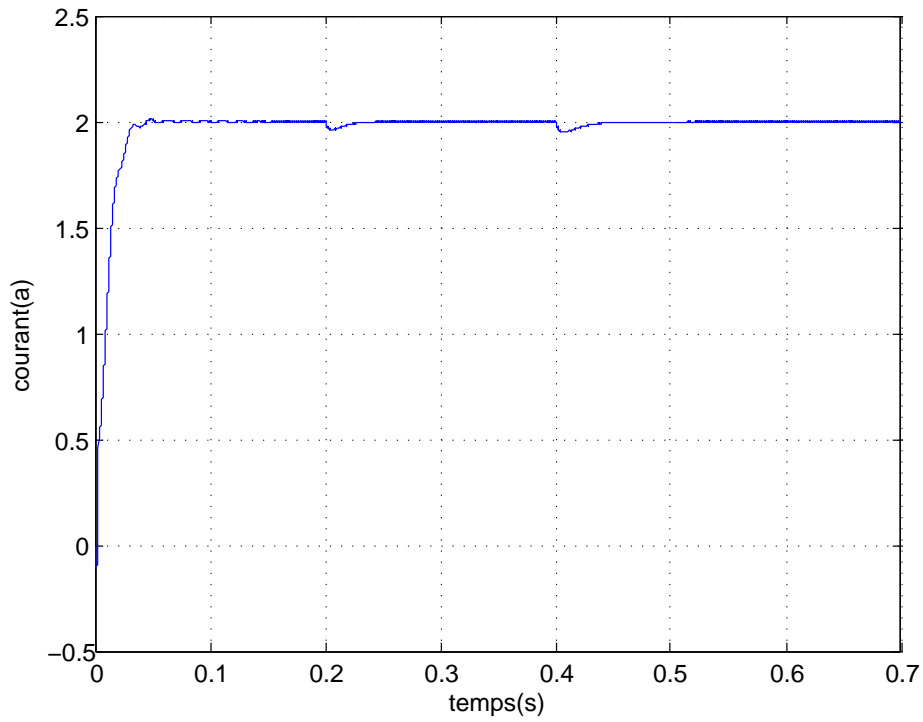


Fig 3.17: courant de la charge de (FIBC)à 4bras.

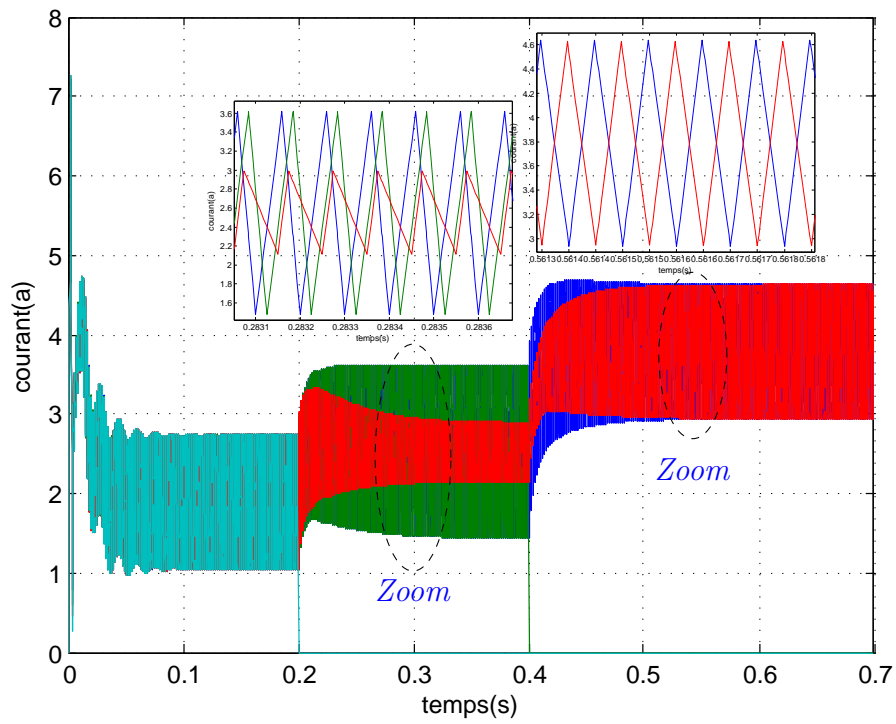


Fig 3.18: courants des inductance de (FIBC)à 4bras.

## 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle  $\langle\langle$  moyen en petits signaux  $\rangle\rangle$  du convertisseur a été utilisé pour linéariser notre système. Cette représentation a été utilisée pour construire les deux contrôleurs robustes. Cette commande présente des résultats intéressants, elle montre sa robustesse vis-à-vis des perturbations extérieures. La validation expérimentale a été faite avec un banc d'essai à puissance réduite (1.2KW), elle a permis de prouver la bonne performance du contrôleur conçu.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux effectués lors de cet mémoire se sont focalisés sur les applications d'une techniques d'automatique avancées à des problématiques actuelles de génie électrique et plus précisément à la commande d'un convertisseur DC-DC de type FIBC à quatre bras pour les applications pile à combustible.

Afin de situer au mieux notre contribution, un état de l'art a été présenté dans le premier chapitre. Nous avons d'abord rappelé quelques généralités sur les piles à combustibles, puis une étude sur les convertisseurs DC-DC basse tension et plus particulièrement de type FIBC.

Une modélisation basée sur la technique des petits signaux a été appliquée au système étudié. En ce basant sur l'approche  $H_\infty$ , un contrôleur robuste a été construit.

Les résultats de simulations montrent l'efficacité et les bonne performance (temps de réponse, dépassement, erreur statique ) de la commande proposée.

Pour prouver les résultats obtenus, nous avons utilisé un banc d'essai de puissance réduite développé au sein de laboratoire (MSE), piloté par une carte dSPACE (la DS1104) ; la source étant une alimentation programmable de tension.

Les problèmes évoqués dans ce mémoire ouvrent de nombreuses perspectives pour des futurs travaux :

- Modélisation du convertisseur étudié par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno.
- L'utilisation d'autres commandes robustes.
- L'utilisation des techniques de diagnostic pour détecter les défauts au niveau du convertisseur, notamment les défauts paramétriques.

## BIBLIOGRAPHY

- [ABM<sup>+</sup>94] JC Amphlett, RM Baumert, RF Mann, BA Peppley, PR Roberge, and A Rodrigues. Parametric modelling of the performance of a 5-kw proton-exchange membrane fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 49(1):349–356, 1994. (page 18).
- [ÅH06] Karl Johan Åström and Tore Hägglund. *Advanced PID control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society; Research Triangle Park, NC 27709, 2006. (page 30).
- [AN06] Pierre Apkarian and Dominikus Noll. Nonsmooth hâŁd synthesis. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 51(1):71–86, 2006. (pages 29, 34).
- [ASC04] JR Atkins, SC Savett, and Stephen E Creager. Large-scale current fluctuations in pem fuel cells operating with reduced feed stream humidification. *Journal of Power sources*, 128(2):201–207, 2004. (page 10).
- [ATBTB10] Samuel Vasconcelos Araújo, René P Torrico-Bascopé, and Grover V Torrico-Bascopé. Highly efficient high step-up converter for fuel-cell power processing based on three-state commutation cell. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(6):1987–1997, 2010. (page 11).
- [Aya04] Mohamed-Yacine Ayad. *Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2004. (page 12).



- [BBFL06] Jean Barbaroux, Viet Dang Bang, Jean-Paul Ferrieux, and Yves Lembeye. New high power-high ratio non isolated dc-dc boost converter for fuel cell applications. In *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2006. (page 26).
- [BHGW10] M Becherif, D Hissel, S Gaagat, and M Wack. Three order state space modeling of proton exchange membrane fuel cell with energy function definition. *Journal of Power Sources*, 195(19):6645–6651, 2010. (page 18).
- [Bis06] Manfred Bischoff. Large stationary fuel cell systems: status and dynamic requirements. *Journal of Power Sources*, 154(2):461–466, 2006. (page 15).
- [BMP<sup>+</sup>07] Rod Borup, Jeremy Meyers, Bryan Pivovar, Yu Seung Kim, Rangachary Mukundan, Nancy Garland, Deborah Myers, Mahlon Wilson, Fernando Garzon, David Wood, et al. Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation. *Chemical reviews*, 107(10):3904–3951, 2007. (page 14).
- [BS13] Ankit Bansal and Veena Sharma. Design and analysis of robust h-infinity controller. *Control Theory and Informatics*, 3(2):7–14, 2013. (page 30).
- [CAY<sup>+</sup>11] Soon-Mi Choi, Vassilios Georgios Agelidis, Jian Yang, D Coutellier, and P Marabeas. Analysis, design and experimental results of a floating-output interleaved-input boost-derived dc-dc high-gain transformer-less converter. *Power Electronics, IET*, 4(1):168–180, 2011. (page 26).
- [CGJ04] Mark AJ Cropper, Stefan Geiger, and David M Jollie. Fuel cells: a survey of current developments. *Journal of Power Sources*, 131(1):57–61, 2004. (page 6).
- [Coo02] Brian Cook. Introduction to fuel cells and hydrogen technology. *Engineering science and education journal*, 11(6):205–216, 2002. (page 4).
- [dB05] Frank de Bruijn. The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications. *Green Chemistry*, 7(3):132–150, 2005. (page 7).
- [Ebs14] Abdolkarem Salem Ebshish. *DC-DC boost converter by H-infinity controller*. PhD thesis, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2014. (pages 32, 34).

- [EGE09] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and Ali Emadi. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. CRC press, 2009. (page 7).
- [Fre12] Edouard Freund. *Hydrogen, the Post-oil Fuel?* Editions TECHNIP, 2012. (page 14).
- [GGND13] Damien Guilbert, A Gaillard, A NâĂŽDiaye, and A Djerdir. Comparaison de topologies de convertisseurs dc/dc entrelacées en cas de défauts dâĂŽinterrupteurs de puissance pour véhicule électrique à pile à combustible. *La Revue 3E. I*, pages 49–57, 2013. (page 28).
- [Han08] Walid Hankache. *Gestion Optimisée de lâĂŽEnergie Electrique dâĂŽun GroupeElectrogene Hybridea Pilea Combustible*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2008. (page 7).
- [Hua09] Bin Huang. *Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2009. (page 25).
- [HUY<sup>+</sup>13] Abdul Motin Howlader, Naomitsu Urasaki, Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, and Ahmed Yousuf Saber. Design and implement a digital hâŁđ robust controller for a mw-class pmsg-based grid-interactive wind energy conversion system. *Energies*, 6(4):2084–2109, 2013. (page 32).
- [JO02] Kwi Seong Jeong and Byeong Soo Oh. Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle. *Journal of Power Sources*, 105(1):58–65, 2002. (page 13).
- [KC00] R Kötzt and M Carlen. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 45(15):2483–2498, 2000. (pages iv, 13).
- [KLSC95] Junbom Kim, Seong-Min Lee, Supramaniam Srinivasan, and Charles E Chamberlin. Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(8):2670–2674, 1995. (page 18).

- [Lac05] Amel Lachichi. *Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant-Application aux convertisseurs pour pile à combustible*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2005. (page 10).
- [LC08] Bor-Ren Lin and Jian-Jia Chen. Analysis and implementation of a soft switching converter with high-voltage conversion ratio. *Power Electronics, IET*, 1(3):386–394, 2008. (page 25).
- [LDM03] James Larminie, Andrew Dicks, and Maurice S McDonald. *Fuel cell systems explained*, volume 2. Wiley New York, 2003. (page 18).
- [OIV<sup>+</sup>09] Martha Ouzounidou, Dimitris Ipsakis, Spyros Voutetakis, Simira Papadopoulou, and Panos Seferlis. A combined methanol autothermal steam reforming and pem fuel cell pilot plant unit: experimental and simulation studies. *Energy*, 34(10):1733–1743, 2009. (page 10).
- [PSP04] Jay T Pukrushpan, Anna G Stefanopoulou, and Huei Peng. *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*. Springer Science & Business Media, 2004. (page 12).
- [Rom07] Nicolas Romani. *Modélisation et Commande du Système d’Alimentation en Air pour le Module de Puissance d’un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformage Embarqué*. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 2007. (page 3).
- [SAA15] Ramzi SAADI. *Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015. (pages 3, 9, 13, 19, 20, 22, 26, 27).
- [Sal07] Georges Salloum. *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation*. PhD thesis, Toulouse, INPT, 2007. (page 32).
- [SBAA13] A Saadi, M Becherif, A Aboubou, and MY Ayad. Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models. *Renewable energy*, 56:64–71, 2013. (page 18).

- [SP07] Sigurd Skogestad and Ian Postlethwaite. *Multivariable feedback control: analysis and design*, volume 2. Wiley New York, 2007. (page 30).
- [Tho05] Phatiphat Thounthong. *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2005. (page 6).
- [TRD06] Phatiphat Thounthong, Stéphane Raël, and Bernard Davat. Test of a pem fuel cell with low voltage static converter. *Journal of Power Sources*, 153(1):145–150, 2006. (page 5).
- [TZ99] Sharon Thomas and Marcia Zalbowitz. Fuel cells green power, los alamos national laboratory. *Cerca con Google*, 1999. (page 5).