

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 : ÉLECTROMÉCANIQUE

OPTION : ÉLECTROMÉCANIQUE



## *Mémoire de Master*

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

### *Commande par passivité d'un hâcheur élevateur représenté par les multi-modèles TS*

Réalisé par: Abdelaziz CHIHANI

Soutenue publiquement le : mardi 9 juillet 2019

Devant le jury composé de:

Dr. Okba KRAA	MCB	Université de Biskra	Président
Dr. Med Yacine HAMMOUDI	MCA	Université de Biskra	Examinateur
Dr. Messaoud MOHAMMEDI	MCB	Université de Biskra	Encadreur

*Année Universitaire 2018/2019*

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 : ÉLECTROMÉCANIQUE

OPTION : **électromécanique**



*Mémoire de Fin d'Etudes*

*En vue de l'obtention du diplôme:*

***Master***

*en génie électrique*

***Thème***

*Commande par passivité d'un hâcheur élévateur  
représenté par les multi-modèles TS*

Présenté par

Abdelaziz CHIHANI

Avis favorable de l'encadreur:

DÉDICACE

*À mes chers parents,  
À mes frères et sœurs ,  
À ma fiancée,  
À mes chers amis, surtout : Hadj Brahim Mustapha, Boudjema Hadj  
Rabah, Nedjar Yacine et Zaoui Mustapha ,  
À tous mes enseignants.*

## REMERCIEMENT



u terme de ce travail, je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de notre formation.

Je tiens à remercier particulièrement Dr MOHAMMEDI Messaoude , qui, en tant qu'encadreur, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

J'exprime également mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail .

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et remerciements à tous les enseignants de l'Université de Biskra qui ont été pour beaucoup dans notre cursus.

Par la même occasion je tiens à remercier mes parents pour leur contribution, leur soutien, leur encouragements et leur patience toute au long de mon parcours scolaire et universitaire sans eux je ne serais pas là aujourd'hui.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

*L*e travail présenté dans ce manuscrit traite la modélisation d'un système contenant une pile à combustible liée à un bus continu à travers un convertisseur élévateur DC/DC, par la méthode des secteurs non linéaires représentés par des multi-modèles flous de type Takagi-Sugeno. L'utilisation de la décomposition en secteurs non linéaire nous permet de réécrire le nouveau système sous forme des polytopes sans perte d'information. Une commande basée sur la passivité est utilisée pour commander le système non linéaire et le système représenté par les multi-modèles flous de type TS. La preuve de stabilité et les résultats de simulation sont donnés. Les résultats obtenus très encourageants. Cette forme est ensuite utile pour la synthèse d'autres types de commandes.

**Mots-Clés :** Système non linéaire, Multi- modèles de Takagi-Sugeno, Pile à combustible, Convertisseur DC/DC boost, Commande basée sur la passivité.

*T*he work presented in this manuscript deals with the modeling of a system containing a fuel cell connected to a DC Link through a DC/DC boost converter, by the method of nonlinear sectors represented by fuzzy multi-models of Takagi-Sugeno.

The use of non-linear sector decomposition allows us to rewrite the new system as polytopes without loss of information. Passivity-based control is used to control the non-linear system and the system represented by the fuzzy multi-models of T-S type. Stability proof and simulation results are given. The results obtained very encouraging. This form is then useful for the synthesis of other types of controls.

**Keywords:** Nonlinear system, Takagi-Sugeno Multi-models, Fuel cell, Boost converter, Passivity-based control.

Commande par passivité d'un hâcheur élévateur  
représenté par les multi-modèles TS

Abdelaziz CHIHANI

July 24, 2019

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<i>Généralité sur la pile à combustible et Convertisseurs continu-continu</i>	<b>4</b>
1.1	Introduction	4
1.2	piles à combustible	4
1.2.1	Historique	4
1.2.2	Principe de Fonctionnement	5
1.2.3	Différents types de piles à combustible	7
1.2.4	Applications	9
1.3	Convertisseurs DC/DC pour des applications à piles à combustible	13
1.4	Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé	13
1.5	Le " BOOST " classique	13
1.5.1	Principe de fonctionnement	14
1.6	Conclusion	15
<b>2</b>	<i>Représentation par multi-modèle (TS) et commande par passivité</i>	<b>16</b>
2.1	Introduction	16
2.2	Concepts élémentaires sur les multi-modèles de type Takagi-Sugeno	16
2.3	Qu'est-ce qu'un multi-modèle de type Takagi Sugeno?	17
2.4	Vers la représentation multi-modèles	17
2.4.1	Modélisation par approche multi-modèle	18
2.4.2	Espace de fonctionnement	19
2.4.3	Sous-modèle:	19
2.4.4	Zone de fonctionnement	19



2.4.5	variable de prémisse	20
2.4.6	Fonction d'activation	21
2.4.7	Différentes structures multi-modèles	21
2.5	Commande basée sur la passivité	23
2.6	Système Hamiltonien Commandé par Port	24
2.6.1	Assignment d'interconnexion et d'amortissement IDA-PBC	26
2.7	Conclusion	28
<b>3</b>	<b><i>Simulation et interprétation des résultats:</i></b>	<b>29</b>
3.1	Introduction	29
3.2	Structure de la source: pile à combustible-hâcheur	29
3.3	Modélisation du convertisseur boost	30
3.4	Représentation du système non linéaire par les les multi-modèles flous T.S	32
3.5	Commande basée sur la passivité	33
3.5.1	Système à l'équilibre	33
3.5.2	Formulation de problème	34
3.5.3	Présentation de la commande hamiltonienne 'PCH' du système	34
3.6	Simulation et interprétation des résultats	38
3.7	Conclusion	42

## LISTE DES FIGURES

1.1	Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEMFC . . . . .	6
1.2	Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température . . . . .	7
1.3	Technologies des piles à combustible et domaines d'application . . . . .	10
1.4	Tucson ix 35 de Hyundai Motor Group . . . . .	11
1.5	Pile à combustible au méthanol Ultracell . . . . .	12
1.6	Architecture de la topologie boost . . . . .	14
1.7	Convertisseur boost - séquences de fonctionnement . . . . .	14
1.8	Grandeurs électriques caractéristique / convertisseur boost . . . . .	15
2.1	Schéma de principe de l'approche multi-modèles a)- Système non linéaire , b -c)- Représentation multi-modèles . . . . .	20
3.1	schéma bloc de ce travail . . . . .	30
3.2	Schémas équivalents du convertisseur boost du FC . . . . .	30
3.3	Tension de bus continu(Amortissement naturel) . . . . .	36
3.4	l'erreur entre les multi-modèles et systme non linéaire . . . . .	39
3.5	Tension de bus continu et Courant de charge. . . . .	39
3.6	Tension et courant de la pile à combustible. . . . .	40
3.7	Commande de pile à combustible . . . . .	40
3.8	Résistance de la charge . . . . .	41
3.9	Transfert de puissances . . . . .	41

LISTE DES TABLEAUX

3.1 Les paramètres de la charge et la commande. . . . . 38

## NOMENCLATURE

LMI: Inégalité matricielle linéaire(Linear Matrix Inequality)

LPV : Linéaire à Paramètres Variable(Linear Parameter Varying)

MM : Multi-modèles

TS : Takagi-Sugeno

PBC : commande basée sur la passivité

DC/DC : continu-continu

PàC : piles à combustible

PCH: Port Controlled Hamiltonian

PH : forme Hamiltonienne à Ports

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'utilisation des énergies fossiles, du charbon en particulier, provoque des dommages importants sur la santé humaine et a un impact sur le réchauffement planétaire. De nouvelles technologies énergétiques, plus propres et plus efficaces permettent une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Des actions sont menées dans ce sens. Elles concernent les piles à combustible, la bioélectricité (biomasse et déchets pour la production d'électricité et de chaleur), l'intégration des sources d'énergie renouvelable et la production décentralisée, les combustibles plus propres pour le transport, le stockage de l'énergie, le photovoltaïque et l'éolien.

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer en partie l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

La tension d'une cellule élémentaire de conversion, inférieure par principe à la tension thermodynamique de la réaction considérée ( $1.23V$  à  $25^{\circ}C$ , pour de l'eau produite à l'état liquide), est en pratique d'environ  $1V$  en circuit ouvert, et de l'ordre de  $0.6V$  au nominal de puissance. La mise en série électrique de cellules de pile à combustible, constituant ainsi ce qu'on appelle un stack, permet d'augmenter le niveau de tension. Il apparaît donc que la pile à combustible est par nature une source basse tension, de sorte que le traitement de l'énergie délivrée est effectué, dans la plupart des applications mettant ce générateur en œuvre, par des convertisseurs électroniques de puissance, de façon à élever la tension de sortie aux niveaux usuels d'utilisation.

Il existe de nombreux modèles de pile de type circuit électrique équivalent dans la littérature. Le modèle le plus utilisé de le domaine de contrôle est celui qui permet de reproduire au mieux la caractéristique statique de la pile à combustible.

L'association pile à combustible et convertisseur présente un système non linéaire. Ici nous nous proposons d'établir un modèle d'une modélisation mathématique (équations aux variables d'états) partant d'un schéma électrique équivalent.

L'objectif de ce travail est de représenter le modèle non linéaire de ce système (Pile à combustible, convertisseur et charge) par la représentation multi-modèles floue de Takagi-Sugeno et de vérifier que cette représentation a le même comportement que le système non linéaire par l'application des mêmes lois de commande fournies par la commande basée sur la passivité.

L'idée de base est de contrôler le système par la soustraction ou l'ajout, artificiellement, de l'énergie au système afin d'atteindre un ensemble d'équilibres stables.

Le travail présenté dans ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur la pile à combustible telles que le principe de fonctionnement, les types et leurs applications ainsi des généralités sur les convertisseurs DC/DC notamment le convertisseur DC/DC boost.

Le deuxième chapitre, est consacré à la présentation de quelques définitions pour la représentation multi modèles flous de type Takagi-Sugeno en premier lieu. Dans la seconde partie de deuxième chapitre nous allons présenter une introduction de la passivité et de la commande par passivité (PBC: Passivity Based Control). Une revue historique est également détaillée de la structure PCH et l'IDA-PBC.

Dans le troisième chapitre. nous appliquerons la commande par passivité aux systèmes représenté par les multi-modèles TS et le système non linéaire et puis nous comparerons leurs résultats. Ensuite les résultats de simulations et ses interprétations seront présentés.

Enfin, une conclusion générale a été extraite pour faire le bilan de ce travail.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉ SUR LA PILE À COMBUSTIBLE ET CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU

### 1.1 Introduction

Dans le premier chapitre, un état de l'art de la pile à combustible sera présenté. On citera dans une première partie, des généralités sur la pile à combustible : les principes de base qui gouvernent son fonctionnement, ses différentes technologies et leur développement, ses applications et actualités .

Ensuite, dans la deuxième partie, on présentera une étude d'une structure d'un convertisseur statique continu-continu non-isolé (Le " **BOOST** " classique ) utilisé dans le système à pile à combustible.

### 1.2 piles à combustible

#### 1.2.1 Historique

La première démonstration pile à combustible a été faite en 1839 par William Grove. Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et d'un électrolyte à base d'acide sulfurique dilué. Ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible devinrent pertinentes grâce aux travaux de l'ingénieur anglais Francis T. Bacon, à Cambridge sur une pile à combustible hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux (température de 80 à 200°C , pression de gaz de quelques atmo-

sphères à 40 atmosphères, électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel). En 1953, la réalisation d'un premier prototype de puissance notable a eu lieu. Le programme spatial américain de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) conduisit, à la fin des années cinquante, à une série de réalisations technologiques concernant des piles à électrolyte polymère solide (SPEFC de General Electric), pour le programme GEMINI, et, à partir des années soixante, à la fabrication de piles alcalines de type Bacon par Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation), pour les missions lunaires APOLLO et maintenant pour les navettes spatiales. Parallèlement, Justi et Winsel, en Allemagne, développèrent des piles alcalines (AFC) de quelques kilowatts, avec des électrodes de nickel de Raney de grandes surfaces actives (électrodes à double squelette ou DSK) [MAK08].

## 1.2.2 Principe de Fonctionnement

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans aucun processus thermique ou mécanique externe. Il existe divers types de pile à combustible, mais toutes ces piles gardent en commun les caractéristiques suivantes :

- Elles sont essentiellement constituées de deux plaques (plaques bipolaires) permettant notamment l'amenée des gaz, la collecte du courant et assurant la tenue mécanique, et de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte.
- Sur l'anode, on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible). Cette réaction produit des électrons et met en jeu un ion.
- Sur la cathode, on déclenche une réaction de réduction électrochimique en présence d'oxygène (le comburant) et des électrons venus de l'anode via la charge extérieure, et qui met en jeu le même ion qu'à l'anode. Le comburant est généralement l'oxygène de l'air.
- Les réactions électrochimiques nécessitent un catalyseur sur chaque électrode de plus elles produisent de la chaleur et de l'eau.



- Entre ces deux électrodes, un électrolyte permet le transfert de l'ion mis en jeu tout en étant un isolant électrique vis-à-vis des électrons générés à l'anode. Cet électrolyte peut être solide ou liquide [MOH16].

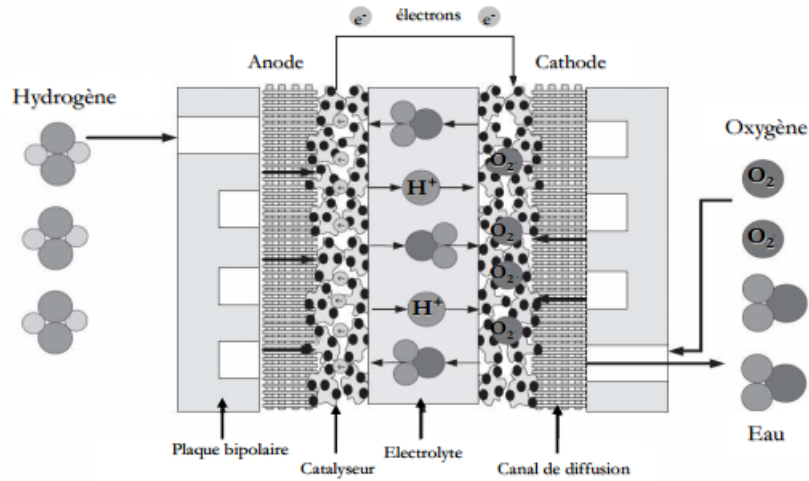
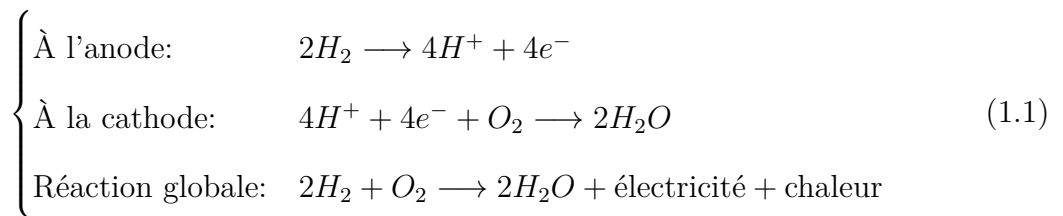
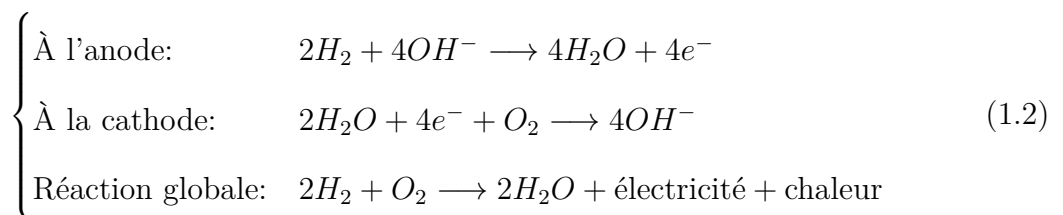


Fig 1.1: Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEMFC

On rencontre deux équations de principe selon que l'électrolyte soit acide ou alcalin. Pour un électrolyte acide, on a :



Pour un électrolyte alcalin, on a :



### 1.2.3 Différents types de piles à combustible

La pile à hydrogène est la PàC la plus courante, l'hydrogène peut aussi bien être remplacé par du gaz naturel, du méthane ou de l'éthanol. Les différents types de piles à combustible concernent plutôt le type d'électrolyte et de catalyseurs utilisés. Chaque type possède ainsi un rendement, une température de fonctionnement et un usage différents : certains ne conviennent qu'à un usage stationnaire, d'autres fonctionnent à des températures de près de  $1000^{\circ}\text{C}$ .

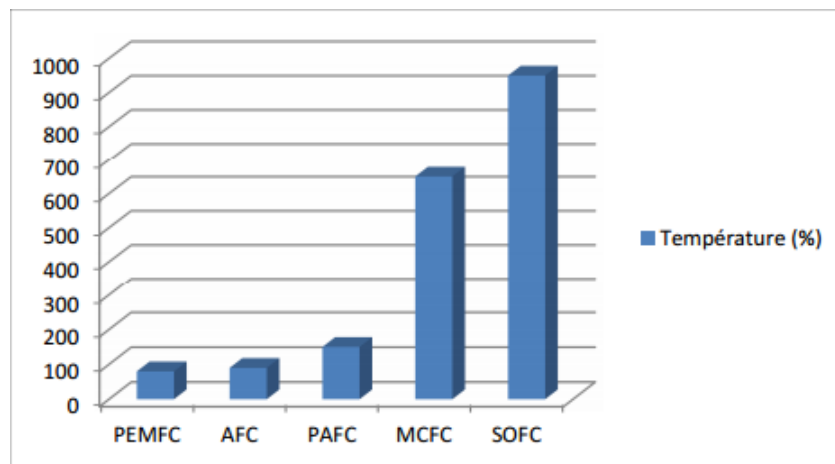


Fig 1.2: Classification différents types de pile à combustible en fonction de la température

#### 1.2.3.1 Pile alcaline (AFC)

Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement que lorsqu'elle utilise de l'hydrogène et de l'oxygène purs. En effet, lors de l'utilisation d'air ou d'hydrogène réformé, le dioxyde de carbone contenu dans ces derniers réagit avec l'électrolyte KOH et forme du carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions.

Cette pile a l'avantage d'utiliser une grande variété de catalyseurs et présente le meilleur rendement de toutes les piles à combustible. Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif comme l'aluminium permettant de réduire le coût global de fabrication de cette technologie. Pour les plaques bipolaires, le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés [Hal16].

### 1.2.3.2 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

C'est la technologie la plus prisée pour les applications dans les transports surtout après l'avènement des membranes Nafion au début des années 80. Ses atouts majeurs sont sa petite taille et son temps de démarrage court . Elle fonctionne à des températures basses (  $80^{\circ}C$ ) de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Cette dernière permet le passage des protons  $H^+$ , un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes, cependant, le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur diminuant ainsi l'efficacité de la pile. Quant aux plaques bipolaires, elles peuvent être conçues de trois manières différentes à savoir en composite, en métal ou en graphite [PAY09].

### 1.2.3.3 Pile à méthanol direct (DMFC)

Le nom de cette pile prête à confusion. En effet, c'est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant qui est directement en contact avec l'anode et non comme on le croirait, une pile qui utilise du méthanol comme source d'hydrogène par un reformage externe. Elle utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions qui se présente sous forme de membrane. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone. Les plaques bipolaires sont, quant à elles, faites de graphite, de métal ou de composite [PAY09].

### 1.2.3.4 Pile à acide phosphorique (PAFC)

C'est une pile généralement réservée aux applications stationnaires, d'où un développement et une commercialisation plus importants comparés aux autres technologies de piles. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW. L'électrolyte est de l'acide phosphorique sous forme liquide. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone. Le catalyseur est à base de platine. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat dans lequel l'électrolyte est stocké [Hal16].

### 1.2.3.5 Pile à carbonate fondu (MCFC)

Le développement de ces piles a commencé plus récemment. Elles sont ainsi considérées comme des piles de seconde génération, car apparues bien après les piles fonctionnant à basses températures. Ces piles fonctionnent à des températures élevées ce qui améliore la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements électriques supérieurs à 50%. De plus, elles peuvent utiliser une large gamme de carburant, grâce au reformage interne et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou  $CO_2$  comme c'est le cas pour les piles à basses températures. L'électrolyte est constitué d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenu par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium ( $LiAlO_2$ ). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel. Le choix des matériaux est important, en raison de la température de fonctionnement élevée et de la nature hautement corrosive de l'électrolyte [PAY09].

### 1.2.3.6 Pile à oxyde solide (SOFC)

La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à hautes températures. Pour cela, c'est une pile généralement exploitée en cogénération et destinée à la production d'électricité décentralisée pour des gammes de puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW. L'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés, en se passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures. L'électrolyte est solide, habituellement du Zircon ( $Zr_2$ ) dopé avec de l'ytterbium ( $Y^{3+}$ ), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène ( $O^{2-}$ ). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [PAY09].

## 1.2.4 Applications

Il y a aujourd'hui trois grands domaines dans lesquels on promet un brillant avenir à la pile à combustible : les applications **mobiles** le **transport** et le **stationnaire**.

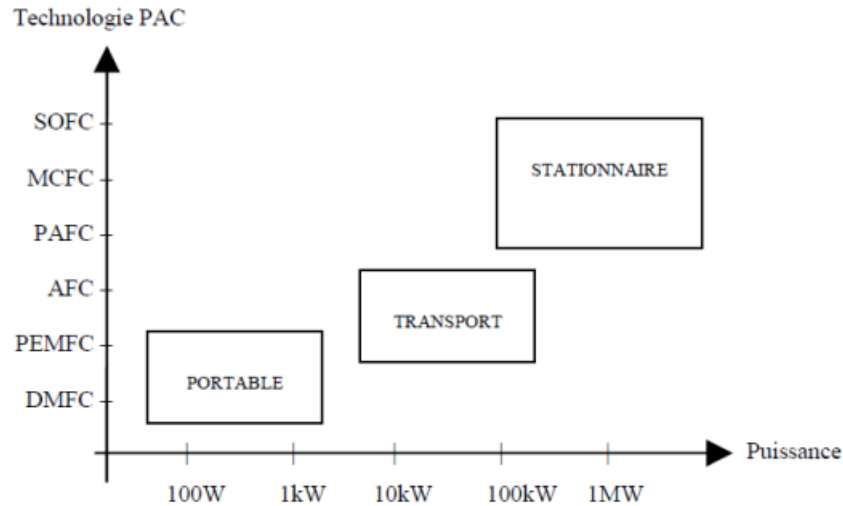


Fig 1.3: Technologies des piles à combustible et domaines d'application

#### 1.2.4.1 Applications dans le transport

La PàC 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 PàC est bien meilleur que les moteurs à l'essence. D'autre part, la faible émission des gaz de la PàC 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 PàC seront commercialisées en 2025 Hyundai Motor Group est le premier constructeur qui a pu fabriqué plus de 1000 véhicules à pile à combustible le Tucson ix 35 (figure 1.4) dans l'année 2012, la majorité est destinée à l'Europe. Le coût de production est de 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 [Ram15].



Fig 1.4: Tucson ix 35 de Hyundai Motor Group

#### 1.2.4.2 Applications portables

Les piles à combustible peuvent être de toutes tailles grâce à leur modularité, de moins d'1 Watt à plusieurs MW, ce qui permet la fabrication des piles de très petite taille ne comportant que quelques cellules et ayant une petite surface. Les piles de petite taille ont en effet, de réelles chances dans un marché d'appareils électroniques en constante croissance : téléphones portables, caméscopes, agendas électroniques. D'où l'intérêt des industriels pour les piles d'une puissance entre 0.1 et 10W. Tous ces appareils portables souffrent actuellement de leur faible autonomie, il est nécessaire de les recharger régulièrement. Au contraire, avec une pile à combustible, l'autonomie ne dépend que de la taille du réservoir de carburant (hydrogène ou méthanol) : il est ainsi possible de recharger une batterie assurant la fourniture d'électricité.

Toutefois et malgré des avancements considérables, la plupart des acteurs dans ce domaine n'arrivent pas à commercialiser leurs produits comme prévus. Le militaire était et reste le client principal [AFF09].



Fig 1.5: Pile à combustible au méthanol Ultracell

### 1.2.4.3 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 PàC 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. Toutefois, actuellement, la commercialisation de la PàC 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 [Ram15].

### 1.3 Convertisseurs DC/DC pour des applications à piles à combustible

Des états de l'art sur les convertisseurs DC/DC pour des applications véhicule électrique à PàC ont déjà été reportés dans la littérature. Ils comparent les convertisseurs DC/DC non-isolés et isolés en termes de volume, coût, ondulation de courant et efficacité énergétique sans toutefois prendre en compte la tolérance aux défauts. Ils présentent une sélection de convertisseurs DC/DC (non-isolés, isolés) pour des applications véhicule électrique en les comparant en termes d'efficacité énergétique et compacité.

### 1.4 Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé

Nous allons nous intéresser dans cette partie de travail, aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de " BOOST ". Plusieurs variantes existent à savoir:

- Le " BOOST " classique .
- le " BUCK- BOOST " .
- le " BOOST " entrelacé .
- le " BOOST " à trois niveaux .
- le double " BOOST " dual entrelacé, etc...[Ram15].

### 1.5 Le " BOOST " classique

Généralement, le convertisseur DC/DC boost est utilisé comme interface entre la PàC et le bus DC en raison de sa simplicité . L'architecture du convertisseur composée d'une inductance, d'un interrupteur et d'une diode, est montrée sur la figure (1.6).



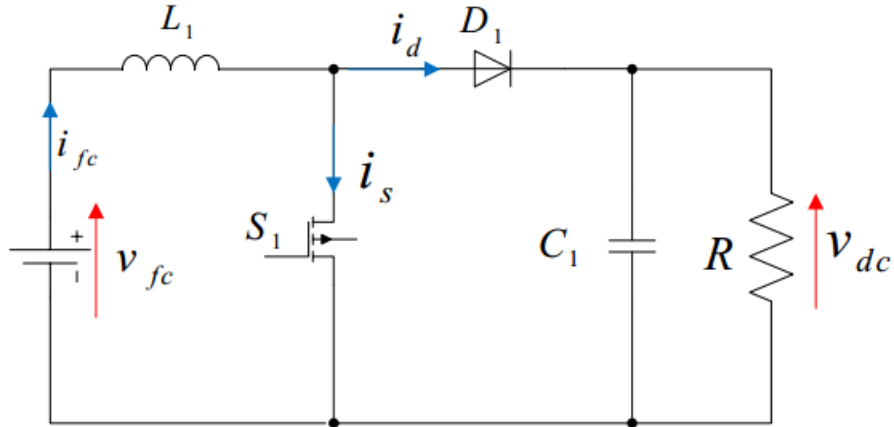


Fig 1.6: Architecture de la topologie boost

Cette topologie permet d'élever la tension en sortie de la PàC qui délivre une tension de faible amplitude [GUI14].

### 1.5.1 Principe de fonctionnement

Chaque période de commutation  $T_{sw}$  des interrupteurs est composée de 2 séquences de fonctionnement Figure (1.7).

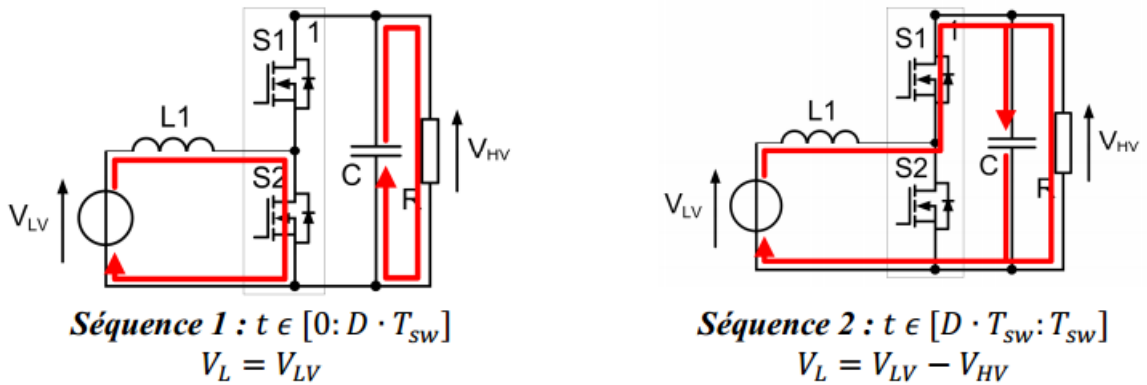


Fig 1.7: Convertisseur boost - séquences de fonctionnement

**Séquence 1:** l'interrupteur S2 est passant et l'interrupteur S1 est bloqué. Il n'y a pas de transfert d'énergie entre la source basse tension et la charge R. L'inductance emmagasine de l'énergie, le condensateur alimente la charge.

**Séquence 2** : l'interrupteur S1 est passant et l'interrupteur S2 est bloqué. La source basse tension et la charge sont connectées de manière directe, il y a restitution de l'énergie emmagasinée dans l'inductance vers la charge. Le condensateur se charge.

**fonction de transfert** : la fonction de transfert est déduite à partir de l'annulation de la tension moyenne aux bornes de l'inductance [Vid14].

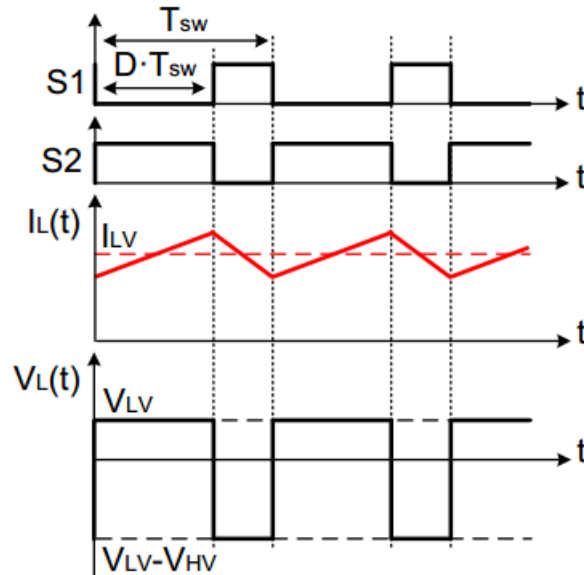


Fig 1.8: Grandeurs électriques caractéristique / convertisseur boost

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art de la pile à combustible a été présenté : Historique, son principe de fonctionnement, ses différentes technologies, et ses applications dans les différents domaines de la vie humaine.

La pile à combustible soumise aux différentes pertes résistives, par activation et par concentration de masse délivre un courant élevé sous une tension faible dans une caractéristique statique tension/courant non linéaire, est considérée en dynamique comme une source de tension mais qui demeure inexploitable pour beaucoup d'utilisations, d'où l'indispensabilité d'insertion d'une interface électronique de puissance élévatrice de tension entre la PàC est la charge électrique.

## CHAPITRE 2

# REPRÉSENTATION PAR MULTI-MODÈLE (TS) ET COMMANDE PAR PASSIVITÉ

### 2.1 Introduction

*L*es multi-modèles sont reconnus par leurs capacités à approcher les comportements dynamiques complexes d'une large gamme des systèmes. Ils se révèlent tout à fait adaptés à la modélisation des systèmes à partir des données expérimentales. Leur structure possède des propriétés mathématiques très intéressantes du point de vue de l'automatique. En effet, les multi-modèles facilitent l'extension de certains outils d'analyse développés dans le cadre des systèmes linéaires aux systèmes non linéaires et ce, sans avoir à effectuer d'analyse spécifique que sur la non-linéarité du système [Ham12].

Dans ce chapitre on présente quelques définitions relatives sur multi-modèles de Takagi-Sugeno et Commande Basée sur la Passivité (PBC).

### 2.2 Concepts élémentaires sur les multi-modèles de type Takagi-Sugeno

Les modèles Takagi-Sugeno (TS) ont fait l'objet de nombreuses études depuis leur introduction en 1985 (Takagi-Sugeno, 1985). Ceux-ci appartiennent à la classe des systèmes poly-topiques convexes et permettent d'étendre certains concepts de la commande

des systèmes linéaires au cas des systèmes non linéaires affines en la commande.

Historiquement basées sur le formalisme flou, les méthodes d'obtention les plus récentes des modèles TS, telles que la décomposition en secteurs non linéaires, permettent de représenter exactement un système non linéaire sur un espace compact de ses variables d'état. Il en résulte qu'un modèle TS s'écrit de manière équivalente à un modèle Quasi-LPV (Linéaire à Paramètres Variants), sous la forme d'une collection de dynamiques linéaires (polytopes) interpolées par un ensemble de fonctions non linéaires (vérifiant les propriétés de somme convexe). De nombreux travaux de recherche s'intéressent à cette classe de système [Jab11].

## 2.3 Qu'est-ce qu'un multi-modèle de type Takagi Sugeno?

Un multi-modèle TS est constitué d'un ensemble de modèles linéaires liés par une structure d'interpolation représentée par des fonctions d'appartenance non linéaires. En effet, en 1985, sur la base du formalisme flou, Takagi et Sugeno ont proposé une approche de modélisation des systèmes non linéaires basée sur un ensemble de règles floues de type dont les conclusions représentent un ensemble de dynamiques linéaires. Ainsi, si l'on note  $r$  le nombre de règles floues décrivant un modèle TS [Jab11].

## 2.4 Vers la représentation multi-modèles

Les processus physiques sont très souvent représentés par des modèles décrits sous la forme suivante (représentation d'état explicite):

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y = h(x(t)) \end{cases} \quad (2.1)$$

Où  $x$  représente les variables d'état décrivant l'état interne du système,  $u$  et  $y$  sont respectivement les grandeurs d'entrée et de sortie du système et  $f$  et  $h$  représentent les fonctions linéaires et/ou non linéaires.

La commande d'un processus repose généralement sur une bonne modélisation du système, cette dernière devient plus délicate lorsqu'il s'agit des systèmes complexes et fortement non-linéaires, c'est pour cela, il ya deux situation, soit, en utilise des hypothèses simplificatrices et dans ce cas le modèle obtenu ne tienne pas compte toute la complexité

du système, ou bien, on obtient un modèle très complexe ce qui le rend par fois inexploitable pour la commande. En effet, la représentation multi-modèles est une approche pratique et alternative pour appréhender le comportement d'un processus dans différentes zones de fonctionnement .

À ce moment là, deux méthodes pour représenter un système par une structure multi-modèles , soit par la construction direct de la forme multi-modèles, mais l'inconvénient de cette méthode, est la perte d'information due à la linéarisation du système, ou bien, en utilisant l'approche par secteur non linéaire qui est la plus souvent utilisée.

Actuellement l'approche multi-modèles (MM) , et un outil très utilisé pour la modélisation des systèmes non linéaires. Dans la littérature, plusieurs terminologies, qui sont équivalentes, pour définir ce type de modèles: le multi-modèles , le modèle flou de Takagi-Sugeno , le modèle linéaire polytopique . L'idée principale de cette approche est s'appuie sur la contribution de sous-modèles au modèle global du système, cette contribution qui quantifiée par une fonction de pondération (fonction d'activation), est une combinaison convexe des sous-systèmes [[HAM15](#)].

### 2.4.1 Modélisation par approche multi-modèle

La philosophie de l'approche multi-modèle repose sur la fragmentation d'un problème complexe en sous-problèmes plus simples à résoudre et dont les solutions individuelles conduisent à la résolution du problème global d'origine. Pour résoudre des problèmes pratiques, la fragmentation peut se faire selon deux axes:

#### Décomposition en composants physiques

Cette technique est basée sur la décomposition du système complexe en éléments, unités ou sous-systèmes qui correspondent aux composants physiques comme les réacteurs chimiques, les compresseurs, etc. Le problème de modélisation peut être résolu en considérant qu'un sous-modèle simple peut être construit pour chaque unité. Ces modèles peuvent être combinés dans un modèle global par établissement des relations entre ces composants.

La difficulté principale de cette approche est d'identifier un ensemble de composants qui sont faiblement connectés. Il ne semble pas plus raisonnable de décomposer un

système en composants qui sont fortement couplés, parce qu'ils ne délient pas la complexité [Ham12].

## Décomposition en phénomènes

Une deuxième méthode est de décomposer le comportement du système en un ensemble de phénomènes. Par exemple, dans un réacteur chimique, les phénomènes appropriés peuvent être de diverses réactions chimiques tels que: le transfert de chaleur et les phénomènes thermodynamiques comme la conduction de chaleur, la transition de compression et la transition de phase ou les phénomènes de transfert de masse comme la diffusion et la convection. Les modèles de ces phénomènes peuvent être développés et combinés en tenant compte de leurs interactions.

Pour résoudre les problèmes décrits par des modèles analytiques, l'approche multi-modèle vise à remplacer la recherche d'un modèle unique  $F(\cdot)$  souvent difficile à obtenir, par la recherche d'une famille de sous-modèles  $f_i(t)$  et de fonctions de pondération  $h_i(\xi(t))$  qui assurent la transition entre ces sous-modèles

$$F(\cdot) = \sum_{i=1}^h h_i(\varepsilon(t)) f_i(\cdot)$$

Un choix judicieux de la structure des sous-modèles  $f_i(\cdot)$  et des fonctions de base  $h_i(\xi(t))$  permet d'approcher avec une précision imposée n'importe quel comportement non linéaire dans un large domaine de fonctionnement. Le contexte de la modélisation multi-modèle est basé sur plusieurs termes principaux tels que [Ham12].

### 2.4.2 Espace de fonctionnement

C'est un espace vectoriel à l'intérieur duquel les variables du système évoluent.

### 2.4.3 Sous-modèle:

C'est le modèle qui représente le comportement du système non linéaire dans une zone de fonctionnement spécifique.

### 2.4.4 Zone de fonctionnement

Les zones de fonctionnements représentent les domaines de validité des modèles locaux, chaque domaine est défini autour d'un point de fonctionnement. Ces domaines peuvent

être de validité disjoints ou bien avec recouvrement comme l'indique dans la figure (2.1).

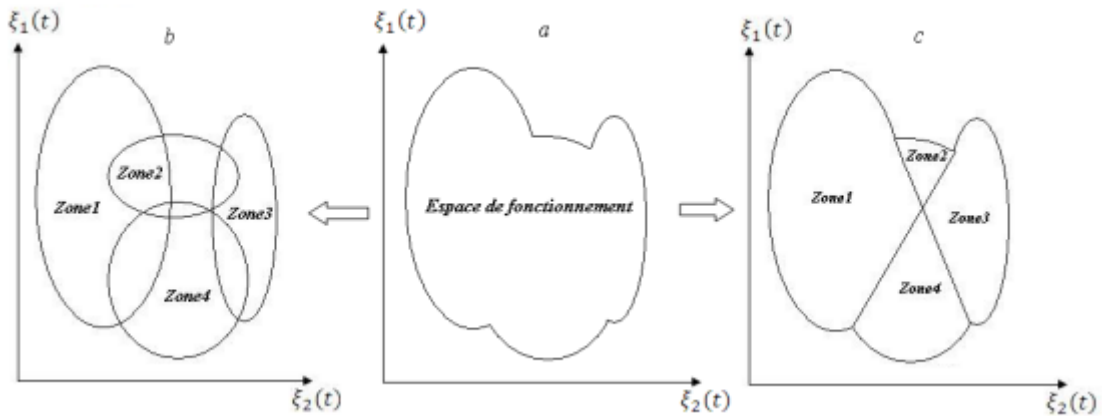


Fig 2.1: Schéma de principe de l'approche multi-modèles  
 a)- Système non linéaire , b -c)- Représentation multi-modèles

Dans le cas où le domaine est de validité disjoint, les fonctions d'activation ne peuvent prendre que des valeurs 0 ou 1 et à un instant donné, il n'y a qu'un seul modèle qui est valable et les autres sont nulles. Ce type de partitionnement est fréquent dans le cas des systèmes à configurations multiples ou à plusieurs modes de fonctionnement, le modèle obtenu est appelé (affine par morceaux). L'autre situation qui peut être aussi rencontrée dans une description multi-modèles est le cas où les domaines de validité se chevauchent ou possèdent des zones communes [HAM15], ce chevauchement dû à la substitution des fonctions d'activation à front tendu par des fonctions à pente douce. Dans ce cas, ces fonctions deviennent des fonctions à dérivées continues dont la pente détermine la vitesse de passage d'un modèle à un autre [Ham12].

### 2.4.5 variable de prémisse

Appelée aussi variable de décision  $\xi(t)$ , est une variable vectorielle caractéristique du système intervenant dans les fonctions de pondération  $\mu(t)$ . Cette variable peut englober une ou plusieurs variables internes ou externes du système. Ces variables peuvent être soit accessibles à la mesure comme des variables d'états mesurables ou bien des signaux d'entrée du système, soit inaccessibles à la mesure [HAM15].

### 2.4.6 Fonction d'activation

C'est une fonction qui dépend des variables de décision. Elle détermine le degré d'activation du  $i^{\text{ème}}$  modèle local associé. Selon la zone où évolue le système, cette fonction indique la contribution plus ou moins importante du modèle local correspondant dans le modèle global (multi-modèle). Elle assure un passage progressif de ce modèle aux modèles locaux voisins. Les fonctions de pondération représentent une normalisation des lois  $h_i(\xi(t))$  qui sont les poids de pondération des modèles locaux. Ces fonctions dépendent des variables internes et/ou externes du système non linéaire (variables de décision) [MES16].

$$h_i(\xi(t)) = \frac{h_i(\xi(t))}{\sum_{i=1}^n h_i(\xi(t))} \quad (2.2)$$

Ces fonctions sont choisies en général de façon à vérifier les propriétés de la somme convexe :

$$\sum_{i=1}^n h_i(\xi(t)) = 1 \quad \text{et} \quad 0 \leq h_i(\xi(t)) \leq 1 \quad \forall \quad i = 1, \dots, n$$

Au cours du temps, ces fonctions ont été construites de différentes façons. Elles peuvent être choisies de type booléen, à dérivées discontinues (fonctions triangulaires) ou des fonctions à dérivées continues (fonctions sigmoïdales ou Gaussiennes). Dans le cas continu, la loi exponentielle est souvent utilisée et s'applique aux différentes variables de prémisse. Les fonctions de pondération peuvent être aussi construites par l'utilisation des bornes des variables de décision.

La représentation multi-modèle d'un système non linéaire peut être obtenue à partir de différentes structures. Ces structures sont réparties selon la dimension de l'espace d'état et la nature du couplage entre les modèles locaux associés aux zones de fonctionnement [Ham12].

### 2.4.7 Différentes structures multi-modèles

On peut énumérer différentes formes de multi-modèles selon que l'on fait la segmentation sur l'entrée ou sur la sortie et aussi selon la nature du couplage entre les modèles locaux associés aux zones de fonctionnement. Cependant, on peut noter trois structures de multi-modèles :

- structure couplée .



- structure découplée .
- structure hiérarchisée .

### 2.4.7.1 Structure couplée

C'est la structure multi-modèle de *Takagi – Sugeno* , elle suppose que le multimodèle possède un vecteur d'état unique et global équations (2.3). L'état global  $x(t) \in R^n$  étant une somme pondérée des états des modèles locaux. La représentation multi-modèle est obtenue par interpolation de  $h$  modèles locaux linéaires :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = C_i(x(t)) \end{cases} \quad (2.3)$$

Cette structure est la plus couramment utilisée dans le cadre de l'approche multi-modèle. Elle est connue sous différentes appellations : multi-modèle de *Takagi – Sugeno*, réseaux de modèles locaux à mélange de paramètres, multi-modèle à modèles locaux couplés ou à état couplé ou encore multi-modèle à état unique, etc.

### 2.4.7.2 Structure découplée

La représentation d'état dans cette structure suppose que le processus est composé de modèles locaux découplés et admet des vecteurs d'états indépendants. Cette structure proposée par *Filev*, est issue d'une interpolation de sous-modèles à états découplés. En conséquence, chaque sous-modèle est caractérisé par un espace d'état propre à l'intérieur duquel il évolue indépendamment des autres sous-modèles. Pour le cas des systèmes singuliers le modèle global peut être donné par:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t))(A_i x_i(t) + B_i u(t)) \\ y_i(t) = C_i(x_i(t)) \end{cases} \quad (2.4)$$

Cette structure peut être vue comme la connexion parallèle de  $h$  modèles affines pondérés par leurs poids de pondération équations (2.4). Les signaux de sorties  $y_i(t)$  des sous-modèles représentent des signaux artificiels de modélisation utilisés seulement pour décrire le comportement non linéaire des systèmes réels [Ham12].

### 2.4.7.3 structure hiérarchisée

Bien que l'approche multi-modèle ait connu un grand succès dans beaucoup de domaines (commande, diagnostic, ...), son application est limitée aux systèmes ayant peu de variables (dimension réduite). Le nombre de modèles locaux augmente d'une façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de variables [Akh04].

## 2.5 Commande basée sur la passivité

La commande basée sur la passivité a d'abord été utilisée pour la commande de systèmes physiques, tels que les systèmes mécaniques, électriques et électromécaniques, en particulier ceux décrits par les équations du mouvement d'Euler-Lagrange. La dénomination commande basée sur la passivité (IDAPBC :Interconnection and Damping Assignment passivity based control) a été introduite pour la première fois pour définir une méthodologie de conception de commandes qui assurent la stabilité des systèmes en les rendant passifs. Un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u; x \in \mathbb{R}^n; u \in \mathbb{R}^m \\ y = h(x); y \in \mathbb{R}^m \end{cases} \quad (2.5)$$

est dit passif par rapport à la fonction de cadence d'approvisionnement (supply rate)  $s(u, y) = u^T y$ , s'il existe une fonction non négative  $C^0$ , appelée fonction de stockage,  $H : x \rightarrow \mathbb{R}$ , vérifiant  $H(0) = 0$ , et telle que toutes conditions initiales  $x_0$ , pour tout  $t > 0$  et toute entrée de commande  $u(\cdot)$ , l'inégalité suivante est vérifiée:

$$H(x(t)) - H(x_0) \leq \int_0^t u^T(s)y(s)ds \quad (2.6)$$

En d'autres termes, "La quantité d'énergie stockée dans un intervalle de temps n'est jamais supérieure à l'énergie totale fournie durant cette période". Le système est dit sans pertes si l'inégalité (2.6) devient une égalité. De l'inégalité (2.6), si :

$$u = 0 \text{ ou } y = 0$$

Ceci implique que  $H$  est décroissante.

- Les systèmes passifs avec une fonction de stockage  $H$  définie positive sont stables au sens de 'Lyapunov'.

- Les systèmes passifs avec une fonction de stockage  $H$  définie positive ont une dynamique des zéros stable au sens de 'Lyapunov'. Ainsi, ils sont à phase minimale.

La **PBC** trouve ses racines dans les travaux fondamentaux de Takegaki sur la régulation par retour d'état d'un robot manipulateur totalement actionné. La méthodologie de la **PBC** suit deux étapes principales. Premièrement, procéder au façonnement de l'énergie où l'énergie totale du système est modifiée de façon à ce que la nouvelle fonction d'énergie ait un minimum unique à l'équilibre désiré. Deuxièmement, une étape d'ajout d'amortissement au système, où l'on modifie la fonction de dissipation d'énergie afin d'imposer une stabilité asymptotique du système commandé. Un avantage important de cette technique est que les dynamiques du système en boucle fermée définissent un système passif. Cette caractéristique amène quatre avantages majeurs qui, dans une large mesure, expliquent le succès pratique de la commande basée sur la passivité.

1. l'action de la commande s'interprète clairement comme une interconnexion entre le système et son environnement. En particulier, la stabilisation peut être interprétée en termes d'équilibres d'énergie.
2. Les systèmes passifs sont robustes vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des dynamiques non modélisées.
3. Dans certains cas, il est possible de donner une interprétation physique claire au réglage des paramètres de la commande, par exemple, des amortisseurs ou des ressorts. Cette propriété peut être d'une grande importance dans les applications industrielles.
4. contrairement aux méthodes telles que la commande par retour linéarisation qui résultent uniquement de considérations Mathématiques la **PBC** a été développée à partir de propriétés physiques comme la conservation de l'énergie et la passivité. La conception Est donc cohérente avec les contraintes physiques, sans annuler des dynamiques, ni introduire des singularités dans la commande [Kha12].

## 2.6 Système Hamiltonien Commandé par Port

La modélisation des systèmes est une étape cruciale qui peut, le cas échéant, considérablement simplifier ou compliquer l'élaboration de la commande. Ainsi, une mod-

élisation basée sur des principes physiques tels que la notion d'énergie peut faciliter la résolution de quelques problèmes en théorie de la commande.

L'énergie est l'un des concepts fondamentaux dans toutes les branches de la science. Son importance dans la modélisation des systèmes est largement illustrée par les méthodes Lagrangienne et Hamiltonienne.

Durant la dernière décennie, une nouvelle structure de modélisation est apparue, appelée structure Hamiltonienne Commandée par Port (PCH: Port Controlled Hamiltonian). Laquelle incorpore les concepts d'énergie et de flux d'énergie et englobe un ensemble plus large de systèmes que les modèles Lagrangiens et Hamiltoniens.

La structure de ces modèles permet d'identifier des caractéristiques intéressantes des systèmes physiques qui peuvent être exploitées dans la synthèse de la commande.

Considérons le système non linéaire affiné en la commande suivant:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.7)$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $f(x)$  et  $g(x)$  sont des fonctions localement Lipschitz et  $u \in \mathbb{R}^m$  est l'entrée de commande.

L'approche PCH consiste, tout d'abord, à identifier la fonction d'énergie naturelle du système que l'on nommera  $H(x)$ , puis de réécrire le système non linéaire (2.7) en fonction du gradient de la fonction d'énergie.

$$\nabla H(x) = \left[ \frac{\partial H}{\partial x_1}(x) \quad \frac{\partial H}{\partial x_2}(x) \dots \frac{\partial H}{\partial x_n}(x) \right]^T$$

Ainsi, la forme PCH du système initial (2.7) est:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}(x) - \mathcal{R}(x)] \nabla H(x) + g(x)u \\ y = g^T(x) \nabla H(x) \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec  $y$  est la sortie considérée,  $\mathfrak{S}(x)$  est une matrice antisymétrique de dimension  $n \times n$  représentant les interconnexions entre les états, et  $\mathcal{R}(x)$  est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

Il est évident de l'équation (2.8) que la structure PCH procure des renseignements énergétiques qui sont d'une importance certaine lors de l'élaboration de la commande. Ainsi, la matrice d'interconnexion  $\mathfrak{S}(x)$  donne d'ores et déjà une indication sur l'échange ou la balance d'énergie entre les variables, quant à l'amortissement  $\mathcal{R}(x)$  du fait que la

matrice soit semi définie positive révèle que les termes appartenant à cette matrice sont des termes associés à la dissipation [MES16].

### 2.6.1 Assignment d'interconnexion et d'amortissement IDA-PBC

La méthode IDA-PBC est une procédure très intéressante pour la commande des systèmes physiques. L'idée de base de cette technique est de, en conservant la structure PH du système avec dissipation, assigner la fonction de l'énergie en boucle fermée en modifiant les matrices d'interconnexions et d'amortissements. Autrement dit, la dynamique désirée du système a une forme PH, d'Amortissement IDA-PBC: L'IDA-PBC a été introduite dans comme étant une procédure pour la commande de systèmes physiques décrit sous la forme PCH suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}(x) - \mathcal{R}(x)] \nabla H(x) + g(x)u \\ y = g^T(x) \nabla H \end{cases} \quad (2.9)$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $u, y \in \mathbb{R}^m$ , avec  $m < n$ , sont les vecteurs d'entrée de commande et de sortie,  $H: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$  est l'énergie totale stockée.

$\mathfrak{S}(x) = -\mathfrak{S}^T(x), \mathcal{R}(x) = \mathcal{R}^T(x) \geq 0$  sont respectivement, la matrice d'interconnexion naturelle et la matrice d'amortissement.  $u, y$  sont les variables conjuguées dont le produit a une unité de puissance.

**Proposition 2.1:** Soit le système non linéaire décrit par (2.5), que l'on veut stabiliser autour d'un point d'équilibre  $x_* \in \mathbb{R}^n$ . Supposons l'existence des matrices suivantes:

$$g^\perp(x) \text{ est telle que: } g^\perp(x).g(x) = 0, \mathfrak{S}_d(x) = -\mathfrak{S}_d^T(x), \mathcal{R}_d(x) = \mathcal{R}_d^T(x) \geq 0$$

Comme étant les matrices d'interconnexion et d'amortissement désirées ainsi que la fonction d'énergie désirée  $H_d: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$  qui a son minimum au point d'équilibre désiré, ainsi  $x_* = \operatorname{argmin}(H_d)$ .

Le système (2.5) en boucle fermée avec la commande  $u$ , telle que:

$$u = [g^T(x).g(x)]^{-1} g^T(x) \{[\mathfrak{S}_d(x) - \mathcal{R}_d(x) \nabla H_d - f(x)]\} \quad (2.10)$$

À la forme PCH suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d \\ y = g^T(x) \nabla H_d \end{cases} \quad (2.11)$$

$x_*$  est un équilibre (localement) stable. Il est asymptotiquement stable si, de plus, on vérifie la condition suivante:

Le plus grand ensemble invariant du système en boucle fermée (2.11) contenu dans:

$$\{x \in \mathbb{R}^n | \dot{H}_d = 0\} \quad (2.12)$$

est égal à  $\{x_*\}$ . La stabilité est globale si  $H_d$  est radialement non bornée.

**Démonstration:** en identifiant les parties droites de (2.5) et (2.11), l'équation suivante est obtenue:

$$f(x) + g(x)u = [\mathfrak{S}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d \quad (2.13)$$

En multipliant (2.13) à gauche par  $g^T(x)$ , on obtient:

$$g^\perp(x)f(x) = g^\perp(x) [\mathfrak{S}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d \quad (2.14)$$

L'expression de la commande est obtenue en multipliant (2.13) à gauche par le pseudo inverse de  $g(x)$ . Le fait d'écrire le système (2.5) en boucle fermée sous la forme (2.11) avec  $\mathfrak{S}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$  ayant les propriétés décrites précédemment suffit pour prouver la stabilité autour du point  $x_*$ . En effet:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \nabla H_d^T \dot{x} \\ &= \nabla H_d^T [\mathfrak{S}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d \\ &= -\nabla H_d^T \mathcal{R}_d(x) \nabla H_d \leq 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Ainsi,  $H_d$  joue le rôle de la fonction de Lyapunov. La stabilité asymptotique suit immédiatement en utilisant le principe d'invariance et la condition (2.12). La méthode standard pour résoudre (2.13) est de fixer les matrices  $\mathfrak{S}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$  (d'où vient le nom IDA), puis résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP) où l'inconnue est la fonction d'énergie désirée  $H_d$ . En générale, la résolution des EDP est une tâche très complexe, qui peut être en quelque sorte facilitée par un choix judicieux de  $\mathfrak{S}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$ . La deuxième méthode est de fixer la fonction d'énergie désirée  $H_d$  et laisser libres les matrices désirées  $\mathfrak{S}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$ . Dans ce cas, il faut résoudre des équations algébriques dans lesquelles les inconnues sont les matrices désirées d'interconnexions et d'amortissements qui doivent avoir les propriétés décrites dans la proposition. Les techniques IDA-PBC

ont été appliquées à une large classe de systèmes physiques, qui inclut des applications mécaniques , électriques et électromécaniques [MOH16].

## **2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté quelques définitions relatives à la modélisation des systèmes non linéaires par les multi-modèles flous ainsi sa stabilité. Tout d’abord, nous avons présenté les différentes structures des multi-modèles de Takagi-Sugeno, dont, ces approches vient répondre aux difficultés dues à la complexité des modèles non linéaires, par des techniques proches de celles développées dans le cadre linéaire. Contrairement aux modèles linéaires qui ont généralement un caractère local et qui sont valides autour de points de fonctionnement particuliers .

Ensuite, une brève introduction de la notion de Passivité et de la Commande Basée sur la Passivité (PBC) est donnée. Une commande récente est la PBC par Assignation d’Interconnexions et d’Amortissements (IDA-PBC).

## CHAPITRE 3

### SIMULATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS:

#### 3.1 Introduction

Nous présentons dans ce travail une conception d'une source d'alimentation DC en utilisant une pile à combustible liée à un bus continu à travers un convertisseur élévateur DC/DC alimentant une charge R, L, E. Ce système constitue un système non linéaire où nous voulons le représenter par les multi-modèles flous *T.S.* Pour démontrer que notre système non linéaire a le même comportement (réponse) du système représenté par les multi-modèles. Nous allons appliquer aux deux systèmes la même commande qui est la commande *PBC* : commande basée sur la passivité.

#### 3.2 Structure de la source: pile à combustible-hâcheur

Suivant la (Figure3.2), la source d'énergie étudiée inclue un bus continu « *DC link* » alimenté par une pile à combustible (FC) via un convertisseur élévateur DC/DC, ce qui met à jour la tension  $V_{DL}$  à sa valeur de référence  $V_d$ . Le rôle de la pile à combustible est d'assurer l'alimentation de la charge.



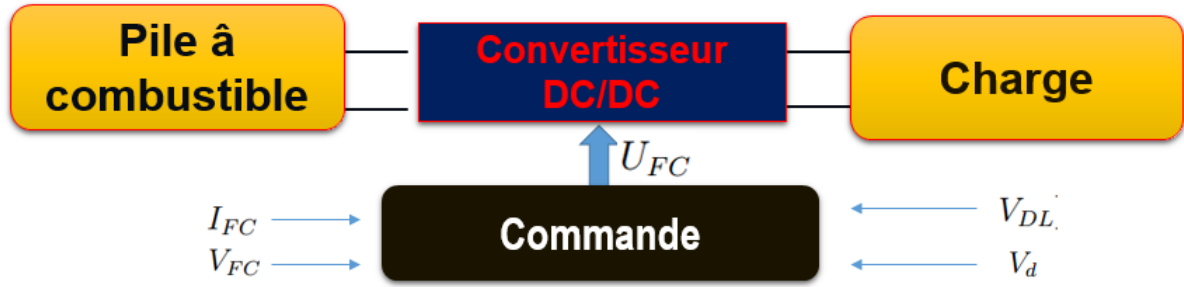


Fig 3.1: schéma bloc de ce travail

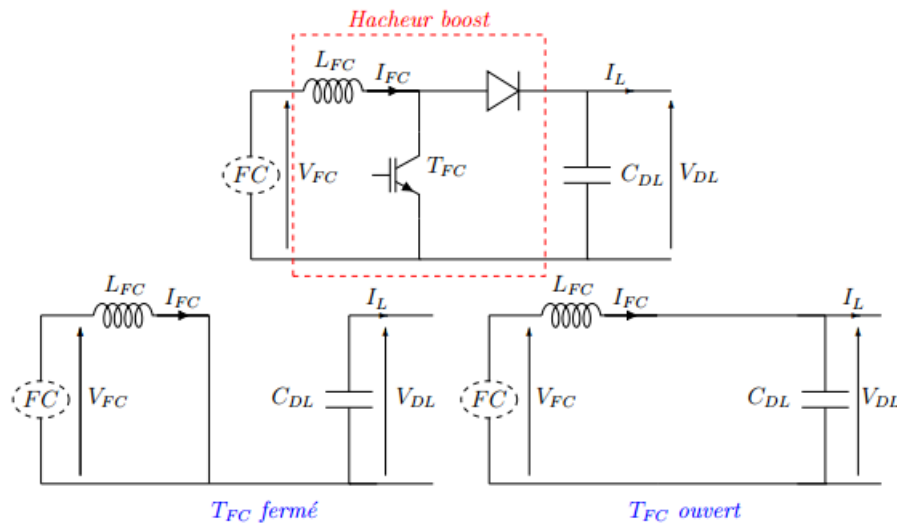


Fig 3.2: Schémas équivalents du convertisseur boost du FC

### 3.3 Modélisation du convertisseur boost

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse de différentes séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur  $T$ . Chaque état est représenté par une équation différentielle.

- Lorsque  $T_{FC}$  est fermé:

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} \\ C_{DL} \cdot \frac{dV_{DL}}{dt} + I_L = 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

- Lorsque  $T_{FC}$  est ouvert:

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} + V_{DL} \\ I_{FC} = C_{DL} \cdot \frac{dV_{DL}}{dt} + I_L \end{cases} \quad (3.2)$$

En posant  $U_{FC} = 1$  lorsque l'interrupteur  $T_{FC}$  est fermé et  $U_{FC} = 0$  pour  $T_{FC}$  ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équation unique, que nous qualifions de modèles instantanés. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$\begin{cases} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_{DL}] \\ C_{DL} \cdot \frac{dV_{DL}}{dt} = [(1 - U_{FC}) I_{FC} - I_L] \end{cases} \quad (3.3)$$

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande  $U_{FC}$  et les variables d'état  $V_{DL}$  et  $I_{FC}$ .

$$\begin{cases} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_{DL}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [(1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} - I_L] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{cases} \quad (3.4)$$

Selon la structure de la source (pile à combustible-hacheur) de la Figure (3.2), le modèle global du système hybride est écrit dans un modèle de variable d'état en choisissant le vecteur suivant de variable d'état:

$$x = [x_1, x_2, x_3]^T = [I_{FC}, V_{DL}, I_L]^T$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot x_2] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_{DL}} [(1 - U_{FC}) \cdot x_1 - x_3] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{L_L} [x_2 - R_L \cdot x_3 - E_L] \end{cases} \quad (3.5)$$

Le modèle statique de la pile est donné comme suit:

$$V_{FC} = E_0 - A \cdot \ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) - R_m \cdot (I_{FC} + i_n) - B \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L}\right)$$

## Partie 1: Représentation par les multi-modèles flous T.S

### 3.4 Représentation du système non linéaire par les multi-modèles flous T.S

Le modèle (3.5) peut être réécrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L_{FC}} & 0 \\ \frac{1}{C_{DL}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL}} \\ 0 & \frac{1}{L_L} & \frac{-R_L}{L_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_2}{L_{FC}} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 \\ \frac{-x_1}{C_{DL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{FC} \\ V_{FC} \\ E_L \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Nous supposons que les variables d'état sont bornées :

$$x_1 \in [-1, 100] \text{ et } x_2 \in [-1, 50]$$

- Variable de prémisse:

L'équation (3.6) présente deux non linéarités qu'on notera  $\xi_1(x(t))$  et  $\xi_2(x(t))$  respectivement tels que :  $\xi_1(x(t)) = \frac{x_2}{L_{FC}}$ ,  $\xi_2(x(t)) = \frac{-x_1}{C_{DL}}$

Nous évaluons ensuite les valeurs minimales et maximales de  $\xi_1(x(t))$  et  $\xi_2(x(t))$

$$\begin{aligned} \xi_{1max} = \max \xi_1(t) &= \frac{50}{L_{FC}}, \quad \xi_{1min} = \min \xi_1(t) = \frac{-1}{L_{FC}} \\ \xi_{2max} = \max \xi_2(t) &= \frac{1}{C_{DL}}, \quad \xi_{2min} = \min \xi_2(t) = \frac{-100}{C_{DL}} \end{aligned}$$

- fonctions d'appartenance:

$$\begin{aligned} M_1(\xi_1(t)) &= \frac{\xi_1(t) - \xi_{1min}}{\xi_{1max} - \xi_{1min}}, \quad M_2(\xi_1(t)) = \frac{\xi_{1max} - \xi_1(t)}{\xi_{1max} - \xi_{1min}} \\ N_1(\xi_2(t)) &= \frac{\xi_2(t) - \xi_{2min}}{\xi_{2max} - \xi_{2min}}, \quad N_2(\xi_2(t)) = \frac{\xi_{2max} - \xi_2(t)}{\xi_{2max} - \xi_{2min}} \end{aligned}$$

Le multi-modèles équivalent au modèle non linéaire (3.6) est:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^4 h_i(Ax(t) + B_i U) \quad (3.7)$$

Avec:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L_{FC}} & 0 \\ \frac{1}{C_{DL}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL}} \\ 0 & \frac{1}{L_L} & \frac{-R_L}{L_L} \end{bmatrix} \text{ et } U = \begin{bmatrix} U_{FC} \\ V_{FC} \\ E_L \end{bmatrix}$$

et :

$$B_1 = \begin{bmatrix} \xi_{1max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 \\ \xi_{2min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 \\ \xi_{2max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} \xi_{1max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 \\ \xi_{2max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \quad B_4 = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 \\ \xi_{2min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}$$

$$h_1 = M_1 \times N_1$$

$$h_2 = M_1 \times N_2$$

$$h_3 = M_2 \times N_1$$

$$h_4 = M_2 \times N_2$$

## *Partie 2: Commande basée sur la passivité du système non linéaire*

### 3.5 Commande basée sur la passivité

#### 3.5.1 Système à l'équilibre

A partir du système non linéaire (3,5), le système à l'équilibre est:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - \bar{U}_{FC}) \cdot \bar{x}_2] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{C_{DL}} [(1 - \bar{U}_{FC}) \cdot \bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_2 - R_L \cdot \bar{x}_3 - E_L] \end{cases} \quad (3.8)$$

Après quelques calculs simples, le vecteur d'équilibre peut être exprimé par:

$$\bar{x} = \left[ \frac{(V_d - E_L)V_d}{R_L V_{FC}}; V_d; \frac{V_d - E_L}{R_L} \right] \quad (3.9)$$

Par conséquent, la commande désirée:

$$\bar{\mu} = (1 - \bar{U}_{FC})$$

Où:

$$\bar{U}_{FC} = (1 - \frac{V_{FC}}{V_d}) \quad (3.10)$$

La fonction naturelle d'énergie du système est:

$$H = \frac{1}{2}x^T Qx \quad (3.11)$$

Où  $Q = \text{diag}\{L_{FC}; C_{DL}; L_L\}$  est une matrice diagonale.

### 3.5.2 Formulation de problème

Après la modélisation de système, les points d'équilibre sont calculés afin d'assurer le comportement désiré du système. Si l'équilibre est atteint, la charge doit être alimentée par la source. Ainsi la commande doit mettre à jour la tension du bus continu à la valeur de référence. Dans la prochaine section, la commande sera développée et la stabilité du système sera étudiée.

### 3.5.3 Présentation de la commande hamiltonienne 'PCH' du système

Dans le suivant, une représentation en boucle fermée de PCH est donnée.

La fonction en boucle fermée d'énergie désirée est:

$$H_d = \frac{1}{2}\tilde{x}^T Q\tilde{x} \quad (3.12)$$

Où le  $\tilde{x} = x - \bar{x}$  est le nouveau variable d'état définissant l'erreur entre l'état  $x$  et sa valeur d'équilibre  $\bar{x}$ .

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu\tilde{x}_2] + \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu} - \mu).\bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{C_{DL}} [\mu\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] + \frac{1}{C_{DL}} [(\mu - \bar{\mu}).\bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_2 - R_L\tilde{x}_3] \end{cases} \quad (3.13)$$

La représentation (3.13) en fonction du gradient de l'énergie désirée (3.12) peut être écrite comme suit:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathcal{R}] \nabla H_d + A \quad (3.14)$$

avec:  $\nabla H_d = \{L_{FC}\tilde{x}_1; C_{DL}\tilde{x}_2; L_L\tilde{x}_3\}$  et:

$$[\mathfrak{S} - \mathcal{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\mu}{L_{FC}C_{DL}} & 0 \\ \frac{\mu}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL}L_L} \\ 0 & \frac{1}{L_L C_{DL}} & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu} - \mu) \cdot \bar{x}_2] \\ \frac{1}{C_{DL}} [(\mu - \bar{\mu}) \cdot \bar{x}_1] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

avec:

$$\mathfrak{S} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\mu}{L_{FC}C_{DL}} & 0 \\ \frac{\mu}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL}L_L} \\ 0 & \frac{1}{L_L C_{DL}} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}^T \geq 0 \quad \text{et} \quad \mathfrak{S} = -\mathfrak{S}^T$$

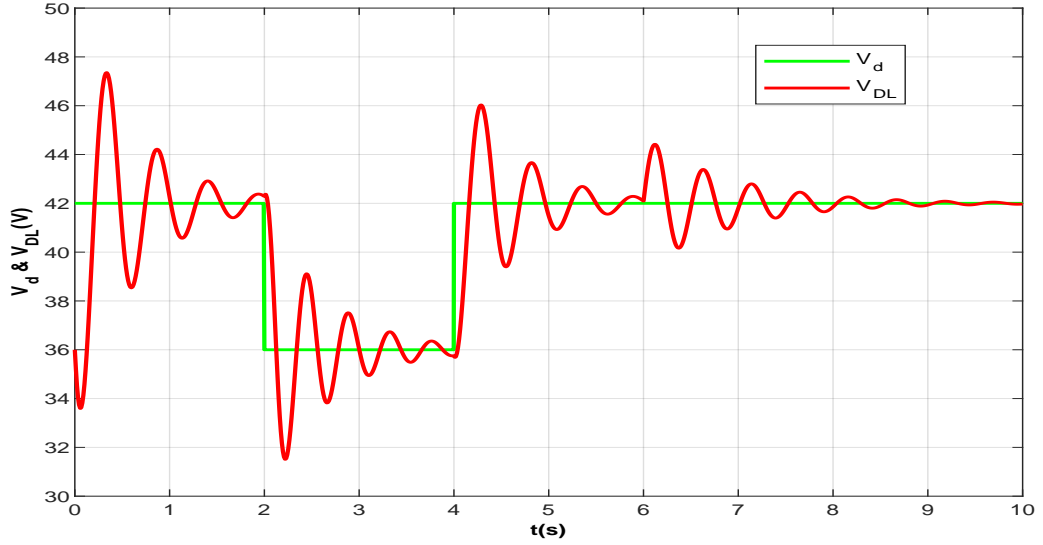


Fig 3.3: Tension de bus continu (Amortissement naturel)

Figure (3.3) représente la réponse de la tension  $V_{DL}$  du système non linéaire, il est remarquable que la stabilité de système est trop lent.

On propose la lois de commande suivante:

$$U_{FC} = \bar{U}_{FC} - r\tilde{x}_1 \quad (3.19)$$

Où  $r$  est un paramètre de réglage positif qui laisse augmenter l'atténuation du système. Une grande valeur de  $r$  augmentera considérablement l'atténuation au détriment de la rapidité de système. Un compromis devrait être fait pour le bon choix de ce paramètre.

La dynamique du système en boucle fermée (3.14) avec les lois (3.19), (3.10) et la fonction d'énergie désirée (3.12) est:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathcal{R}'] \nabla H_d + A' \quad (3.20)$$

Où

$$[\mathfrak{S} - \mathcal{R}'] = \begin{bmatrix} \frac{-rV_d}{L_{FC}^2} & \frac{-\mu}{C_{DL}L_{FC}} & 0 \\ \frac{\mu}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL}L_L} \\ 0 & \frac{1}{C_{DL}L_L} & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Et

$$\mathcal{R}' = \text{diag} \left\{ \frac{rV_d}{L_{FC}^2}; 0; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathcal{R}'^T \quad (3.22)$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r\bar{x}_1\tilde{x}_1}{C_{DL}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{r\bar{x}_1}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \nabla H_d \quad (3.23)$$

$$A' = \mathcal{F} \nabla H_d \quad (3.24)$$

$$[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] = \begin{bmatrix} \frac{rV_d}{L_{FC}^2} & 0 & 0 \\ \frac{-r\bar{x}_1}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

La dérivée de la fonction d'énergie désirée (3.12) au long de la trajectoire de (3.20) est non positive si et seulement si, la matrice suivante est définie non négative  $[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] \geq 0$

**Preuve de stabilité :**

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathcal{R}'] \nabla H_d + \mathcal{F} \nabla H_d = \mathfrak{S} \nabla H_d - [\mathcal{R}' - \mathcal{F}] \nabla H_d$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\tilde{x}} = \nabla H_d^T \mathfrak{S} \nabla H_d - \nabla H_d^T [\mathcal{R}' - \mathcal{F}] \nabla H_d$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T [\mathcal{F} - \mathcal{R}'] \nabla H_d \leq 0$$

La matrice  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est définie semi-négative si et seulement si toutes ses valeurs propres sont négative.

Mathématiquement, les valeurs propres d'une matrice triangulaire sont les éléments de la diagonale. Dans notre cas,  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est une matrice triangulaire supérieure dont ses valeurs propres sont :  $-\frac{rV_d}{L_{FC}^2}$ ,  $0$ ,  $-\frac{R_L}{L_L^2}$ . Donc, les valeurs propres de  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  sont des valeurs négatives car,  $r$ ,  $V_d$ ,  $L_{FC}$ ,  $R_L$  et  $L_L$  sont des constantes positives.

Alors, la dérivée de la fonction d'énergie désirée (3.12) au long de la trajectoire de (3.20) et avec la lois de commande proposée (3.19), (3.10) est définie semi-négative. Conséquent, le système en boucle fermée (3.20) est globalement stable.



### 3.6 Simulation et interprétation des résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en appliquant la commande basée sur la passivité (*PBC*) au système non linéaire et au système représenté par les multi-modèles flous et nous comparons leurs réponses.

Les différents paramètres de simulation sont:

Tableau 3.1: Les paramètres de la charge et la commande.

$E_L(V)$	$R_L(\Omega)$	$L_L(mH)$	$r(\Omega)$
10	10	10	0.01

Figure (3.4) présente l'erreur entre les états du système représenté par les multi-modèles et les états du système non linéaire. L'erreur est entre  $-7.10^{-14}$  et  $6.10^{-14}$ , alors on peut déduire que les deux systèmes sont identiques.

Figure (3.5) présente respectivement la réponse de la tension  $V_{DL}$  du système représenté par les multi-modèles TS a due aux changements de la référence de tension de bus continu  $V_d$  aux instants 2s et 4s et la charge  $R_L$  à l'instant 6s. Pour la réponse, la tension du bus continu suit bien sa référence (un léger dépassement entre eux) La deuxième figure présente la réponse du courant de la charge  $I_L$  du système représenté par les multi-modèles. Lors du changement de la tension de référence  $V_d$  et la changement de la charge à l'instant 6 secondes. on peut remarquer que le courant converge toujours vers la valeur  $(\frac{V_d - E_L}{R_L})$ .

Figure (3.6) montre respectivement la tension  $V_{FC}$  et le courant  $I_{FC}$  du système représenté par les multi-modèles TS. La réponse de  $V_{FC}$  est inversement proportionnelle au courant. La pile à combustible alimente la charge pendant les régimes transitoires et le régime permanent.

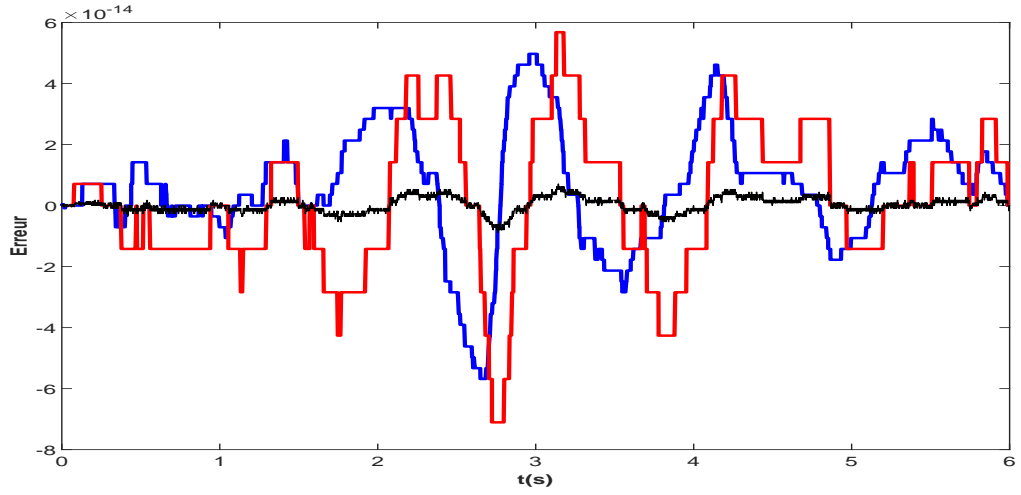


Fig 3.4: l'erreur entre les multi-modèles et système non linéaire

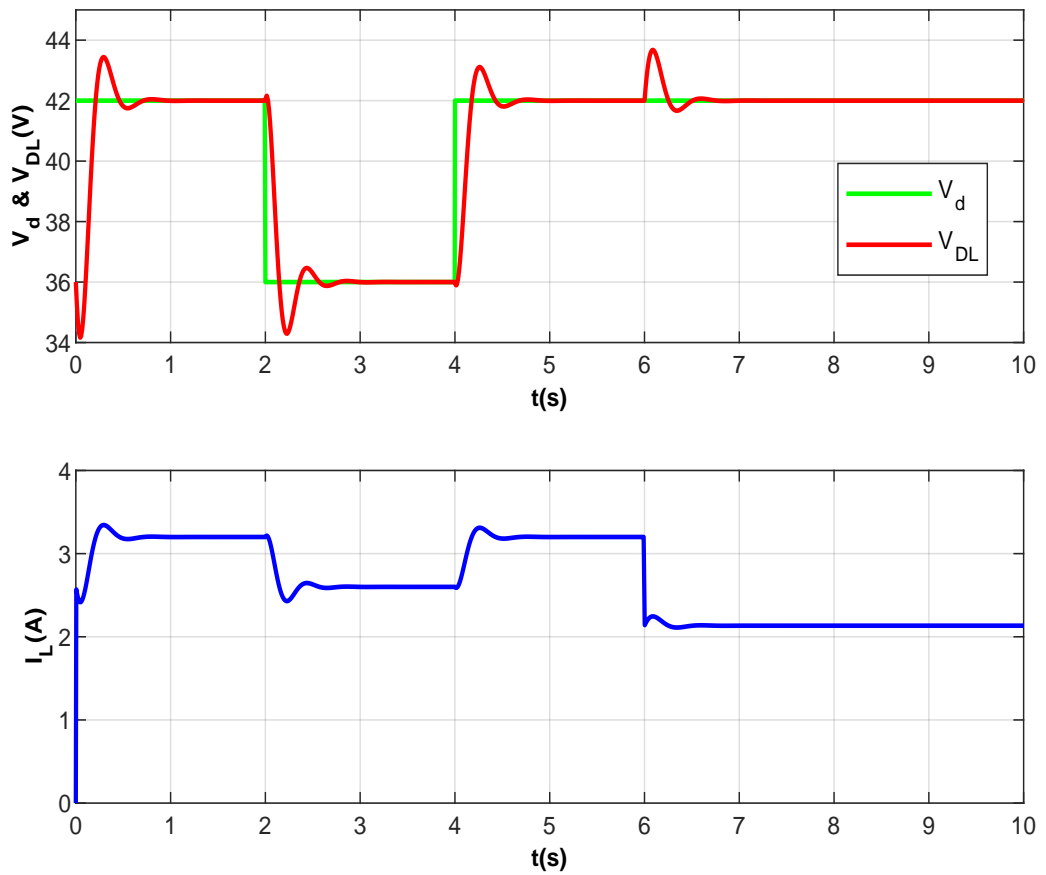


Fig 3.5: Tension de bus continu et Courant de charge.

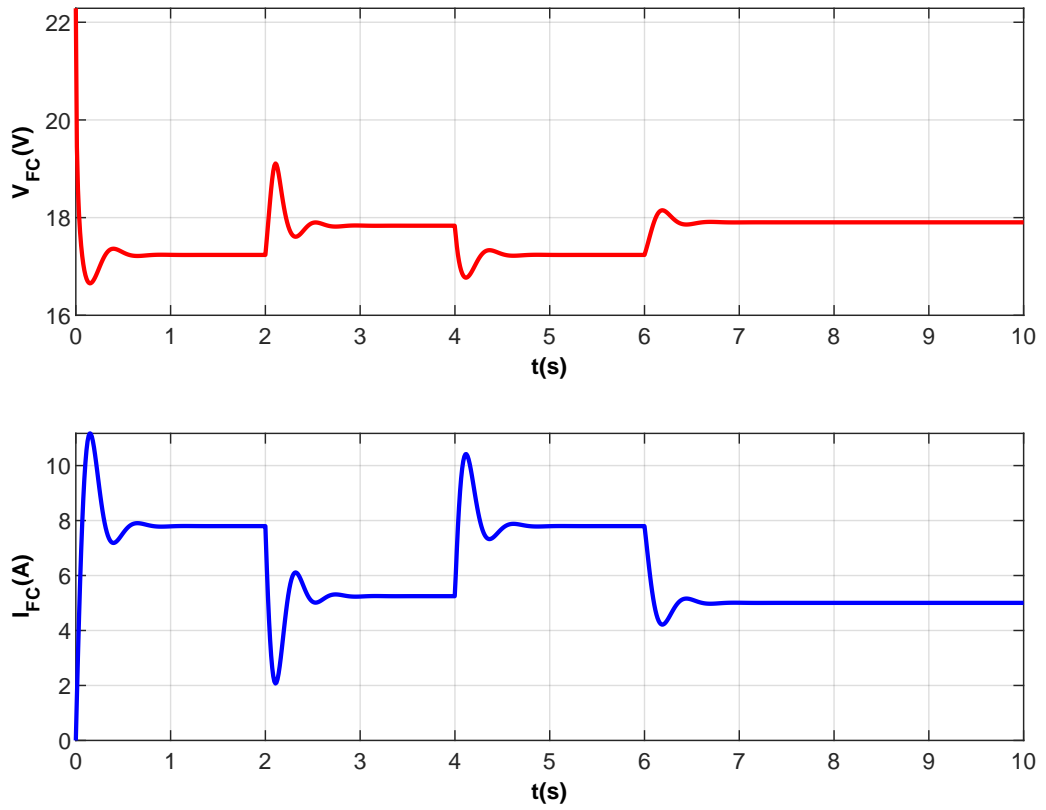


Fig 3.6: Tension et courant de la pile à combustible.

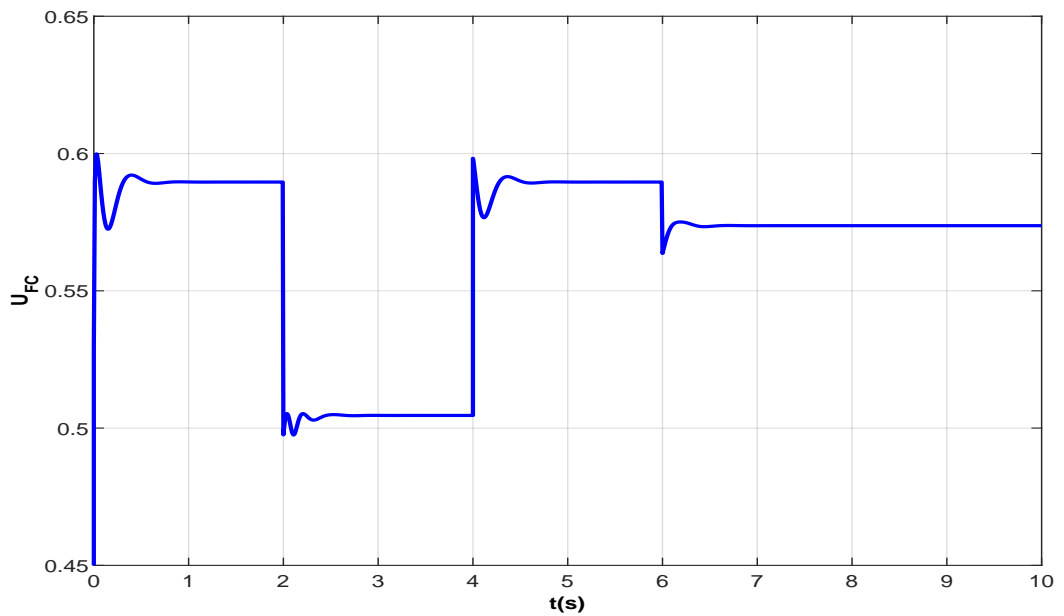


Fig 3.7: Commande de pile à combustible

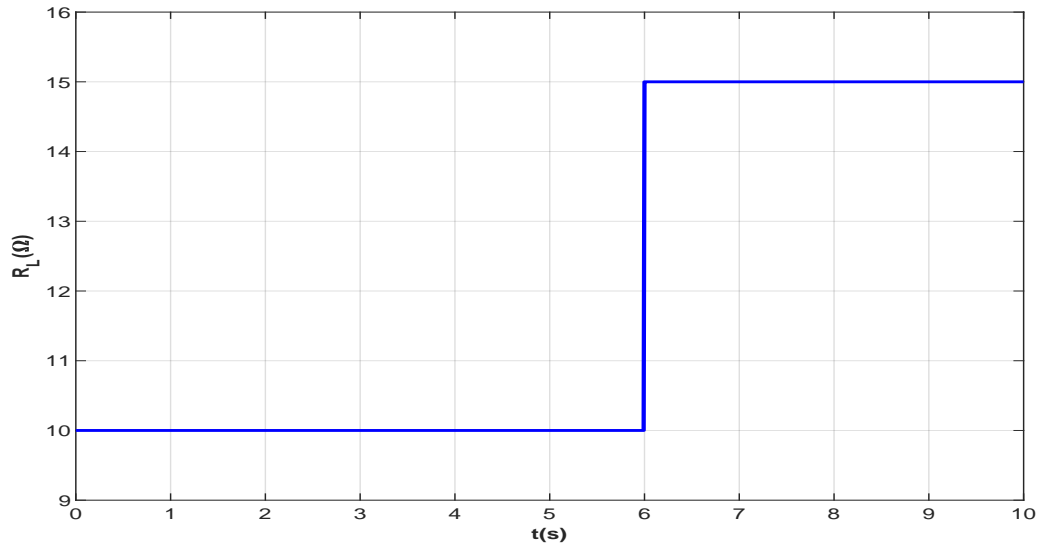


Fig 3.8: Résistance de la charge

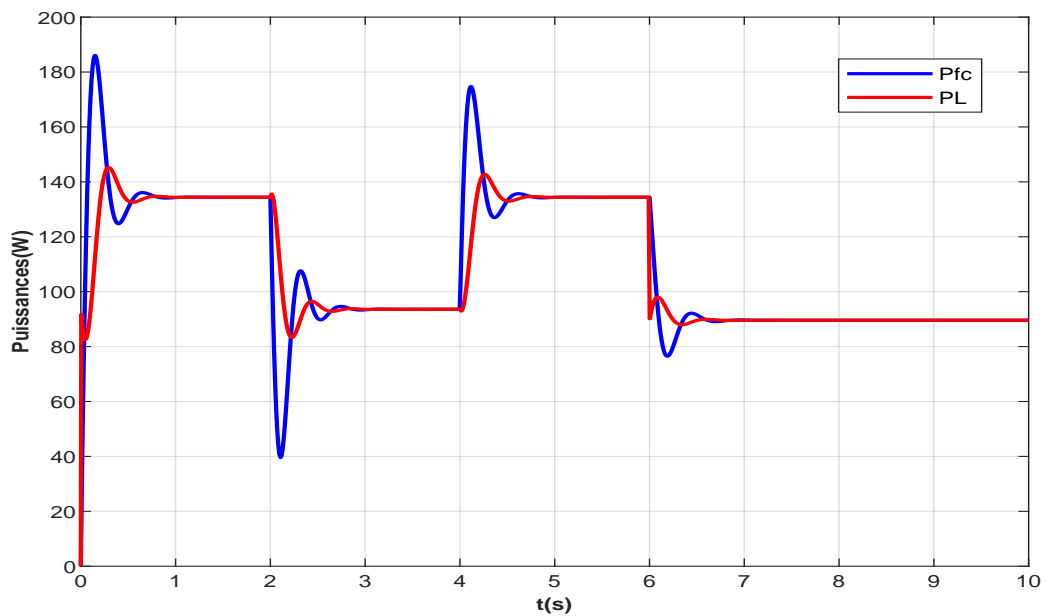


Fig 3.9: Transfert de puissances

Figure (3.7) présente la commande de convertisseur élévateur de la pile à combustible, Le changement de la résistance  $R_L$  de la charge à l'instant  $t = 6$  s de 10 à 15 ( $\Omega$ ) est présenté par la figure (3.8).

Figure (3.9) présente le transfert des puissances dans le système ainsi une puissance douce est fournie par la pile à combustible  $P_{FC}$ .

## **3.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système composé d'une pile à combustible comme source d'énergie, liée a un bus continu à travers un convertisseur élévateur DC/DC. Le système non linéaire représenté par les multi-modèles flous TS est commandé par la commande basée sur la passivité. Les résultats obtenus sont très encourageants ou l'erreur entre les multi-modèles et système non linéaire est de l'ordre de  $10^{-14}$  au maximum.

En effet, on a remarqué que la stabilité naturelle du système est trop lent, alors on a proposé une autre lois commande pour augmenter l'amortissement du système.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but de ce travail est d'étudier la structure d'un système à pile à combustible associé à un convertisseur DC/DC alimentant une charge via un bus continu. Ce convertisseur a permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de la puissance vers la charge. En général, la pile à combustible est hybridée par un moyen de stockage pour couvrir les phases transitoires de fonctionnement. La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie utilisées sont nécessaires pour évaluer le comportement du système électrique hybride.

Pour commencer cette étude, il était nécessaire de faire une synthèse sur le principe de fonctionnement des pile à combustible, leurs types et applications et sur les convertisseurs DC/DC.

Le modèle global de ce système est décrit par un modèle d'équations d'état déduit du schéma électrique globale du système. Le système d'équation obtenu est un système non linéaire car la commande est liée aux variables d'état.

Ce travail apporte une contribution à la description ou la représentation de notre système non linéaire décrit par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno. Pour prouver la validité de cette représentation, une loi de commande obtenue de la commande basée sur la passivité qui est une commande très puissante, est appliquée en même temps au système non linéaire et au système représenté par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno. L'erreur remarquée entre les deux réponses des deux systèmes représentations est presque inexistante de l'ordre de  $10^{-14}$ . Alors, la représentation par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno est équivalente au système non linéaire et peut être adoptée pour appliquer d'autres commandes.

## BIBLIOGRAPHY

- [AFF09] Hassiba AFFOUN. Etude des convertisseurs statiques continu-continu pour pile à combustible. Mèmoire deMagister en Electrotechnique. Université de Bejaia 2009. (page 11).
- [Akh04] Abdelkader Akhenak. Conception d'observateurs non linéaires par approche multi-modèle: application au diagnostic. *Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, 16, 2004. (page 23).
- [GUI14] Damien GUILBERT. *Tolérance aux défauts et optimisation des convertisseurs DC/DC pour véhicules électriques À pile à combustible*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2014. (page 14).
- [Hal16] AZZI Halim. Etude et modélisation d'une pile à combustible. Mèmoire deMagister en Electrotechnique. Université de A.MIRA-BEJAIA 2016. (pages 7, 8).
- [Ham12] Habib Hamdi. *Approche Multi-Modèle pour l'Observation d'État et le Diagnostic des Systèmes Singuliers non Linéaires*. PhD thesis, Ecole Polytechnique de Tunis, 2012. (pages 16, 19, 20, 21, 22).
- [HAM15] Mohamed Yacine HAMMOUDI. *Contribution à la commande et à l'observation dans l'association convertisseurs machine*. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015. (pages 18, 20).
- [Jab11] Dalel Jabri. *Contribution à la synthèse de lois de commande pour les systèmes de type Takagi-Sugeno et/ou hybrides interconnectés*. PhD thesis, Reims, 2011. (page 17).

- [Kha12] Mohamed Khanchoul. *Contribution au développement de la partie électromécanique d'un compresseur pour climatisation de véhicule électrique*. PhD thesis, UNIVERSITE PARIS-SUD, 2012. (page 24).
- [MAK08] Hattab MAKER. *Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs*. PhD thesis, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE BELFORT MONTBELIARD, 2008. (page 5).
- [MES16] Yassine MESSAOUDI. *Modélisation d'un système hybride (pile à combustible et batterie) par la méthode des secteurs non linéaires*. Mémoire de Master. Université de Biskra 2016. (pages 21, 26).
- [MOH16] Messaoud MOHAMMEDI. *Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources*. PhD thesis, Université Mohamed Khider - Biskra, 2016. (pages 6, 28).
- [PAY09] Alireza PAYMAN. *Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. (pages 8, 9).
- [Ram15] SAADI Ramzi. *Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible*. PhD thesis, Université de Biskra, 2015. (pages 10, 12, 13).
- [Vid14] Nicolas Videau. *Convertisseurs continu-continu non isolés à haut rapport de conversion pour Piles à Combustible et Electrolyseurs - Apport des composants GaN*. PhD thesis, French, 2014. (page 15).