

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechniques
Option : **Commande Electriques**

Réf:.....

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

MASTER

Thème

**Modélisation du convertisseur
Boost entrelacé a trois bras via les
multi-modèles TS**

Présenté par :
Massa Amar
Soutenu le : **06 Juin 2017**

Devant le jury composé de :

Mr. KRAA Okba
Mr. Saadi Ramzi
M^{eme} LAALA Widad

MCB
MCB
MAA

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

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



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

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

MASTER

Thème

**Modélisation du convertisseur
Boost entrelacé a trois bras via les
multi-modèles TS**

Présenté par :

MASSA Amar

Avis favorable de l'encadreur :

Mr. SAADI Ramzi

signature

Avis favorable du Président du Jury

Mr. KRAA Okba

Signature

Cachet et signature

Dédicaces

Avec les sentiments de la plus profonde humilité

Je dédie ce modeste travail :

*A l'âme de ma mère qui été pour mon corps mieux
qu'un cœur ;*

A mon cher père qui a sacrifié son temps pour nous ;

*A mes Sœurs : Amira, Sana, Djihan, Malak, Lamis,
Arij ;*

A mes Frères : Samir, Alla, Ramzi ;

A mes bien aimés : P.S, Alla , Razik ;

A tous les membres d'un groupe : Sbi9 ;

A tous ceux qui me sont chers :

A toute ma grande famille : Massa, Barkat ;

A mes collègues des études;... Et à tous mes amis.

Massa Amar

Remerciements

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

Je tiens à remercier Mr SAADI Ramzi, qui a accepté de m'encadrer, et pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr KRAA Okba, d'avoir accepté de présider le Jury de cette mémoire.

Je remercie sincèrement Mem LAALA Widad, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

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

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

Mr.MASSA amar.

Résumé

La pile à combustible est un système de production d'énergie, qui tire profit de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène pour produire de l'électricité et de la chaleur tout en ne rejetant que de l'eau. généralement une pile à combustible a une faible tension de sortie et une réponse lente en raison de la dynamique de ses auxiliaires. Pour cette raison, un convertisseur basse tension DC / DC est nécessaire pour élever la faible tension de quelques centaines de volts pour alimenter la charge.

Le travail présenté dans ce manuscrit traite la modélisation d'un convertisseur représenté par les multi-modèles flous de Takagi-sugeno. nous étudierons la réponse de modèle moyenne classique et le système représenté par les multi modèles flous de Takagi-sugeno et une comparaison est faite entre les deux système. Des résultats de simulation très encourageants sont donnés.

MOTS CLES:

Système non linéaire, Multi- modèles de Takagi-Sugeno, Pile à combustible, convertisseur basse tension continu-continu.

Abstract

Fuel cell is an energy supply system, which takes advantage of the electro-chemical reaction between oxygen and hydrogen to produce electricity and heat, water as its by-product. Usually a fuel cell has low output voltage and slow response due to the dynamic of its auxiliaries. For this reason, a DC/DC converter is required to set up the low voltage to a few hundred volts to supply load.

The work presented in this manuscript deals with the modeling of a converter represented by fuzzy multi-models of Takagi-Sugeno. We will study the classic average model response and the system response represented by the fuzzy multi-model of Takagi-sugeno and a comparison is made between the two systems. Simulation Results obtained very encouraging are given.

KEYWORDS:

Nonlinear system, hybrid system, Fuzzy Takagi-Sugeno Multi-models, Low voltage DC-DC converter, cascade converter.

Table des matières

1. Généralité sur la pile à combustible et les convertisseurs DC/DC non-isolé	14
1.1 Introduction.....	14
1.2 Historique et principe de fonctionnement	14
1.3 Fonctionnement de la pile à combustible et différents types :.....	16
1.3.1 La pile à membrane polymère (PEMFC)	c18
1.4 Comparaison entre la pile à combustible et d'autres sources d'énergies	19
1.5 Avantages et inconvénients des piles à combustible.....	21
1.6 Les applications envisageables pour la PAC.....	22
1.6.1 Applications portables	22
1.6.2 Applications stationnaires.....	23
1.6.3 Applications dans le transport	24
1.7 Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé	25
1.7.1 Convertisseur BOOST entrelacé (IBC).....	25
1.8 Conclusion	30
2. MultiI-modèles flous de TAKAGI-SUGENO	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Concepts élémentaires sur les multi-modèles de type Takagi-Sugeno	32
2.3 Vers la représentation multi-modèles.....	32
2.3.1 Espace de fonctionnement	33
2.3.2 Zone de fonctionnement	34
2.3.3 Sous-modèle:	34
2.3.4 Variable de prémisse	34
2.3.5 Fonction d'activation	34
2.3.6 Multi-modèles.....	35
2.4 Obtention d'une structure multi-modèles couplée.....	36
2.4.1 Multi-modèles par identification.....	36
2.4.2 Multi-modèles par linéarisation.....	36
2.4.3 Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires	37
2.5 Conclusion:	41

3. Simulation et interprétation des résultats	43
3.1 Introduction.....	43
3.2 Modèle mathématique du Convertisseur BOOST entrelacé (IBC)	43
3.3 Représentation du système non linéaire par les multi-modèles flous T.S	44
3.4 Simulation et interprétation des résultats.....	47
3.5 Conclusion	54
4. Conclusion générale et Perspectives	56

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1-1 Fonctionnement de principe d'une pile à combustible.....	15
Figure 1.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.....	17
Figure 1-3 Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie.....	19
Figure 1-4. Pile à combustible au méthanol Ultracell.	21
Figure 1-5 Unité de Pile à combustible.....	22
Figure 1-6 : Pile Ballard Mark 90 embarqué dans le véhicule Ford FCV (85kW)	22
Figure 1-7 Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches.	23
Figure 1-8 Commande des transistors de IBC.....	24
Figure 1-9 Courants dans les inductances de IBC.	24
Figure 1-10 Courant de la source de IBC.....	24
Figure 1-11 Tension aux bornes d'un transistor de IBC.	24
Figure 1-12 Courant aux bornes d'un transistor de IB.....	24
Figure 1-13 Tension aux bornes d'un diode de IBC.	25
Figure 1-14 Courant aux bornes d'un diode de IBC.	25
Figure 1-15 Commande des transistors de IBC.	26
Figure 1-16 Courants dans les inductances de IBC.....	26
Figure 1-17 Courant de la source de IBC.....	26
Figure 1-18 Tension aux bornes d'un transistor de IBC.	26
Figure 1-19 Courant aux bornes d'un transistor de IBC.....	26
Figure 1-20 Tension aux bornes d'un diode de IBC.	27
Figure 1-21 Courant aux bornes d'un diode de IBC.	27
Figure 2.1 : Schéma de principe de l'approche multi-modèles a)-Système non linéaire.....	31
b – c)- Représentation multi-modèles	
Figure 2.2: Secteur non linéaires.....	36
Figure 3.1 : Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches	41
Figure 3.2 : Courants dans les inductances de IBC.....	46
Figure 3.3 : erreur de Courant entre états de du système non linéaire et du multi-modèles	46
Figure 3.4: Tension de bus continu	47
Figure 3.5 : erreur de tension entre états de du système non linéaire et du multi-modèles	47
Figure 3.6 : puissance de bus continu.....	48
Figure 3.7 : erreur de puissance entre états de du système non linéaire et du multi-modèles.....	48
Figure 3.8 : Courants dans les inductances de IBC.....	49
Figure 3.9 : erreur de Courant entre états de du système non linéaire.....	50
Figure 3.10: Tension de bus continu et du multi-modèles	50
Figure 3.11 : erreur de tension entre états de du système non linéaire et du multi-modèles	51
Figure 3.12 : puissance de bus continu	51
Figure 3.13 : erreur de puissance entre états de du système non linéaire et du multi-modèles	52

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 Comparaison des différentes technologies de piles à combustible.....	16
Tableau 3.1: Les paramètres de la charge et du bus continu.....	45

Introduction générale

Introduction générale

La pile à combustible (PàC) est une alternative sérieuse (en Anglais : Fuel Cell (FC)). Par son rendement électrique et énergétique élevé, ses très faibles émissions de gaz nocifs, sa faible nuisance sonore et sa production localisée, occupe une place très importante dans ce domaine. Ces avantages expliquent les motivations fortes pour le développement et la recherche dans ce domaine. Dans le futur proche, la technologie des PàC sera considérée comme source d'énergie primaire renouvelable, en particulier pour les applications de transport [1].

Les convertisseurs DC-DC sont largement utilisés dans l'environnement industriel et domestique. Grâce à leur rendement de plus en plus élevé, leur poids et leur coût réduits, ils ont occupés une place importante dans les sources d'alimentation des ordinateurs portables, les téléphones mobiles, les appareils électroménagers etc ... Un convertisseur de puissance peut être caractérisé comme un système périodique, non-linéaire et variant au cours du temps en raison du changement de la topologie de leur circuit selon les états passants et bloqués des interrupteurs et diodes . Ces circuits sont typiquement contrôlés par la modulation de largeur d'impulsions PWM (Pulse Width Modulation) ou autres techniques semblables pour régler la tension ou le courant fourni aux charges. Le contrôleur décide qu'on passe d'une configuration à une autre en faisant en sorte que les transitions se produisent cycliquement ou en temps discret.

Les convertisseurs DC-DC les plus répandus sont de plusieurs types, parmi lesquels le Buck, Boost ou Buck-Boost. Le Buck diminue et le Boost augmente la tension de sortie par rapport à une tension d'entrée. Le convertisseur Buck-Boost peut fonctionner comme un convertisseur Buck ou comme un convertisseur Boost selon le rapport cyclique d'un ou plusieurs commutateurs dans le convertisseur.

L'objectif de ce travail est de représenter le modèle non linéaire de ce système convertisseur elevateur par la représentation multi-modèles flous 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.

L'approche multimodèle a connu un intérêt certain depuis la publication des travaux de Johansen et Foss. L'idée de l'approche multimodèle est d'appréhender le comportement non

linéaire d'un système par un ensemble de modèles locaux (linéaires ou affines) caractérisant le fonctionnement du système dans différentes zones de fonctionnement.

La motivation de cette approche découle du fait qu'il est souvent difficile de concevoir un modèle qui tient compte de toute la complexité du système étudié. Au départ, certains auteurs ont essayé de représenter des systèmes non linéaires avec des modèles linéaires par morceaux construits à partir d'un arbre de décision.

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques rappels sur les piles à combustible et le fonctionnement d'une PàC de type PEMFC. nous décrivons les différentes applications envisageables pour la PAC, Et nous l'avons fait à quelques-uns des avantages et des inconvénients. Après une présentation générale sur les convertisseurs statiques continu-continu isolé pour les applications piles à combustible.

le deuxième chapitre, représente quelques concepts fondamentaux pour la représentation multimodèles flous de type Takagi-Sugeno. De plus, les principales approches de conception des observateurs sont ensuite introduites. Nous présentons également un bref rappel sur les méthodes de diagnostic des procédés.

Le troisième chapitre est consacré sur la représentation de notre système par les multimodèles de Takagi-sugeno. Ensuite, la comparaison entre les résultats de simulations en boucle ouvert de représentation par les multi-modèles et le modèle non linéaire est donnée.

Enfin, une conclusion générale permet de faire le bilan de cette représentation proposée pour le système étudié.

Chapitre 1

Généralité sur la pile à combustible et les convertisseurs DC/DC non-isolé

1.1 Introduction

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous produits très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications. Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxyde de carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air). [2]

Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible. Pour cela 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 qui peut atteindre au moins 20 % de la tension nominale.

Dans ce chapitre on va présenter les pile à combustible (les différentes technologies de piles existantes et on explique leur principe de fonctionnement On présente enfin les Avantages et les inconvénients technologiques réalisées sur les PAC et les applications.),et puis aux convertisseurs statiques continu-continu isolé pour les applications piles à combustible.

1.2 Historique et principe de fonctionnement

L'histoire de la pile à combustible commence déjà en 1800 avec l'invention de l'électrolyse par deux scientifiques anglais, William Nicholson et Sir Anthony Carlisle. Ce nouveau procédé consiste à séparer des molécules d'eau en molécules d'oxygène et d'hydrogène. Pour ce faire, il faut faire passer un courant électrique dans de l'eau.

Mais la première personne qui observe le principe de la pile à combustible est le chimiste allemand, puis suisse, Christian Friedrich Schönbein. C'est en 1838 que, pendant une expérience d'électrolyse de l'eau, il coupe le courant et constate qu'un faible courant électrique de sens inverse au courant qu'il utilisait pour faire l'électrolyse, se forme pendant un petit moment.

Christian Schönbein relate son expérience dans une lettre à son ami et collègue anglais William Robert Grove, rencontré à un meeting à Birmingham en 1839. Grove se met alors à travailler sur ce sujet. Il invente une pile à combustible hydrogène-oxygène avec des électrodes en platine et un électrolyte d'acide sulfurique. Il l'appelle batterie à gaz car, contrairement aux batteries chimiques classiques, les électrodes ne se transforment pas chimiquement pendant la réaction. Grove décrit l'effet comme l'électrolyse inverse et en reconnaît la portée comme moyen de production d'énergie électrique.

En 1845, William Robert Grove revendique l'invention de la pile à combustible à la place de Christian Schönbein

La pile à combustible tombe dans l'oubli pendant les années suivantes au profit des moteurs thermiques et des piles électriques car elle n'est pas assez rentable.

Toutefois, la pile à combustible subira quelques améliorations comme l'insertion d'un catalyseur en platine et l'amélioration de l'électrolyte par Dr. Ludwig Mond et son assistant Charles Langer en 1889. En 1921, prenant en compte la cinétique (étude de la vitesse des réactions chimiques), Erwin Baur crée une pile à combustible qui fonctionne à 1000°C de manière à ce que la réaction soit plus efficace.

Mais ce n'est qu'en 1932 que Dr. Francis T. Bacon remplace le platine des électrodes par du nickel et il crée un électrolyte alcalin. Cette innovation rend la pile moins coûteuse et plus rentable. En 1959, il présente une pile de 5 kilowatts, ce qui est suffisant pour activer une machine à souder. Il l'appelle «pile Bacon». Cette pile ouvre la voie à celles qui seront utilisées par la suite dans le domaine spatial. Le premier véhicule fonctionnant avec une pile à combustible est un tracteur électrique qui a été créé en 1959 par Allis-Chalmers Manufacturing Company.

Dans les années 60, des prototypes naissent dans tous les domaines : une pile à combustible est emmenée dans les missions Apollo, un sous-marin américain en est aussi équipé.

L'industrie de l'automobile ne se mettra à développer des piles à combustible qu'en 1973, avec le premier choc pétrolier. Cette crise booste la recherche sur les piles à combustible partout dans le monde. Des améliorations seront relevées dans tous les éléments de la pile, des électrolytes à la production d'hydrogène. DuPont met au point la membrane Nafion qui sert d'électrolyte.

Des nouveaux combustibles remplacent l'hydrogène, de nouveaux types de piles sont découverts.

En 1977, une pile de 1 mégawatt est mise en place à New York, suivie en 1983 par une autre pile à combustible de 4.5 mégawatts

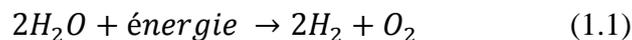
Tandis que la recherche continue en Amérique du Nord et au Japon grâce à des financements de l'Etat, l'Europe, excepté l'Allemagne, ralentit dans la course à la pile à combustible pendant les années 80 : malgré quelques succès, la pile a une courte durée de vie et coûte très cher.

Les années 90 relancent lentement le domaine de la pile à combustible grâce à une prise de conscience du réchauffement climatique. D'autre part, les premiers prototypes de véhicules voient le jour et les progrès technologiques permettent de construire des piles plus performantes. Depuis la fin des années 90, l'intérêt pour les recherches s'accroît de plus en plus à cause du prix en hausse du pétrole. Beaucoup de projet voient le jour dans le monde entier, même si le marché est largement dominé par l'Amérique du Nord et le Japon.[3]

1.3 Fonctionnement de la pile à combustible et différents types :

Le principe de la pile à combustible consiste à faire réagir de l'hydrogène et de l'oxygène pour obtenir de l'électricité. C'est en fait le procédé inverse de l'électrolyse, qui sépare l'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau en faisant passer un courant électrique. La pile à combustible crée de l'eau, de la chaleur et de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène.

Équation chimique de l'électrolyse :



Équation chimique de la pile à combustible :

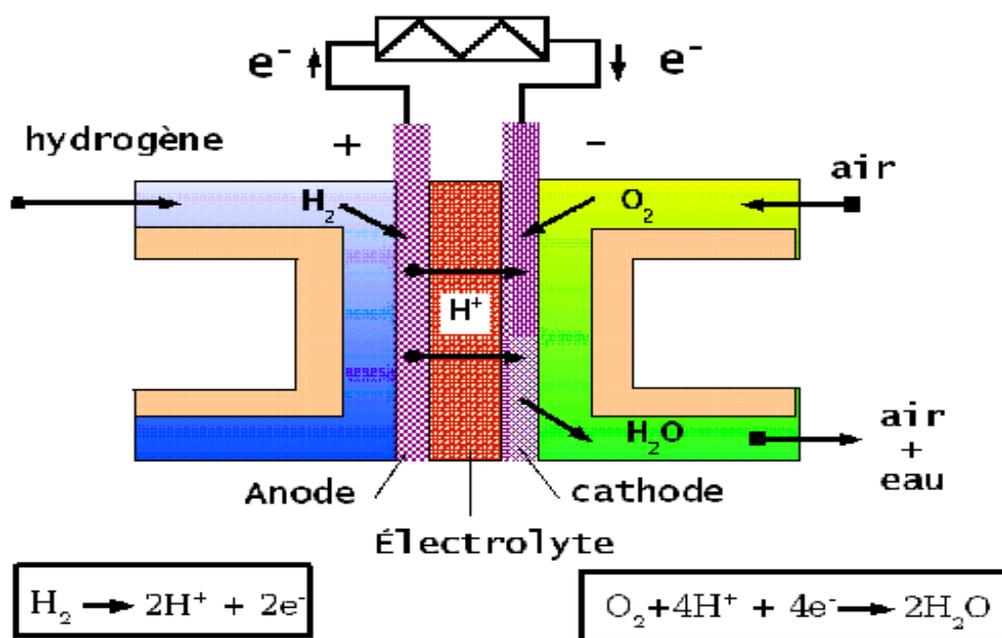
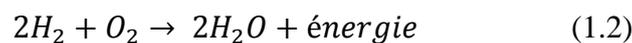


Figure 1-1 Fonctionnement de principe d'une pile à combustible.

La pile à combustible se différencie du moteur à explosion car il n'y a justement pas d'explosion. La décomposition des molécules d'hydrogène et d'oxygène puis la construction d'une molécule d'eau se fait en deux phases. Ce qui permet une circulation d'électrons entre les deux points de réaction, l'anode et la cathode, et donc une production d'électricité.

La somme des deux réactions est exothermique, ce qui veut dire que de la chaleur s'en dégage. La pile à combustible va alors produire d'une part de l'électricité mais aussi de la chaleur.[3]

On dénombre actuellement six principaux types de piles à combustible qui diffèrent selon leur la nature de l'électrolyte, des électrodes et du combustible:

- les piles alcalines (AFC),
- les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC).
- les piles directes au méthanol (DMFC),
- les piles à acide phosphorique (PAFC),
- les piles à carbonate fondu (MCFC)
- les piles à oxyde solide (SOFC)

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydant	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air

Tableau 1-1 Comparaison des différentes technologies de piles à combustible[4].

Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU)
Niveau de développement	Utilisée	Utilisée	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

1.3.1 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 [5].

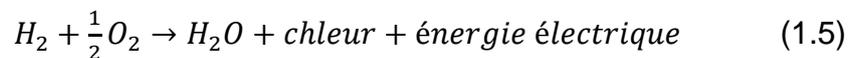
Une pile à combustible de type PEM est constituée d'un empilement de cellules électrochimiques en série [6]. Chaque cellule est le siège d'une réaction électrochimique inverse de l'électrolyse de l'eau, la réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur selon les équations suivantes : Anode : couple H^+ / H_2



Cathode : couple O_2 / H_2O



Réaction globale :



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

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

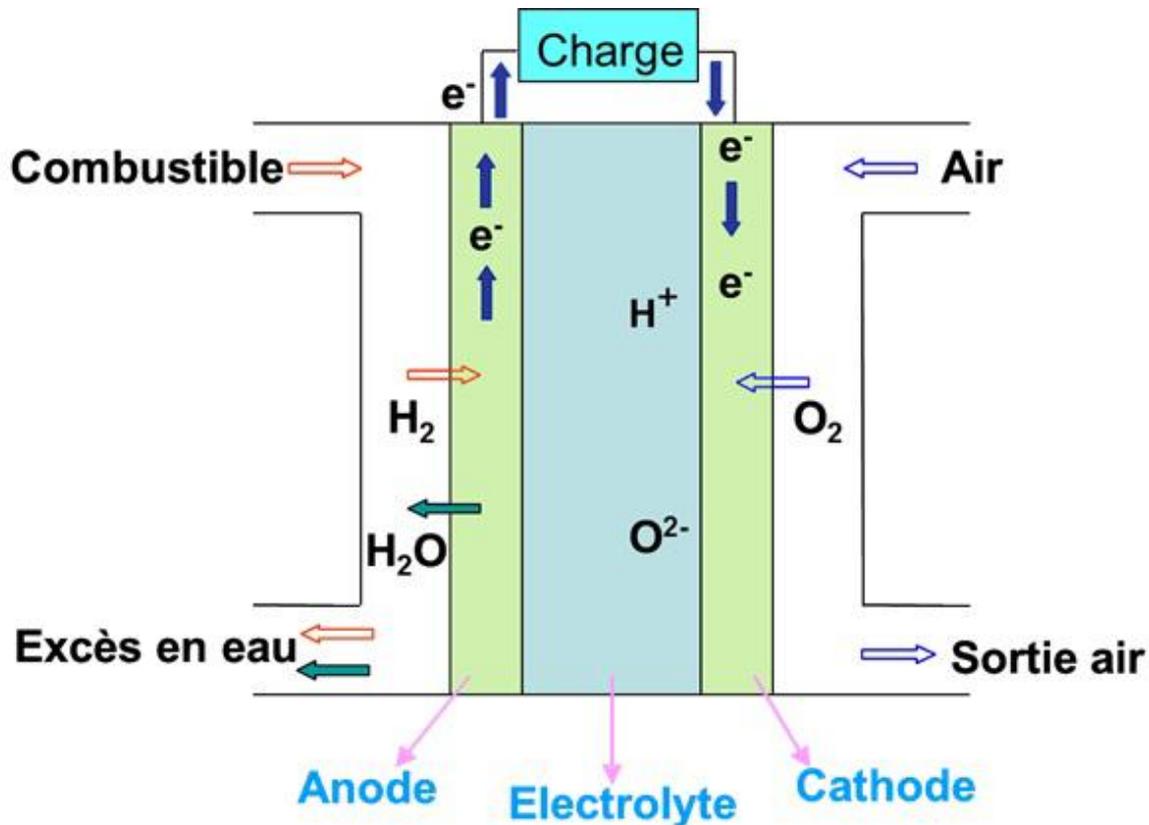


Figure 1.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC. [4]

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux Laboratoires sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins coûteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone [7].

1.4 Comparaison entre la pile à combustible et d'autres sources d'énergies

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 à 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 [8]. 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 1.3). 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 cyclage) 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 représenté. Ce digramme montre que les piles a combustibles présentent les nergies spécifiques les plus élevées par rapport à les autres dispositifs . Néanmoins, leur puissance spécifique reste très limitée (quelques dizaines de $W.Kg^{-1}$), et leur irréversibilité en courant intrdit la récupération d'énergie.

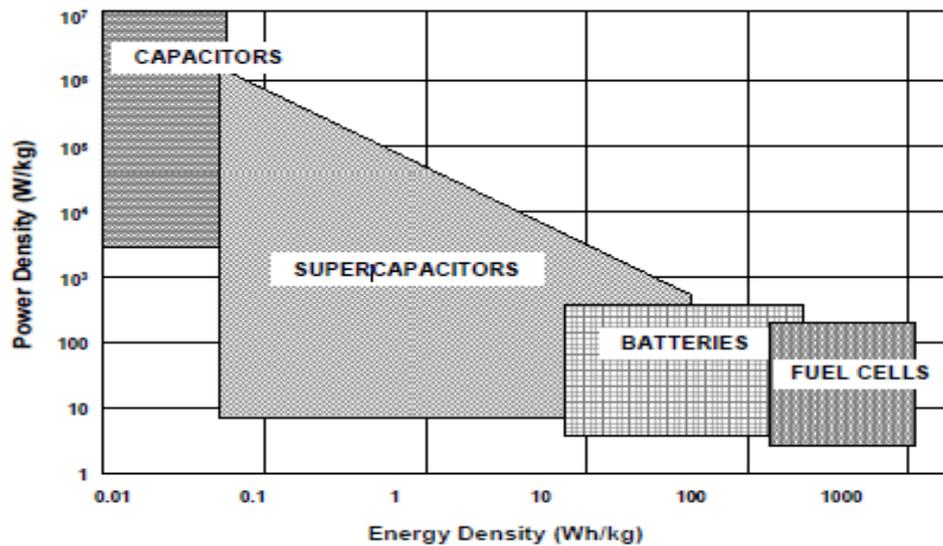


Figure 1-3 Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie [9].

1.5 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:

- L'ensemble des processus revient à une conversion directe de l'énergie chimique en électricité, au contraire des systèmes courants (transformation de l'énergie chimique en énergie thermique).
- Utilisées en production décentralisée d'électricité les piles à combustible présentent un double avantage :
 - une réduction significative de la consommation d'énergie par rapport à des solutions plus traditionnelles,
 - une réduction très forte des émissions de polluants.
- S'ajoute la possibilité de faire appel à de multiples combustibles, avec un fonctionnement très silencieux, des coûts de maintenance a priori très réduits. Au contraire des batteries électriques les réactifs cathodiques et anodiques possèdent l'avantage de se renouveler régulièrement à partir de l'air et du combustible.
- des rendements énergétiques élevés même à charge partielle: de 40 à 70% électrique, plus de 85% en tout (électricité et chaleur) [10].

- 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 cœur de la pile).

L'INCONVÉNIENT MAJEUR :

- la durée de vie: elles doivent durer plus de 40000h dans les applications stationnaires [11], 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.

1.6 Les applications envisageables pour la PAC

Comme cela a été souligné, la forte modularité de la PAC introduit un vaste champ d'applications potentielles. On distingue trois grands types d'applications portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts), transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts), stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt).

1.6.1 Applications portables

Dans cette famille, on inclut essentiellement la téléphonie mobile(100 mW-1 W), l'ordinateur portable (30-50 W) ainsi que les générateurs autonomes portables (500 W-2 kW). Les deux premières applications connaissent actuellement une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même les plus performantes au Lithium Ion. Ces dernières atteignent aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 140 W/kg,

qui n'augmentera plus significativement La pile à combustible est plus intéressante que les batteries actuelles compte tenu de son autonomie, mais aussi parce qu'aucun système de recharge n'est requis. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C). [12].



Figure 1-4. Pile à combustible au méthanol Ultracell.

1.6.2 Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation.

Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible [13].



Figure 1-5 Unité de Pile à combustible

1.6.3 Applications dans le transport

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

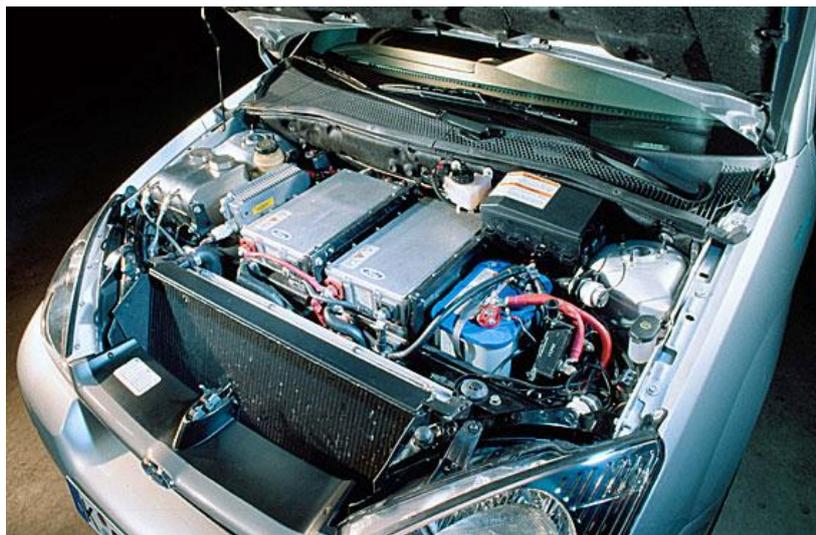


Figure I-6 : Pile Ballard Mark 90 embarqué dans le véhicule Ford FCV (85kW)

1.7 Convertisseurs statiques basse tension continu-continu non-isolé

Nous allons intéresser dans cette section aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de BOOST. Plusieurs variantes existent : le BOOST classique, le BUCK- BOOST, le BOOST entrelacé, le BOOST à trois niveaux et le double BOOST dual entrelacé...etc. Ces structures, quant à elles, répondent bien aux contraintes de gamme de puissance de PAC.

1.7.1 Convertisseur BOOST entrelacé (IBC)

L'entrelacement permet de résoudre le problème lié au fort courant des convertisseurs basse tension. Il consiste en la mise en parallèle de cellules BOOST dont les commandes sont régulièrement décalées entre elles. Ainsi, ce principe permet, outre la réduction du courant dans chaque branche, d'augmenter la fréquence apparente en entrée et en sortie [14-15]. L'analyse sera faite sur le BOOST entrelacé à branches mais les résultats sont valables pour les autres structures entrelacées. La technique de l'entrelacement est réalisée par « 3 » branches L (inductance) – T (transistor) – D (diode) identiques (Figure 2.12 : Hacheur entrelacé à 3 branches). Les commandes des transistors de chaque branche sont décalées de $T/3$ de façon régulière avec un même rapport cyclique pour chaque branche.

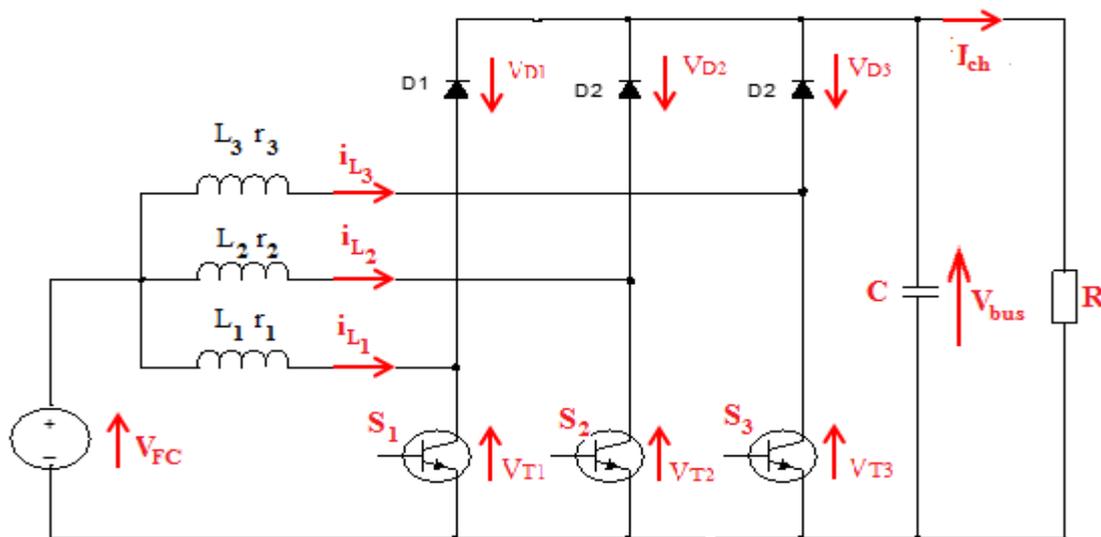


Figure 1-7 Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches.

Nous distinguons deux cas de fonctionnement correspondant avec $D > 0,5$ et $D < 0,5$.

Lorsque le rapport cyclique D est inférieur à 0,5, les formes d'onde simulé des tensions et courants de cette structure sont représentant dans les figures suivantes :

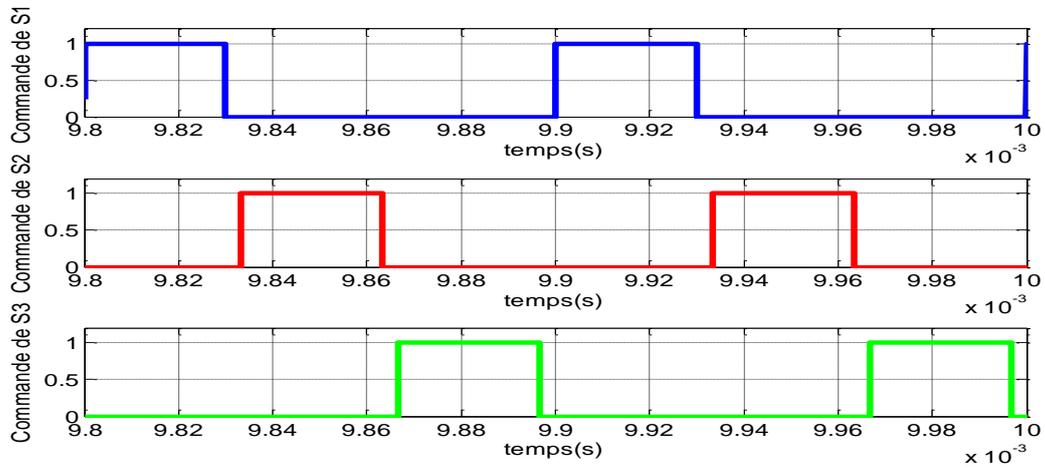


Figure 1-8 Commande des transistors de IBC.

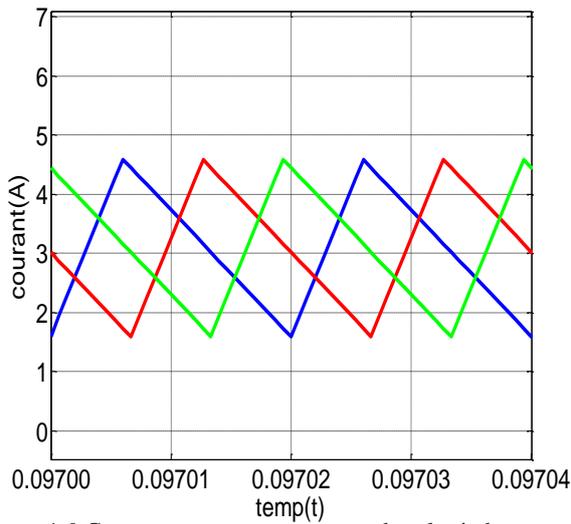


Figure 1-9 Courants dans les inductances de IBC.
Courant de la source de IBC.

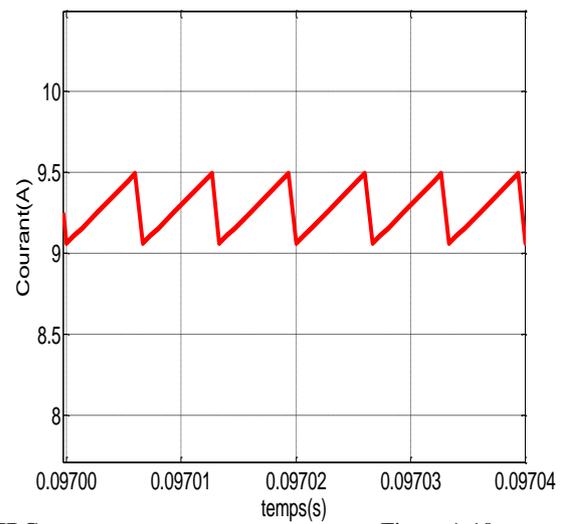


Figure 1-10

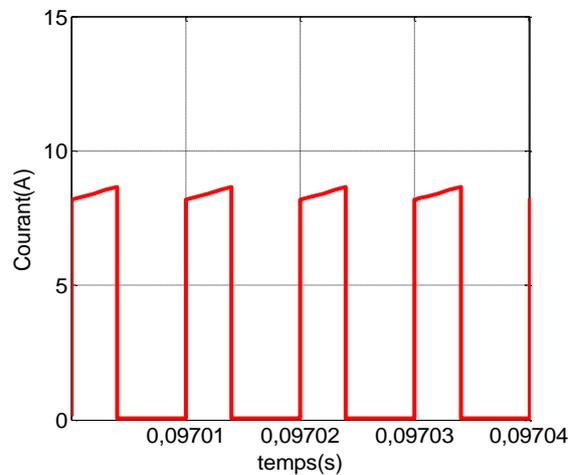
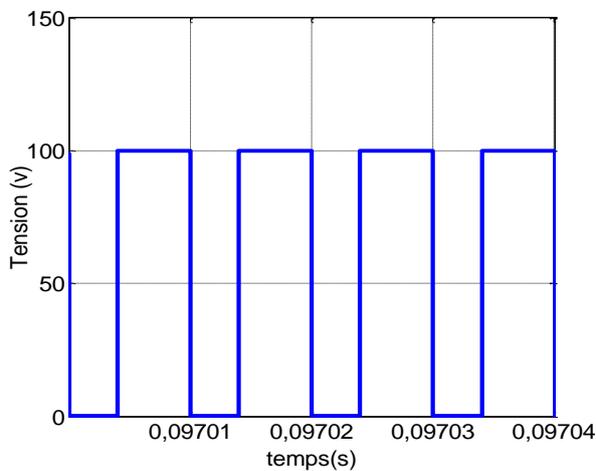


Figure 1-11 Tension aux bornes d'un transistor de IBC.

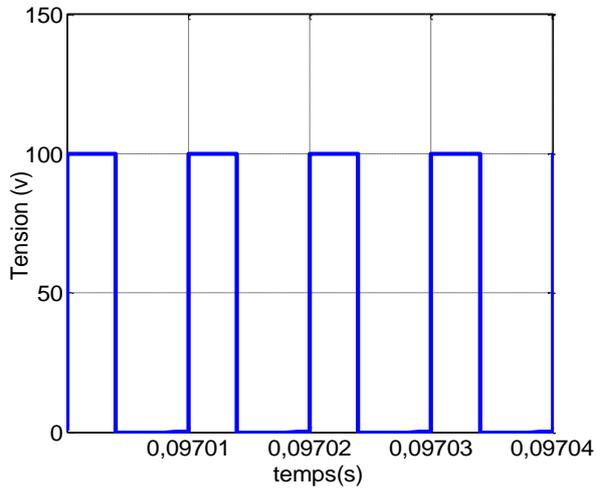


Figure 1-13 Tension aux bornes d'un diode de IBC.

Figure 1-12 Courant aux bornes d'un transistor de IB

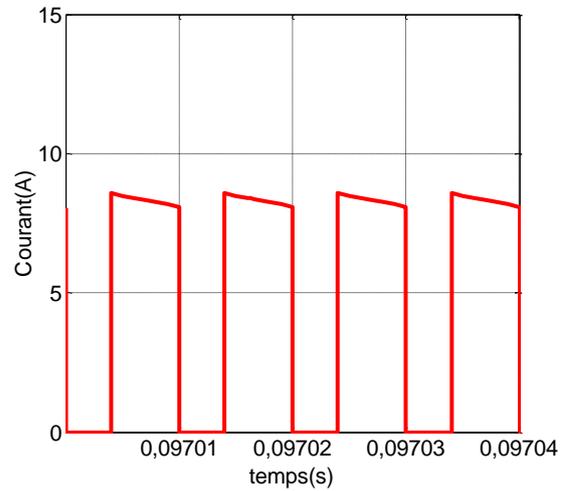


Figure 1-14 Courant aux bornes d'un diode de IBC.

Le rapport cyclique D et le gain en tension sont :

$$D = 1 - \frac{V_e}{V_s} \quad (1-4)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - D} \quad (1-5)$$

Tant que la valeur des inductances des deux convertisseurs élémentaires sont identiques, les courants dans les inductances sont de même forme, mais ils sont décalés d'une demi période entre eux. Les ondulations de courant dans chaque inductance sont toujours égales à :

$$\Delta i_L = \Delta i_1 = \Delta i_2 = \frac{D.V_e}{L.f} \quad (1-6)$$

Pour un rapport cyclique D inférieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\Delta i_{pac} = \frac{1-2.D}{1-D} \cdot \frac{D.V_e}{L.f} = \frac{1-2.D}{1-D} \cdot \Delta i_L \quad (1-7)$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s - (0.5 - D)}{C.f} = \frac{V_e \cdot (0.5 - D)}{(1 - D) \cdot R.C.f}$$

Pour D supérieur à 0.5 :

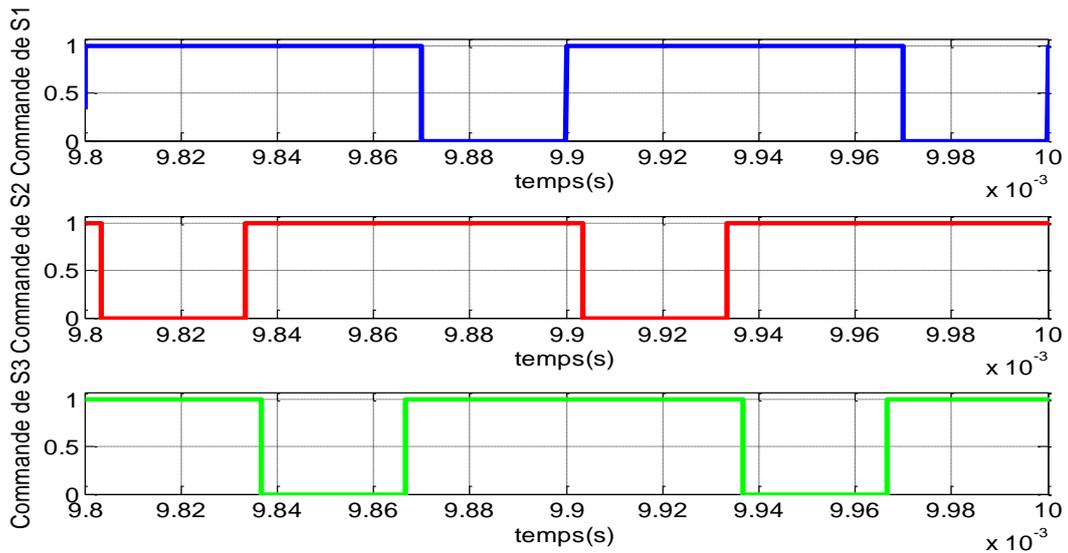


Figure 1-15 Commande des transistors de IBC.

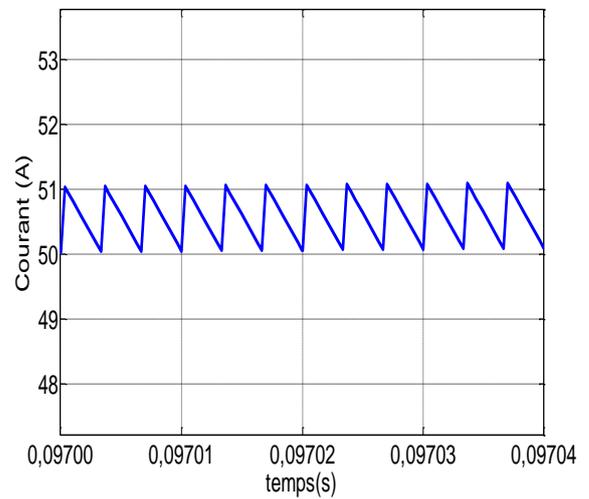
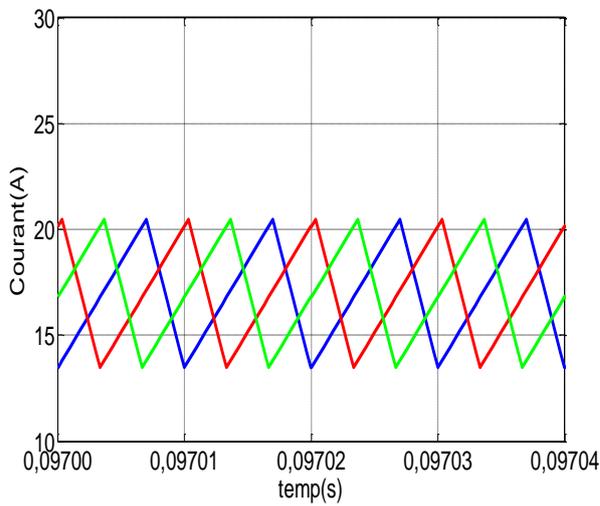


Figure 1-16 Courants dans les inductances de IBC.

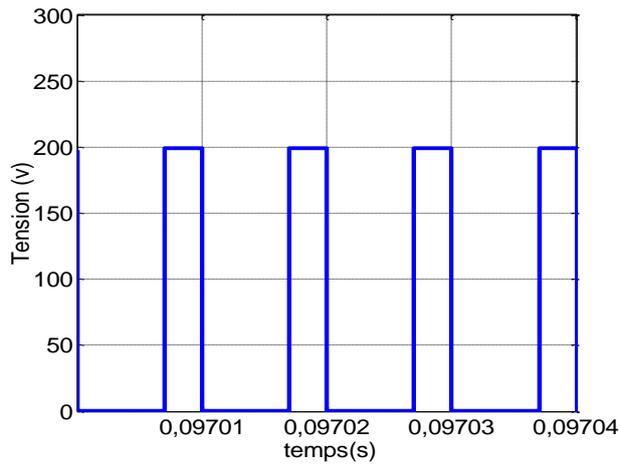


Figure 1-18 Tension aux bornes d'un transistor de IBC.

Figure 1-17 Courant de la source de IBC.

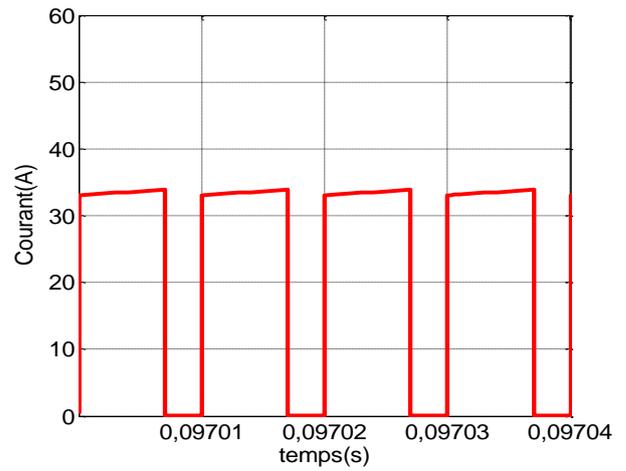


Figure 1-19 Courant aux bornes d'un transistor de IBC.

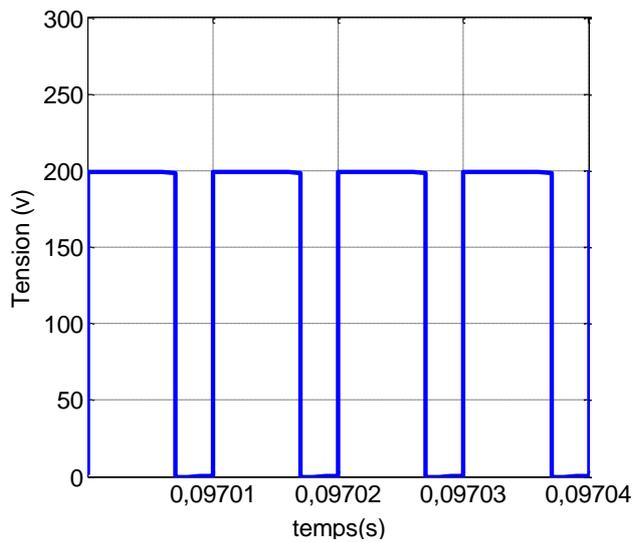


Figure 1-20 Tension aux bornes d'un diode de IBC.

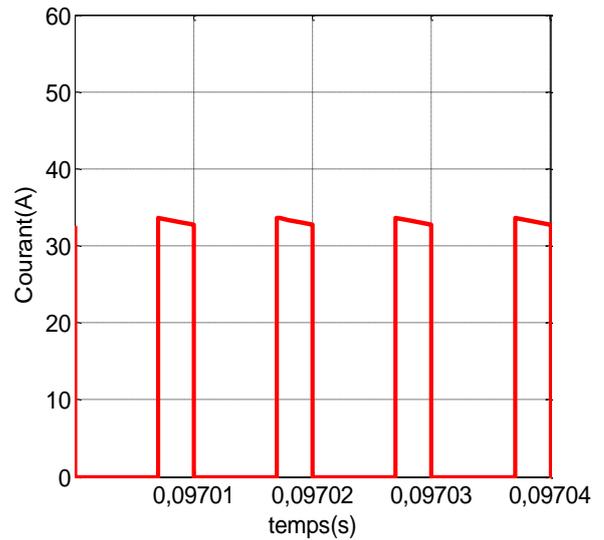


Figure 1-21 Courant aux bornes d'un diode de IBC.

Et pour un rapport cyclique D supérieur à 0,5, l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie sont :

$$\Delta i_{pac} = \frac{2.D-1}{D} \cdot \frac{D.V_e}{L.f} = \frac{2.D-1}{D} \cdot \Delta i_L$$

$$\Delta V_s = \frac{I_s - (D-0.5)}{C.f} = \frac{V_e.(D-0.5)}{(1-D).R.C.f}$$

(1-1)

Le courant moyenne qui traverse les interrupteurs et les diodes est :

$$I_{K_{moy}} = D \cdot \frac{I_{pac}}{2} \quad (1-2)$$

$$I_{D_{moy}} = (1 - D) \cdot \frac{I_{pac}}{2} \quad (1-3)$$

On observant que les courants dans les interrupteurs et les diodes sont divisés par deux.

Pour la capacité, la fréquence de l'ondulation du courant de sortie est doublée donc la capacité de sortie peut être divisée par deux par rapport au cas du BOOST à une branche :

$$C_s = \frac{D.V_e}{2.(1-D).R.\Delta V_s.f} = \frac{D.V_s}{2.R.\Delta V_s.f} \quad (1-4)$$

Cette structure entrelacée est une solution efficace pour augmenter le niveau de puissance, car elle permet le partage du courant entre les phases. Cette structure permet de minimiser l'ondulation du courant et la taille des composants passifs [16]. Mais, les contraintes de tension sur l'interrupteurs et diodes sont encore importantes, ce qui conduit à l'efficacité limitée en raison des pertes de commutation dans des applications à haute puissance. De plus, le convertisseur entrelacé souffre d'un gain en tension limité, ce qui est identique à celui du BOOST conventionnel convertisseur.

1.8 Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé aux piles à combustible et principalement aux piles PEM. Les différents points abordés ont concerné quelques rappels historiques du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement. Ainsi que leurs avantages et inconvénients.

D'après, nous avons présenté la structure de Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches pour les applications piles à combustible.

Chapitre 2
Multi-modèles flous de
Takagi-sugeno

2.1 Introduction

En 1985, Takagi et Sugeno ont proposé un modèle flou d'un système constitué d'un ensemble de règles 'si prémisse alors conséquence', telle que la conséquence d'une règle est un modèle affine. Le modèle global s'obtient par l'agrégation des modèles locaux. Quelques années après, Jacob et al ont présenté l'approche multi-experts qui est la combinaison de différents experts par l'entremise de fonctions d'activation, tel qu'un expert est un modèle décrivant le comportement local d'un système. L'ensemble de toutes ces techniques conduit à un modèle global d'un système qui est une combinaison de modèles localement valables [17].

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 polytopiques 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 [18].

2.3 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, on 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: les multi-modèles, le modèle flou de Takagi- Sugeno, le modèle linéaire polytopique. L'idée principale de cette approche est s'appuie

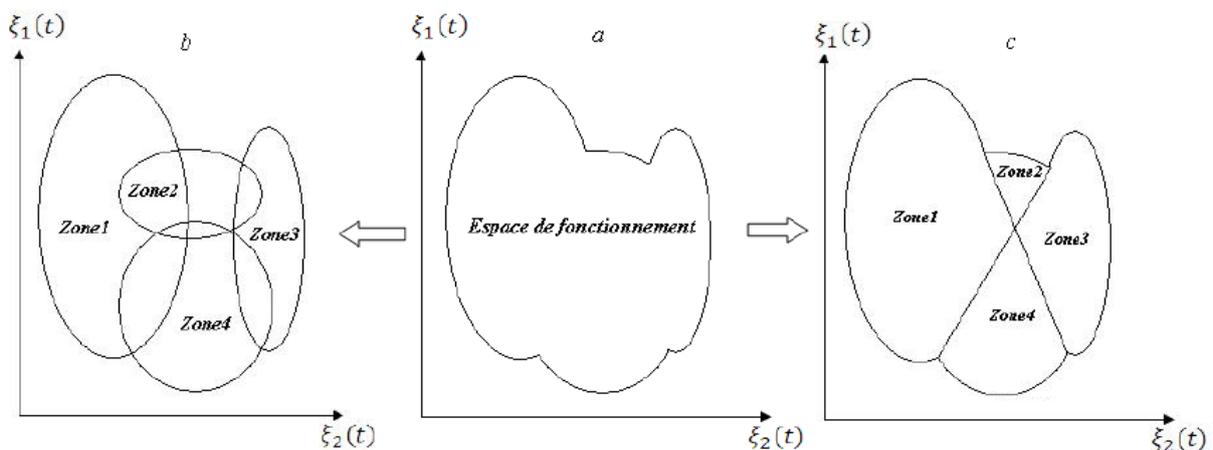


Figure 2.1 : Schéma de principe de l'approche multi-modèles a)-Système non linéaire , b – c)- Représentation multi-modèles [19].

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.

2.3.1 Espace de fonctionnement

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

2.3.2 Zone de fonctionnement

de Les zones de fonctionnement 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). 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 morceaur). 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, ce chevauchement est 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 aux dérivées continues dont la pente détermine la vitesse de passage d'un modèle à un autre.

2.3.3 Sous-modèle:

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

2.3.4 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.

2.3.5 Fonction d'activation

C'est une fonction qui détermine le degré d'activation du sous 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. Elle assure un passage progressif de ce modèle aux modèles locaux voisins. Ces fonctions dépendent des variables de décision.

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

Les fonctions d'activation peuvent être construites soit à partir des fonctions à dérivées discontinues (des fonctions triangulaires ou trapézoïdales), soit à partir des fonctions à dérivées continues (des fonctions gaussiennes). Elles sont choisies de façon à vérifier les propriétés de somme convexe suivantes :

$$\begin{cases} 0 \leq h_i(\xi(t)) \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n \mu_i(\xi(t)) = 1 \end{cases}$$

Les fonctions d'activation construites à partir d'une loi exponentielle sont souvent utilisées pour le cas continu.

2.3.6 Multi-modèles

C'est un ensemble de sous modèles agrégés par un mécanisme d'interpolation permettant de caractériser le comportement dynamique global d'un système. Un multi-modèles se caractérise par le nombre de ses sous-modèles, par leur structure et par le choix des fonctions de pondération. Dans la littérature, deux grandes familles de multi-modèles sont recensées selon l'utilisation du vecteur d'état.

2.3.6.1 Structure couplée

C'est un ensemble de sous modèles agrégés par un mécanisme d'interpolation permettant de caractériser le comportement dynamique global d'un système. Un multi-modèles se caractérise par le nombre de ses sous-modèles, par leur structure et par le choix des fonctions de pondération. Dans la littérature, deux grandes familles de multi-modèles sont recensées selon l'utilisation du vecteur d'état.

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

2.3.6.2 Structure découplée

La deuxième famille c'est la structure découplée ou bien les multi-modèles locaux, il ya plusieurs vecteurs d'états. Elle suppose que le processus est composé de modèles locaux découplés et admet des vecteurs d'états indépendants, et peut être vue comme la connexion parallèle de r modèles affines pondérés par leurs poids de pondération. Dans le contexte d'identification des paramètres cette structure est très utile car elle permet d'ajuster les dimensions des sous-modèles à la complexité des différents comportements d'un processus [19].

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

2.4 Obtention d'une structure multi-modèles couplée

Dans cette section, nous décrivons les trois méthodes d'obtention d'une structure multi-modèles couplée à partir d'un modèle non linéaire.

2.4.1 Multi-modèles par identification

En représentant un système non linéaire sous forme multi-modèles, le problème d'identification des systèmes non linéaires est réduit à l'identification des sous-systèmes définis par des modèles locaux linéaires et des fonctions d'activation. Les méthodes d'optimisation numérique sont alors utilisées pour estimer ces paramètres. Généralement la construction d'un multi-modèles à partir des entrées/sorties exige :

- La définition d'une structure de multi-modèles
- La définition des fonctions d'appartenance
- L'estimation des paramètres des fonctions d'activation et des modèles locaux
- L'évaluation des performances du multi-modèles

Pour l'estimation des paramètres, plusieurs méthodes d'optimisation numérique peuvent être utilisées, selon les informations disponibles à priori. Elles sont généralement basées sur la minimisation de la fonction d'écart entre la sortie estimée du multi-modèles $\hat{y}(t)$ et la sortie mesurée du système $y_m(t)$ [19].

2.4.2 Multi-modèles par linéarisation

Dans ce cas, on dispose de la forme analytique du modèle non linéaire du processus physique qu'on linéarise autour de différents points de fonctionnement judicieusement choisis. Considérons le système non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (2.5)$$

Où $(f, h) \in \mathcal{R}^{2n}$ sont des fonctions non linéaires continues, $x(t) \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état et $u(t) \in \mathcal{R}^m$ est le vecteur d'entrée. Par la suite, nous représenterons le système non linéaire (2.5) par

un multi-modèles, composé de plusieurs modèles locaux linéaires ou affines obtenus en linéarisant le système non linéaire autour d'un point de fonctionnement arbitraire $(x_i, u_i) \in \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^m$:

Dans ce cas, on considère le choix suggéré par Johansen et Foss [21], c'est-à-dire qu'on définit les modèles locaux comme le premier terme du développement en série de Taylor du système (2.5).

D'un point de vue mathématique, ceci correspond à approcher une fonction non linéaire par son plan tangent au point (x_i, u_i) . On suppose que les différents modèles locaux sont issus d'une linéarisation autour de r points de fonctionnement $(x_i, u_i) i \in \{1, \dots, r\}$. La formulation multi-modèles est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_m(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) (A_i x_m(t) + B_i u(t) + D_i) \\ y_m(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) (C_i x_m(t) + E_i u(t) + N_i) \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec

$$A_i = \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \Big|_{(x,u)=(x_i,u_i)}, B_i = \frac{\partial f(x,u)}{\partial u} \Big|_{(x,u)=(x_i,u_i)}$$

$$A_i = \frac{\partial h(x,u)}{\partial x} \Big|_{(x,u)=(x_i,u_i)}, B_i = \frac{\partial h(x,u)}{\partial u} \Big|_{(x,u)=(x_i,u_i)}$$

$$D_i = f(x_i, u_i) - A_i x_i - B_i u_i \quad N_i = h(x_i, u_i) - C_i x_i - E_i u_i$$

Notons que dans ce cas, le nombre des modèles locaux (r) dépend de la précision de modélisation souhaitée, de la complexité du système non linéaire et du choix de la structure des fonctions d'activation [18]

2.4.3 Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires

La modélisation des systèmes flous de Takagi-Sugeno par l'approche des secteurs non linéaires. Cette approche consiste à représenter le système non linéaire de façon exacte dans un espace compact des variables d'état. Dans ce contexte, parfois, il est difficile de trouver un secteur global pour le système non linéaire, c'est pour cette raison on considère un secteur non linéaire local, comme il est indiqué dans la (Figure 2.2) Soit le système non linéaire décrit par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (2.7)$$

Avec $x(t)$, $y(t)$ et $u(t)$ représentent respectivement, l'état du système, la sortie, et la commande. On peut écrire le système (2.7) sous une forme d'un système linéaire à Paramètres Variants (LPV):

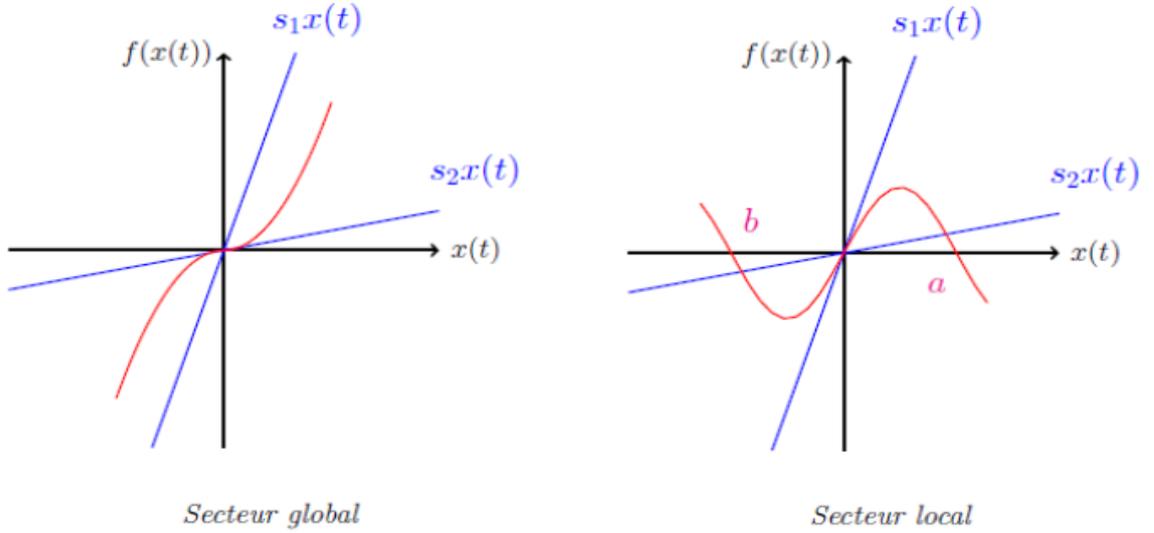


Figure2.2: Secteur non linéaires [19]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(\xi(t))x(t) + H(\xi(t))u(t) \\ y(t) = H(\xi(t))x(t) \end{cases} \quad (2.8)$$

Soit k le nombre des fonctions non linéaires présentes dans le système (2.8). On les note f_i ou $i=1, \dots, k$. Supposons qu'il existe un compact C des variables $\xi(t)$ où les non-linéarités sont bornées:

$$f_i \in [f_{min}^i, f_{max}^i], \text{ pour } i=1, \dots, k \quad (2.9)$$

Les non-linéarités f_i peuvent alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} f_i(\xi(t)) = f_{min}^i w_{max}^i(\xi(t)) + f_{max}^i w_{min}^i(\xi(t)) \\ w_{max}^i(\xi(t)) = \frac{f_{max}^i - f_i(\xi(t))}{f_{max}^i - f_{min}^i} \\ w_{min}^i = 1 - w_{max}^i(\xi(t)) \end{cases} \quad (2.10)$$

À partir des fonctions des poids w_{max}^i , w_{min}^i , on peut définir les fonctions d'activation $h_i(\xi(t))$ comme suit:

$$h_i(\xi(t)) = \prod_{\ell=1}^k w_{\ell}^i(\xi(t)) \quad r=1, \dots, 2^k \text{ et } \ell=1, 2 \quad (2.11)$$

Le système (1.7) qui possède $r=2^k \in \mathbb{N}$ sous-modèles linéaires, devient par la transformation par secteur non linéaire sous la forme suivante [18]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{r=2^k} h_i(\xi(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^{r=2^k} h_i(\xi(t)) (C_i x(t)) \end{cases} \quad (2.12)$$

Exemple 1 : Considérons le système non linéaire suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1(t) + x_1(t)x_2^3(t) \\ -x_2(t) + (3+x_2(t))x_1^3(t) \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

On suppose que $x_1(t) \in [-1,1]$ et $x_2(t) \in [-1,1]$.

Le système précédent peut être écrit sous la forme :

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1 & x_1(t)x_2^2(t) \\ (3+x_2(t))x_1^2(t) & -1 \end{bmatrix} x(t)$$

Avec $x(t)=[x_1(t), -x_2(t)]^T$ et $x_1(t)x_2^2(t)$ et $(3+x_2(t))x_1^2(t)$ sont les termes non linéaires.

Pour les termes non linéaires, soit

$$\xi_1(t) = x_1(t)x_2^2(t) \text{ et } \xi_2(t) = (3+x_2(t))x_1^2(t)$$

Alors on a :

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1 & \xi_1(t) \\ \xi_2(t) & -1 \end{bmatrix} x(t)$$

Ensuite, on calcule les valeurs minimale et maximale de $\xi_1(t)$ et $\xi_2(t)$ pour $x_1(t) \in [-1,1]$ et $x_2(t) \in [-1,1]$.

$$\xi_{1\max} = \max_{x_1(t), x_2(t)} \xi_1(t)=1, \quad \xi_{1\min} = \min_{x_1(t), x_2(t)} \xi_1(t)=-1$$

$$\xi_{2\max} = \max_{x_1(t), x_2(t)} \xi_2(t)=4, \quad \xi_{2\min} = \min_{x_1(t), x_2(t)} \xi_2(t)=0$$

$\xi_1(t)$ et $\xi_2(t)$ peuvent être représentés par :

$$\xi_1(t)=x_1(t)x_2^2(t) = M_1(\xi_1(t)). \xi_{1\max} + M_2(\xi_1(t)). \xi_{1\min}$$

$$\xi_2(t) = (3 + x_2(t))x_1^2(t) = N_1(\xi_2(t)) \cdot \xi_{2\max} + N_2(\xi_2(t)) \cdot \xi_{2\min}$$

Avec :

$$M_1(\xi_1(t)) + M_2(\xi_1(t)) = 1.$$

$$N_1(\xi_2(t)) + N_2(\xi_2(t)) = 1.$$

Les fonctions d'appartenance sont alors :

$$M_1(\xi_1(t)) = \frac{\xi_1(t) - \xi_{1\min}}{\xi_{1\max} - \xi_{1\min}} = \frac{\xi_1(t) + 1}{2}, \quad M_2(\xi_1(t)) = \frac{\xi_{1\max} - \xi_1(t)}{\xi_{1\max} - \xi_{1\min}} = \frac{1 - \xi_1(t)}{2}$$

$$N_1(\xi_2(t)) = \frac{\xi_2(t) - \xi_{2\min}}{\xi_{2\max} - \xi_{2\min}} = \frac{\xi_2(t)}{4}, \quad N_2(\xi_2(t)) = \frac{\xi_{2\max} - \xi_2(t)}{\xi_{2\max} - \xi_{2\min}} = \frac{4 - \xi_2(t)}{4}$$

On appelle ces fonctions d'appartenance, "Positif ", "Négatif" , "Grand" et "Petit" respectivement. Alors le système linéaire précédent peut être représenté par le modèle flou de Takagi-Sugeno suivant :

- Règle 1: Si $\xi_1(t)$ est "Positif " et $\xi_2(t)$ est "Grand" Alors $\dot{x}(t) = A_1x(t)$.
- Règle 2: Si $\xi_1(t)$ est "Positif " et $\xi_2(t)$ est "petit" Alors $\dot{x}(t) = A_2x(t)$.
- Règle 1 : Si $\xi_1(t)$ est "Négatif " et $\xi_2(t)$ est "Grand" Alors $\dot{x}(t) = A_3x(t)$.
- Règle 1 : Si $\xi_1(t)$ est "Négatif " et $\xi_2(t)$ est "petit" Alors $\dot{x}(t) = A_4x(t)$.

Avec :

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 4 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 4 & -1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Le système non linéaire est représenté par le modèle flou de Takagi-Sugene suivant :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(\xi(t))A_i x(t)$$

Avec :

$$h_1(\xi(t)) = M_1(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)), \quad h_2(\xi(t)) = M_1(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t))$$

$$h_3(\xi(t)) = M_2(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)), \quad h_4(\xi(t)) = M_2(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t))$$

Ce modèle flou représente d'une manière exacte le système non linéaire précédent dans la région $[-1,1] \times [-1,1]$ de l'espace d'état.

2.5 Conclusion:

Le multi-modèle est une structure particulièrement bien adaptée à la modélisation des systèmes non linéaires sur une large plage de fonctionnement. Il permet d'obtenir un modèle doté d'une structure mathématiquement attractive et capable d'appréhender avec précision donnée la complexité d'un système. Le multi-modèle vient répondre aux difficultés dues à la complexité des modèles non linéaires, par des techniques proches de celles développées dans le cadre linéaire. Ainsi, la forme multi-modèle permet de décrire un système non linéaire sur une large plage de fonctionnement, contrairement aux modèles linéaires qui ont généralement un caractère local et qui sont valides autour de points de fonctionnement particuliers. Finalement, ce type d'approche permet de prendre en compte des incertitudes et des erreurs de modélisation, fournissant une technique de reconstruction des variables bien adaptée aux processus réels [22].

Chapitre 3

Simulation et interprétation des résultats

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons une comparaison entre le modèle moyenne classique et du système représenté par les multi-modèles.

premièrement , nous avons représenté les deux modèles (modèle du Convertisseur BOOST entrelacé et le modèle présenté par les multi-modèles flous T.S). nous examinons ensuite la résultats de simulation réponse de chaque type et comparaison entre eux

3.2 Modèle mathématique du Convertisseur BOOST entrelacé (IBC)

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté en fig.3.1 et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de les interrupteur S1 S2 S3

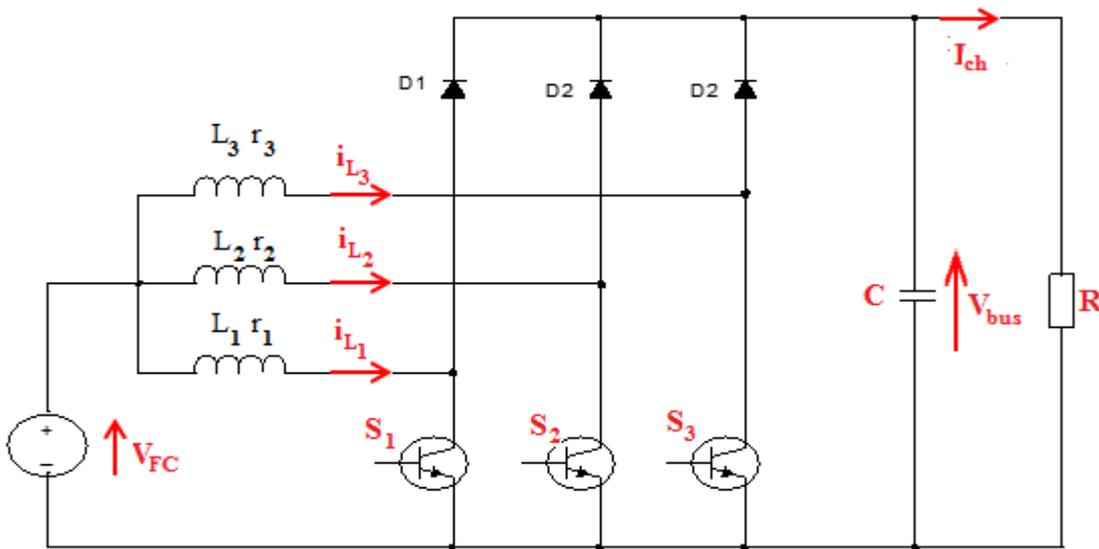


Figure 3.1 : Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches

Les équations différentielles du convertisseur IBC de première étage s'écrivent, en valeur moyenne :

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_{L_1}(t)}{dt} = V_{FC} - (1 - D_1)V_{bus} - r_{L_1}I_{L_1} \\ L_2 \frac{dI_{L_2}(t)}{dt} = V_{FC} - (1 - D_2)V_{bus} - r_{L_2}I_{L_2} \\ L_3 \frac{dI_{L_3}(t)}{dt} = V_{FC} - (1 - D_3)V_{bus} - r_{L_3}I_{L_3} \\ C \frac{dV_{bus}(t)}{dt} = -I_{ch} + (1 - D_1)I_{L_1} + (1 - D_2)I_{L_2} + (1 - D_3)I_{L_3} \end{cases} \quad (3.1)$$

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en (1)

, où $I_{L_1}, I_{L_2}, I_{L_3}$ les Courants dans les inductances L_1, L_2, L_3 , V_{FC} est la tension d'entrée, V_{bus} est la tension de sortie et D_1, D_2, D_3 sont le commande. Soit :

$$x_1 = I_{L_1}; x_2 = I_{L_2}; x_3 = I_{L_3}; x_4 = V_{bus}$$

alors les équations d'état deviennent :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L_1} [V_{FC} - (1 - D_1) x_4 - r_{L_1} x_1] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_2} [V_{FC} - (1 - D_2) x_4 - r_{L_2} x_2] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{L_3} [V_{FC} - (1 - D_3) x_4 - r_{L_3} x_3] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{C_1} [-I_{ch} + (1 - D_1) x_1 + (1 - D_2) x_2 + (1 - D_3) x_3] \end{cases} \quad (3.2)$$

Les paramètres du système sont : Les inductances de les bobines L_1, L_2, L_3 en [H], la capacité du condensateur C en [F] et la résistance de la charge R est les résistance des bobines r_1, r_2, r_3 en [Ω]. Les variables d'état sont les courant dans les bobines et la tension aux bornes du condensateur. Les signaux de contrôle D_1, D_2, D_3 est compris dans le domaine discret de $\{0;1\}$ et il indique l'état de les interrupteurs S1 S2 S3 : ouvert pour 0 et fermé pour 1.

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

Le système d'équation globale (3.2) peut être écrit comme suit :

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot D + G \cdot V_{FC}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{r_2}{L_2} & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & -\frac{r_3}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C \cdot R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_4}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_4}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_4}{L_3} \\ -\frac{x_1}{C} & -\frac{x_2}{C} & -\frac{x_3}{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{L_3} \end{bmatrix} \cdot V_{FC} \quad (3.3)$$

Avec

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [I_{L_1} \ I_{L_2} \ I_{L_3} \ V_{bus}]^T$$

Nous supposons que les variables d'état sont bornées :

$$x_1 \in [-1, 110] \text{ et } x_2 \in [-1, 45] \text{ et } x_3 \in [-1, 45] \text{ et } x_{14} \in [-1, 45]$$

- Variable de prémisses :

L'équation (3.2) présente quatre non linéarités qu'on notera $\xi_1(x(t))$ et $\xi_2(x(t))$ et $\xi_3(x(t))$ et $\xi_4(x(t))$:

$$\begin{aligned}\xi_1(x(t)) &= \frac{x_4}{L}, & \xi_2(x(t)) &= -\frac{x_1}{C_1}, \\ \xi_3(x(t)) &= -\frac{x_2}{C_1}, & \xi_4(x(t)) &= -\frac{x_3}{C_1} \\ L_1 &= L_2 = L_3 = L\end{aligned}$$

Nous évaluons ensuite les valeurs minimales et maximales de $\xi_1(x(t))$ et $\xi_2(x(t))$ et $\xi_3(x(t))$ et $\xi_4(x(t))$:

$$\begin{aligned}\xi_{1max} &= \max \xi_1(t) = \frac{1}{L}, & \xi_{1min} &= \min \xi_1(t) = \frac{1}{L} \\ \xi_{2max} &= \max \xi_2(t) = -\frac{1}{C}, & \xi_{2min} &= \min \xi_2(t) = -\frac{1}{C} \\ \xi_{3max} &= \max \xi_3(t) = -\frac{1}{C}, & \xi_{3min} &= \min \xi_3(t) = -\frac{1}{C} \\ \xi_{4max} &= \max \xi_4(t) = -\frac{1}{C}, & \xi_{4min} &= \min \xi_4(t) = -\frac{1}{C}\end{aligned}$$

• fonctions d'appartenance :

$$\begin{aligned}M_1(\xi_1(t)) &= \frac{\xi_1(t) - \xi_{1min}}{\xi_{1max} - \xi_{1min}}, & M_2(\xi_1(t)) &= \frac{\xi_{1max} - \xi_1(t)}{\xi_{1max} - \xi_{1min}} \\ N_1(\xi_2(t)) &= \frac{\xi_2(t) - \xi_{2min}}{\xi_{2max} - \xi_{2min}}, & N_2(\xi_2(t)) &= \frac{\xi_{2max} - \xi_2(t)}{\xi_{2max} - \xi_{2min}} \\ K_1(\xi_3(t)) &= \frac{\xi_3(t) - \xi_{3min}}{\xi_{3max} - \xi_{3min}}, & K_2(\xi_3(t)) &= \frac{\xi_{3max} - \xi_3(t)}{\xi_{3max} - \xi_{3min}} \\ L_1(\xi_4(t)) &= \frac{\xi_4(t) - \xi_{4min}}{\xi_{4max} - \xi_{4min}}, & L_2(\xi_4(t)) &= \frac{\xi_{4max} - \xi_4(t)}{\xi_{4max} - \xi_{4min}}\end{aligned}$$

Le multi-modèles équivalent au modèle non linéaire (3.2) est :

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{16} h_i(Ax(t) + B_i U + G V_{FC}) \quad (3.4)$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{r_2}{L_2} & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & -\frac{r_3}{L_3} & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C.R} \end{bmatrix} \text{ et } U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

Et :

$$\begin{aligned}
B_1 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2max} & \xi_{3max} & \xi_{4max} \end{bmatrix} & B_2 &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2max} & \xi_{3max} & \xi_{4max} \end{bmatrix} \\
B_3 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2min} & \xi_{3max} & \xi_{4max} \end{bmatrix} & B_4 &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2min} & \xi_{3max} & \xi_{4max} \end{bmatrix} \\
B_5 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2max} & \xi_{3min} & \xi_{4max} \end{bmatrix} & B_6 &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2max} & \xi_{3min} & \xi_{4max} \end{bmatrix} \\
B_7 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2min} & \xi_{3min} & \xi_{4max} \end{bmatrix} & B_8 &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2min} & \xi_{3min} & \xi_{4max} \end{bmatrix} \\
B_9 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2max} & \xi_{3max} & \xi_{4min} \end{bmatrix} & B_{10} &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2max} & \xi_{3max} & \xi_{4min} \end{bmatrix} \\
B_{11} &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2min} & \xi_{3max} & \xi_{4min} \end{bmatrix} & B_{12} &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2min} & \xi_{3max} & \xi_{4min} \end{bmatrix} \\
B_{13} &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2max} & \xi_{3min} & \xi_{4min} \end{bmatrix} & B_{14} &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2max} & \xi_{3min} & \xi_{4min} \end{bmatrix} \\
B_{15} &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1max} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1max} \\ \xi_{2min} & \xi_{3min} & \xi_{4min} \end{bmatrix} & B_{16} &= \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{1min} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{1min} \\ \xi_{2min} & \xi_{3min} & \xi_{4min} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Et :

$$h_1 = M_1 \times N_1 \times K_1 \times L_1$$

$$h_2 = M_1 \times N_1 \times K_1 \times L_2$$

$$h_3 = M_1 \times N_1 \times K_2 \times L_1$$

$$h_4 = M_1 \times N_1 \times K_2 \times L_2$$

$$h_5 = M_1 \times N_2 \times K_1 \times L_1$$

$$h_6 = M_1 \times N_2 \times K_1 \times L_2$$

$$h_7 = M_1 \times N_2 \times K_2 \times L_1$$

$$h_8 = M_1 \times N_2 \times K_2 \times L_2$$

$$h_9 = M_2 \times N_1 \times K_1 \times L_1$$

$$h_{10} = M_2 \times N_1 \times K_1 \times L_2$$

$$h_{11} = M_2 \times N_1 \times K_2 \times L_1$$

$$h_{12} = M_2 \times N_1 \times K_2 \times L_2$$

$$h_{13} = M_2 \times N_2 \times K_1 \times L_1$$

$$h_{14} = M_2 \times N_2 \times K_1 \times L_2$$

$$h_{15} = M_2 \times N_2 \times K_2 \times L_1$$

$$h_{16} = M_2 \times N_2 \times K_2 \times L_2$$

3.4 Simulation et interprétation des résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en boucle ouverte basée sur le modèle moyenne classique et au modèle représenté par les multi-modèles flous et nous comparons leurs réponses. Avec deux cas de fonctionnement correspondant avec $D=0,7$ et $D=0,3$.

Les différents paramètres de simulation sont:

Tableau 3.1: Les paramètres de la charge et du bus continu.

$V_{FC} (v)$	$L_1, L_2, L_3 (H)$	$r_1, r_2, r_3 (\Omega)$	$C(F)$	$R(\Omega)$
30	10^{-3}	$2.5.10^{-3}$	1100.10^{-6}	13.3333

- Lorsque le rapport cyclique $D=0.7$.

Figure (3.2) présente respectivement les Courants I_{L_1} I_{L_2} I_{L_3} dans les inductances L_1, L_2, L_3 du modèle moyenne, I_{L_1-TS} , I_{L_2-TS} , I_{L_3-TS} du multi-modèles.

Figure (3.3) présente l'erreur entre les deux états du modèle moyenne et du multi-modèles. L'erreur est de l'ordre de 10^{13} .

Figure (3.4) présente respectivement la tension (Vs) du modèle moyenne, Vs_TS du multi-modèles et la Figure (3.5) présente l'erreur entre eux. L'erreur est de l'ordre de 10^{13} .

Figure (3.6) présente respectivement la puissance (P) du modèle moyenne, P_TS du multi-modèles et la Figure (3.7) présente l'erreur entre eux. L'erreur est de l'ordre de 10^{12} .

Figure 3.2 : Courants dans les inductances de IBC.

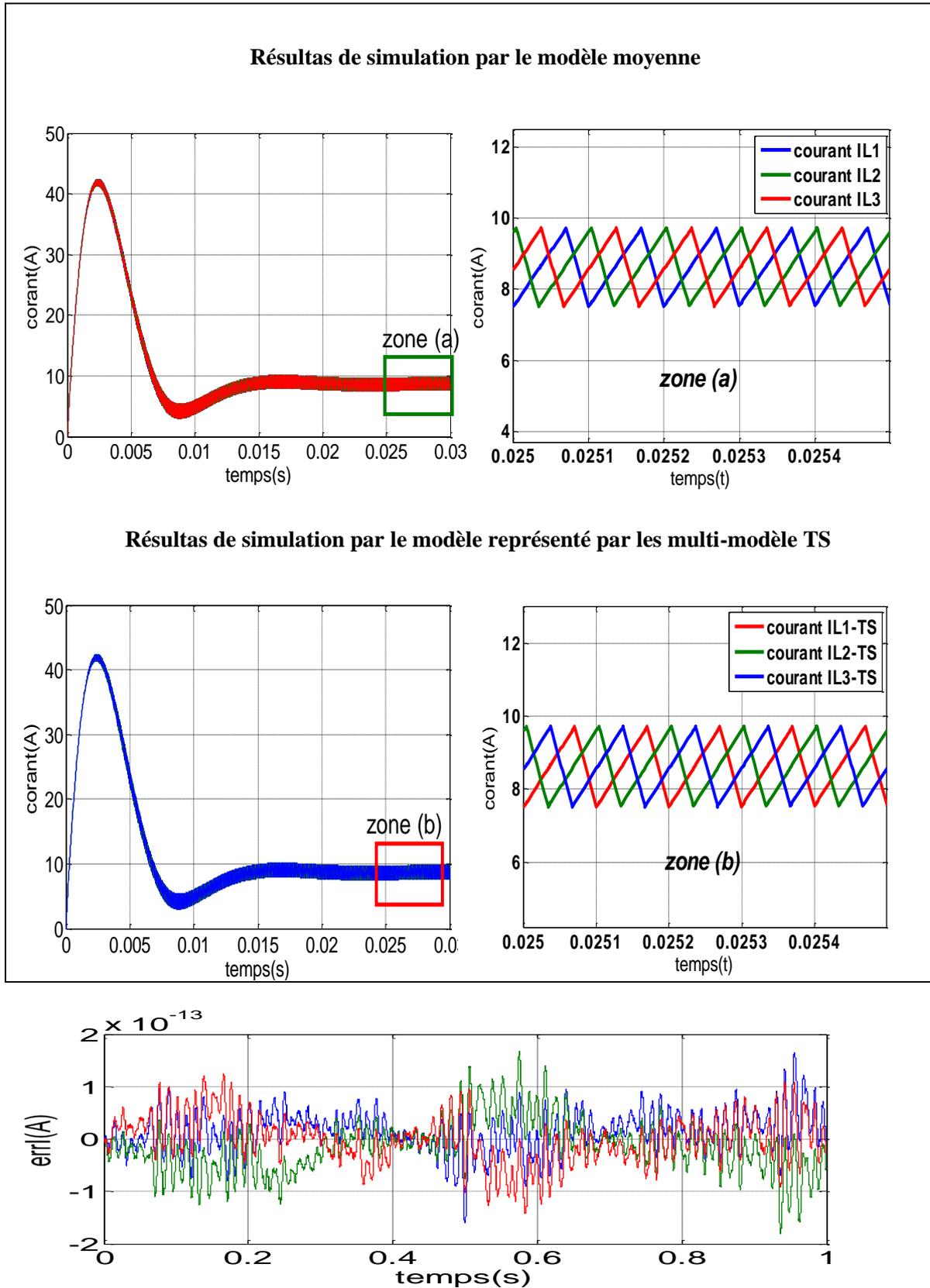


Figure 3.3 : erreur de Courant entre états de du système non linéaire
et du multi-modèles

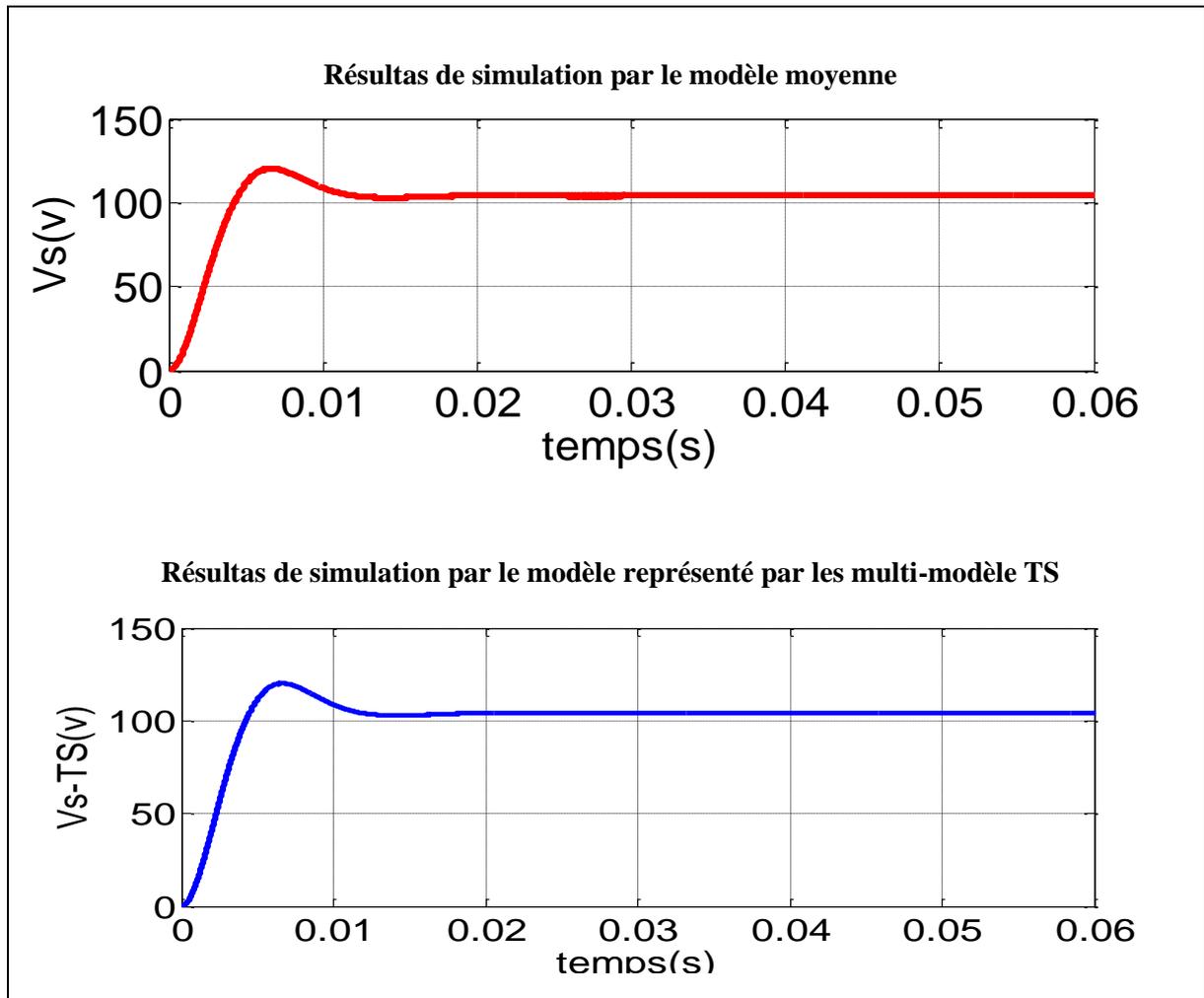


Figure 3.4: Tension de bus continu

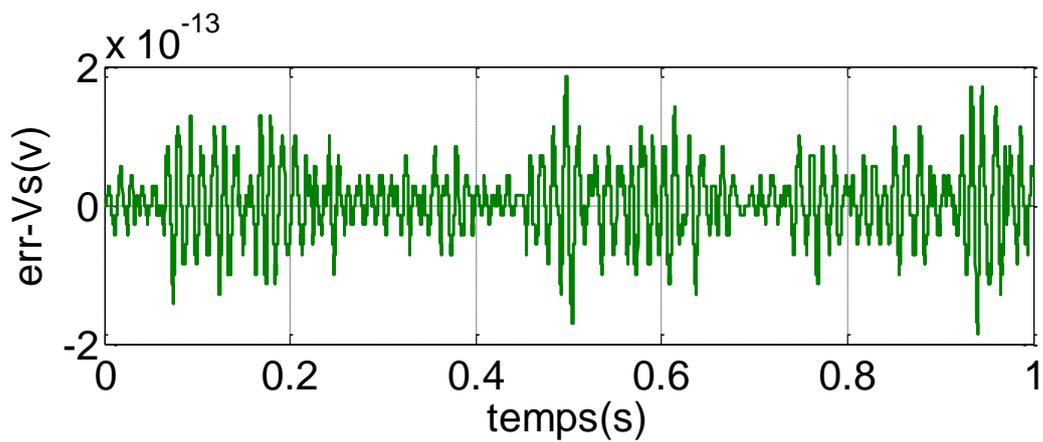


Figure 3.5 : erreur de tension entre états de du système non linéaire et du multi-modèles

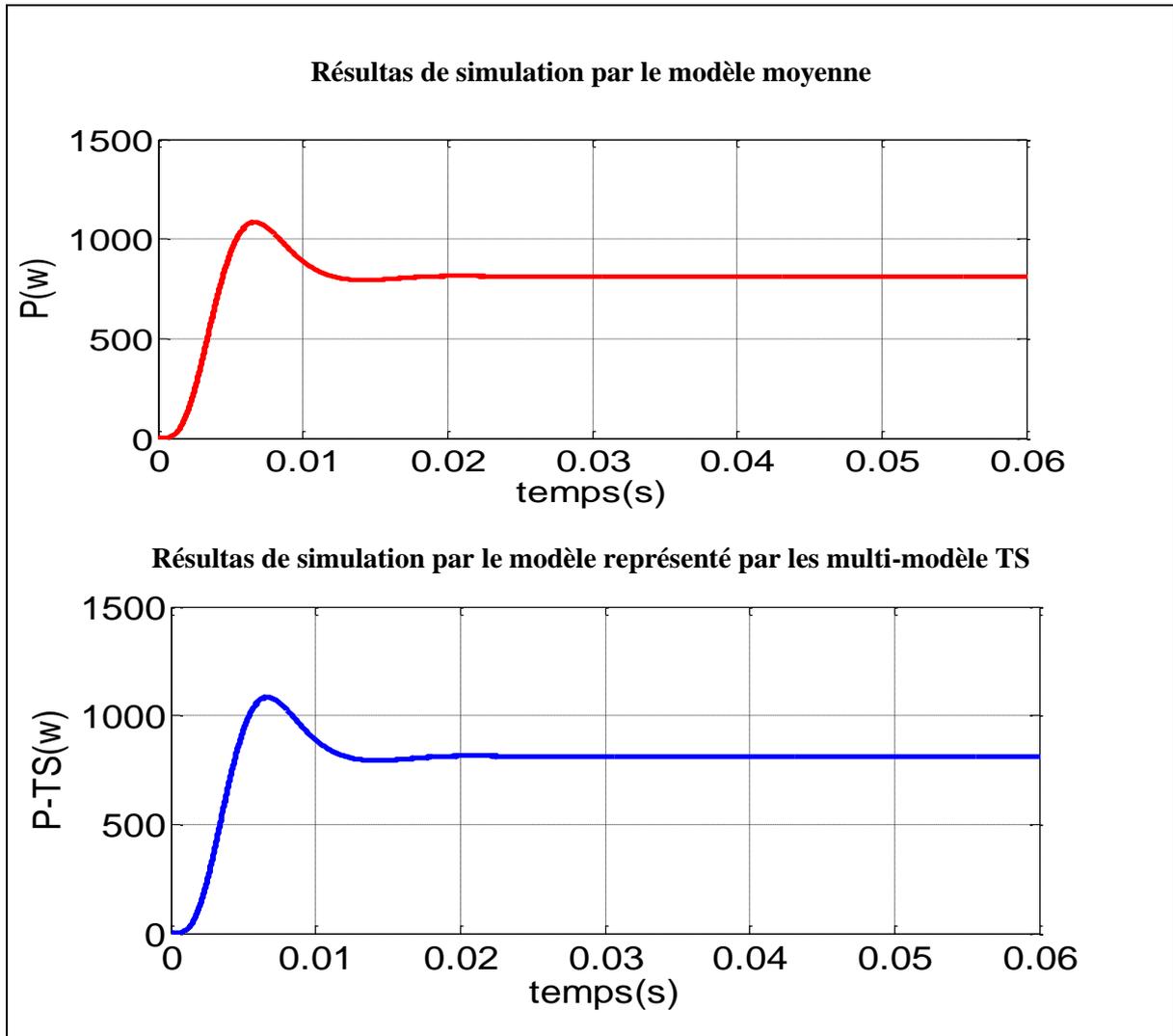


Figure 3.6 : puissance de bus continu

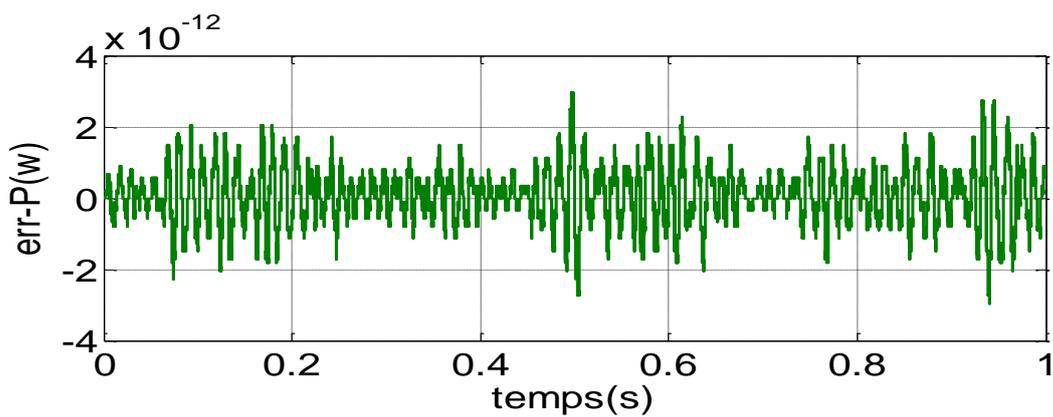


Figure 3.7 : erreur de puissance entre états de du système non linéaire et du multi-modèles

- Lorsque le rapport cyclique $D=0.3$.

Figure (3.8) présente respectivement les Courants I_{L_1} , I_{L_2} , I_{L_3} dans les inductances L_1, L_2, L_3 du modèle moyenne, I_{L_1-TS} , I_{L_2-TS} , I_{L_3-TS} du multi-modèles.

Figure (3.9) présente l'erreur entre les deux états (du modèle moyenne et du multi-modèles). L'erreur est de l'ordre de 10^{13} .

Figure (3.10) présente respectivement la tension (Vs) du modèle moyenne, V_s du multi-modèles et la Figure (3.11) présente l'erreur entre eux. L'erreur est de l'ordre de 10^{13} .

Figure (3.12) présente respectivement la puissance (P) du modèle moyenne, P du multi-modèles et la Figure (3.13) présente l'erreur entre eux. L'erreur est de l'ordre de 10^{12} .

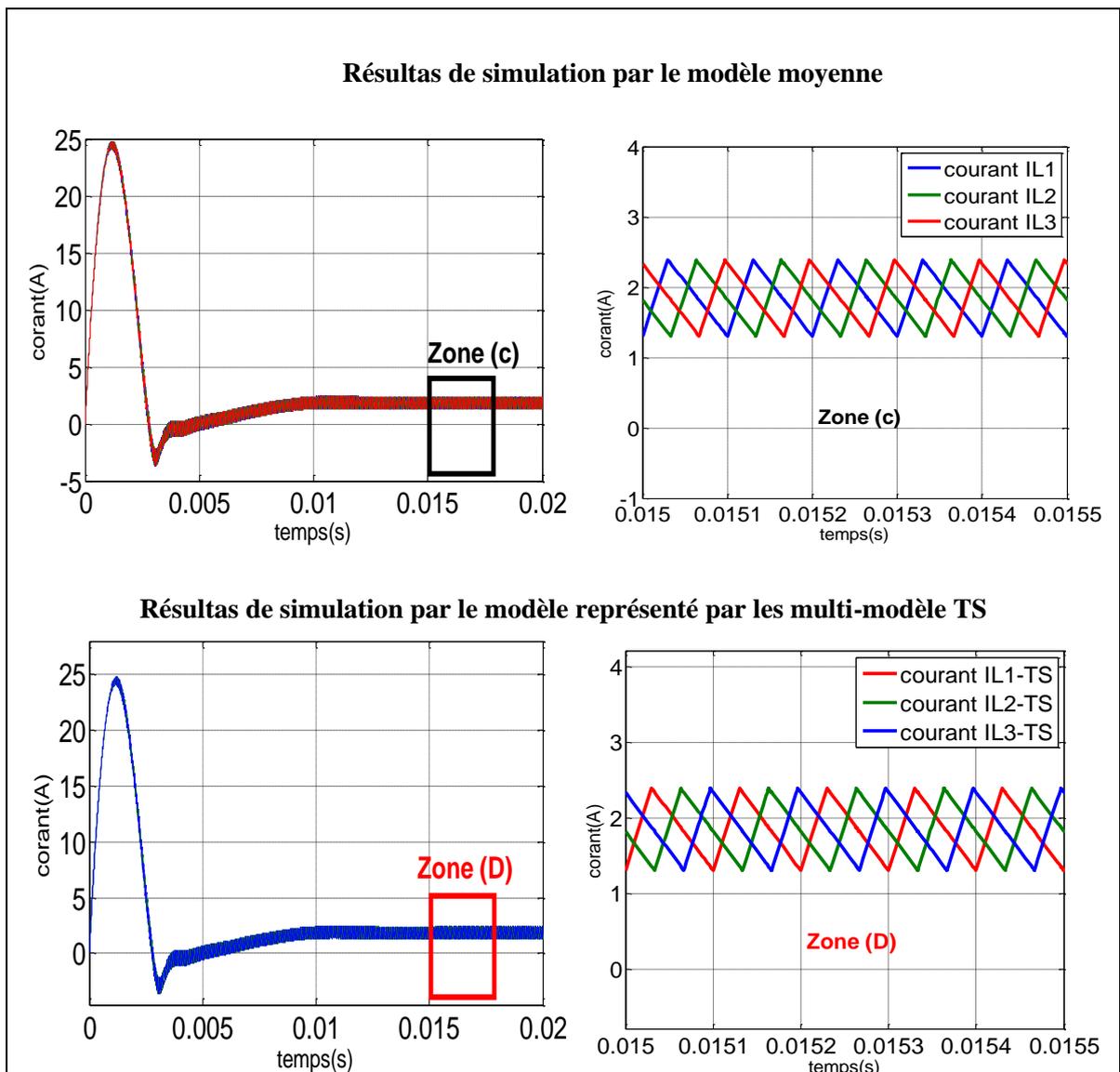


Figure 3.8 : Courants dans les inductances de IBC.

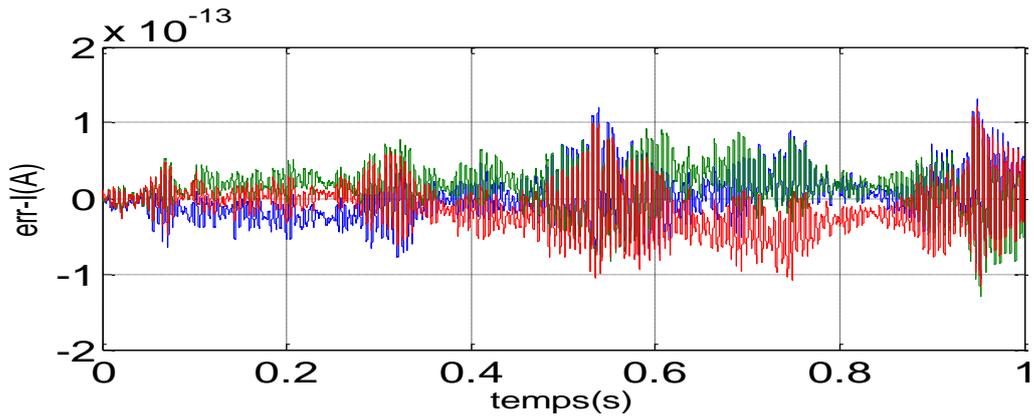


Figure 3.9 : erreur de Courant entre états de du système non linéaire

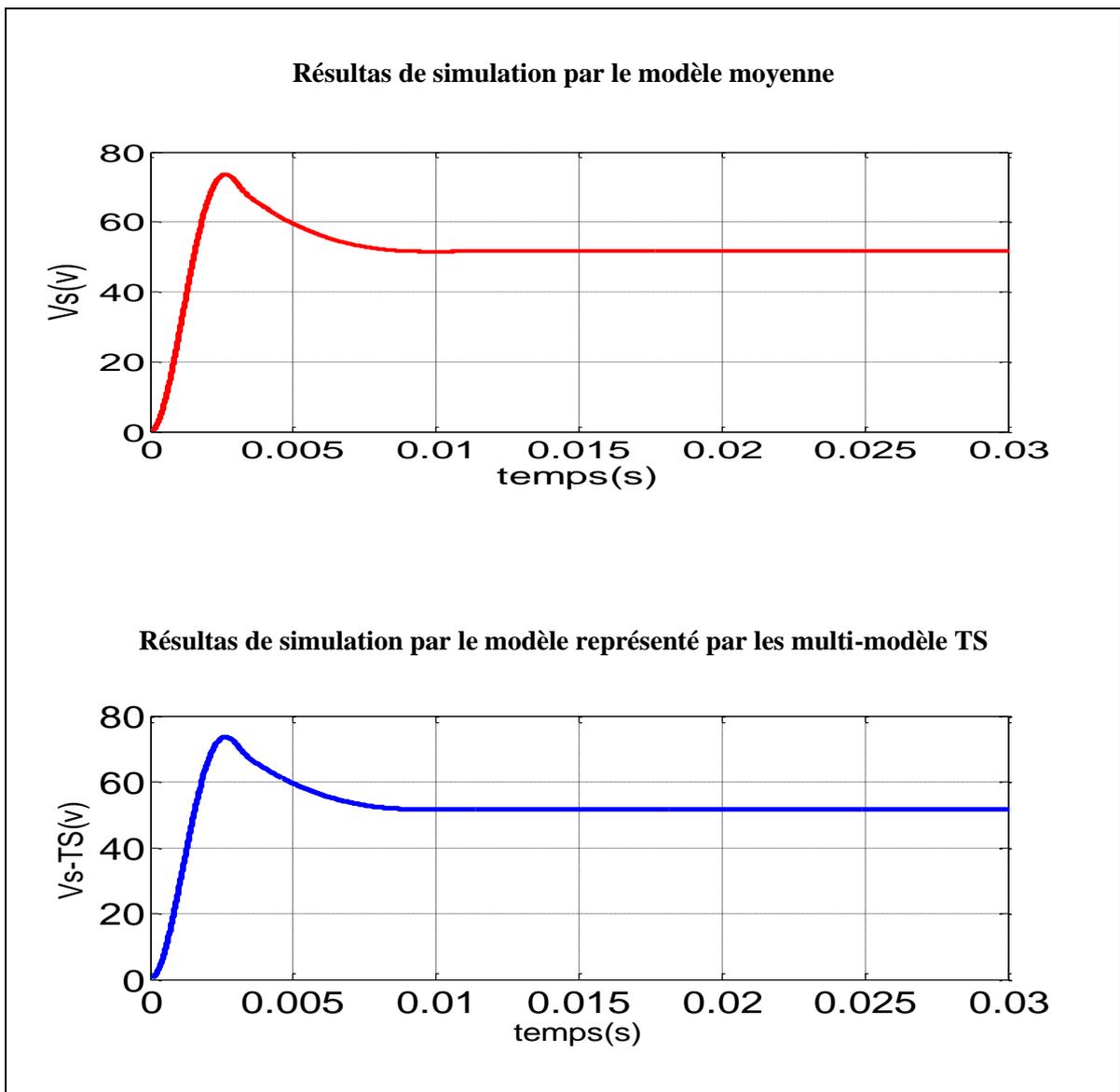


Figure 3.10: Tension de bus continu et du multi-modèles

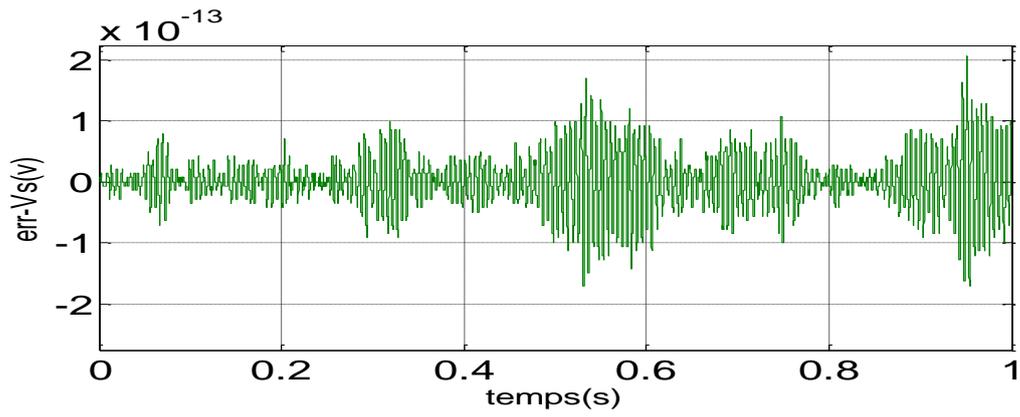


Figure 3.11 : erreur de tension entre états de du système non linéaire et du multi-modèles

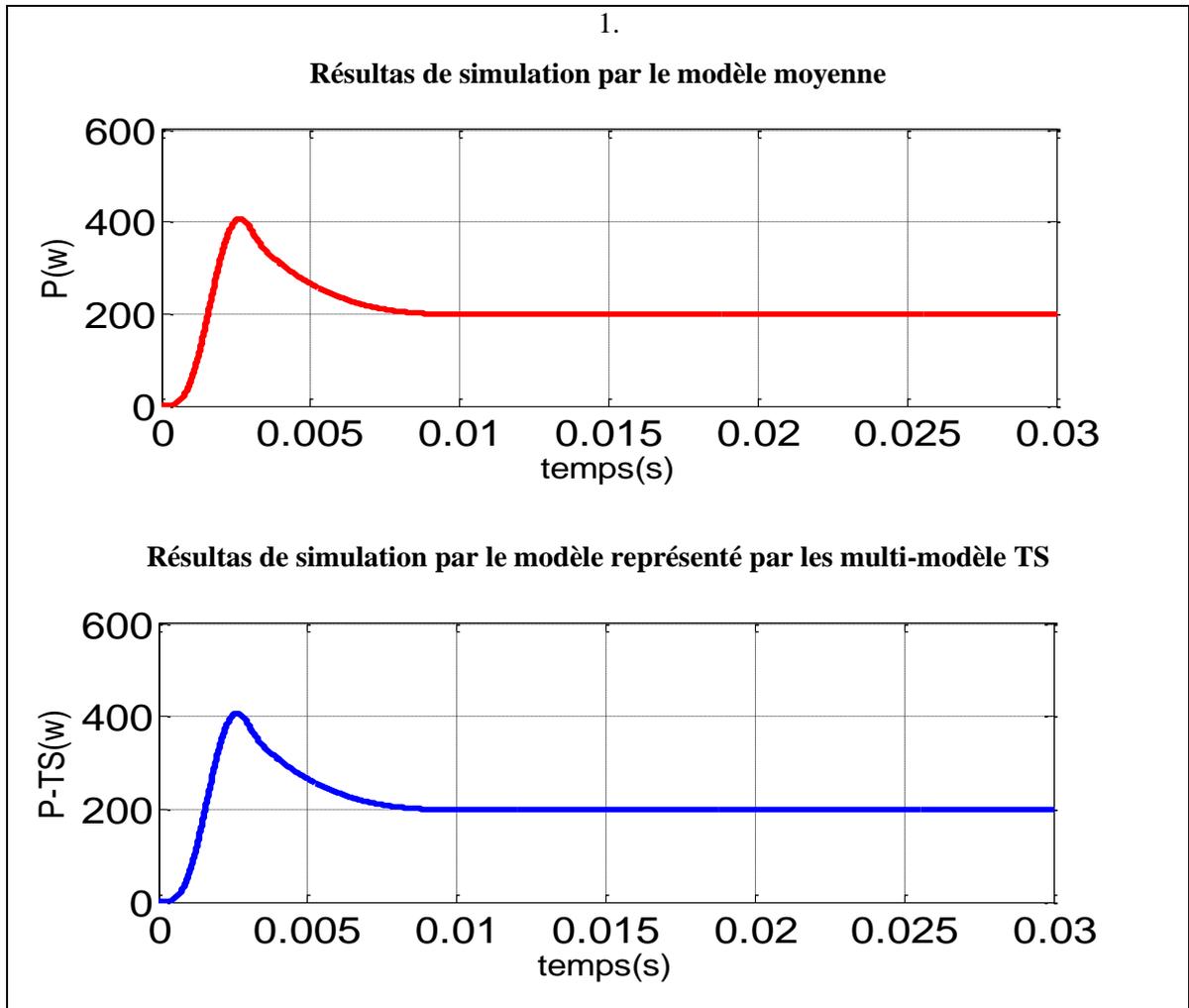


Figure 3.12 : puissance de bus continu

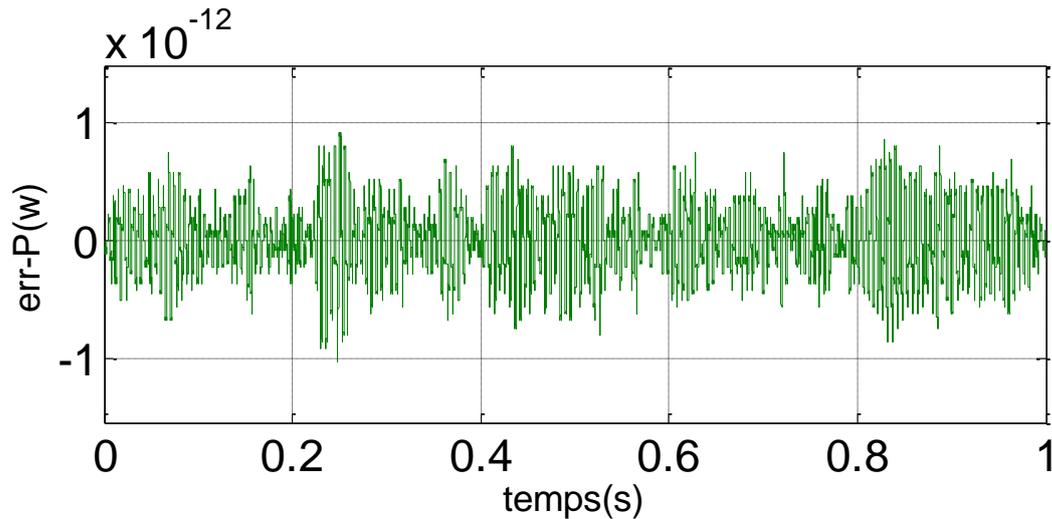


Figure 3.13 : erreur de puissance entre états de du système non linéaire
et du multi-modèles

D'après les résultats de simulation on conclut que la modélisation par les multi-modèles TS proposée représente le même comportement du modèle moyen.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons le travail le plus important dans cette mémoire. Premièrement nous avons modélisé un système de Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches. Ensuite la représentation par les multi-modèles flous T.S du convertisseur a été présentée.

Nous avons simulé une étude comparative entre les deux modèles, le modèle moyen classique et le système représenté par les multi-modèles flous (TS). Les résultats obtenus sont très encourageants où l'erreur entre les variables d'état est de l'ordre de 10^{13} . au maximum. Donc, la représentation par les multi-modèles flous TS montre le même comportement que le système non linéaire ce que nous ouvre les portes d'utiliser d'autres commandes comme la commande PDC.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale et Perspectives

Les travaux de recherche présentés dans cette mémoire portent sur la modélisation d'un convertisseur DC/DC pour les applications pile à combustible (Convertisseur BOOST entrelacé) représenté par les multi-modèles flous TS.

Nous avons vu dans le premier chapitre, historique de la pile à combustible et différents types et aussi le principe de fonctionnement et les applications envisageables nous avons vu aussi quelques-uns des avantages et des inconvénients , ensuite, nous avons étudié les convertisseur basse tension isolé et non-isolé pour les applications pile à combustible (Convertisseur BOOST entrelacé à 3 branches).

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, nous avons comparé le système représenté par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno est le modèle moyenne classique en boucle ouvert. L'erreur remarquée entre les deux représentations est presque inexistante de l'ordre de 10^{-13} . Alors, la représentation par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno est équivalente au système non linéaire et peut être adoptée pour appliquer des lois de commande non linéaire avancé.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. F. Hannan M.A and M. A. Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles . Energy Conversion and Management, Vol. 62, pp. 123-130, 2012.
- [2] I. SADLI « modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM pour utilisation en électronique de puissance » thèse doctorat L'Institut National Polytechnique de Lorraine -2006.
- [3] PDF . LA PILE À COMBUSTIBLE. Gymnase Auguste Piccard Travail de maturité 2008. www.auguste-piccard.ch/pages/TM-PDF/TM2008/TM2008Favre.pdf.
- [4] Public. (s.d.). Consulté le mai 20, 2017, sur <http://www.wikipedia.org>.
- [5] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design: CRC press, 2009
- [6] H. Maker. Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateurs. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [7] J. Lachaiza. _Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des énergétiques à Pile à combustible (PAC) destinées à la traction_. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [8] M.-Y. Ayad, "Mise en oeuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues," Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2004.
- [9] R. Kötz and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," Electrochimica Acta, vol. 45, pp. 2483-2498, 2000.
- [10] K. S. Jeong and B. S. Oh, "Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle," Journal of Power Sources, vol. 105, pp. 58-65, 2002.
- [11] R. Borup, J. Meyers, B. Pivovar, Y. S. Kim, R. Mukundan, N. Garland, D. Myers, M. Wilson, F. Garzon, and D. Wood, "Scientific aspects of polymer electrolyte fuel cell durability and degradation," Chemical reviews, vol. 107, pp. 3904-3951, 2007.
- [12] G. LEFEVRE « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible » thèse doctorat Université Joseph Fourier – 2004.
- [13] A. LACHICHI « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant Application aux convertisseurs pour pile à combustible » thèse doctorat Université de Franche-Comté 2005

- [14] Y. Gu and D. Zhang, "Interleaved boost converter with ripple cancellation network," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 3860-3869, 2013.
- [15] H. El Fadil, F. Giri, J. Guerrero, M. Haloua, and A. Abouloifa, "Advanced Control of Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Energy Generation System," in *World Congress*, 2011, pp. 2803-2808..
- [16] K. Hwu and Y. Yau, "An interleaved AC–DC converter based on current tracking," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 1456-1463, 2009.
- [17] A. Akhenak. Conception d'observateurs non linéaires par approche multi-modèle: application au diagnostic. Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 16, 2004.
- [18] D.l Jabri. Contribution à la synthèse de lois de commande pour les systèmes de type Takagi-Sugeno et/ou hybrides interconnectés. PhD thesis, Reims, 2011.
- [19] M. Yacine Hammoudi. Contribution à la commande et à l'observation dans l'association convertisseurs machine. PhD thesis, Université de Biskra, 2016. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 1263-1272, 2003.
- [20] M. Oudghiri. Commande multi-modèles tolérante aux défauts: Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile. PhD thesis, Université de Picardie Jules Verne, 2008.
- [21] Tor A Johansen and BJARNE FOSS. Constructing narmax models using armax models. *International Journal of Control*, 58(5):1125–1153, 1993.
- [22] A. Maria Nagy. Analyse et synthèse de multimodèles pour le diagnostic. Application à une station d'épuration. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2010.