

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

FLILIÈRE: ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION: MACHINES ÉLECTRIQUES



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie électrique

Modélisation d'un système hybride (pile à combustible et batterie) par la méthode des secteurs non linéaires

Réalisé par: **Yassine MESSAOUDI**

Devant le jury composé de:

Mohamed Yacine HAMMOUDI	MCB, Université de Biskra	Président
Messaoud MOHAMMEDI	MAA, Université de Biskra	Rapporteur
Adel GHOGGAL	MCA, Université de Biskra	Examineur

Année Universitaire 2015/2016

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : **Machines électriques**



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme:

Master

en génie électrique

Thème

Modélisation d'un système hybride (pile à combustible et batterie) par la méthode des secteurs non linéaires

Présenté par

Yassine MESSAOUDI

Avis favorable de l'encadreur:

Avis favorable du président de jury:

Cachet et signature

DÉDICACE

A

*mon très chère père,
À ma très chère mère,
À mes frères,
À toute ma famille,
À tous mes amis ,
Et À tous ceux qui comptent pour moi.*

Yassine

REMERCIEMENTS

A vant toute chose, nous remercions DIEU qui a nous a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons toute gratitude à notre encadreur Mr. Mohammedi Messaoud pour ses conseils durant la réalisation de notre travail de fin d'étude.

Toutes nos expressions de gratitude et de reconnaissance vont vers les membres du jury. Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour la formulation qu'ils nous ont donné durant notre cycle d'étude.

Enfin nous remercions, avec toute la suprême sincérité tout ceux qui ont aidé de près ou de loin à terminer et réaliser notre projet de fin d'étude.

L'utilisation des systèmes hybrides en combinant plusieurs sources devient plus en plus très important. Pour réduire la consommation des systèmes électriques, l'idée consiste à récupérer l'énergie lorsqu'il est possible, et à réutiliser lorsque le système est dans le besoin. L'énergie peut être emmagasinée dans les organes de stockage comme la batterie. Cette unité de stockage peut stocker ou fournir les pics de puissances.

Ce travail traite la modélisation par les multi-modèles flous de Takagi-sugeno d'un système hybride utilisant une pile à combustible comme source principale, un bus continu et une batterie comme source de puissance secondaire transitoire. L'ensemble du système est modélisé par un modèle d'équations d'état. Ce modèle non linéaire est contrôlé par la commande basée sur la passivité. Les mêmes lois de commande sont appliquées au système représenté par les multi-modèles flous de Takagi-sugeno et une comparaison est faite entre les deux systèmes. Des résultats de simulation très encourageants sont donnés.

Mots clés: Système non linéaire, Système hybride, Pile à combustible, Batterie, multi-modèles flous de Takagi-sugeno, Commande basée sur la passivité.

The use of hybrid systems by combining several sources becomes more important. To reduce the consumption of electrical systems, the idea is to recover energy where possible, and reuse when the system is in need. Energy can be stored in storage organs such as the Battery. This storage unit can store or supply the peak powers.

This work deals with the modeling with the fuzzy multi-model of Takagi-Sugeno of a hybrid system contains a fuel cell as a main source, à DC link and a battery as a secondary power source. the whole system is modeled by a model of state equations. This nonlinear model is controlled by the passivity based control. The same control laws are applied to the system 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, Fuel cell, Battery, Passivity based control.

Modélisation d'un système hybride (pile à combustible
et batterie) par la méthode des secteurs non linéaires

MESSAOUDI Yassine

June 2, 2016

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction Générale</i>	1
1 Généralités sur les piles à combustible et les batteries	4
1.1 Introduction	4
1.2 Pile à combustible:	5
1.2.1 Historique et applications:	5
1.2.2 Principe de fonctionnement:	8
1.2.3 Différents types de piles à combustible:	9
1.2.4 Système pile à combustible:	10
1.2.5 Caractéristique tension-courant des piles à combustible:	13
1.3 Batterie:	14
1.3.1 Principe de fonctionnement d'une batterie:	15
1.3.2 Différents technologies de batteries:	17
1.3.3 Modélisation des batteries:	20
1.3.4 Introduction aux indices d'états:	21
1.4 Conclusion:	23
2 Multi-modèles flous de Takagi-sugeno	24
2.1 Introduction	24
2.2 Concepts élémentaires sur les multi-modèles de type Takagi-Sugeno:	24
2.3 Vers la représentation multi-modèles:	25
2.3.1 Espace de fonctionnement:	26
2.3.2 Zone de fonctionnement:	26

2.3.3	Sous-modèle:	27
2.3.4	Variable de prémisses:	27
2.3.5	Fonction d'activation:	27
2.3.6	Multi-modèles:	28
2.4	Obtention d'une structure multi-modèles couplée:	29
2.4.1	Multi-modèles par identification:	29
2.4.2	Multi-modèles par linéarisation:	29
2.4.3	Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires:	30
2.5	Conclusion:	34
3	Commande basée sur la passivité	35
3.1	Introduction:	35
3.2	Conséquences immédiates de la passivité:	36
3.3	Système Hamiltonien Commandé par Port:	37
3.4	Différentes approches de la PBC:	38
3.4.1	La Passivité et la Balance d'Énergie:	39
3.4.2	Méthodologie d'Assignation d'Interconnexion et d'Amortissement IDA-PBC:	41
3.4.3	Conclusion:	44
4	Simulation et interprétation des résultats	45
4.1	Introduction	45
4.2	Structure de la source d'énergie hybride:	45
4.3	Modélisation du système:	46
4.4	Représentation du système non linéaire par les les multi-modèles flous T.S:	48
4.5	Commande basée sur la passivité:	52
4.5.1	Système hamiltonien contrôlé par ports:	52
4.6	Simulation et interprétation des résultats:	56
4.7	Conclusion:	61

LISTE DES FIGURES

1.1	Expérience de Sir W. Grove en 1839 [Ber07].	5
1.2	Technologies des piles à combustible et domaines d'application [Ber07].	8
1.3	Schéma de Principe d'une piles à combustible de type PEMFC [F ⁺ 09].	8
1.4	Principe des piles à combustible à électrolyte acide (à gauche) ou alcalin (à droite) [Tho05].	10
1.5	Différents constituants d'un système pile à combustible [Tho05].	11
1.6	Caractéristique tension-courant d'une pile PEM [Pay09].	13
1.7	Représentation schématique d'une batterie en décharge [Mon09].	15
1.8	Représentation des potentiels d'électrodes, de la tension et de la puissance d'une batterie en régime stationnaire : (a,b) en décharge, (c,d) en charge [Mon09].	16
1.9	Première batterie d'accumulateurs conçue par Gaston Planté [Zan10].	18
1.10	Vue éclatée d'un accumulateur au Plomb et détail d'un élément [Zan10].	18
1.11	Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion [Sad13].	20
1.12	Modèle simple d'une batterie [Zan10].	21
2.1	Schéma de principe de l'approche multi-modèles a)- Système non linéaire , b - c)- Représentation multi-modèles [Ham16].	26
2.2	Secteurs non linéaires [Ham16].	31
4.1	Structure de la source hybride FC/Batterie	46
4.2	Tension de bus continu et sa référence.	57
4.3	Courant de charge.	58

4.4	Courant de la bus continu.	58
4.5	Tension de sortie de l'ensemble pile à combustible-hacheur boost.	59
4.6	Courant de la pile à combustible.	59
4.7	Tension et courant la batterie.	60
4.8	Commande de pile à combustible, commande de batterie.	60
4.9	Résistance de charge.	61
4.10	Transfert de puissances.	61

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Différentes technologies de piles à combustibles [Pay09].	7
4.1	Paramètres de la charge et la commande.	57
4.2	Paramètres de la batterie et du bus continu.	57

*L*es piles à combustible sont encore à ce jour des sources à fort courant et à faible niveau de tension. Leur utilisation dans des chaînes de traction passe souvent par une élévation de la tension en utilisant des convertisseurs statiques adaptés. L'optimisation globale de ces chaînes de traction passe par l'hybridation de la pile en utilisant un système de stockage d'énergie. En effet, cette source d'énergie doit à la fois fournir l'énergie suffisante pour assurer l'autonomie et délivrer une puissance importante lors des phases transitoires. De plus, la présence d'un système de stockage d'énergie peut permettre la récupération des énergies.

L'objectif de ce travail est de représenter le modèle non linéaire de ce système hybride 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. Il en résulte une approximation discontinue du système due aux commutations entre les différents modèles linéaires.

Malheureusement ces discontinuités peuvent être indésirables dans la majorité des

applications industrielles. Pour remédier à ce problème, il est préférable d'assurer un passage progressif d'un modèle à un autre. On substitue aux fonctions de commutation à front raide des fonctions à pente douce, ce qui crée un chevauchement entre les zones de validité des modèles. Dans ce cas, les fonctions de commutation deviennent des fonctions à dérivées continues dont la pente détermine la vitesse de passage d'un modèle à un autre.

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[Akh04].

Dans le premier chapitre, nous présentons deux sources électriques utilisées dans les systèmes hybrides, notamment les piles à combustible, les batteries électrochimiques en s'appuyant sur plusieurs références bibliographiques. Après une présentation générale de ces sources d'énergies, nous exposons leurs principes de fonctionnement et leurs modélisations usuelles. Ce chapitre se termine par une synthèse des avantages et contraintes spécifiques de ces sources de stockage.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la représentation multi-modèles flous de type Takagi-Sugeno (TS). Celle-ci s'appuie sur l'obtention d'un ensemble de polytopes interconnectés par des fonctions non linéaires, vérifiant la propriété de somme convexe. Chaque sous-modèle décrit le comportement du système non linéaire dans une zone de fonctionnement particulière. Deux grandes familles des modèles flous TS sont largement utilisées dans la littérature, la première est dite les modèles TS couplés, celle-ci est obtenue par trois méthodes, cette approche est utilisée dans le cas où il ya une difficulté de décrire le système à l'aide d'un modèle analytique, la deuxième méthode repose sur la linéarisation du système autour de différentes points de fonctionnement, une dernière approche repose sur la transformation polytopique convexe des termes non linéaires du système, est dite décomposition (transformation) en secteurs non linéaires, elle permet d'obtenir une représentation équivalente au modèle non linéaire initial, évitant les pertes d'information par rapport aux deux autres approches. Notons que cette dernière approche

sera utilisée dans le cadre de ce mémoire. La seconde famille est dite les multi-modèles flous TS.

Le troisième chapitre donne une introduction de la passivité et de la commande par passivité (PBC: Passivity Based Control). Une revue historique est également détaillée. La structure PCH est donnée ainsi que différentes approches de la PBC, telles que la PBC standard, la Balance-d'Énergie et l'IDA-PBC.

Le quatrième chapitre contient notre système à étudier, la structure de la source hybride et la représentation de ce système par les multi-modèles de Takagi-sugeno. Ensuite, la comparaison entre les résultats de simulations 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 hybride étudié.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES PILES À COMBUSTIBLE ET LES BATTERIES

1.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les deux sources d'énergie propres aux piles à combustible, les batteries. Pour chacune de ces sources, nous présentons leurs caractéristiques physiques.

Premièrement la pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction directement en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur. Lorsqu'en 1802 Sir Henry David énonça le principe de l'électrolyse inverse, il met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène. Partant de ce procédé Sir William Grove expérimenta en 1839 la première pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et un produit de réaction, l'eau. Depuis cette découverte, différents types de piles à combustible ont été inventés fonctionnant à des températures pouvant aller de quelques dizaines de degrés Celsius à plus de 1000°C , selon l'électrolyte utilisé.

Deuxièmement la batterie poursuit plusieurs objectifs. On effectue tout d'abord un rappel chronologique de l'évolution des batteries depuis leur découverte jusqu'à nos jours. On présente ensuite les différentes technologies de piles existantes et on explique leur principe de fonctionnement et on déduit alors la caractéristique statique de la batterie qui nous intéresse.

1.2 Pile à combustible:

Si l'hypothèse du choix de l'hydrogène comme nouveau vecteur d'énergie est retenue, la pile à combustible s'imposera comme le convertisseur le plus performant de l'hydrogène en énergie utilisable (électricité et chaleur) [Can02].

1.2.1 Historique et applications:

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 160 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (Figure 1.1), rebaptisée plus tard pile à combustible.

La découverte de W. Grove ne fut cependant pas exploitée et fut reléguée au rang de curiosité scientifique, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor. En 1932, le docteur Francis Bacon reprend les recherches initiées par W. Grove et parvient à réaliser une pile à combustible de 5kW en 1959.

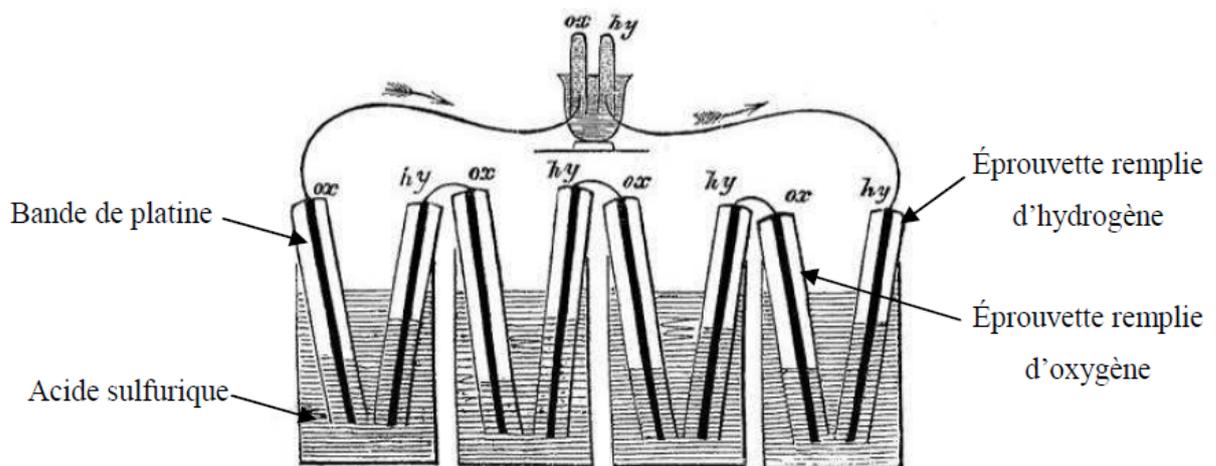


Fig 1.1: Expérience de Sir W. Grove en 1839 [Ber07].

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux. La pile à combustible apparut comme un système idéal du fait de

la présence d'oxygène et d'hydrogène disponible dans les systèmes de propulsion. Des piles à combustible furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964, et l'eau produite par la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène était consommée par les astronautes. Il s'agit d'une des premières utilisations concrètes des piles à combustible.

L'intérêt de l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine des transports remonte à 1973. La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire les coûts de fabrication des systèmes pile à combustible, pour augmenter leur fiabilité et pour améliorer leur compacité. En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz. La pile à combustible était de type PEM («Proton Exchange Membrane» ou «membrane échangeuse de proton»).

L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol. Depuis les années 1990, les piles à combustibles et l'hydrogène sont considérés comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires. Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. Les principales technologies de pile à combustible ainsi que leurs caractéristiques sont données dans le (Tableau 1.1).

Chaque type de pile à combustible a un domaine d'application privilégié (Tableau 1.1). Les piles dites à basses températures sont plutôt destinées aux applications mobiles, alors que les piles dites à hautes températures sont généralement destinées aux applications stationnaires. Les principales applications mobiles concernent les appareils électroniques portables (ordinateur, téléphone cellulaire...) et le domaine des transports (voiture, bus...); les applications stationnaires concernent la production décentralisée d'énergie électrique (habitats collectifs ou individuels...). Dans ces dernières, la chaleur produite par les piles de hautes températures peut être récupérée par des procédés de cogénération ce qui augmente le rendement global du système PAC. A la (Figure 1.2), les différents types de pile à combustible et les plages de puissance sont liés par leurs domaines possibles d'application [Ber07].

Tableau 1.1: Différentes technologies de piles à combustibles [Pay09].

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
	Basse Température				Haute Température	
Température	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220°C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbone fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol..	hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs KW	200KW à 10MW	1W à 100KW	1KW à 100MW	500KW à 10MW
Rendement Electrique	30-45%	30-45%	35-45% 75% en cogénération	55-60%	50-55% 70% en cogénération	50-60%
Applications	spatial Transport stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial Défense Equipements portables	Stationnaire cogénération	Stationnaire cogénération
Principaux constructeurs	Ballard nuevera axane* helion* (*français)	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens-westinghouse sulzer	IFC Hitachi Fuji

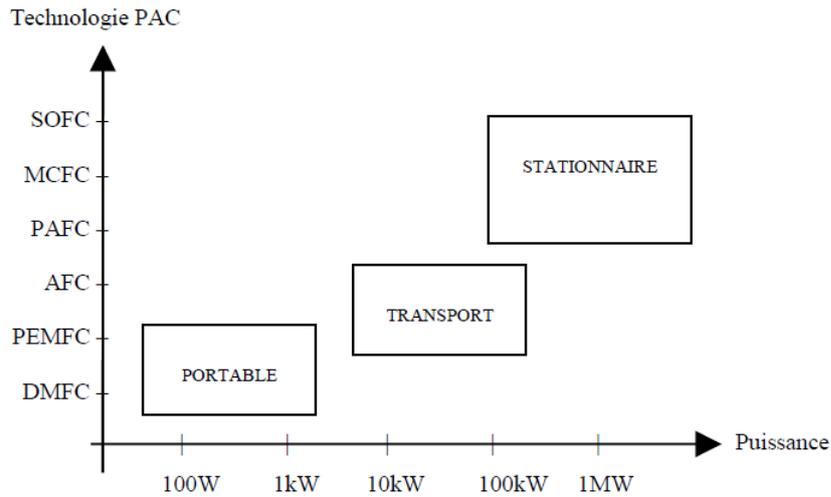


Fig 1.2: Technologies des piles à combustible et domaines d'application [Ber07].

1.2.2 Principe de fonctionnement:

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique (Figure 1.3). L'énergie est produite quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air. Dans un moteur à combustion interne, lorsque la réaction se produit, l'énergie est relâchée sous forme de chaleur, dont une partie peut effectuer un travail utile en poussant un piston. Dans une pile à combustible, la réaction est électrochimique et produit de l'énergie électrique et de la chaleur. L'énergie électrique peut être employée pour effectuer le travail utile directement tandis que la chaleur est soit gaspillée soit employée par ailleurs.

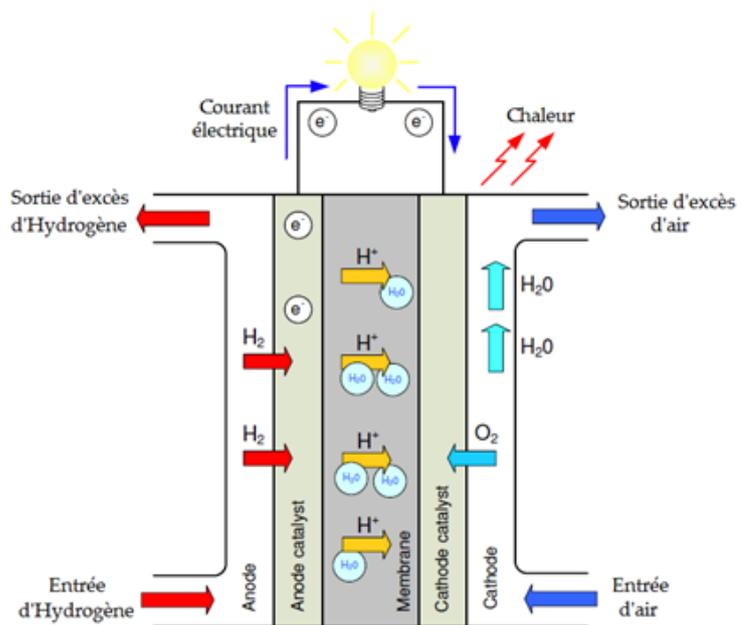
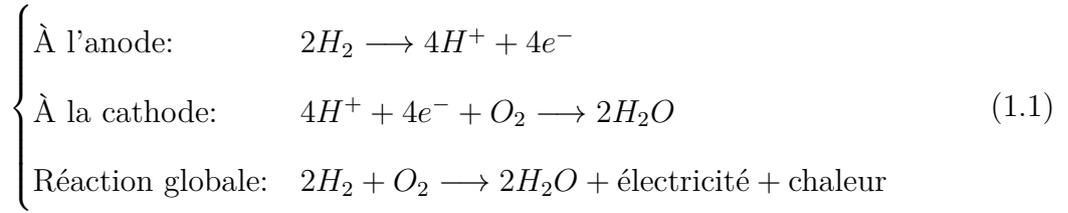
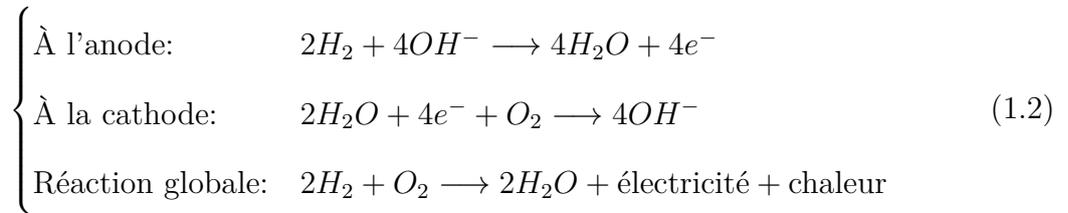


Fig 1.3: Schéma de Principe d'une piles à combustible de type PEMFC [F+09].



pour un électrolyte alcalin, on a:



Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène.

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air [Tho05].

1.2.3 Différents types de piles à combustible:

En règle générale, les piles à combustible sont classifiées selon le type d'électrolyte utilisé (Figure 1.4), à l'exception des piles de type DMFC (Direct Méthanol Fuel Cell) qui n'est autre qu'une pile PEM utilisant du méthanol comme carburant qui est directement envoyé à l'anode.

La deuxième caractéristique utilisée pour classer les piles à combustible est leur

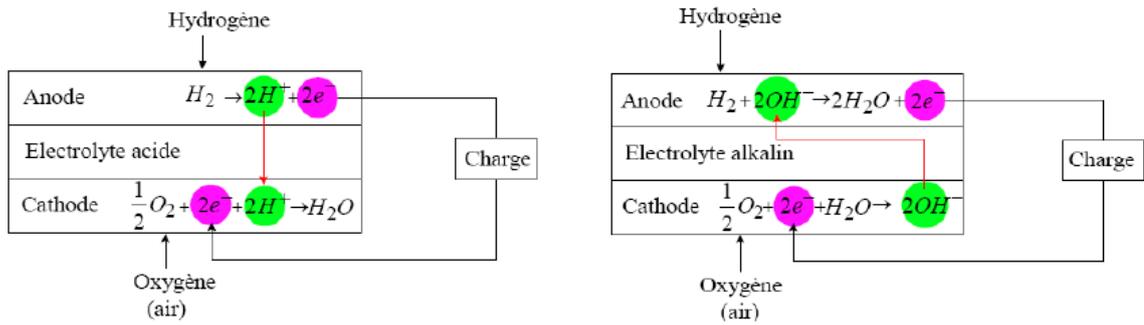


Fig 1.4: Principe des piles à combustible à électrolyte acide (à gauche) ou alcalin (à droite) [Tho05].

température de fonctionnement. On distingue les piles à basse température qui englobent quatre technologies à savoir les piles alcalines ou AFC (Alkaline Fuel Cell), les piles à membrane échangeuse de protons ou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), les piles à méthanol direct ou DMFC (Direct Methnol Fuel Cell) et les piles à acide phosphorique ou PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell). Les piles haute température fonctionnent entre 600 et $1000^\circ C$. Deux technologies ont été développées, les piles à carbonates fondus ou MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) et les piles à oxyde solide ou SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).

Le tableau 1-1 présente les différentes technologies de piles à combustible et leurs principales caractéristiques [Pay09].

1.2.4 Système pile à combustible:

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés. En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification.

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle.

1.2.4.1 Configuration système:

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la (Figure 1.5) Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose de six sous-systèmes fondamentaux : le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite. La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet et est un élément fondamental de la réalisation de systèmes pile à combustible performants.

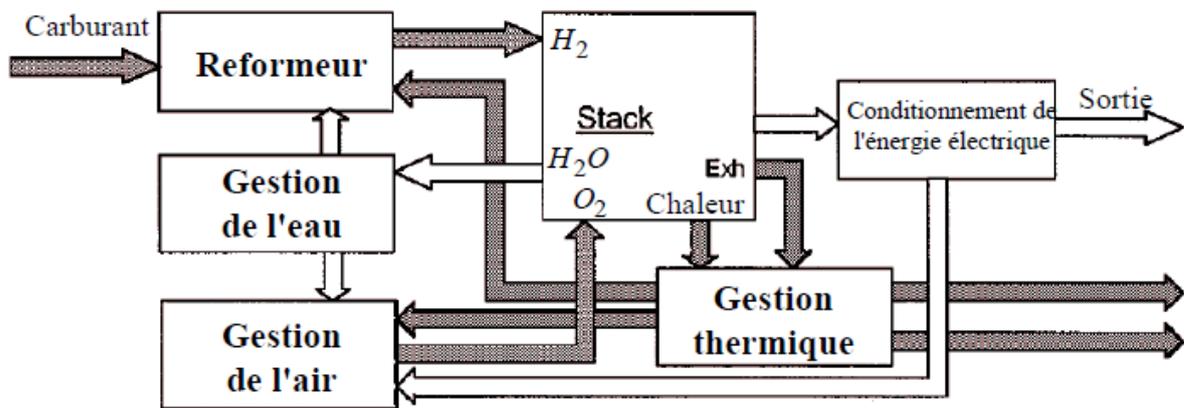


Fig 1.5: Différents constituants d'un système pile à combustible [Tho05].

1.2.4.2 Reformeur:

Parce que la plupart des piles à combustible utilisent de l'hydrogène comme carburant et que la plupart des sources d'énergie primaires sont des hydrocarbures, un dispositif de production de carburant est parfois nécessaire pour convertir le carburant initial en hydrogène. La complexité du procédé de reformage dépend du type de système pile à combustible et de la composition du carburant d'origine. Pour les systèmes fonctionnement à basse température comme les piles PEM, ce procédé est relativement complexe et comporte généralement un désulfuriseur, un vaporeformeur ou un réacteur d'oxydation partielle, et un système de filtrage de gaz pour enlever le monoxyde de carbone du gaz d'anode. Le développement d'un reformeur économique et compact permettant de produire un gaz riche en hydrogène pour les piles à combustible basse température, pour les applications du bâtiment ou du transport automobile est un défi actuel.

1.2.4.3 Gestion de l'air:

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant, qui est typiquement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part, l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. D'autre part, la puissance exigée pour comprimer l'air réduit la puissance disponible. Une partie de cette énergie peut être récupérée en plaçant une turbine sur la sortie d'air du côté de la cathode. Néanmoins, le compresseur d'air emploie typiquement plus de puissance que n'importe quel autre dispositif auxiliaire dans le système. Actuellement, la plupart des stacks de pile à combustible fonctionnent à une pression comprise entre 1 et 8 atmosphères. Afin d'obtenir des densités de puissance importantes et pour améliorer la gestion de l'eau, la plupart des systèmes développés pour l'automobile à partir de pile PEM fonctionnent à des pressions de 2 à 3 atmosphères.

1.2.4.4 Gestion de l'eau:

L'eau est nécessaire à plusieurs endroits dans un procédé de reformage. Dans les systèmes de pile PEM, les gaz réactifs doivent être humidifiés afin d'éviter de dessécher la membrane. Si de l'eau est fournie au niveau de la réaction, celle-ci n'est pas toujours suffisante et l'air (et parfois l'hydrogène) doit être humidifié. Dans des systèmes autonomes, elle peut être récupérée dans les gaz d'échappement.

1.2.4.5 Gestion thermique:

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement. Pour les systèmes de petite puissance (< 200 W), l'air en excès circulant à la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour des systèmes plus importants la circulation d'air, d'eau ou d'un liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques est nécessaire. Avec un liquide de refroidissement, le stack est plus compact. En outre, avec un liquide, il est plus facile de

transférer l'énergie thermique vers d'autres applications telles que le chauffage d'espace ou le chauffage d'eau dans des applications de cogénération [Tho05].

1.2.5 Caractéristique tension-courant des piles à combustible:

De nombreux travaux comme par exemple [Tho05] et [Pay09] proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (Figure 1.6) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} , la surtension ohmique V_{ohm} et la surtension de concentration V_{conc} :

$$V_{pile} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1.3)$$

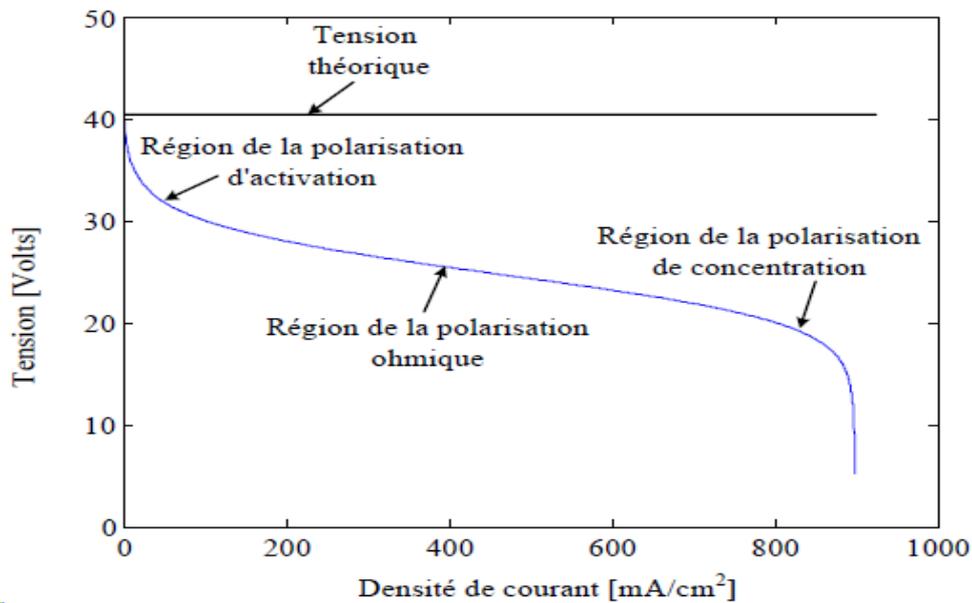


Fig 1.6: Caractéristique tension-courant d'une pile PEM [Pay09].

1.2.5.1 Pertes d'activation:

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel:

$$V_{act} = A.ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) \quad (1.4)$$

où I_{FC} est le courant délivré par la pile à combustible, i_0 le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode - électrolyte, i_n le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et A la pente de la droite de Tafel.

1.2.5.2 Pertes ohmiques:

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{ohm} = R_m \cdot (I_{FC} + i_n) \quad (1.5)$$

où R_m est la résistance totale de la pile à combustible.

1.2.5.3 Pertes de concentration:

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé (sa pression tomberait à zéro), et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse:

$$V_{conc} = -B.ln\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L}\right) \quad (1.6)$$

1.3 Batterie:

La batterie est un élément-clé de l'hybridation; de manière simplifiée, c'est l'élément qui permet de stocker l'énergie gratuite, récupérée lors des phases de freinage, pour la restituer lors des phases d'accélération.

La batterie est un élément de stockage d'énergie électrochimique, pouvant fonctionner de manière réversible. L'ensemble des technologies repose sur ce même principe de

fonctionnement bien que les mécanismes réactionnels peuvent être différents. Après avoir détaillé ce principe, on précise le fonctionnement des batteries constituées de nickel métal hydrure (NiMH) et de celles constituées de lithium-ion (Li-ion). Par la suite, on définit, de manière générale, les grandeurs caractéristiques des batteries. Ceci permet de préciser les indices d'état de la batterie; indices utilisables par le système de gestion de la batterie dans un système hybride.

1.3.1 Principe de fonctionnement d'une batterie:

Le principe d'un élément de stockage d'énergie électrochimique repose sur l'exploitation de deux couples oxydo-réducteur, Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2 , se déroulant à deux électrodes différentes. Les potentiels d'équilibre des deux couples sont tels que $E_{eq,2} > E_{eq,1}$. Lorsque l'on relie les électrodes par un conducteur métallique, des électrons circulent de l'électrode négative vers l'électrode positive. En partant de l'électrode négative, le manque d'électrons crée une réaction d'oxydation. De même, en arrivant sur l'électrode positive, les électrons vont produire une réduction à l'interface électrochimique. La (Figure 1.7) représente le principe de fonctionnement d'une batterie en décharge.

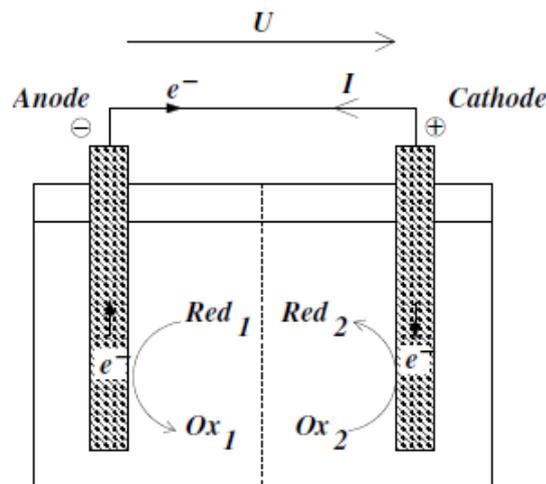
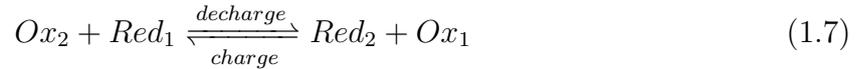


Fig 1.7: Représentation schématique d'une batterie en décharge [Mon09].

Les générateurs électrochimiques rechargeables, communément appelés batteries ou accumulateurs, sont des dispositifs dont les systèmes redox sont réversibles. Deux cas sont donc à dissocier selon que le système électrochimique fournit ou récupère de l'électricité.

La réaction globale du système est donc :



Les potentiels des électrodes sont influencés par le courant qui les traverse dus aux transferts de charge et aux phénomènes de transport. En considérant la cinétique de réaction au niveau des électrodes en régime stationnaire autour d'un état d'équilibre thermodynamique, il est possible d'estimer la tension de la batterie en décharge et en charge (Figure 1.8). Cette représentation traduit uniquement l'influence de la cinétique électrochimique sur la tension U de la batterie en régime stationnaire. Elle ne prend pas en compte les phénomènes de chutes ohmiques dues aux connectiques et à l'électrolyte.

Dans le cas de la décharge (Figure 1.8), plus le courant est important, plus la tension aux bornes de la batterie diminue. On remarque que, dans cet exemple et dans le cas général, le comportement de la tension est non linéaire en fonction du courant. Il est possible de déduire aussi la courbe de puissance disponible en fonction du courant. Cette courbe présente un maximum pour les forts courants correspondant à la puissance maximale que peut fournir le système. Si l'on impose un courant plus élevé, la tension diminue fortement et les pertes dans la batterie deviennent prépondérantes. Il est alors possible de déclencher une réaction secondaire indésirable.

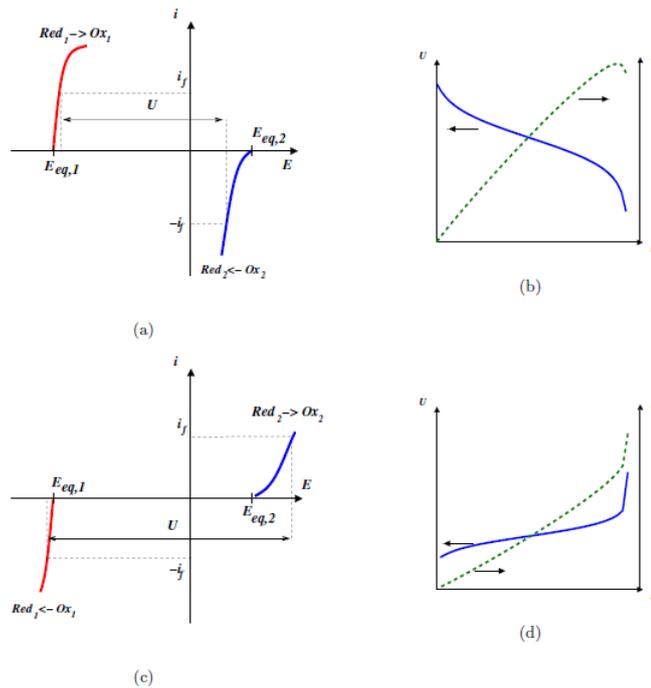


Fig 1.8: Représentation des potentiels d'électrodes, de la tension et de la puissance d'une batterie en régime stationnaire : (a,b) en décharge, (c,d) en charge [Mon09].

Dans le cas de la charge (Figure 1.8), plus le courant qui traverse les électrodes est important, plus la tension augmente. Dans ce cas-ci, le profil de puissance ne présente pas de maximum. Cependant, si le courant dépasse pour un des couples le courant limite de diffusion, il peut aussi se déclencher une réaction secondaire indésirable. En calculant la surtension pour différents courants, il est possible de détecter le courant limite au-delà duquel une deuxième réaction redox se met en jeu [Mon09].

1.3.2 Différents technologies de batteries:

Les batteries sont les plus utilisées dans les applications embarquées. De nombreuses technologies de batteries, définies par le couple électrochimique, sont proposées par les fabricants : Plomb-Acide, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion...etc. Ces deux dernières sont particulièrement utilisées pour l'alimentation des véhicules électrifiés. Le rôle de la batterie est d'assurer les pics de consommations notamment dans les phases d'accélération et de freinage. Pour ce besoin spécifique, la technologie Ni-MH est la mieux adaptée pour ce type de véhicules grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion [Sad13].

1.3.2.1 Accumulateur au Plomb:

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au Plomb en plaçant des feuilles de plomb dans de l'acide sulfurique (Figure 1.9). Après 150 ans d'amélioration, cet accumulateur est loin d'être suranné et il continue de faire l'objet de travaux de recherche. C'est le moins cher des accumulateurs, c'est encore le plus vendu dans le monde et il est presque entièrement recyclable.

Le principe de cet accumulateur est inchangé depuis Gaston Planté et on retrouve toujours dans un accumulateur actuel, les deux électrodes en plomb plongeant dans un électrolyte acide sulfurique (Figure 1.10). Cet accumulateur exploite une oxydoréduction du plomb, chacune des électrodes est constituée d'un élément apparaissant sous sa forme réduite et sous sa forme oxydée : une cathode oxydée en PbO_2 et réduite en $PbSO_4$ et une anode oxydée en $PbSO_4$ et réduite en Pb [Zan10].

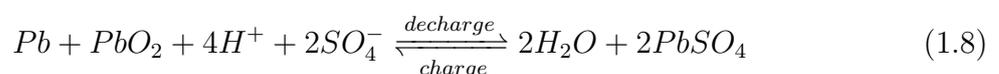




Fig 1.9: Première batterie d'accumulateurs conçue par Gaston Planté [Zan10].

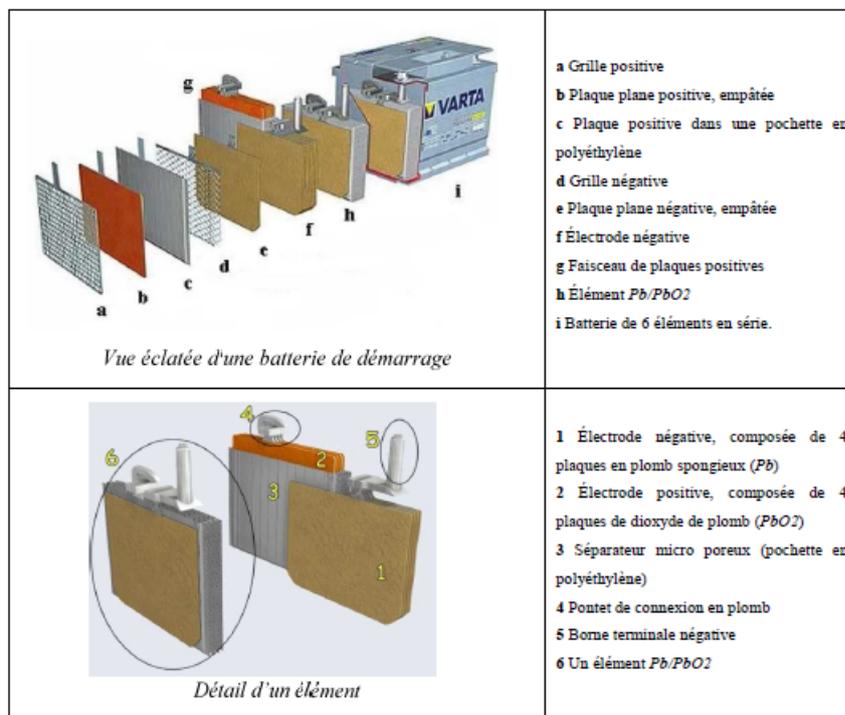


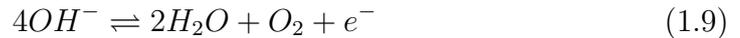
Fig 1.10: Vue éclatée d'un accumulateur au Plomb et détail d'un élément [Zan10].

1.3.2.2 Batteries au nickel métal hydrure (NiMH):

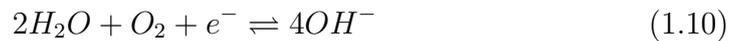
En charge, le métal hydrure MH est formé dans l'électrode de métal M, tandis que le $Ni(OH)_2$ est transformé à la cathode en hydroxyde de nickel NiOOH. Les réactions inverses se produisent en décharge. Lors de surcharge et de sous-décharge, des réactions secondaires interviennent:

- en surcharge, on observe la recombinaison du dioxygène:

– à la cathode, les ions hydroxyde sont oxydés en dioxygène :

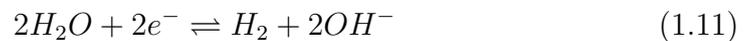


– à l’anode, le dioxygène formé est réduit :

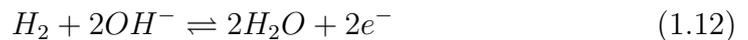


• en sur-décharge, c’est la recombinaison du dihydrogène qui intervient :

– à la cathode, les ions hydroxydes sont réduits en dihydrogène :



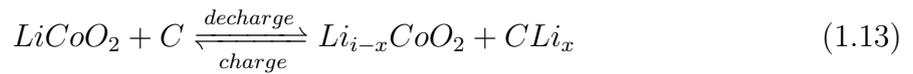
– à l’anode, le dihydrogène formé est oxydé :



Le bilan global de ces réactions est nul, excepté que de la chaleur est produite et que la pression dans l’élément augmente. Afin d’assurer la recombinaison du oxygène et du dihydrogène permettant ainsi d’éviter des surpressions dans l’élément, l’anode en métal hydrure est surdimensionnée par rapport à la cathode en nickel . Le phénomène de recombinaison de l’oxygène intervient aussi en phase de charge réduisant les capacités de recharge de l’élément et diminuant son rendement faradique [Mon09].

1.3.2.3 Batteries lithium-ion (Li-ion):

Dans l’accumulateur Li-ion, le lithium est inséré sous forme d’ions (Li^+) dans la structure cristalline, généralement en graphite, de l’électrode négative. C’est ce procédé d’insertion qui différencie la batterie Li-ion de la batterie lithium. Pendant la décharge d’une batterie Li-ion (Figure 1.11), le lithium est relâché du graphite, migre à travers l’électrolyte pour se loger dans le réseau cristallin du matériau actif de l’électrode positive. A la charge, les ions Li^+ viennent se replacer dans la structure en graphite. La réaction électrochimique globale dans le cas d’une batterie Li-ion à base de cobalt est:



Ce principe de fonctionnement est le même pour tous les types de batteries Li-ion. En revanche, la composition chimique des électrodes et de l'électrolyte varie d'une technologie à l'autre. Ces différences ont un impact sur ce qui fixe leurs caractéristiques en termes d'énergie spécifique, puissance spécifique, durée de vie...etc. Dans ce qui suit, nous allons décrire les principaux éléments des batteries Li-ion [Sad13].

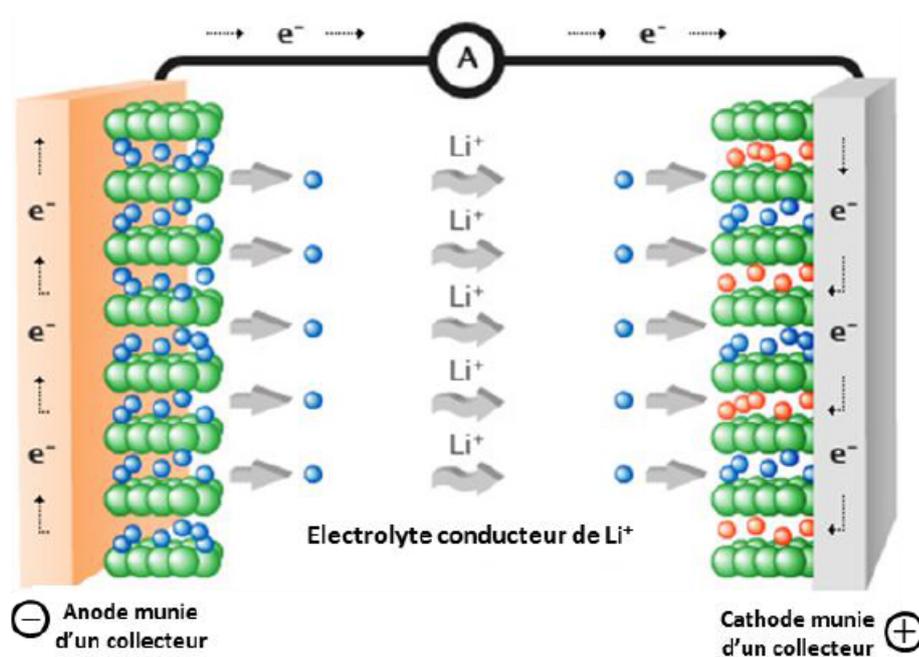


Fig 1.11: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion [Sad13].

1.3.3 Modélisation des batteries:

Le modèle le plus simple d'une batterie est représenté sur la (Figure 1.12). Il est constitué d'une source de tension correspondant à la tension de circuit ouvert V_o en série avec une résistance ($r_s = R_{ohm} + R_{int}$) constituée de deux termes. R_{int} (résistance interne) terme variable représente la réaction chimique et correspond aux chutes de tension dues à une réaction d'activation et à la concentration d'électrolytes. R_{ohm} (résistance ohmique) est constante et correspond à la résistance des conducteurs.

La détermination analytique exacte de la résistance ou de la chute de tension de la batterie est difficile et est généralement obtenue par des essais expérimentaux. La chute de tension augmente avec une augmentation du courant de décharge et une diminution de

l'énergie stockée.

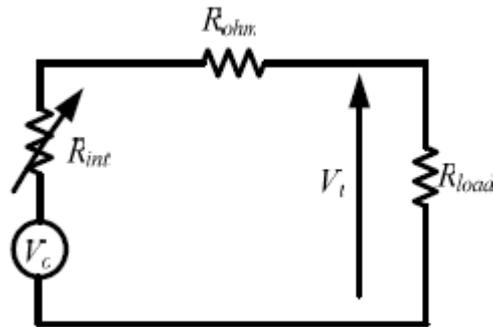


Fig 1.12: Modèle simple d'une batterie [Zan10].

La tension de sortie ($V_t = V_o - r_s I$) est régie par la loi classique des générateurs de tension non idéaux. Ce modèle de base est particulièrement simple à mettre en application, mais il ne tient pas compte des variations d'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge, de la concentration en électrolyte, de la température ou encore du nombre de cycles qu'a déjà subi la batterie. Ce modèle ne permet donc pas d'obtenir un modèle précis de comportement dynamique, mais il peut être suffisant lors d'un premier dimensionnement d'équipement d'électronique de puissance [Zan10].

1.3.4 Introduction aux indices d'états:

Dire dans quel état est une batterie est une étape primordiale pour sa bonne utilisation. Il est alors possible d'éviter des modes de fonctionnement dommageables à la batterie comme des surcharges, des sur-décharges ou des surintensités. Mais aussi, il est possible de prévoir si la batterie peut assurer ou non sa fonctionnalité: démarrage à froid pour une batterie de démarrage, autonomie restante d'une voiture électrique. Un certain nombre d'indices permettent de quantifier ces états. Nous allons présenter ceux qui sont communément utilisés pour l'étude des batteries.

1.3.4.1 État de charge (SOC):

Il existe différentes manières de définir l'état de charge d'une batterie qui s'apparentent à des conventions de la part des utilisateurs de batterie. La définition que nous avons retenue est la suivante, l'état de charge d'une batterie est défini pour une température ambiante T telle que :

$$SOC = \frac{C_s(T)}{C_n(T)} \quad (1.14)$$

C_s : La capacité stockée.

C_n : La capacité nominale.

L'état de charge est en général compris entre 0 et 100 %. Cependant, lorsque le régime de décharge est inférieur au régime nominal, il est possible d'obtenir des valeurs d'état de charge inférieures à 0. Par ailleurs, on fait l'hypothèse que lorsque la température de la batterie change sans transfert de charge, l'état de charge de la batterie se conserve.

Le suivi de l'état de charge peut être réalisé à partir d'un calcul de coulométrie. La variation d'état de charge d'une batterie est définie comme:

$$SOC(t_2) - SOC(t_1) = \frac{1}{3600C_n(T)} \begin{cases} - \int_{t_1}^{t_2} I dt & \text{si } I > 0 \text{ (décharge)} \\ - \int_{t_1}^{t_2} \eta_f I dt & \text{si } I < 0 \text{ (charge)} \end{cases} \quad (1.15)$$

avec t_1 et t_2 les instants de début et de fin de la phase d'utilisation exprimé en s, C_n la capacité nominale de la batterie exprimée en Ah.

η_f : Le rendement faradique.

1.3.4.2 État de santé (SOH):

La notion d'état de charge ne prend pas en compte la perte de capacité due au vieillissement et se réfère à la capacité nominale actuelle de la batterie. Lorsque les performances de la batterie diminuent à cause de phénomènes de vieillissement, il est intéressant de quantifier la différence entre la capacité nominale actuelle de la batterie C_n et celle obtenue lorsque la batterie était neuve $C_{n,0}$. L'état de santé est défini comme :

$$SOC = \frac{C_n}{C_{n,0}} \quad (1.16)$$

Afin de ne pas prendre en compte la variation de la capacité avec la température de la batterie, cette grandeur est définie pour une température de référence.

1.3.4.3 État de fonction (SOF):

La définition de l'état de vie que nous venons de donner est adaptée à l'application des véhicules hybrides pour lesquelles la capacité d'énergie disponible est importante. Elle n'est pourtant pas conforme à l'état que l'on souhaiterait connaître d'une batterie de démarrage par exemple ; cet état serait par exemple la capacité de fournir une puissance donnée pendant un temps fini dans une large gamme de température sans atteindre une tension minimale. D'autres cas sont envisageables, comme la capacité récupérable pendant un temps donné ou la puissance disponible pendant x secondes. Utilisé dans les systèmes de gestion des batteries (Battery Management System), cet indice permettrait de quantifier si l'élément batterie continue à assurer ses fonctionnalités bien que ses performances soient diminuées par les phénomènes de vieillissement.

Afin de quantifier l'influence du vieillissement sur les performances de la batterie et notamment sur la puissance disponible en charge et en décharge à un état donné, il est possible de définir l'état de fonction en décharge de la manière suivante :

$$SOF = \frac{|P(T, SOH, SOC) - P_c|}{|P_0(T, SOH, SOC) - P_c|} \quad (1.17)$$

avec P_c la puissance désirée dans le cadre de l'application, $P(T,SOH,SOC)$ la puissance que peut fournir la batterie dans les conditions de l'application et $P_0(T,SOH,SOC)$ la puissance que peut fournir la batterie en début de vie [Mon09].

1.4 Conclusion:

La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous avons présenté de deux sources d'énergie électrique les plus utilisées dans la réalisation de source hybride électrique. Ces sources sont : les piles à combustibles, les batteries électrochimiques.

Les batteries électrochimiques peuvent être utilisé dans sources auxiliaires dédiées au stockage de l'énergie afin d'améliorer le comportement des systèmes hybrides électriques en régime transitoire.

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 [Akh04].

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 [Jab11].

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

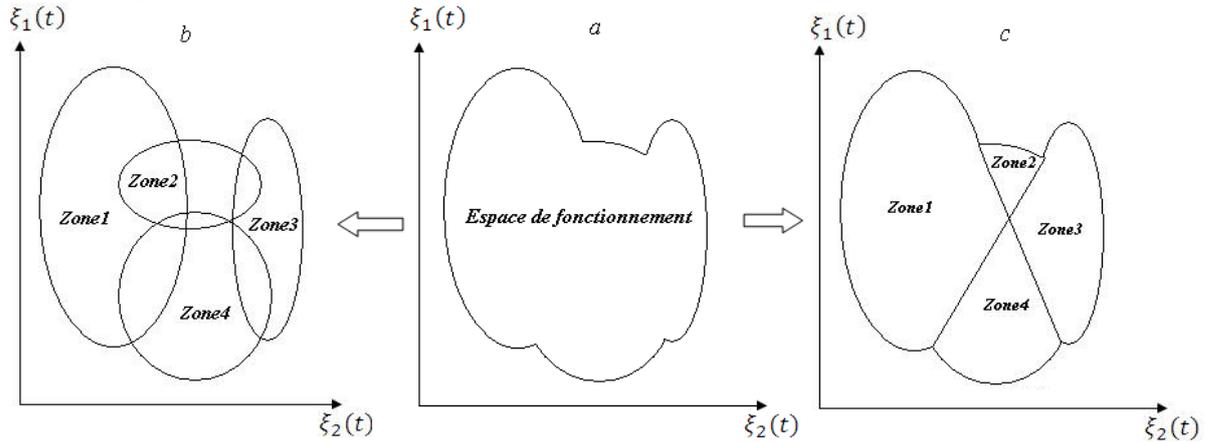


Fig 2.1: Schéma de principe de l'approche multi-modèles a)- Système non linéaire , b - c)- Représentation multi-modèles [Ham16].

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:

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 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, 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 :

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

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:

La structure couplée, où le vecteur d'état étant une somme pondérée des états des modèles locaux, s'appelle aussi le modèle flou de Takagi-Sugeno (Fuzzy T-S model), et elle est basée sur des règles du type SI prémisse Alors conséquence, dans cette situation la représentation multimodèle est obtenue par interpolation de r modèles locaux linéaires.

Cette représentation (structure couplée) étant la plus largement utilisée, et par l'utilisation de la transformation par secteurs non linéaires, on peut déduire facilement le modèle sans aucune perte d'information.

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

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 [Ham16].

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

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 a 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 $y_m(t)$ [Oud08].

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 $(f, h) \in \mathbb{R}^{2n}$ sont des fonctions non linéaires continues, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état et $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 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 $(x_i, u_i) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$:

Dans ce cas, on considère le choix suggéré par Johansen et Foss [JF93], 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

$$\begin{aligned} A_i &= \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{(x,u)=(x_i,u_i)}, \quad B_i = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{(x,u)=(x_i,u_i)} \\ C_i &= \left. \frac{\partial h(x, u)}{\partial x} \right|_{(x,u)=(x_i,u_i)}, \quad E_i = \left. \frac{\partial h(x, u)}{\partial u} \right|_{(x,u)=(x_i,u_i)} \\ D_i &= f(x_i, u_i) - A_i x_i - B_i u_i, \quad N_i = h(x_i, u_i) - C_i x_i - E_i u_i \end{aligned}$$

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 [Akh04].

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) :

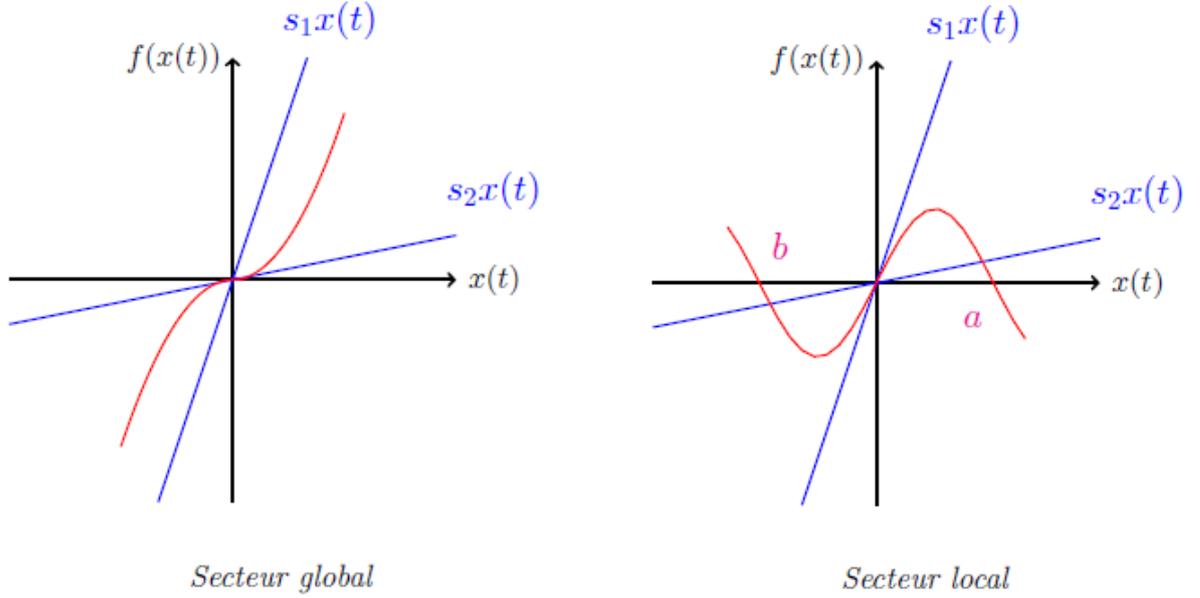


Fig 2.2: Secteurs non linéaires [Ham16].

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

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:

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

Le système (2.7) qui possède $r = 2^k \in \mathbb{N}$ sous-modèles linéaires, devient par la transformation par secteur non linéaire sous la forme suivante [Ham16]:

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

Exemple 1: Considérons le système non linéaire suivant:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1(t) + x_1(t)x_2^2(t) \\ -x_2(t) + (3 + x_2(t))x_1^3(t) \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

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 $\xi_1(t) = x_1(t)x_2^2(t)$ 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 $x_2(t) \in [-1, 1]$.

$$\begin{aligned} \xi_{1max} &= \max_{x_1(t), x_2(t)} \xi_1(t) = 1, \quad \xi_{1min} = \min_{x_1(t), x_2(t)} \xi_1(t) = -1 \\ \xi_{2max} &= \max_{x_1(t), x_2(t)} \xi_2(t) = 4, \quad \xi_{2min} = \min_{x_1(t), x_2(t)} \xi_2(t) = 0 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \xi_1(t) &= x_1(t)x_2^2(t) = M_1(\xi_1(t)) \cdot \xi_{1max} + M_2(\xi_1(t)) \cdot \xi_{1min}, \\ \xi_2(t) &= (3 + x_2(t))x_1^2(t) = N_1(\xi_2(t)) \cdot \xi_{2max} + N_2(\xi_2(t)) \cdot \xi_{2min} \end{aligned}$$

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:

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

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

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 3: Si $\xi_1(t)$ est "Négatif" et $\xi_2(t)$ est "Grand" Alors $\dot{x}(t) = A_3x(t)$.
- Règle 4: Si $\xi_1(t)$ est "Négatif" et $\xi_2(t)$ est "Petit" Alors $\dot{x}(t) = A_4x(t)$.

avec

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

Le système non linéaire est représenté par le modèle flou de Takagi-Sugeno 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 [Nag10].

3.1 Introduction:

La dénomination "commande basée sur la passivité" (**PBC, Passivity-Based Control**) a été introduite pour définir une méthodologie de conception et de commande qui assurent la stabilité des systèmes en les rendant passif. Un système de la forme:

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

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:

$$H(x(t)) - H(x_0) \leq \int_0^t u^T(s)y(s)ds \quad (3.1)$$

"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 (3.1) devient une égalité :

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

3.2 Conséquences immédiates de la passivité:

De l'inégalité (3.1), 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 fut couronnée de succès 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 PBC trouve ses racines dans les travaux fondamentaux de Takegaki et Arimoto 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 ou 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, ou 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 majeure qui, dans une large mesure, expliquent le succès pratique de la commande basée sur la passivité. [\[Bec04\]](#)

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.

Mathématiquement 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.

3.3 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 modélisation 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:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \tag{3.2}$$

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 (x) , puis de réécrire le système non linéaire (3.2) en fonction du gradient de la fonction d'énergie.

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

Ainsi, la forme PCH du système initial (3.2) est:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}(x) - \mathfrak{R}(x)] \nabla H(x) + g(x)u \\ y = g^T(x) \nabla H(x) \end{cases} \quad (3.3)$$

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 $\mathfrak{R}(x)$ est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

Il est évident de l'équation (3.3) 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 $\mathfrak{R}(x)$ du fait que la matrice soit semi définie positive révèle que les termes appartenant à cette matrice sont des termes associés à la dissipation [Kha12].

3.4 Différentes approches de la PBC:

La PBC définit une méthode de synthèse d'un contrôleur qui stabilise le système étudié en le rendant passif. Ceci en prenant une fonction d'énergie désirée ayant un minimum à l'équilibre souhaité en injectant de l'amortissement dans le système.

Bien qu'il y ait beaucoup de variantes à cette idée fondamentale, la PBC peut être largement classifiée dans deux grands groupes, la PBC "classique" où nous choisissons à priori la fonction de stockage pour être assignée (en général Quadratique) puis concevons le contrôleur qui rendra la fonction de stockage non croissante. Malheureusement, pour assigner une fonction de stockage donnée qui n'est pas nécessairement interprétée comme fonction d'énergie totale cette approche utilise l'inversion du modèle le long des trajectoires de références, ce qui a pour effet de détruire la structure Lagrangienne et impose des conditions non naturelles d'inversion stable du modèle.

Dans la seconde classe de PBC la fonction de stockage de la boucle fermée est laissée libre, mais nous choisissons à la place la structure désirée du système en boucle fermée, par exemple Lagrangienne ou Hamiltonienne commandée par port (PCH), et l'on caractérise alors toutes les fonctions d'énergie assignables compatibles avec cette structure.

Cette caractérisation est donnée en termes de solutions d'équations différentielles partielles (EDP). Les exemples les plus notables de cette approche sont les systèmes Lagrangiens commandés, et l'Assignment d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA: Interconnexion and Dumping Assignment).

Depuis l'introduction de l'IDA-PBC plusieurs extensions théoriques et applications pratiques de cette méthodologie de synthèse de contrôleurs ont été reportées dans la littérature. Parmi les applications de l'IDA-PBC, on peut citer: le pendule, les moteurs électriques, la lévitation magnétique, les systèmes de puissances, les convertisseurs de puissance, les véhicules sous-marins, un module spatial et les systèmes mécaniques.

3.4.1 La Passivité et la Balance d'Énergie:

Pour la synthèse d'une commande, le concept d'énergie est naturellement introduit par le concept de passivité. Les systèmes physiques interconnectés à l'environnement externe à travers les variables de ports conjuguées $u \in \mathbb{R}^n$ et $y \in \mathbb{R}^m$ (dont le produit a une unité de puissance) satisfont l'Équation de Balance d'Énergie (EBE) suivante:

$$H(x(t)) - H(x(0)) = \int_0^t u^T(s)y(s)ds - d(t) \quad (3.4)$$

Ainsi, les systèmes satisfaisant l'équation de Balance d'énergie, avec $H(x)$ fonction définie positive, sont passifs. y est alors appelée sortie passive.

3.4.1.1 Propriétés:

- Si $u = 0$, nous avons $H(x(t)) \leq H(x(0))$. Le système s'arrête sur un point d'équilibre d'énergie minimum.
- La commande u est introduite afin de stabiliser le système autour d'un point d'équilibre désirée x_* .
- Le taux de convergence vers le point d'équilibre peut être augmenté par l'extraction d'énergie en posant $u = -K_{Amort}y$ Avec $K_{Amort} = K_{Amort}^T > 0$.

- $\left(- = \int_0^t u^t(s)y(s)ds\right) \leq H(x(0)) < \infty \Leftrightarrow$ la quantité d'énergie qui peut être extraite du système passif est bornée.
- $d(t)$ en fonction de t est non décroissant.

3.4.1.2 Formulation de la PBC standard:

Considérons le système non linéaire (3.2) et prenons, par exemple, pour signal de commande $u = \beta(x) + v$ tel que:

$$H_d(x(t)) - H_d(x(0)) = \int_0^t \mathbf{v}^t(s)z(s)ds - d_d(t) \quad (3.5)$$

Avec:

- $H_d(x)$ la fonction d'énergie désirée ayant son minimum au point d'équilibre x_* .
- $d_d(t) \geq 0$ l'amortissement désiré.
- z (qui peut être égal à y) la nouvelle sortie passive.

Ainsi la PBC représente la Balance d'énergie + ajout d'Amortissement.

3.4.1.3 Stabilisation via la Balance d'Énergie:

Pour une classe de systèmes passifs, incluant les systèmes mécaniques, la stabilisation est relativement simple, pour cela il suffit de trouver $\beta(x)$ telle que l'énergie apportée par la commande soit fonction des variables d'états.

En effet, si :

$$- \int_0^t \beta^t(x(s))y(s)ds = H_a(x(t)) + \mathcal{K} \quad (3.6)$$

Pour une fonction $H_a(x)$ donnée et \mathcal{K} est une constante, alors $u = \beta(x) + v$ assure que $v \rightarrow y$ est passive avec la nouvelle fonction d'énergie désirée.

$$H_d(x) \triangleq \underbrace{H(x)}_{\text{emmagasinée}} + \underbrace{H_a(x)}_{\text{ajoutée}} \quad (3.7)$$

3.4.1.4 Obstacle de dissipation pour la PBC-BE:

Les systèmes mécaniques mis à part, l'application de la PBC-BE est considérablement limitée par la dissipation naturelle du système.

En effet, si $\dot{x} = 0 \Rightarrow \bar{x}$ est un point d'équilibre pour (3.2) ainsi:

$$f(\bar{x}) + g(\bar{x})\beta(\bar{x}) = 0 \Rightarrow h^T(\bar{x})\beta(\bar{x}) = 0 \quad (3.8)$$

La partie droite de (3.8) donne:

$$\beta^T(\bar{x})h(\bar{x}) = 0 = u^T y|_{\bar{x}} \quad (3.9)$$

Ainsi à l'équilibre la puissance extraite ($= h^T B$) doit être nulle, La PBC-BE est donc applicable uniquement aux systèmes dont la dissipation est finie.

La méthode IDA-PBC pallie parfaitement à cette limitation.

3.4.2 Méthodologie d'Assignment d'Interconnexion et 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:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}(x) - \mathfrak{R}(x)] \nabla H(x) + g(x)u \\ y = g^T(x) \nabla H \end{cases} \quad (3.10)$$

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.

$\mathfrak{S}(x) = -\mathfrak{S}^T(x), \mathfrak{R}(x) = \mathfrak{R}^T(x) \geq 0$ 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 3.1. Soit le système non linéaire décrit par (3.2), que l'on veut stabiliser autour d'un point d'équilibre $x_* \in \mathbb{R}^n$. Supposons l'existence des matrices suivantes:

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

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 (3.2) en boucle fermée avec la commande u , telle que:

$$u = [g^T(x).g(x)]^{-1} g^T(x) \{[\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)\nabla H_d - f(x)]\} \quad (3.11)$$

À la forme PCH suivante:

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \\ y = g^T(x)\nabla H_d \end{cases} \quad (3.12)$$

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 (3.12) contenu dans:

$$\{x \in \mathbb{R}^n | \dot{H}_d = 0\} \quad (3.13)$$

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

Démonstration: en identifiant les parties droites de (3.2) et (3.12), l'équation suivante est obtenue:

$$f(x) + g(x)u = [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \quad (3.14)$$

En multipliant (3.13) à gauche par $g^T(x)$, on obtient:

$$g^\perp(x)f(x) = g^\perp(x) [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \quad (3.15)$$

L'expression de la commande est obtenue en multipliant (3.14) à gauche par le pseudo inverse de $g(x)$. Le fait d'écrire le système (3.2) en boucle fermée sous la forme (3.12) avec $\mathfrak{S}_d(x)$ et $\mathfrak{R}_d(x)$ ayant les propriétés décrites précédemment suffit pour prouver la stabilité autour du point x_* . En effet:

$$\begin{aligned} \dot{H}_d &= \nabla H_d^T \dot{x} \\ &= \nabla H_d^T [\mathfrak{S}_d(x) - \mathfrak{R}_d(x)] \nabla H_d \\ &= -\nabla H_d^T \mathfrak{R}_d(x) \nabla H_d \leq 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Ainsi, H_d joue le rôle de la fonction de Lyapunov. La stabilité asymptotique suit

immédiatement en utilisant le principe d'invariance de LaSalle et la condition (3.13). La procédure de synthèse du contrôleur IDA-PBC est récapitulée dans les étapes suivantes.

Étapes:

On désire trouver la commande u qui permet d'écrire le système non linéaire affine en la commande (3.2) sous la forme PCH (3.12). Il est clair que (3.12) dispose de deux inconnues : la matrice désirée $[\mathfrak{S}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$ qui a les propriétés décrites dans la Proposition (3.1) et la fonction d'énergie désirée H_d qui intervient dans (3.12) par le biais de son gradient. Ainsi, deux approches existent:

1. Fixer la matrice d'interconnexions et d'amortissements désirée $[\mathfrak{S}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$ et laisser libre la fonction d'énergie désirée.

Dans ce cas, la procédure IDA-PBC consiste à résoudre des équations aux dérivées partielles où l'inconnue est la fonction d'énergie désirée H_d qui est soumise à la contrainte que son minimum est atteint aux points d'équilibres désirés et où le degré de liberté est la commande u .

2. Fixer la fonction d'énergie désirée H_d et par conséquent ∇H_d et laisser libre la matrice désirée $[\mathfrak{S}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$.

Dans ce cas, la procédure IDA-PBC consiste à résoudre des équations algébriques où l'inconnue est la matrice désirée $[\mathfrak{S}_d(x), \mathfrak{R}_d(x)]$ qui doit avoir les propriétés décrites dans la Proposition (3.1) et où le degré de liberté est la commande u .

La méthode IDA-PBC est une procédure très intéressante pour la commande des systèmes physiques. Néanmoins, le fait de vouloir trouver une commande u qui permet d'écrire le système (3.2) en boucle fermée sous la forme PCH (3.12) peut donner lieu à des contrôleurs complexes et qui, éventuellement, ont besoin de la mesure complète de l'état. Afin de simplifier la complexité du contrôleur, une variante à cette méthode est proposée dans ce qui suit en introduisant un terme de perturbation à la forme PCH, ainsi appelée forme PCH perturbée (DPCH: Disturbed PCH). Mais tout d'abord un exemple d'application de l'IDA-PBC est donné.

Remarque 1. Dans l'approche IDA-PBC, le fait d'écrire le système initial sous la forme (3.10) permet d'identifier des propriétés physiques importantes. Cependant, tous les systèmes physiques ne sont pas facilement mis sous la forme (3.10). Ainsi, on peut

considérer le système non linéaire (3.2) comme modèle de départ puis on applique la méthodologie IDA-PBC décrite en (3.4).

Remarque 2. A ce stade de la recherche, la procédure IDA-PBC peut être utilisée pour la stabilisation d'un point d'équilibre et non pour la poursuite de trajectoire. Il existe cependant deux alternatives pour appliquer l'IDA-PBC pour la poursuite de trajectoire [Bec04]:

- Trouver un changement de repère dans lequel les trajectoires d'équilibre deviennent des points d'équilibre.
- Réécrire le modèle du système en termes d'équations d'erreur de poursuite, ainsi on stabilisera l'erreur de poursuite vers un point d'équilibre au lieu de stabiliser l'état vers une trajectoire d'équilibre.

3.4.3 Conclusion:

Dans ce chapitre 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). Dans l'approche IDA-PBC, qui définit d'abord les interconnexions et amortissements à assigner puis trouve les fonctions de stockage associées, on est confronté à la résolution d'équations aux dérivées partielles.

4.1 Introduction

Nous présentons dans ce travail une conception d'une source d'alimentation hybride DC en utilisant une pile à combustible comme source d'énergie principale et une batterie comme unité de stockage auxiliaire. Ce système hybride 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 (réponses) du système représenté par les multi-modèles, nous allons appliquer la même commande qui est la commande basée sur la passivité.

4.2 Structure de la source d'énergie hybride:

suivant la (Figure 4.1), la source d'énergie hybride étudiée incluent un bus continu $\ll DC \text{ link} \gg$ 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 , et une batterie comme source secondaire, qui est connecté au bus continu par un convertisseur bidirectionnel DC/DC.

Le rôle de la pile à combustible est d'assurer l'alimentation de la charge, tandis que la batterie est utilisée comme source auxiliaire pour assurer l'alimentation de la charge pendant l'accélération et le freinage.

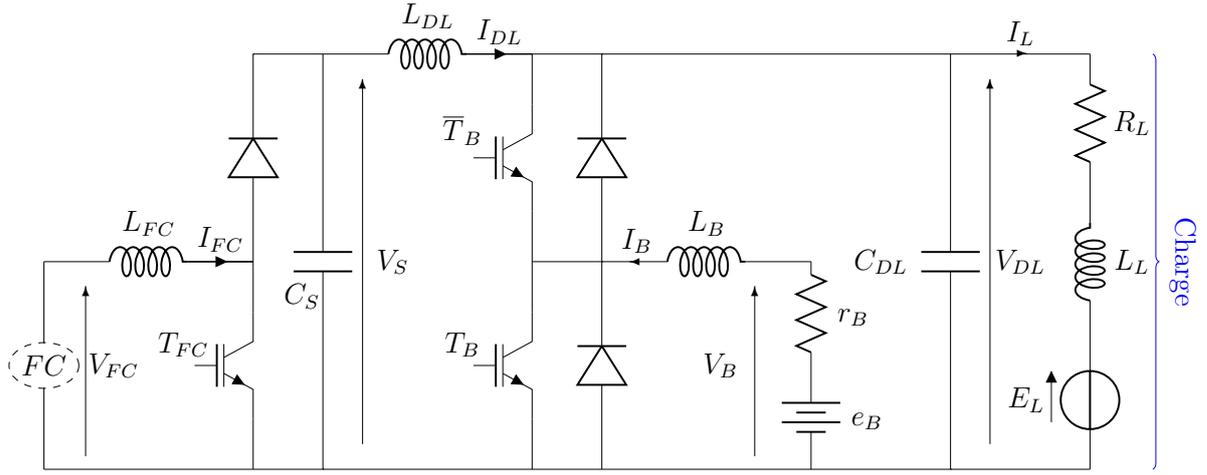


Fig 4.1: Structure de la source hybride FC/Batterie

4.3 Modélisation du système:

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:

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} \\ I_{FC} = C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

➤ Lorsque T_{FC} est ouvert:

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} + V_S \\ I_{FC} = C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \end{cases} \quad (4.2)$$

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.

$$\begin{cases} L_{FC} \cdot \frac{dI_{FC}}{dt} = [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S] \\ C_S \cdot \frac{dV_S}{dt} = [(1 - U_{FC}) I_{FC} - I_{DL}] \end{cases} \quad (4.3)$$

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

$$\begin{cases} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S] \\ \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} - I_{DL}] \end{cases} \quad (4.4)$$

$$U_B = 1 \implies \begin{cases} T_B = 1 \\ \bar{T}_B = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad U_B = 0 \implies \begin{cases} T_B = 0 \\ \bar{T}_B = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_S - V_{DL}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_B) \cdot I_B - I_L] \end{cases} \quad (4.5)$$

avec: $V_B = e_B - r_B I_B$

$$\frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B I_B - (1 - U_B) \cdot V_{DL}] \quad (4.6)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \quad (4.7)$$

Selon la structure de la source hybride de la (Figure 4.1), le modèle global du système hybride est écrit dans un modèle de variable d'état en choisissant le vecteur suivant de variable d'état:

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [V_S, I_{FC}, V_{DL}, I_{DL}, I_B, I_L]^T$$

$$\begin{cases} \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC}) \cdot I_{FC} - I_{DL}] \\ \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}) \cdot V_S] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_B) \cdot I_B - I_L] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_S - V_{DL}] \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B I_B - (1 - U_B) \cdot V_{DL}] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{cases} \quad (4.8)$$

U_{FC} : La commande du convertisseur élévateur de FC.

U_B : La commande du convertisseur bidirectionnel de la batterie.

Le modèle global de variable d'état d'ordre six est alors:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC}).x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - U_{FC}).x_1] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [x_4 + (1 - U_B).x_5 - x_6] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B x_5 - (1 - U_B).x_3] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_L} [x_3 - R_L x_6 - E_L] \end{cases} \quad (4.9)$$

Le modèle statique de la pile est donné comme suit:

$$V_{FC} = E_0 - A.ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) - R_m.(I_{FC} + i_n) - B.ln\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L}\right) \quad (4.10)$$

Avec: $V_{FC} = f(x_2)$.

E_0 est la tension mesurée en circuit ouvert, I_{FC} est le courant fourni, i_0 est le courant d'échange, A est la pente de la ligne de Tafel, i_L est le courant de limite, B est la constante du transfert de masse, i_n est de le courant interne et R_m est la résistance de membrane et de contacts.

Dans la suite, V_{FC} sera considéré comme perturbation mesurée, et de la considération physique, $V_{FC} \in [0; V_d]$, où V_d est la tension désirée du bus continu.

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

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

Le modèle (4.9) peut être réécrit comme suit:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_S} & 0 & \frac{-1}{C_S} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL}} & \frac{1}{C_{DL}} & \frac{-1}{C_{DL}} \\ \frac{1}{L_{DL}} & 0 & \frac{-1}{L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_B} & 0 & \frac{-r_B}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-x_2}{C_S} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{x_1}{L_{FC}} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-x_5}{C_{DL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_3}{L_B} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{FC} \\ V_{FC} \\ U_B \\ e_B \\ E_L \end{bmatrix} \\
 & \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

Nous supposons que les variables d'état sont bornées:

$$x_1 \in [-1, 50] \text{ et } x_2 \in [-1, 100] \text{ et } x_3 \in [-1, 50] \text{ et } x_4 \in [-30, 30] \text{ et } x_5 \in [-25, 25] \text{ et } x_6 \in [-15, 15]$$

➤ Variable de prémisse:

L'équation (4.11) présente quatre fonctions non linéaires qu'on notera $\xi_1(x(t))$ et $\xi_2(x(t))$ et $\xi_3(x(t))$ et $\xi_4(x(t))$ respectivement tels que :

$$\xi_1(x(t)) = \frac{-x_2}{C_S}, \xi_2(x(t)) = \frac{x_1}{L_{FC}}, \xi_3(x(t)) = \frac{-x_5}{C_{DL}}, \xi_4(x(t)) = \frac{x_3}{L_B} \quad (4.12)$$

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

$$\begin{aligned}
 \xi_{1max} &= \max \xi_1(t) = \frac{1}{C_S}, \quad \xi_{1min} = \min \xi_1(t) = \frac{-100}{C_S} \\
 \xi_{2max} &= \max \xi_2(t) = \frac{50}{L_{FC}}, \quad \xi_{2min} = \min \xi_2(t) = \frac{-1}{L_{FC}} \\
 \xi_{3max} &= \max \xi_3(t) = \frac{25}{C_{DL}}, \quad \xi_{3min} = \min \xi_3(t) = \frac{-25}{C_{DL}} \\
 \xi_{4max} &= \max \xi_4(t) = \frac{50}{L_B}, \quad \xi_{4min} = \min \xi_4(t) = \frac{-1}{L_B}
 \end{aligned}$$

➤ fonctions d'appartenance:

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

Le multi-modèles équivalent au modèle non linéaire (4.9) est:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{16} h_i(\xi(t))(Ax(t) + B_i U) \quad (4.13)$$

Avec:

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

et

$$B_1 = \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_6 = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 B_7 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_8 = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4max} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \\
 B_9 &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_{10} = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \\
 B_{11} &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3max} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \\
 B_{13} &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_{14} = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2max} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \\
 B_{15} &= \begin{bmatrix} \xi_{1max} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix}, B_{16} = \begin{bmatrix} \xi_{1min} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \xi_{2min} & \frac{1}{L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{3min} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{4min} & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L_L} \end{bmatrix} \\
 \text{et} &
 \end{aligned}$$

$$h_1(\xi(t)) = M_1(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t))$$

$$\begin{aligned}
 h_2(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_3(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_4(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_5(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_6(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_7(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_8(\xi(t)) &= M_1(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_9(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_{10}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_{11}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_{12}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_1(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_{13}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_{14}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_1(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t)) \\
 h_{15}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_1(\xi_4(t)) \\
 h_{16}(\xi(t)) &= M_2(\xi_1(t)) \times N_2(\xi_2(t)) \times K_2(\xi_3(t)) \times L_2(\xi_4(t))
 \end{aligned}$$

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

4.5 Commande basée sur la passivité:

4.5.1 Système hamiltonien contrôlé par ports:

Les systèmes de PCH ont été introduits par van der Schaft et Maschke dans les années '90 tôt et depuis avaient tiré beaucoup d'attention dans les systèmes électriques, mécaniques et électromécaniques.

Certains des avantages d'exprimer des systèmes sous la formule de PCH sont le fait qu'ils couvrent un grand ensemble de systèmes physiques et capturent les propriétés structurales importantes. Considérons le système non linéaire donné par.

$$\dot{x} = f(x) + A(x) \tag{4.14}$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $f(x)$ et $A(x)$ sont localement des fonctions de Lipchitz

et $u \in \mathbb{R}^m$ est l'entrée de commande. Une formule de du PCH système (4.14) EST donné par:

$$\dot{x} = [\mathfrak{S}(x) - \mathfrak{R}(x)] \nabla H(x) + A(x) \quad (4.15)$$

$\mathfrak{S}(x) = -\mathfrak{S}^T(x)$ est une matrice antisymétrique de dimension $n * n$ représentant les interconnexions entre les états, et $\mathfrak{R}(x)$ est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système et $\nabla H(x)$ est le vecteur de gradient de la fonction d'énergie $H(x)$ du système (4.14).

4.5.1.1 Système à l'équilibre:

Le système à l'équilibre devient:

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [(1 - \bar{U}_{FC}).\bar{x}_2 - \bar{x}_4] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - \bar{U}_{FC}).\bar{x}_1] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\bar{x}_4 + (1 - \bar{U}_B).\bar{x}_5 - \bar{x}_6] \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{L_B} [e_B - r_B \bar{x}_5 - (1 - \bar{U}_B).\bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_3 - R_L \bar{x}_6 - E_L] \end{array} \right. \quad (4.16)$$

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

$$\bar{x} = \left[V_d; \frac{(V_d - E_L)V_d}{R_L V_{FC}}; V_d; \frac{V_d - E_L}{R_L}; 0; \frac{V_d - E_L}{R_L} \right]^T \quad (4.17)$$

Où V_d est la tension désirée du bus continu. Un but implicite de la structure proposée est de récupérer l'énergie pour charger la batterie.

Par conséquent, la commande désirée:

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}), (1 - \bar{U}_B)]^T$$

Où:

$$\bar{U} = [\bar{U}_{FC}, \bar{U}_B] = \left[\left(1 - \frac{V_{FC}}{V_d}\right), \left(1 - \frac{e_B}{V_d}\right) \right] \quad (4.18)$$

La fonction naturelle d'énergie du système est:

$$H = \frac{1}{2} x^T Q x \quad (4.19)$$

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

4.5.1.2 Formulation de problème:

Après la modélisation de système, les points d'équilibre sont calculés afin d'assurer le comportement désiré du système. Si équilibré est atteint, la charge doit être alimentée seulement par la source principale. Ainsi la commande doit mettre à jour la tension du bus continu à une valeur constante et le courant de batterie doit être annulé. À l'équilibre, la batterie doit être chargée et le courant doit être égal à zéro. Dans la prochaine section, la commande sera développée et la stabilité du système sera étudiée.

4.5.1.3 Présentation de la commande hamiltonienne 'PCH' du système:

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

La fonction en boucle bloquée désirée d'énergie est:

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad (4.20)$$

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} .

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\mu_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_4] + \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \cdot \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_1] + \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1) \cdot \bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\tilde{x}_4 + \mu_2 \tilde{x}_5 - \tilde{x}_6] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{L_B} [-\mu_2 \tilde{x}_3 - r_B \tilde{x}_5] + \frac{1}{L_B} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2) \cdot \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_3 - R_L \tilde{x}_6] \end{cases} \quad (4.21)$$

La représentation (4.21) en fonction du gradient de l'énergie désirée (4.20) peut être écrite comme suit:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}] \nabla H_d + A \quad (4.22)$$

avec: $\nabla H_d = [C_S \tilde{x}_1; L_{FC} \tilde{x}_2; C_{DL} \tilde{x}_3; L_{DL} \tilde{x}_4; L_B \tilde{x}_5; L_L \tilde{x}_6]^T$ et:

$$[\mathfrak{S} - \mathfrak{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & \frac{-1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DL} L_B} & 0 & \frac{-r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \cdot \bar{x}_2] \\ \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1) \cdot \bar{x}_1] \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_B} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2) \cdot \bar{x}_3] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

On propose les lois de commande suivantes:

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_B = \bar{U}_B - r \tilde{x}_5 \end{cases} \quad (4.25)$$

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 représentation du système (4.21) et avec les de commande proposées (4.25) devient:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & \frac{-1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & \frac{-1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DL} L_B} & 0 & \frac{-(r_B + rV_d)}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_S \tilde{x}_1 \\ L_{FC} \tilde{x}_2 \\ C_{DL} \tilde{x}_3 \\ L_{DL} \tilde{x}_4 \\ L_B \tilde{x}_5 \\ L_L \tilde{x}_6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.26)$$

L'origine du système PCH en boucle fermé (4.22), avec les lois de commande (4.25), (4.18) et la fonction d'énergie désirée (4.20), est globalement asymptotiquement stable.

La dynamique du système en boucle fermée (4.22) avec les lois (4.25), (4.18) et la fonction d'énergie désirée (4.20) est:

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \quad (4.27)$$

Où

$$\mathfrak{R}' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; \frac{(r_B + rV_d)}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathfrak{R}'^T \geq 0 \quad (4.28)$$

dérivé de la fonction désirée d'énergie (4.20) le long de la trajectoire de (4.27) est:

$$\begin{aligned} \dot{H}_d &= \nabla H_d^T \dot{\tilde{x}} = \nabla H_d^T [\mathfrak{S} - \mathfrak{R}'] \nabla H_d \leq 0 \\ &= \nabla H_d^T \mathfrak{S} \nabla H_d - \nabla H_d^T \mathfrak{R}' \nabla H_d \leq 0 \\ &= -\nabla H_d^T \mathfrak{R}' \nabla H_d \leq 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

$\dot{H}_d \leq 0 \Rightarrow$ Le système est globalement asymptotiquement stable.

4.6 Simulation et interprétation des résultats:

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation en appliquant la commande basée sur la passivité 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 4.1: Paramètres de la charge et la commande.

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

Tableau 4.2: Paramètres de la batterie et du bus continu.

$C_S(\mu F)$	$C_{DL}(F)$	$e_B(V)$	$r_B(\Omega)$
300	30.10^{-3}	12	50.10^{-3}

Figure (4.2) présente respectivement la réponse de la tension V_{DL} du système non linéaire, V_{DLm} du multi-modèles et l'erreur entre eux 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 les deux réponses, la tension du bus continu suit bien la référence, un léger dépassement et il n'y a pas d'erreur statique observée. L'erreur est de l'ordre de 10^{-14} .

Figure (4.3) présente respectivement la réponse du courant de la charge I_L du système non linéaire, I_{Lm} du multi-modèles et l'erreur entre eux due aux mêmes changements précédents. Pour les deux réponses, le courant de la charge tend vers la valeur désirée. L'erreur est de l'ordre de 10^{-15} .

Figure (4.4) présente respectivement la réponse du courant I_{DL} à travers l'inductance L_{DL} du système non linéaire, I_{DLm} du multi-modèles et l'erreur entre eux. L'erreur est de l'ordre de 10^{-14} .

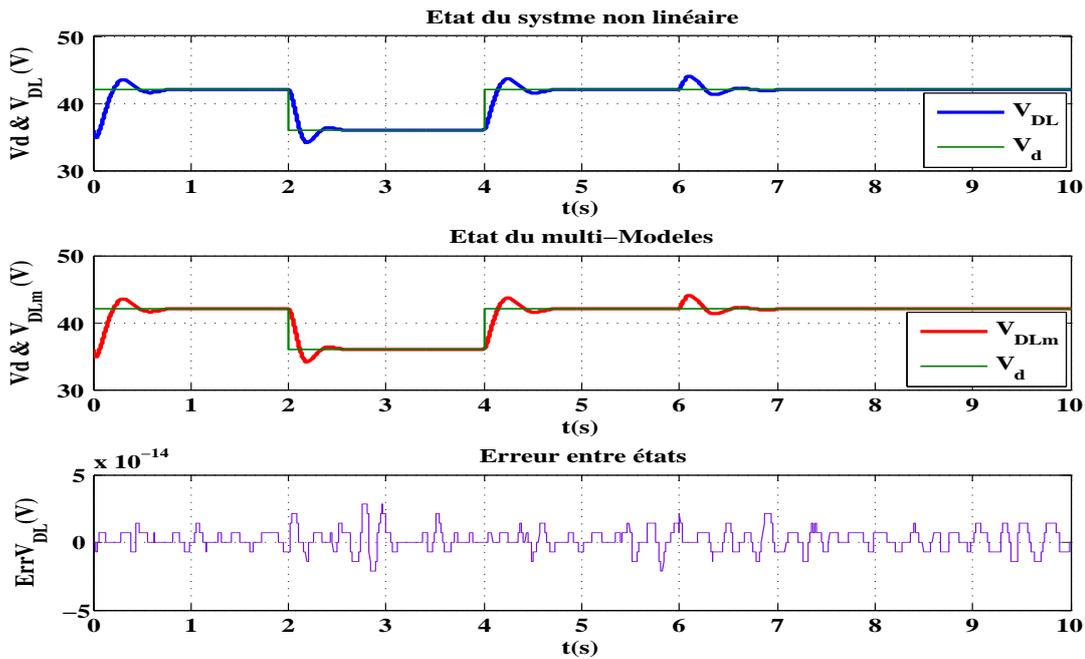


Fig 4.2: Tension de bus continu et sa référence.

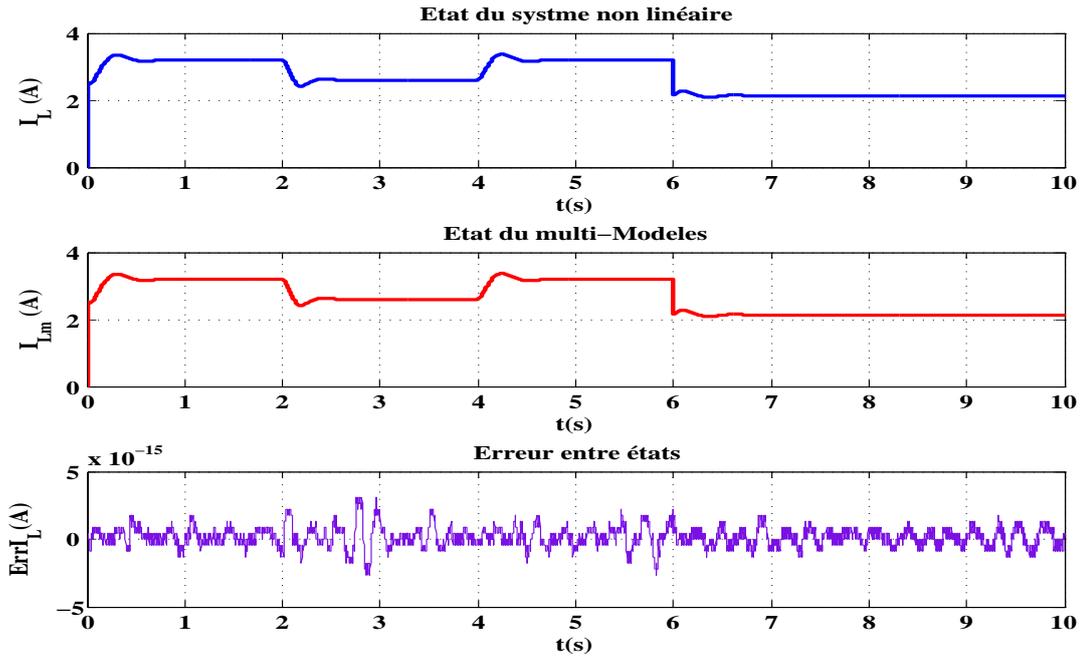


Fig 4.3: Courant de charge.

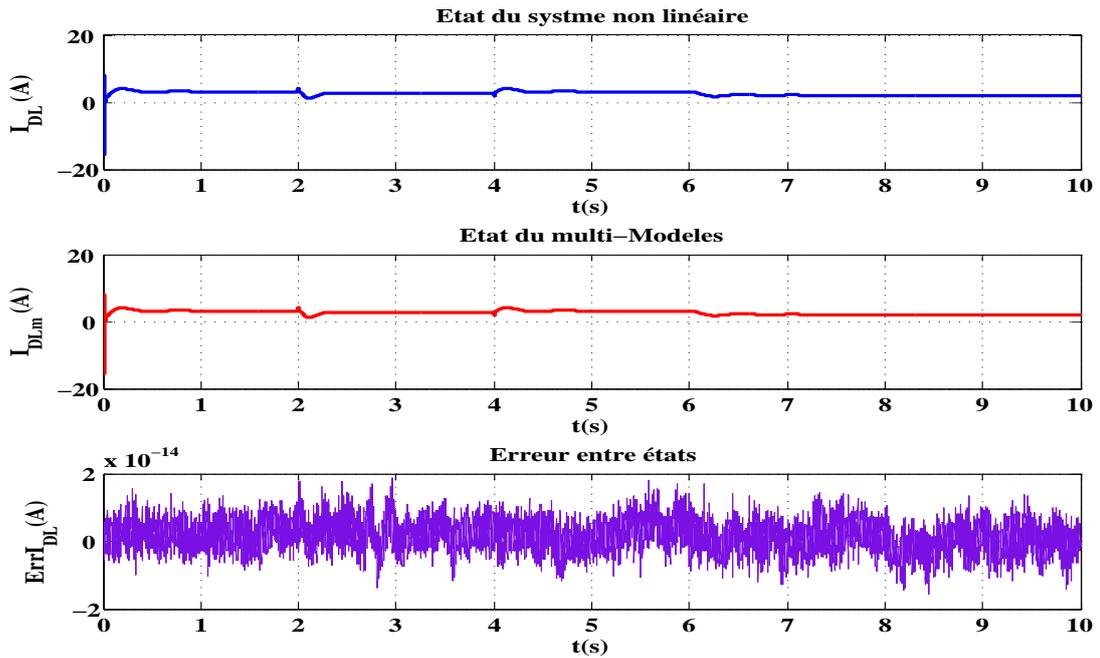


Fig 4.4: Courant de la bus continu.

Figure (4.5) montre la tension V_S du système non linéaire, V_{Sm} du multi-modèles et l'erreur entre eux. La réponse de V_S est celle de V_{DL} de la figure (4.2). L'erreur est de l'ordre de 10^{-14} .

Figure (4.6) montre respectivement la tension V_{FC} , le courant I_{FC} du système non linéaire, I_{FCm} du multi-modèles et l'erreur entre les courants. La réponse de V_{FC} est

inversement proportionnelle avec le courant. La pile à combustible alimente la charge pendant les régimes transitoires et le régime permanent. L'erreur entre les courants est de l'ordre de 10^{-14} .

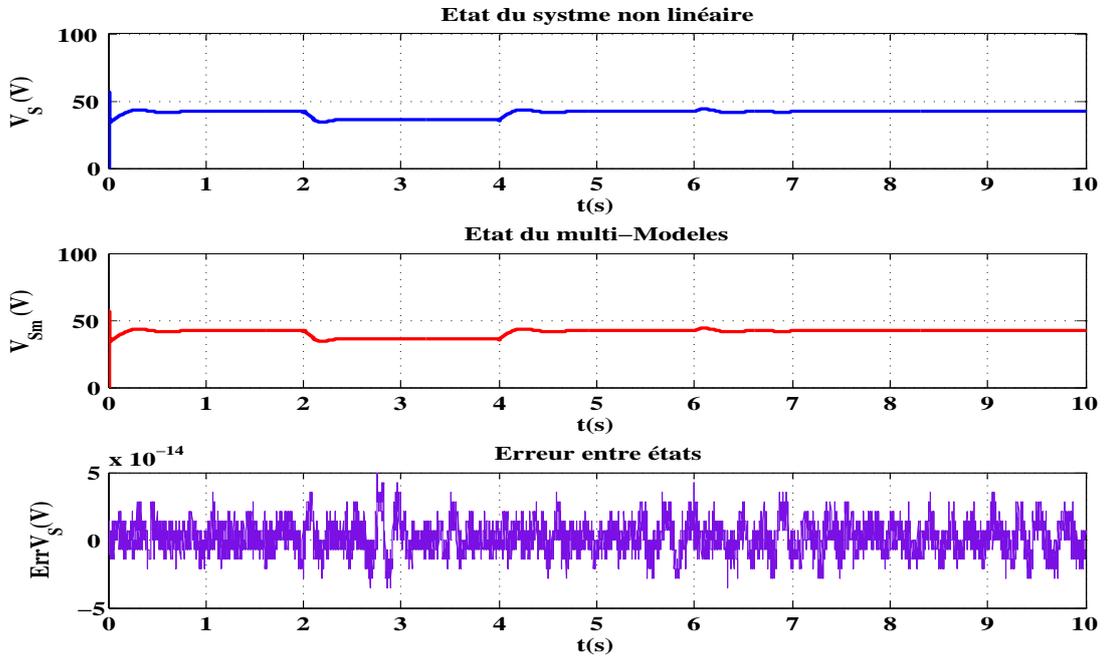


Fig 4.5: Tension de sortie de l'ensemble pile à combustible-hacheur boost.

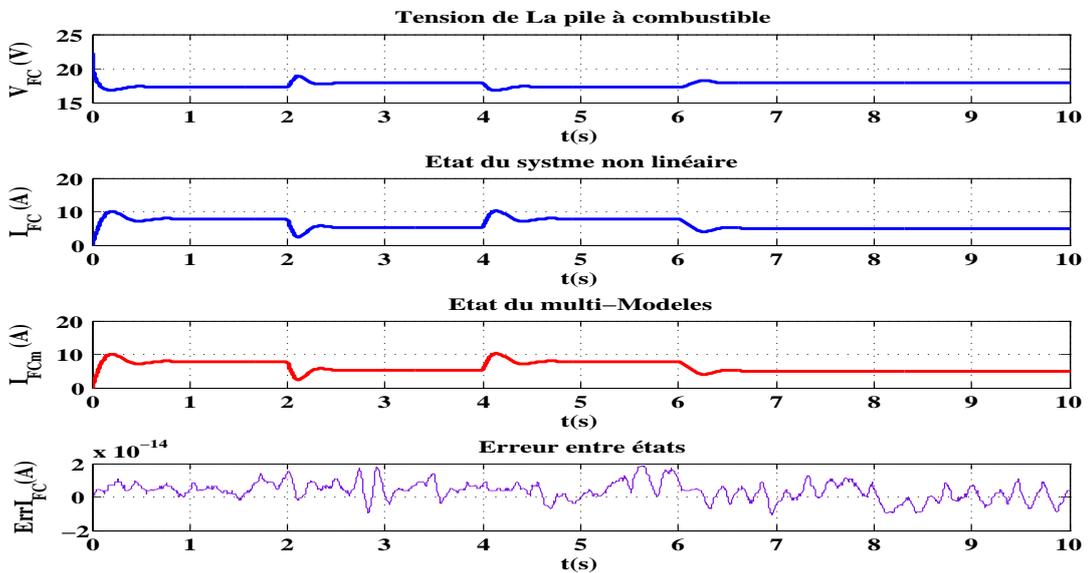


Fig 4.6: Courant de la pile à combustible.

Figure (4.7) montre les réponses de la tension V_B de la batterie, le courant I_B du système non linéaire et I_{Bm} du multi-modèles et l'erreur entre les courants. La batterie fourni la puissance vers la charge pendant les transitoires et en régime permanent aucune

puissance est extraite quand $I_B = 0$. La valeur positive de I_B signifie que la batterie fournit la puissance à la charge et une valeur négative correspond à la récupération de l'énergie par la batterie. L'erreur entre les courants est de l'ordre de 10^{-13} .

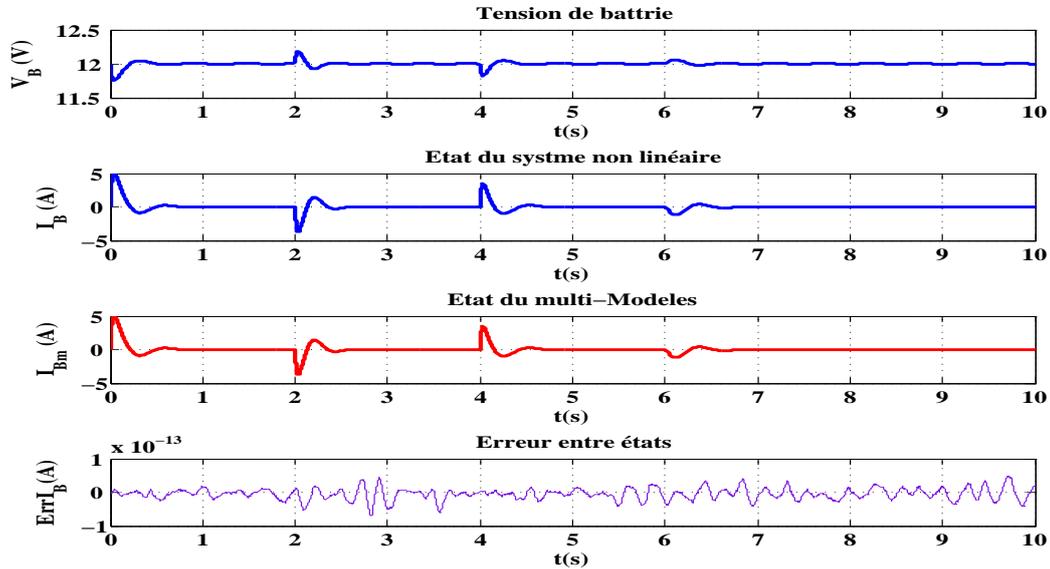


Fig 4.7: Tension et courant la batterie.

Figure (4.8) présente la commande de convertisseur élévateur de la pile à combustible et la commande du convertisseur bidirectionnel de la batterie. 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 (4.9). U_{FC} et U_B sont dans l'intervalle $[0, 1]$.

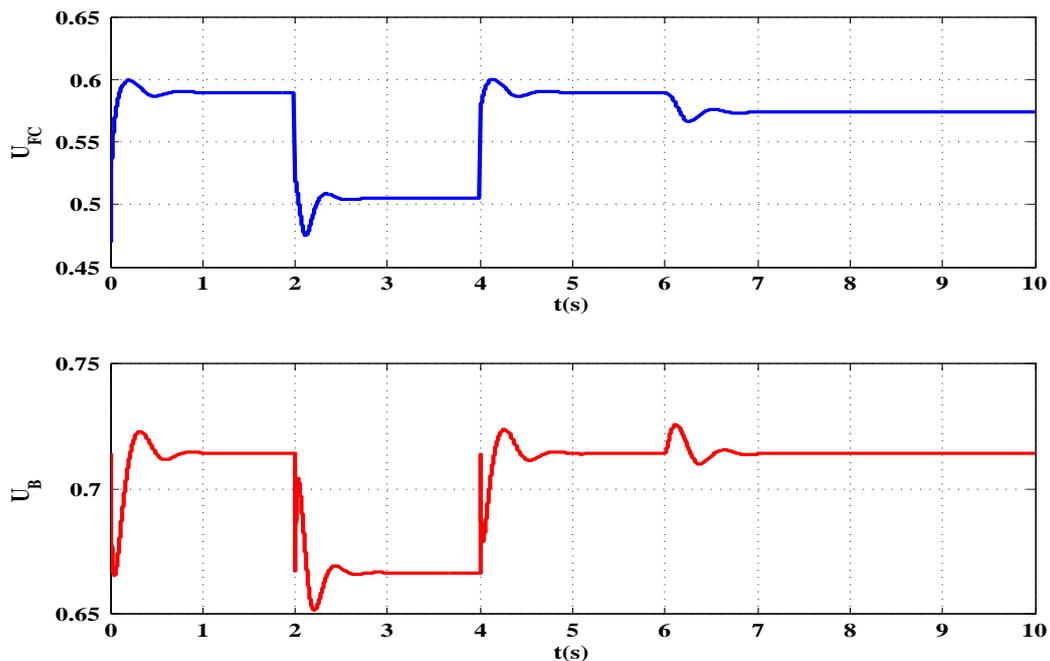


Fig 4.8: Commande de pile à combustible, commande de batterie.

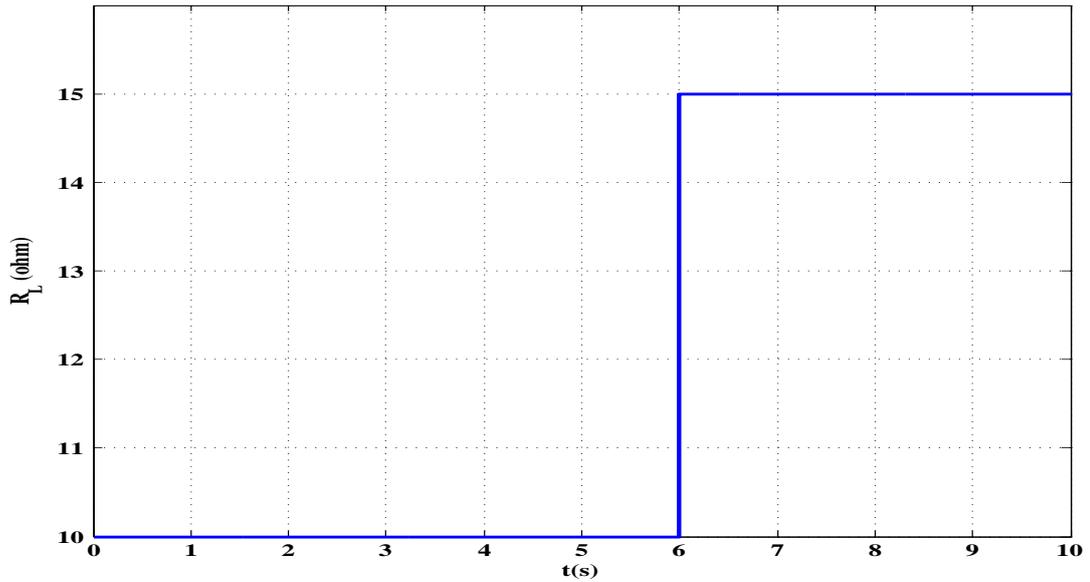


Fig 4.9: Résistance de charge.

Figure (4.10) présente le transfert des puissances dans le système. Les pics de puissance sont absorbés ou fournis par la batterie P_B , ainsi une puissance douce est fournie par la pile à combustible P_{FC} .

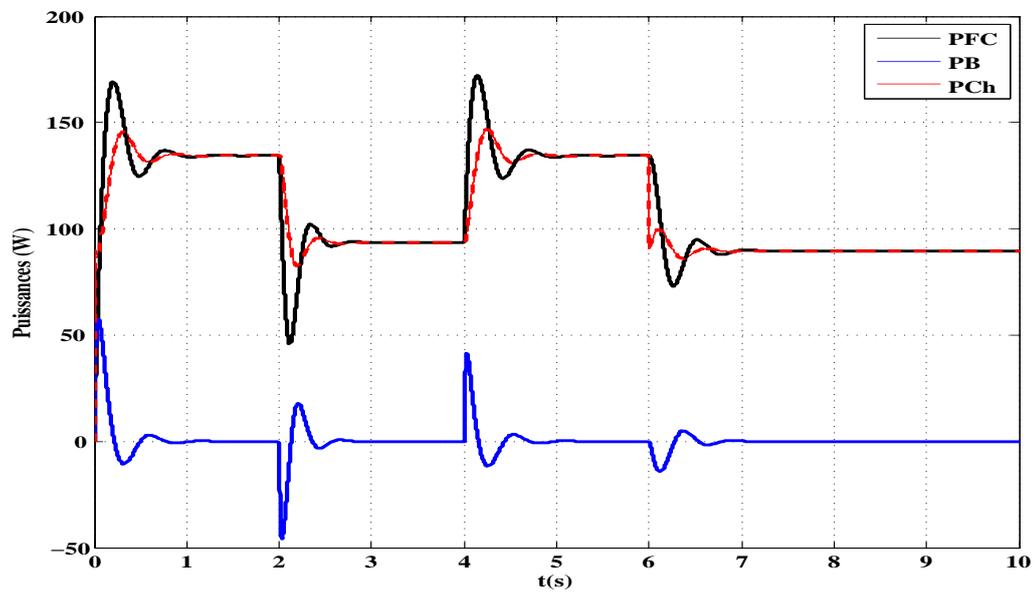


Fig 4.10: Transfert de puissances.

4.7 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système de source hybride composé d'une pile à combustible comme source d'énergie et une batterie comme unité de stockage. Le

Le système non linéaire est commandé par la commande basée sur la passivité et en utilisant les mêmes lois de commande, nous avons commandé le même système mais représenté par les multi-modèles flous TS pour comparer leurs comportements. 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

Les travaux de ce mémoire présentés ici ont pour but l'étude de la structures d'un système d'énergie à pile à combustible destiné à la traction. En générale, la pile à combustible est hybridé avec un moyen de stockage pour couvrir les phases transitoires de fonctionnement (accélération, freinage). La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie utilisées sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique.

Cette étude, a mis en évidence dans ce type d'application, l'utilisation de la technologie PEM pour la pile à combustible et une batterie pour le système de stockage d'énergie.

Pour commencer cette étude, il a fallu mettre en place les lois de commande spécifiques pour les convertisseurs statiques, permettant le pilotage des variables d'état électriques du système. À partir de la structure de ce système hybride, il est évident de remarquer que le modèle d'équations d'état de ce système est fortement non linéaire à cause du couplage de la commande avec les 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 commande basée sur la passivité qui est une commande très puissante est appliquée au système non linéaire. Le système représenté par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno est contrôlé par les mêmes lois de commande que le système non linéaire. 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 d'autres commandes.

- [Akh04] Abdelkader Akhenak. Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodèle: application au diagnostic. *Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, 16, 2004. (pages 2, 24, 30).
- [Bec04] Mohamed Badreddine Becherif. *Contribution aux techniques de façonnement d'énergie: application à la commande des systèmes électromagnétiques*. PhD thesis, Paris 11, 2004. (pages 36, 44).
- [Ber07] Jérôme Bernard. *Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007. (pages iii, 5, 6, 8).
- [Can02] Denis Candusso. *Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2002. (page 5).
- [F⁺09] Diego Hernán Feroldi et al. Control and design of pem fuel cell-based systems. 2009. (pages iii, 8).
- [Ham16] Mohamed Yacine Hammoudi. *Contribution à la commande et à l'observation dans l'association convertisseurs machine*. PhD thesis, Université de Biskra, 2016. (pages iii, 26, 28, 31, 32).
- [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 25).

- [JF93] Tor A Johansen and BJARNE FOSS. Constructing narmax models using armax models. *International Journal of Control*, 58(5):1125–1153, 1993. (page [30](#)).
- [Kha12] Mohamed Khanchoul. *Contribution au développement de la partie électromécanique d’un compresseur pour climatisation de véhicule électrique*. PhD thesis, Paris 11, 2012. (page [38](#)).
- [Mon09] Maxime Montaru. *Contribution à l’évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2009. (pages [iii](#), [15](#), [16](#), [17](#), [19](#), [23](#)).
- [Nag10] Anca 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. (page [34](#)).
- [Oud08] Mohammed 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. (page [29](#)).
- [Pay09] Alireza Payman. Contribution à la gestion de l’énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges. *PhDthesis, Polytechnic Institute of Lorraine, Nancy, France*, 2009. (pages [iii](#), [v](#), [7](#), [10](#), [13](#)).
- [Sad13] Redha Sadoun. *Intérêt d’une Source d’Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain-dimensionnement et tests de cyclage*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2013. (pages [iii](#), [17](#), [20](#)).
- [Tho05] Phatiphat Thounthong. *Conception d’une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2005. (pages [iii](#), [9](#), [10](#), [11](#), [13](#)).
- [Zan10] Majid Zandi. *Contribution au pilotage des sources hybrides d’énergie électrique*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2010. (pages [iii](#), [17](#), [18](#), [21](#)).