

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE



DOMAINE : SCINECE TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECHTROTECHNIQUE

N° :

MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE
OPTION : ENERGIE RENOVELABLE EN ELECTROTECHNIQUE

THEME

**MODELISATION ET COMMANDE FLOUE
ADAPTATIVE DE LA PILE A
COMBUSTIBLE DE TYPE SOFC**

Proposé et dirigé Par:

- DR. OUAGUENI FAYSSAL

Réalisé par :

- BEN ATHMANE HEMZA

- GUEBROUDJ MANEL

Année universitaire : 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'étude : À mes chers parents, qui ne cessent de me soutenir et d'implorer en moi la force de continuer malgré les entraves. je porte pour vous. Que Allah vous protège et vous accorde de la santé.

*À mes chères soeurs et à mon seul frère Abderraouf
A toute ma famille.*

Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les honorer.

A tous mes amis et mes collègues.

A tous les enseignants du département de génie électrique.

Manel

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A celle qui a attendu avec impatience les fruits
de sa bonne éducation ... ma chère mère.*

*A celui m'a indiqué la bonne voie en me
rappelant*

*Que la volonté fait toujours les grandes
personnes Mon cher père.*

A tous mes chères sœurs et frères.

A tous ma famille.

*Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse
les honorer.*

A tous mes amis et mes collègues.

*A tous les enseignants du département de génie
électrique*

Remerciement

Tout d'abord on remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude.

*Nous remercions Très sincèrement Mr. **FAYSSAL OUAGUENI** notre promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions à grandement facilité ce travail.*

Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département Génie électrique, qui ont encouragé à donner le meilleur d'eux même en Nous assurant une formation aussi meilleure que possible, et particulier Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciement les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation dans les meilleurs conditions.

Résumé

Résumé

Une pile est définie comme un système qui permet de convertir l'énergie chimique d'une réaction directement en énergie électrique. Le terme « pile à combustible » précise que la réaction s'effectue de manière continue tant que le combustible, pouvant être de nature variée, est fourni.

L'objectif de ce travail est l'étude des phénomènes régissant la dynamique de la pile à combustible de type SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) afin de développer une base théorique pour la modélisation, l'analyse et la conception des régulateurs pour une suivi rapide de la charge, les deux approches utilisées pour la synthèse du régulateur sont : Le régulateur PID et le régulateur PID flou adaptative.

Mots-clés : Pile à combustible SOFC, PID, logique floue adaptative.

ملخص

تعرف البطارية بأنها نظام يحول الطاقة الكيميائية للتفاعل مباشرة إلى طاقة كهربائية. يبين مصطلح "خلية الوقود" أن التفاعل يستمر باستمرار طالما يتم توفير الوقود، والذي يمكن أن يكون ذا طبيعة مختلفة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الظواهر التي تحكم ديناميكيات خلية الوقود من نوع SOFC (خلية الوقود المؤكسدة الصلبة) من أجل تطوير أساس نظري لنمذجة وتحليل وتصميم نظام تحكم للتتبع السريع للحمولة، النهجان المستخدمان للتحكم في النظام هما PID و PID الضبابي.

الكلمات المفتاحية : خلية وقود SOFC ، PID ، منطق ضبابي تكيفي.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 01 : Les piles à combustible

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique	3
I.3 Principe de fonctionnement	4
I.4 Différents types des piles à combustible :	5
I.4.1 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)	7
I.4.2 Pile à méthanol direct (DMFC).....	7
I.4.3 La pile Alcaline (AFC).....	8
I.4.4 La pile à acide phosphorique (PAFC).....	8
I.4.5 Piles à combustible à haute température.....	9
I.4.5.1 Pile à carbonate fondu (MCFC)	9
I.4.5.2 La pile à oxyde solide(SOFC).....	10
I.5 Applications	10
I.5.1 Les applications portables	10
I.5.2 Les applications stationnaires	11
I.5.3 Les applications de transport.....	13
I.6 Les avantages et inconvénients des piles à combustible :	14
I.6.1 Les avantages :.....	14
I.6.2 Les Inconvénients :	14
I.7 La pile à oxyde solide (SOFC):.....	14
I.8 La modélisation de la SOFC	17
I.9 Raisons du choix	19
II. Validation du modèle de système SOFC.....	20
II.1. Caractéristiques statique de la pile SOFC	20
II.3 Conclusion	23

CHAPITRE 02 : La Command PID Floue

I.1 Introduction.....	24
I .2 Le régulateur PID.....	24
I .2.1 Définition	24
I .2.2 Principe du correcteur PID.....	24
I.2.3 Aspect fonctionnel et structurel d'un régulateur PID	25
□ Action proportionnelle.....	25
□ Action intégrale.....	26
□ Action dérivée.....	27
I.2.4 Les différentes structures du PID	27
□ La structure parallèle :	28
□ La structure mixte :	28
□ La structure série :	28
II. Command Floue	29
II.1 Historique.....	29
II.2 Principe fondamental de la logique floue	29
II.3 Structure d'une commande floue	30
□ Fuzzification	31
□ Base de connaissance	31
□ Inférences floues	31
□ Défuzzification.....	31
II.4 Opérateurs de la logique floue	31
□ Opérateur NON.....	32
□ Opérateur ET.....	32
□ Opérateur OU.....	33
II.5 Les ensembles flous.....	34
II.5.1 Caractéristiques d'un sous ensemble flou	35
□ Support.....	35
□ Hauteur	35
□ Noyau.....	35
□ Fonction d'appartenance.....	36
II.6 Conclusion	37

CHAPITRE 03 : Commande PID floue adaptative de la pile à combustible SOFC

III.1 Introduction	38
III.2 Stratégie de commande.....	38
III.3 Résultats de simulation.....	42
III.4 Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	46
Références.....	47

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau 1-1 : les différences entre les piles à combustibles	6
--	---

CHAPITRE III

Tableau 3-1 : Symbole de sept intervalles ou sous-ensembles flous	41
Tableau 3-2 : Règles floues pour K_p	41
Tableau 3-3 : Règles floues pour K_i	41
Tableau 3-4 : Règles floues pour K_d	42

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure 1-1 : Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.....	4
Figure 1-2 : schéma de principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	5
Figure 1-3 : un portable chargé par une PAC model POWERTREEK (MyFc).....	11
Figure 1-4 : L'installation Siemens-Westinghouse de Irvine (220 kW) (2002).....	12
Figure 1-5 : Schéma d'une voiture équipé de la pile à combustion.....	13
Figure 1-6 : Schéma de principe d'une pile SOFC.....	15
Figure 1-7: Schéma de fonctionnement d'une SOFC(Module plan testé par le Centre de Jülich).....	16
Figure 1-8 : Schémas bloc du modèle d'une pile SOFC.....	20
Figure 1-9 : Caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes températures.....	20
Figure 1-10 : Caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes températures.....	21
Figure 1-11 : Caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes débit du combustible...	21
Figure 1-12 : Caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes débit du combustible....	22
Figure 1-13 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (avec un courant de charge variable)	22
Figure 1-14 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (avec un débit de combustible variable).....	23

CHAPITRE II

Figure 2-1 : Correcteur PID parallèle.....	25
Figure 2-2 : Influence de l'action proportionnelle	26
Figure 2-3 : Influence de l'action intégrale.....	26
Figure 2-4 : Influence de l'action dérivée	27
Figure 2-5 : La structure parallèle.....	28
Figure 2-6 : La structure mixte	28
Figure 2-7 : La structure série.....	28
Figure 2-8 : Structure interne d'un régulateur flou	30
Figure 2-9 : Opérateur NON	32

Figure 2-10: Opérateur ET	33
Figure 2-11 : Opérateur OU	34
Figure 2-12 : Fonctions d'appartenance : (a) logique binaire, (b) logique flou	35
Figure. 2-13 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou A	36
Figure 2-14: Types de fonctions d'appartenance	36

CHAPITRE III

Figure III-1 : Stratégie de commande floue du système SOFC	38
Figure III-2 : Fonctions d'appartenance des entrées	39
Figure III-3 : Fonctions d'appartenance des sorties	40
Figure III-4 : Le courant de charge I_D	42
Figure III-5 : La tension de sortie V_s	43
Figure III-6 : Le débit du combustible q_F	43
Figure III-7 : Le taux d'utilisation du combustible U_f	44

Liste des abréviations et symboles

Abréviations :

a	Anode
c	Cathode
n	Nombre d'électrons participant à la réaction
r	Résistance ohmique (Ω)
I_L	Courant de limitation (A)
E	Potentiel réversible en circuit ouvert (V)
E_o	Potentiel cellulaire réversible standard (V)
τ	Constante de temps (s)
∂	Tafel constant
β	Pente de Tafel
n	Nombre d'électrons participant à la réaction
r	Résistance ohmique (Ω)
I_L	Courant de limitation (A)
E	Potentiel réversible en circuit ouvert (V)
E_o	Potentiel cellulaire réversible standard (V)
I	Courant de pile (A)
V_s	Tension de pile (V)
V_a, V_c	Le volume (V)
V_{act}	Pertes d'activation (V)
V_{ohm}	Pertes ohmiques (V)
V_{conc}	Pertes de concentration (V)
R	Constante de gaz, 8.3143 j/(mol k)
T	Température du gaz (K)
T_s	Température cellulaire (K)
F	La constante de Faraday (96487 C/mol)
N_0	Nombre de cellules dans la pile
I	Courant de pile (A)
H_2	Hydrogène
O_2	Oxygène
H_2O	Eau

P_{H_2}	Pression partielle d'hydrogène (atm)
P_{H_2O}	Pression partielle de l'eau (atm)
P_{O_2}	Pression partielle d'oxygène (atm)
q_O	Débit d'oxygène à l'entrée (mol/s)
q_H	Débit de carburant en entrée (mol / s)
in	Entrée
out	Sortie
PAC	pile à combustible
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membranes Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell

Introduction générale

Introduction générale

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles, attendu vers la fin de ce siècle sont à la base de l'orientation vers une source, ou méthode de production d'énergie renouvelable et écologique (énergie solaire, énergie hydraulique, éolienne, géothermie...). Pour cela, entreprises, centres de recherche et universités s'orientent actuellement vers des solutions autour des piles à combustible et ceci dans différents secteurs (électronique, téléphones portables, véhicules, avionique, production stationnaire d'électricité, chauffage...) et investissent dans le développement de cette technologie qui présente un faible taux d'émission de gaz polluant.

La pile à combustible est une alternative sérieuse (en Anglais : Fuel Cell (FC)). Par son rendement électrique et énergétique élevé, ses très faibles émissions de gaz nocifs, sa faible nuisance sonore et sa production localisée, occupe une place très importante dans ce domaine. Ces avantages expliquent les motivations fortes pour le développement et la recherche dans ce domaine. Dans le futur proche, la technologie des piles à combustible sera considérée comme source d'énergie primaire renouvelable, en particulier pour les applications de transport. Cependant, pour faire face au double défi de réduire les rejets en polluants, émis par les véhicules et leurs émissions de gaz à effet de serre, les constructeurs automobiles ont lancé de vastes programmes de recherche afin d'utiliser l'hydrogène comme carburant dans des piles à combustible n'émettant que de la vapeur d'eau ; toutefois l'impact de l'hydrogène sur la traction automobile dépendra largement de son mode de production et de l'ensemble des coûts du cycle énergétique de la production à la consommation qui, pour l'instant, nécessitent aussi beaucoup de travaux de recherche.

Les piles à combustible produisent de l'énergie électrique par un processus électrochimique dans lequel l'hydrogène et l'oxygène se combinent pour former de l'eau. Cette réaction peut se produire dans un domaine très large de température (60-1000°C).

Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) semblent pouvoir prendre une place importante au sein de la grande famille des piles à combustible vu leurs rendements élevés (le

rendement électrique pouvant dépasser 50%) et leur capacité à co-générer de l'électricité et de la chaleur qui est dû à leur haute température de fonctionnement.

Les contrôleurs conventionnels proportionnels-intégraux-dérivés (PID) dominent dans les systèmes de contrôle des centrales électriques en raison de leur fiabilité et de leur simplicité. Cependant, des études ont montré que les contrôleurs PID conventionnels ne sont pas adaptés au contrôle des SOFC. Pour faire face aux difficultés de contrôle des SOFC, des stratégies de contrôle plus avancées devraient être appliquées. Avec les caractéristiques d'une grande robustesse et de performances de contrôle satisfaisantes dans les systèmes non linéaires, les stratégies de contrôle prédictif par modèle (MPC) attirent de plus en plus l'attention des chercheurs. Diverses stratégies MPC basées sur différents modèles [1,2] ont été développées pour le contrôle des SOFC, et elles ont toutes des résultats de simulation satisfaisants. Cependant, pour appliquer les méthodes MPC, une énorme quantité de calculs est nécessaire, ce qui entraînera la demande d'ordinateurs hautes performances. Ceci ajoute à la difficulté de réaliser ce type de schéma de commande.

Compte tenu des inconvénients de la stratégie MPC, nous avons choisi de nous concentrer sur la commande par logique floue. Le contrôle de logique floue (FLC) est une sorte de schéma de contrôle basé sur les règles de logique floue créées par des experts dans le domaine. Le contrôle à logique floue est robuste, facile à régler et peut contrôler plusieurs sources d'entrée et de sortie. De plus, avec une série de règles de logique floue bien conçues, FLC peut atteindre de bonnes performances de contrôle avec une petite quantité de calcul. Pour ces raisons, les schémas de contrôle à logique floue sont couramment utilisés pour les systèmes non linéaires tels que les piles à combustible [3]. Le contrôleur proposé combine les commandes FLC et PID, et le rôle du contrôleur flou est de modifier le gain de proportion K_p et le gain intégral K_i , en même temps. Du fait de la contrainte du débit de carburant, une structure anti-windup basée sur la méthode de rétro-calcul est appliquée pour atténuer le phénomène de saturation des actionneurs. De plus, le contrôleur proposé applique un algorithme différentiel avant pour réduire le phénomène de « snap back » de l'action dérivée et améliorer en même temps la robustesse du contrôleur.

Ce mémoire est divisé en trois chapitre :

Le premier chapitre comporte une étude théorique sur les piles à combustibles, leurs caractéristiques électriques et chimiques. Ensuite, le principe de fonctionnement et les

différents types des piles à combustible. Après, en mentionnant les domaines d'application et les techniques de stockage de l'hydrogène.

Dans **deuxième chapitre**, nous allons présenter les différentes configurations de la pile à combustible SOFC, la modélisation d'un stack du système SOFC, après, on mentionne les performances idéales et réelle de cette pile, enfin la validation du modèle de système avec la simulation par MATLAB.

Le dernier chapitre nous allons présenter la logique floue adaptative et son application à la commande. Ensuite, la théorie de sous-ensembles flous ainsi que la structure générale et les différents types de régulateurs flous, puis nous allons présenter la commande d'une pile à combustible SOFC par la logique floue, régulateur PID (proportionnel intégrale dérivée) et on termine ce chapitre avec des résultats de simulation.

Enfin, nous allons terminer par une conclusion générale résumée les différents résultats obtenus.

I

CHAPITRE 01 : Les piles à combustible

I.1. Introduction

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie interne d'un combustible d'une réaction directement en énergie électrique avec dégagement de la chaleur. Lorsqu'en 1802 Sir Henry David énonce 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 dizaine de degrés Celsius à plus de 1000 °C, selon l'électrolyte utilisé.

I.2 Historique

Le c'est dans le milieu du 19^{ème} siècle que Sir William Grove réalise la première pile à combustible en laboratoire [4]. Il s'agit d'une pile hydrogène/oxygène en milieu acide sulfurique dilué en contact avec des électrodes de platine.

Mais ce n'est qu'à partir des années 1930 que les piles à combustible deviennent crédibles, grâce aux travaux de l'ingénieur anglais F. T. Bacon qui peut être considéré comme le pionnier de leur développement industriel [4]. En effet, les premiers travaux de Bacon sur une pile à combustible hydrogène/ oxygène en milieu KOH aqueux conduisent à la réalisation en 1953 d'un premier prototype de puissance notable (1 A.cm⁻² à 0,8V) qui servira de modèle pour les futures piles à combustible utilisées lors des missions spatiales APOLLO.

Les acteurs du domaine énergétique français ne restent pas à l'écart des travaux de l'époque mais pour des raisons de faisabilité technique ou pour des raisons stratégiques (choix d'autres filières de production d'électricité) les programmes sont progressivement arrêtés. Ce n'est que dans les années 1990 que les recherches reprennent, notamment dans le domaine automobile. . En 1999, les recherches vont être encouragées (et financées) grâce à la création d'un réseau national de recherche technologique "pile à combustible" [5].

Elles sont poursuivies à l'heure actuelle par l'intermédiaire de projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ou d'autres organismes publics comme.

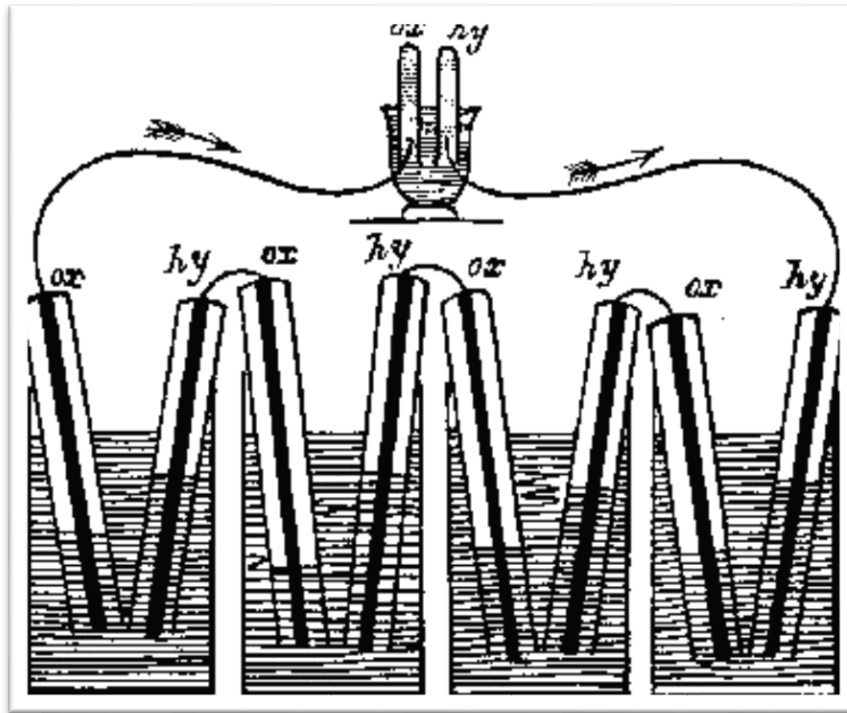


Figure 1-1 : Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839

I.3. Principe de fonctionnement

Mis Les PAC ont un principe de base similaire à celui de toutes les autres piles : l'oxydoréduction. La principale différence d'un point de vue conceptuel avec les piles classiques concerne la gestion et l'état des espèces chimiques qui réagissent. Dans le cas d'une pile classique, ce sont des phases aqueuses ou solides qui sont contenues dans la pile et sont consommées jusqu'à épuisement, ce qui constitue la fin de vie de la pile.

Dans le cas d'une PAC, les espèces chimiques sont des gaz extérieurs à la pile qui sont gérés comme des carburants et comburants classiques (comme l'essence et l'air pour une voiture). La figure 1-2 explicite le fonctionnement d'une PAC [6].

A l'anode, se produit une réaction d'oxydation du combustible où des électrons sont libérés et circulent dans le circuit électrique.

Du côté cathodique, l'oxydant est réduit et cette réaction consomme des électrons. Ces réactions produisent et/ou consomment aussi des ions qui sont transportés au travers de l'électrolyte. Enfin, les produits sont évacués par les mêmes canaux qui transportaient les gaz réactants. Ce dispositif constitue une cellule de pile à combustible.

Une pile est alors l'assemblage en série de plusieurs cellules.

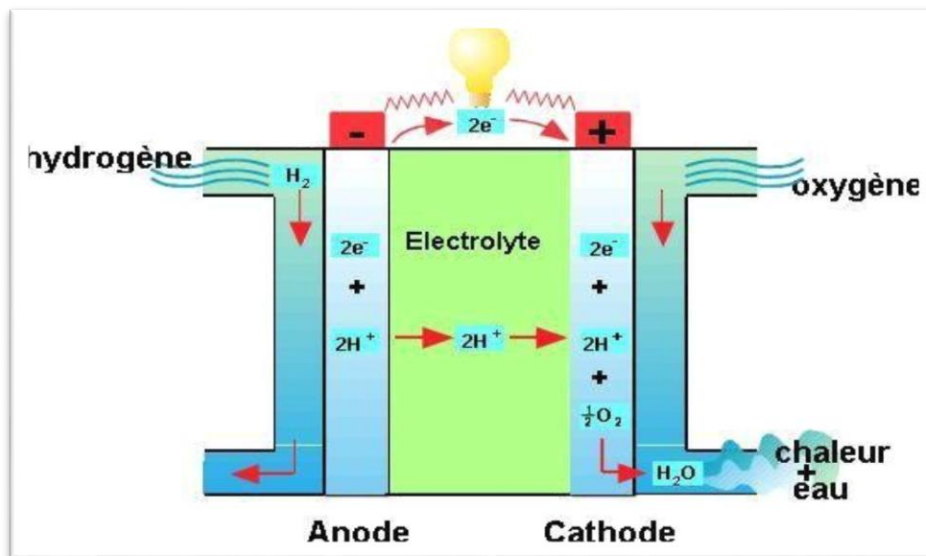


Figure 1-2 : schéma de principe de fonctionnement de la pile à combustible

I.4. Différents types des piles à combustible :

On compte actuellement six types de piles à combustible qui se différencient selon la nature de leur électrolyte et le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Les différents types de piles sont :

PàC	Electrolyte	T° fonctionnement	Combustible	Comburant
AFC	Solution KOH	<100°C	H2 pur	Air ou O2 pur
PEMFC	Membrane à échange de protons (à base de fluor)	50-85°C	H2 pur	Air ou O2 pur
DMFC	Membrane à échange de protons	60-120°C	CH3OH	Air ou O2 pur

PAFC C	Acide phosphorique	160-220°C	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ O H	Air
MFC C	Mélange de Li ₂ CO ₃ et de KCO ₃	600-800°C	H ₂ , CH ₄	Air
SOF C	Oxyde de zirconium stabilisé ZrO ₂ et yttrium Y ₂ O ₃	600-1000°C	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH, CO	Air

Tableau 1-1 : Les différences entre les piles à combustibles

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

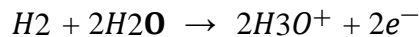
✓ Les piles à combustible à Basse Température

On distingue quatre types qui sont : PEMFC, DMFC, PAFC et AFC

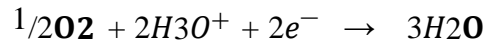
I.4.1. Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

C'est la technologie la plus prisée surtout après l'avènement des membranes Nafion au début des années 80. Elle fonctionne à des températures basses (80°C) de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Cette dernière permet le passage des protons H⁺, un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes, cependant, le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur. Quant aux plaques bipolaires, elles peuvent être conçues de trois manières différentes à savoir en composite, en métal ou en graphite. La PEMFC présente une densité de puissance élevée, un poids léger et un volume faible. Pour fonctionner, cette technologie nécessite seulement de l'hydrogène et de l'oxygène provenant de l'air [8, 9]. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

À l'anode :



À la cathode :

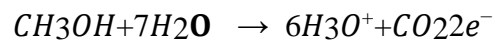


I.4.2 Pile à méthanol direct (DMFC)

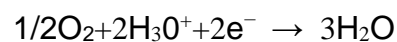
Une pile qui utilise du méthanol et l'eau comme combustible directement sur l'anode. Elle utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions qui se présente sous forme de membrane.

Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone [10,11]. Les plaques bipolaires sont, quant à elles, faites de graphite, de métal ou de composite. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

À l'anode :



À la cathode :

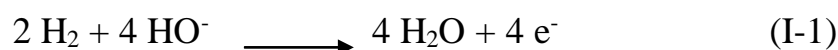


I.4.3 La pile Alcaline (AFC)

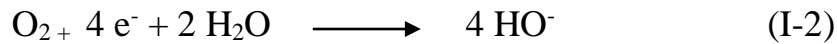
Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se trouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 60° à 90°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes :

À l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction:



Et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (OH^-). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques [6].

L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le CO_2 contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante :



Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage en reliant plusieurs piles en série.

I.4.4. La pile à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou Hôpitaux. Les avantages des PAFC sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C).

Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système. Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans températures variant de 150 à 220°C [12].

A l'anode



Et à la cathode :



I.4.5 Piles à combustible à haute température

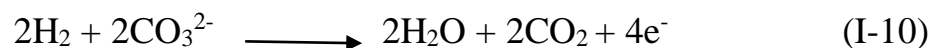
On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC

I.4.5.1 Pile à carbonate fondu (MCFC)

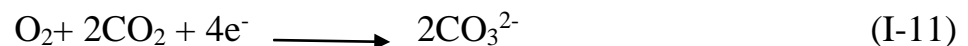
Le développement des piles à combustible à carbonate fondu a débuté dans le milieu du vingtième siècle.

Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voire supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs, De plus les MCFC peuvent utiliser une large gamme de carburant, et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas des piles à basses températures [13].

A l'anode, on a la réaction suivante :



Au niveau de la cathode :



I.4.5.2 La pile à oxyde solide(SOFC)

Le principe de fonctionnement des SOFCs est basé sur le mécanisme suivant : L'oxygène est dissocié à la cathode en O²⁻, puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

À l'anode :



Et à la cathode :



La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à haute température qui est de l'ordre de 650°C à 1000° C. Pour cela, c'est une pile généralement exploitée en cogénération et destinée à la production d'électricité décentralisée pour des gammes de puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW.

L'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés, en passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures.

L'électrolyte est solide, habituellement du Zircon (Zr₂) dopé avec de l'yttrium (Y³⁺), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O²⁻). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [14, 15].

I.5 Applications

Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples, ils sont généralement classés en trois grandes familles d'application: portables, stationnaires et transport. Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples, ils sont généralement classés en trois grandes familles d'application: portables, stationnaires et transport.

I.5.1 Les applications portables

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW, 50 mW en veille et quelques watts en conversation) et l'ordinateur portable (qui consomme en moyenne 10 W). Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même la plus performante comme la batterie lithium-ion.

Cette dernière atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse généralement quelques jours d'autonomie à un téléphone portable et environ 3 heures à

un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux alors que la batterie électrochimique est proche de ses limites. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des «Portables»: 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions en 2005; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions en 2005.

La solution qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux États-Unis, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission.

L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle.



Figure 1-3 : un portable chargé par une PAC model POWERTREEK (MyFc).

I.5.2 Les applications stationnaires

Compte tenu de la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux États-Unis.

L'activité est centrée sur deux grands Domaines d'applications: la production collective (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 200 kW à quelques MW) et la production individuelle ou domestique (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC.

Même si d'autres technologies (MCFC et SOFC) font également l'objet de tests, mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation proche. Dans le domaine de la production individuelle (habitat), plusieurs projets sont en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle et la première commercialisation était en 2002, avec un coût annoncé autour de 0,10 \$/kWh électrique. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur à 60°C (chauffage et eau chaude).

Ils sont alimentés par des combustibles classiques: un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Le marché mondial potentiel des piles à combustible, pour le seul stationnaire, est estimé à près de 60 milliards de dollars à l'horizon 2030. Quant au coût objectif, il se situe autour de 1300 \$/kWh installé pour le système complet. Il correspond au niveau actuel de développement de cette technologie ce qui explique les délais proches (à partir de 2002) généralement annoncés par les divers constructeurs (essentiellement américains jusqu'à maintenant) déjà engagés sur ce marché. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

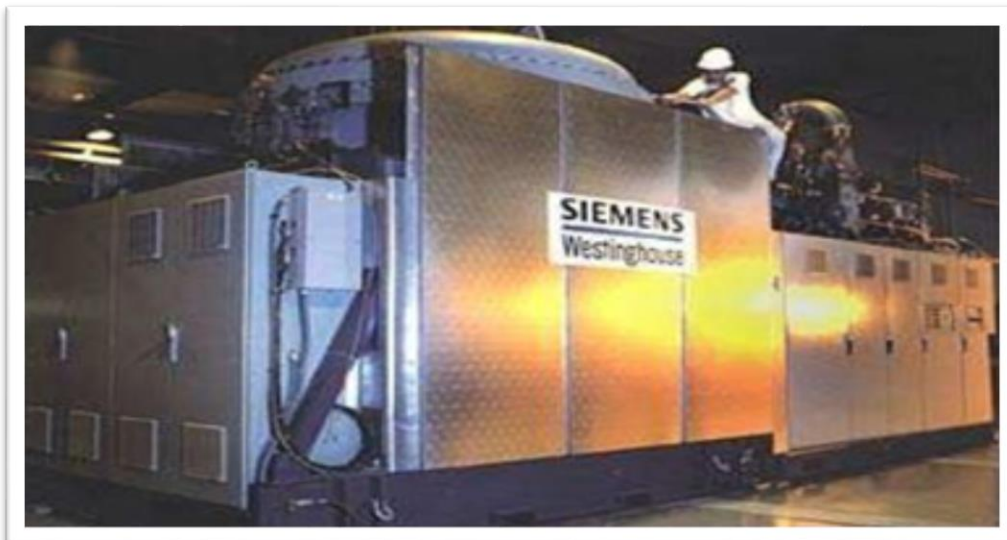


Figure 1- 4 : L'installation Siemens-Westinghouse de Irvine
(220 kW) (2002)

I.5.3 Les applications de transport

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à

combustible à partir du début des années 90, Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs besoins, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd.

Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue.

Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement (donc les coûts admissibles) ne seront pas du tous les mêmes.

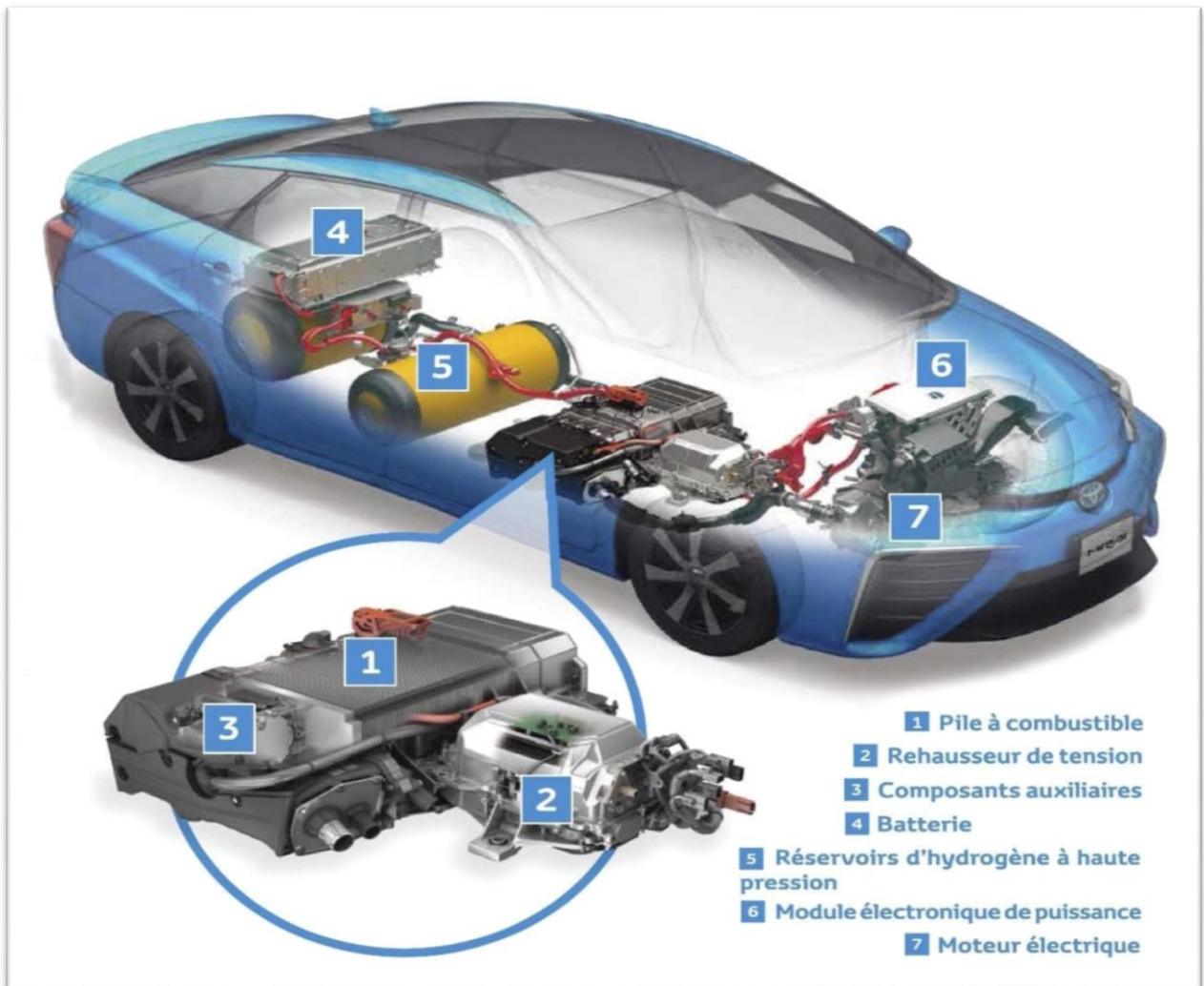


Figure 1-5: Schéma d'une voiture équipée de la pile à combustion.

I.6. Les avantages et inconvénients des piles à combustible

I.6.1. Les avantages

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- de hauts rendements énergétiques même à charge partielle,
- de faibles émissions sonores,
- peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé),
- elles sont de construction modulaire,
- diverses températures de fonctionnement (PEMFC),
- pas de parties rotatives [4]

I.6.2 Les Inconvénients :

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler :

- le coût,
- le poids et le volume,
- la durée de vie,
- la gestion thermique du module,
- le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi [4]

I.7. La pile à oxyde solide (SOFC)

Ce type de pile utilise un oxyde conducteur d'ions oxygène comme matériau d'électrolyte, La construction du Coeur de pile représenté (figure 1-6) est simplifiée par rapport aux autres systèmes puisque seulement deux phases sont requises lors de l'utilisation (gaz et solide). Grace à leur température de fonctionnement élevée (600-1000°C), les combustibles naturels peuvent être reformés à l'intérieur des cellules, par une catalyse rapide sans utiliser de métaux précieux.

Le fonctionnement se déroule à haute température pour permettre une bonne conductivité ionique de l'électrolyte.

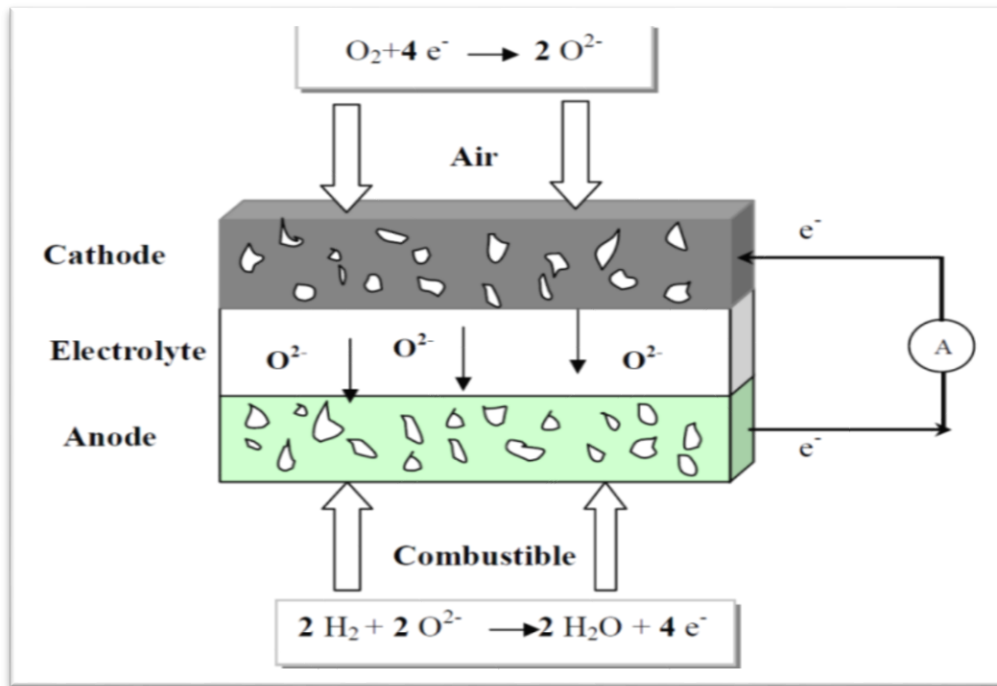


Figure 1-6 : Schéma de principe d'une pile SOFC

L'oxygène délivré par l'interconnecteur arrive à la cathode où il est réduit grâce aux électrons produits à l'anode, selon la demi-équation de réduction (1).



L'oxygène migre au travers de la cathode (sous sa forme ionique (O^{2-})), vers l'interface avec l'électrolyte. Celui-ci continue de diffuser sous sa forme ionique dans l'épaisseur de l'électrolyte sous l'effet d'un gradient de concentration et arrive à l'interface avec l'anode où il réagit avec le dihydrogène selon la réaction (2).



Ainsi, de l'eau est formée, elle est ensuite évacuée de l'anode et un courant électrique s'établit. Les électrons ainsi formés sont redistribués par un circuit externe à la cathode et servent à réduire l'oxygène.

La réaction globale (3) permet de créer de l'électricité et de la chaleur ($\Delta H_0 = -0,164$ kJ/mol à 25°C).



La caractéristique principale des SOFCs réside donc dans leur température de fonctionnement (600 à 1 000°C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Cette température présente un double avantage. Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, qui pourront être facilement reformés se passant de catalyseur à base de métaux nobles. Elle produit d'autre part une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération, le rendement pouvant atteindre ainsi 80%. Mais elle présente également un inconvénient, la mise en température est longue et complique toute utilisation à cycles courts et répétitifs (comme dans le cas de transport).

Pour ces raisons, la technologie se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1KW à quelques dizaines de MW). Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale.

La mise au point de ce type de pile, de par sa haute température de fonctionnement et la résolution des problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux est assez complexe.

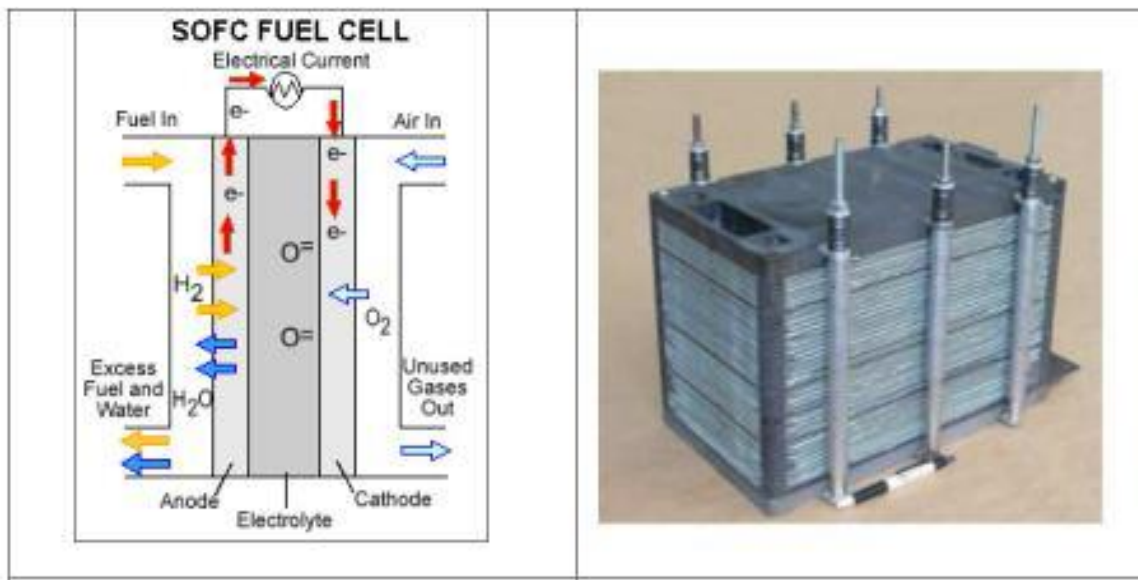


Figure 1-7: Schéma de fonctionnement d'une SOFC(Module plan testé par le Centre de Jülich)

Une des particularités de la SOFC et son électrolyte solide, habituellement du zirconium(Zr_2) dopé d'une mole de 8 à 10% d'ytterbium (Y_3^+), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O_2^-). Les SOFCs peuvent être de conceptions planes,

monolithique et tubulaires, et utiliser de l'acier inoxydable, de l'acier austénitique, des matériaux céramiques selon les températures de fonctionnement et l'électrolyte désiré.

I.8 La modélisation de la SOFC

Le fonctionnement de la SOFC est l'objet du couplage de plusieurs phénomènes : flux des réactifs, réactions électrochimiques, conduction ionique et électrique et transferts de chaleur.

L'intérêt pour la modélisation SOFC a augmenté de manière significative ces dernières années et la gamme des modèles développés vont de l'échelle microscopique (ex : interface entre l'électrolyte et les électrodes) à l'échelle macroscopique (ex : système pile).

On trouve des modèles qui s'intéressent à un phénomène donné ou des modèles qui font l'objet du couplage de plusieurs phénomènes : électrochimiques, thermiques et fluidiques. De nombreux auteurs ont modélisé la SOFC par un programme en 3-D. Sur la base d'un modèle 3-D. Autissier et Larrain, ont développé des modèles permettant de donner la distribution de la température, la concentration de gaz, le profil de vitesse à l'intérieur de la cellule et la densité de courant. D'autres modèles sont basés sur le même principe de modélisation en 3-D. demande une grande puissance de calcul, en particulier lors de la simulation d'un long processus transitoire avec un grand nombre de paramètres à étudier. En plus, cette modélisation demande une parfaite connaissance de la cellule à étudier (géométrie, propriétés physiques...). Des modèles trouvés dans la littérature ont réduit le modèle de la SOFC à du 2-D. passent de la structure complète à l'élément de répétition en considérant un volume moyen et en admettant que le nouveau volume représente les détails de la structure d'origine.

D'autre comme Song, considèrent que la chaleur et le transfert de masse se font suivant la direction longitudinale du système et la réaction électrochimique dans la direction perpendiculaire. Les résultats du modèle donnent le profil de la température le long de direction longitudinale ainsi que la densité de courant.

Certains auteurs résument le modèle à 1-D. Dans ces modèles, la direction étudiée est seulement le long de la direction du flux.

Les surtensions de concentration et de polarisation sont données et l'influence de

l'épaisseur des composants (anode, cathode et électrolyte) sur la tension de la cellule est calculée. Certains auteurs utilisent l'approche des volumes de contrôle (CV7) c'est le cas de Nagata et de Xue. Cette méthode de modélisation permet de diviser la cellule en plusieurs segments perpendiculaires au sens du flux des espèces. Chaque segment comprend des volumes de contrôle :

Anode, cathode, électrolyte et canaux. Dans chaque volume de contrôle, les bilans de conservation de masse et le bilan énergétique sont donnés ; la tension est calculée par la relation de Nernst. Ce type de modélisation permet de donner la distribution de température dans chaque segment, la distribution de courant et la tension le long du canal. Le nombre élevé de phénomènes physiques couplés au sein de la SOFC pousse certains auteurs à présenter un système SOFC par des schémas graphiques explicites appelés Bond Graph (principe d'analogie entre les domaines), Saisset, présentent un outil de modélisation par la méthode des bonds graph et dans ses études, il a regardé la mise en série et en parallèle des cellules SOFC.

La modélisation électrochimique par la spectroscopie d'impédance a été utilisée par plusieurs auteurs pour décrire les phénomènes électrochimiques au sein de la pile et c'est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la caractérisation d'une cellule ou d'un stack SOFC.

Les travaux de Wagner et Lang ont été spécialement consacrés à la modélisation de la SOFC par spectroscopie d'impédance électrochimique. Des relevés en courant/tension de la pile à différentes fréquences permettent d'établir un circuit électrique équivalent (voir. Le modèle est rendu plus attractif grâce aux différents tests (différentes température de fonctionnement, différentes compositions de gaz, différents débits de gaz et différents courants de charge) puis les différents composants du circuit électrique sont calés par régression pour approcher les spectres d'impédance.

D'autres auteurs s'intéressent plus spécialement à la modélisation électrochimique des électrodes (ex : les travaux de Bieberle ont été consacrés à la modélisation par spectroscopie d'impédance de l'anode).

La modélisation par des équations d'état permet de relier l'ensemble des grandeurs qui décrivent l'état d'un système SOFC (ex : température, débit, pression...).

Parmi les auteurs qui ont adopté cette méthode de modélisation, Qi et al qui a développé un modèle dynamique non linéaire de la SOFC par un système d'état.

Le modèle développé permet de décrire la dynamique et la réponse de la SOFC par rapport à un échelon des entrées du système d'état (ex : réponse à un échelon de température, de pression ou de courant).

Certains auteurs utilisent la modélisation par un système d'état pour décrire les phénomènes électrochimiques dans les électrodes.

Les travaux de Bieberle et al [BIE00] ont été marqués par l'utilisation de cette méthode pour modéliser l'impédance électrochimique de l'anode et il a développé un algorithme de calcul de l'impédance de l'anode puis grâce à la technique de la spectroscopie d'impédance, cette impédance a été finement définie.

I.9. Raisons du choix

Dans les applications à haute température de fonctionnement, la pile à oxyde solide retient l'attention pour les raisons suivants :

- Elle peut fonctionner avec divers carburants : hydrogène, gaz naturel, monoxyde de carbone qui peuvent être utilisés directement à raison de la température élevée.
- Une résistance au soufre d'une ou deux fois plus supérieurs à celle des piles à acide phosphorique (PAFC) et à carbonate fondue (MCFC).
- L'absence des métaux nobles permet de réduire son coût.
- Son rendement élevé (70%) si elle est utilisée dans la cogénération (production simultanée de l'électricité et de la chaleur) ou elle est couplée avec turbine à gaz.

II. Validation du modèle de système SOFC

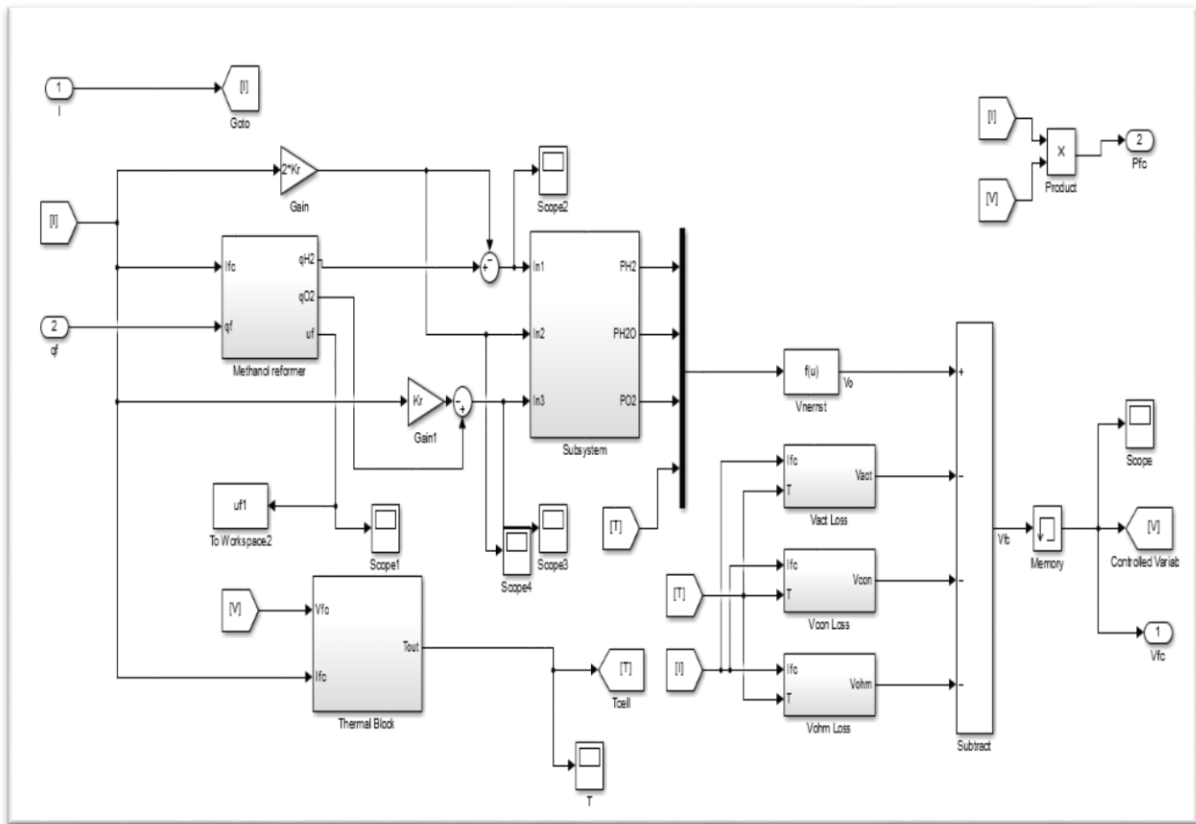


Figure 1-8 : Schémas bloc du modèle d'une pile SOFC

II.1. Caractéristiques statique de la pile SOFC

Les courbes de la tension en fonction du courant (V-I) en régime permanent du modèle d'empilement SOFC à différentes températures sont illustrées à la figure 1-9.

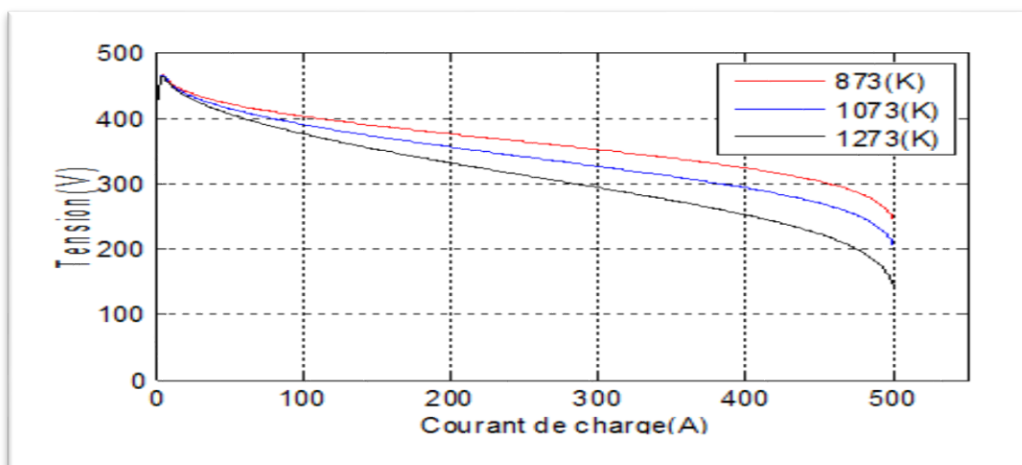


Figure 1-9 : Caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes températures.

Dans la région à faible courant, la tension de sortie de la SOFC est légèrement supérieure à des températures plus basses, tandis que dans la région à courant élevé, la tension est plus élevée à des températures plus élevées. La raison principale est le terme négatif dans l'expression du potentiel interne en circuit ouvert, ainsi que de l'activation et de la chute de la tension ohmique en fonction de la température.

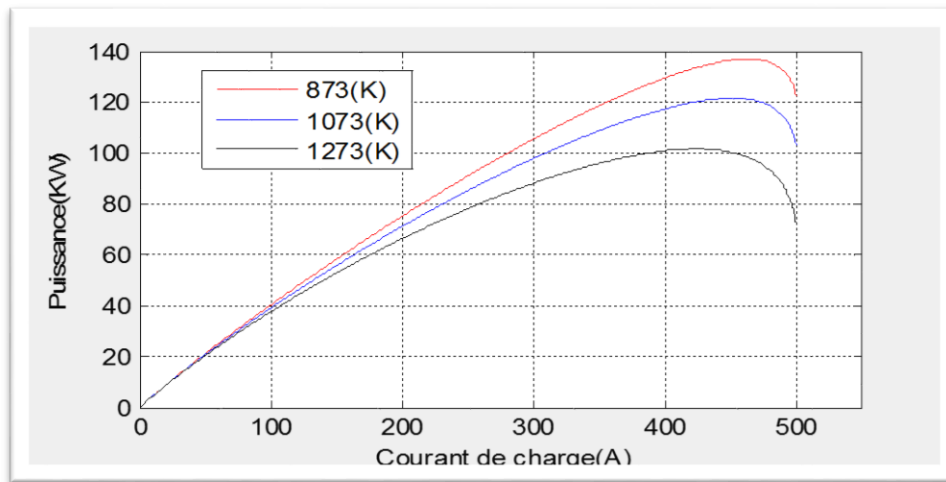


Figure 1-10 : Caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes températures.

Les courbes de puissance en fonction du courant (P-I) du modèle SOFC à différentes températures sont illustrées à la (Fig. 1-10). Avec des courants de charge plus élevés, une puissance de sortie plus élevée peut être obtenue à des températures de fonctionnement plus élevées. Sous chaque température de fonctionnement, il existe un courant critique, où la puissance de sortie du modèle atteint sa valeur maximale.

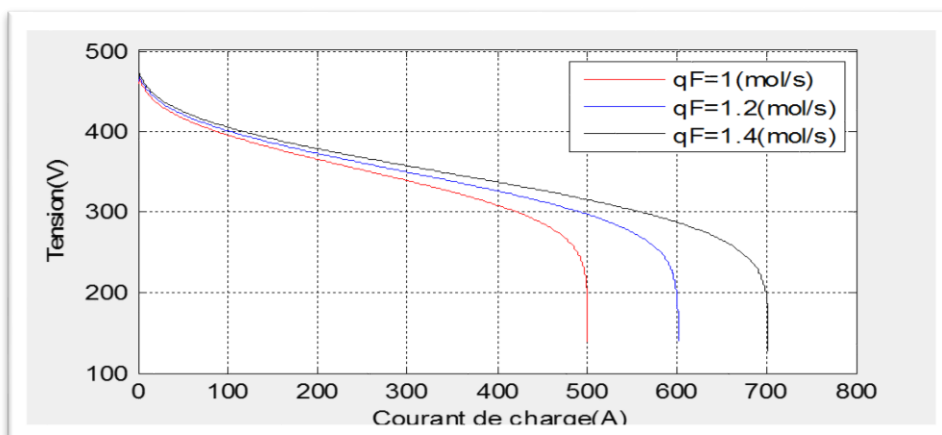


Figure 1-11 : Caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différents débits du combustible

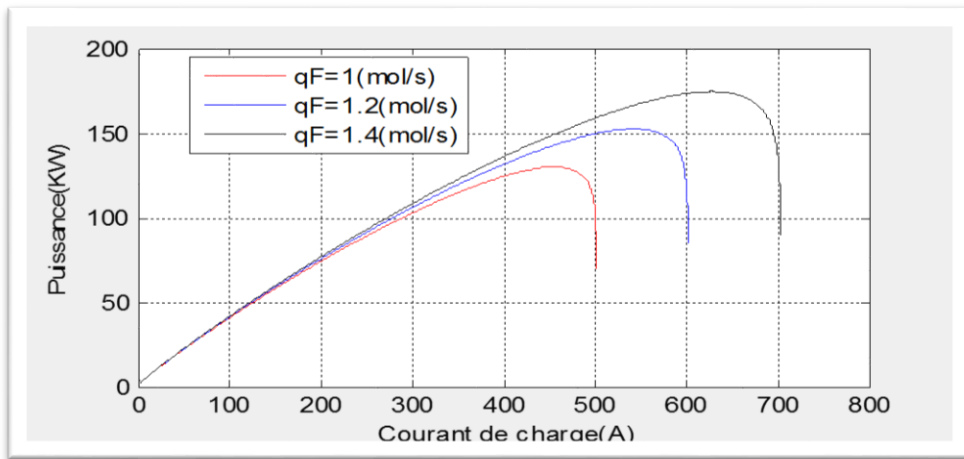


Figure 1-12: Caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes débit du combustible

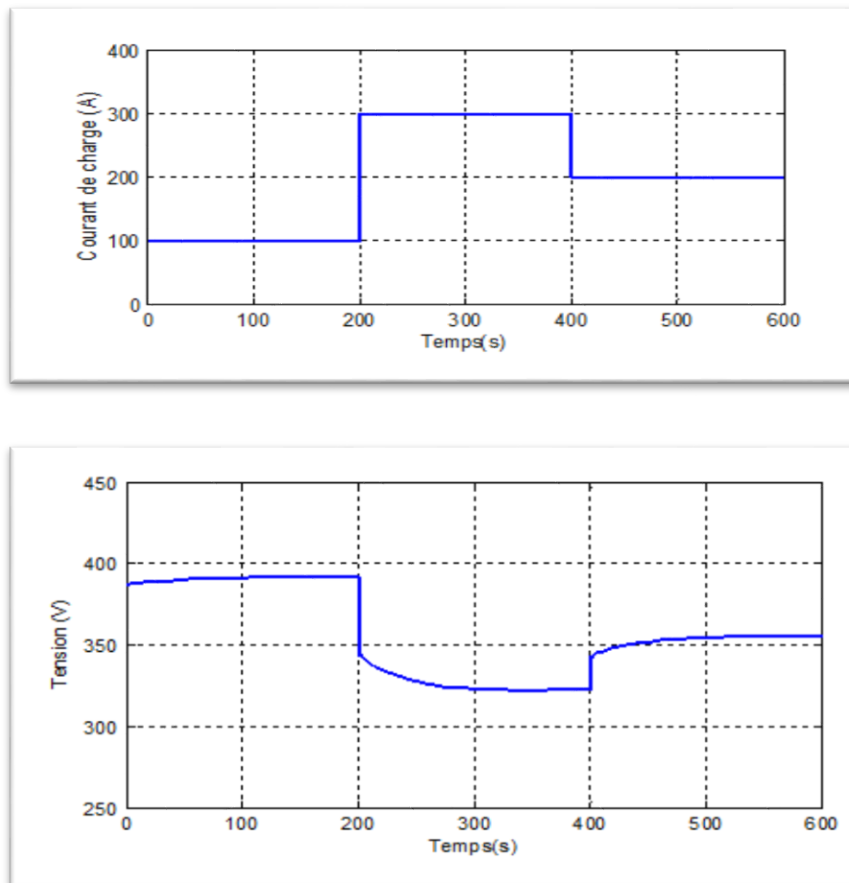


Figure 1-13 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (avec un courant de charge variable)

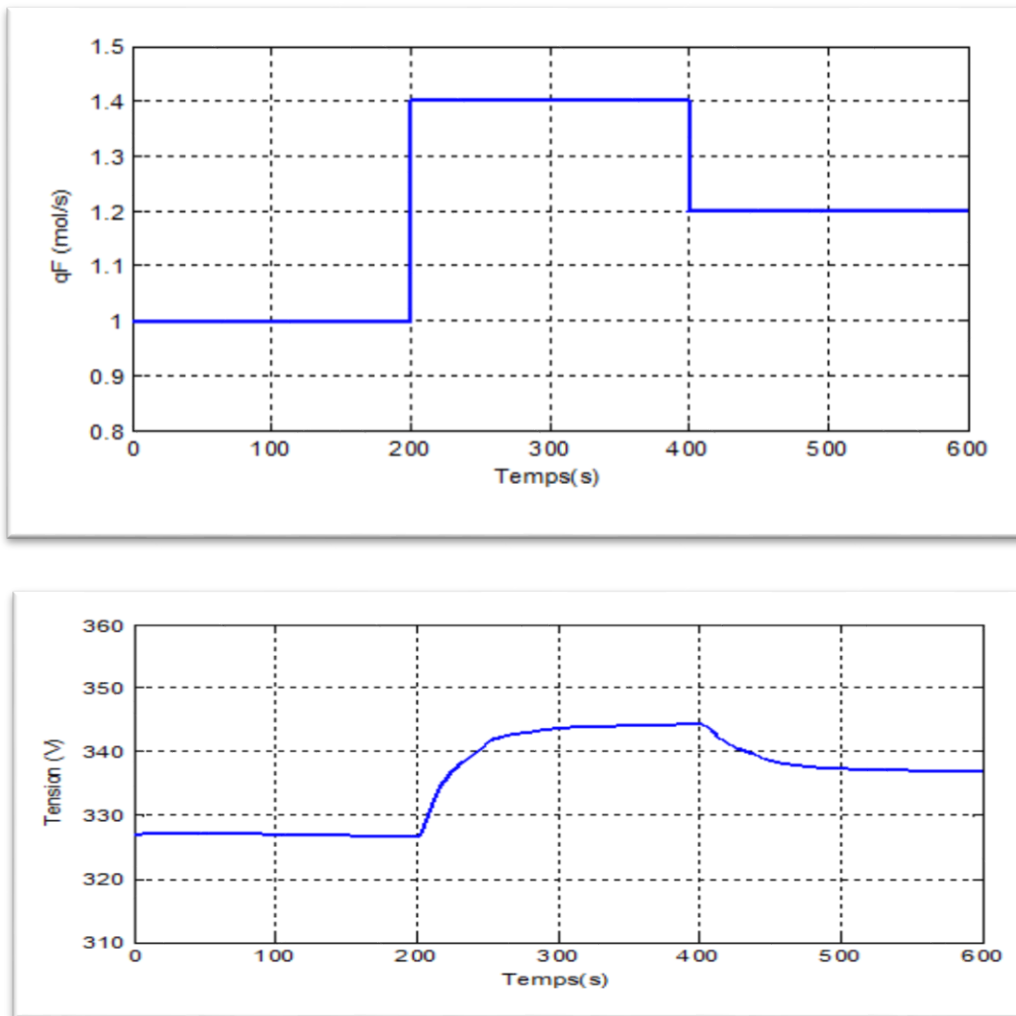


Figure 1-14 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (avec un débit de combustible variable)

II.3 Conclusion

La pile à combustible offre à un faible coût de découverte d'un système énergétique qui entre le domaine des énergies renouvelables. Dans ce chapitre I, nous avons commencé par une introduction sur les piles à combustible, en débutant par un bref historique qui donne un aperçu du développement qu'a connu la pile à combustible depuis 1839 Les différents types de pile ont été présentés puis classés selon leur température de fonctionnement et la nature de leur électrolyte .

Dans le chapitre suivant on va modéliser la pile à oxyde solide SOFC en donnant toute les équations mathématique à fin d'obtenir la tension à la sortie de la pile.

II

CHAPITRE 02 : La Command PID

Floue

I.1 Introduction

La commande adaptative consiste à utiliser un ensemble de techniques pour l'ajustement automatique en ligne des boucles de commande afin de réaliser et de maintenir de meilleures performances dynamiques au système à commander.

Dans un système réel, il existe des paramètres qui se manifestent à l'intérieur de la même façon que des influences de l'environnement. Ces influences peuvent se présenter sous forme de perturbations généralement non mesurable. Le but de la commande adaptative est donc d'atteindre un certain objectif et le rendre optimal [16].

Deux types de structures de commande sont utilisés d'une manière générale.

- Dans le premier on estime les paramètres en ligne par un mécanisme d'adaptation. La loi de commande est calculée à partir des paramètres estimés. Ce type de schéma est appelé indirect.
- Dans le deuxième on peut également calculer les paramètres du régulateur à partir du mécanisme d'adaptation paramétrique. Ce type de commande est appelé direct.

I.2 Le régulateur PID

I.2.1 Définition

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

I.2.2 Principe du correcteur PID

Un correcteur PID est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure.

Le correcteur PID agit de trois manières :

- action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain G ;
- action intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain T_i ;
- action dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain T_d .

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici la plus classique : une structure PID parallèle qui agit sur l'erreur.

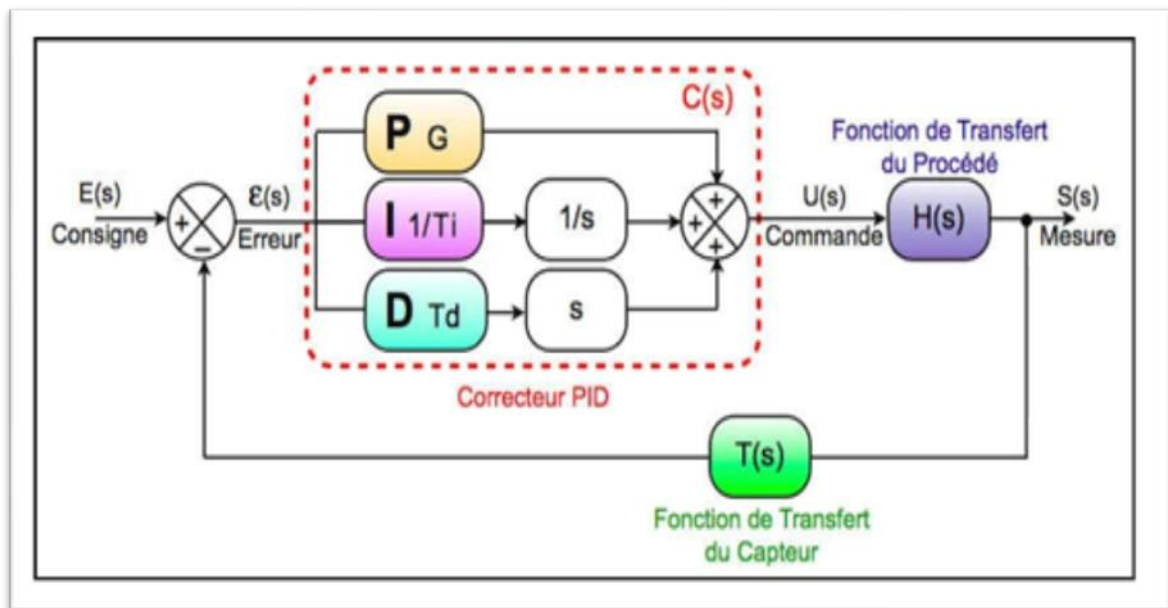


Figure 2-1 : Correcteur PID parallèle

I.2.3 Aspect fonctionnel et structurel d'un régulateur PID

- **Action proportionnelle**

L'action proportionnelle applique une correction instantanée pour tout écart entre la mesure et la consigne, plus la perturbation est grande, plus la correction apportée est grande.

L'équation de régulateur en fonction de temps est donnée comme suit :

$$Y(t) = K_C \cdot s(t) \quad (2.1)$$

L'effet de l'action proportionnelle est de réduire l'écart statique. Plus l'action est grande, plus l'écart est réduit, mais un excès d'action conduit à l'instabilité de la boucle.

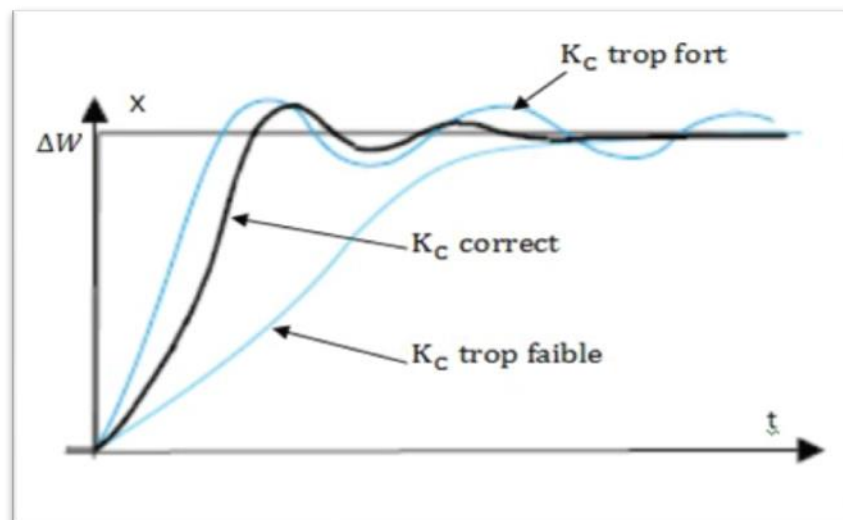


Figure 2-2 : Influence de l'action proportionnelle [20]

- **Action intégrale**

Cette action est complémentaire à l'action proportionnelle, elle permet de stabiliser dans le temps l'action proportionnelle, plus l'erreur mesurée est constante plus la correction est constante. L'action intégrale est conditionnée par le temps d'intégration T_i .

$$Y(t) = \int^t s(t) dt \quad (2.2)$$

L'action intégrale permet de supprimer l'écart statique, plus la constante T_i est petite plus l'action intégrale est forte, une action excessive (T_i trop faible ou K_c trop grand) conduit à une instabilité de la boucle (augmentation de déphasage).

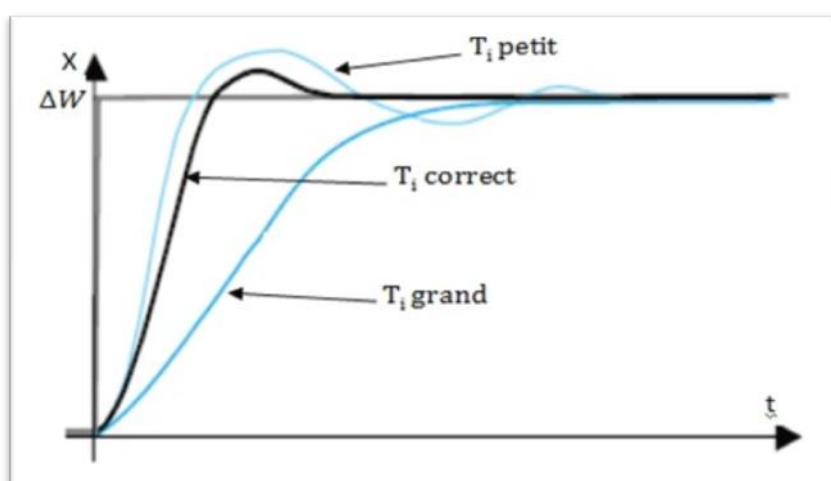


Figure 2-3 : Influence de l'action intégrale [20]

- **Action dérivée**

Cette action permet d'anticiper la réponse de la régulation en cas de perturbations rapide ou de modification de la consigne.

$$Y(t) = T_d \frac{ds(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Avec T_d : constante de temps dérivée Effet de l'action dérivée :

Plus la constante T_d est grande plus l'action dérivée est forte, L'action dérivée bien dosée permet de :

- réduire le dépassement ou les oscillations obtenues en action proportionnelle seule.
- d'accélérer la réponse de la mesure.
- d'améliorer la stabilité de la boucle.

Un excès de l'action dérivée conduit à l'instabilité du système bouclé.

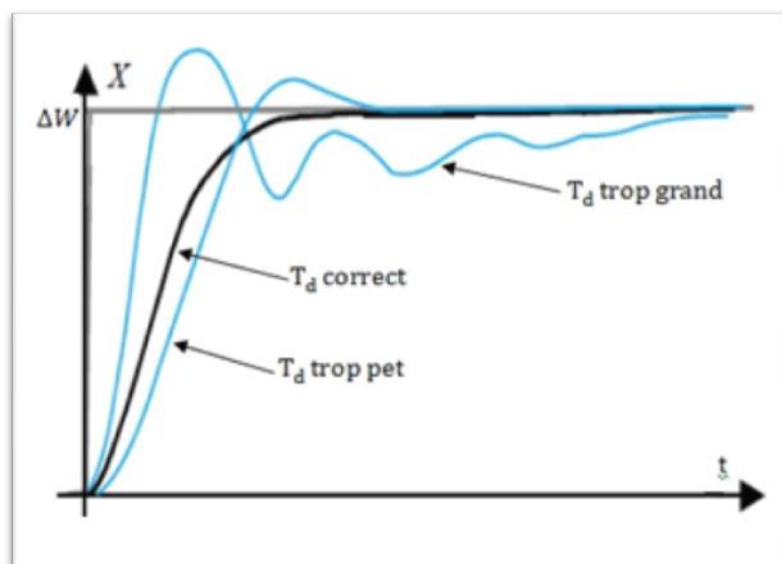


Figure 2-4 : Influence de l'action dérivée

I.2.4 Les différentes structures du PID

Différentes possibilités d'associations des modules P, I et D existent. Ces structures sont fonctionnellement équivalentes, et il est facile de convertir les coefficients utilisés dans l'une pour obtenir ceux d'une autre. Les trois configurations les plus utilisées sont :

- La structure parallèle :

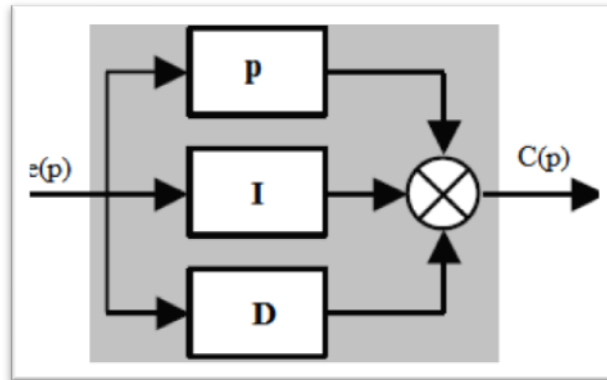


Figure 2-5 – La structure parallèle

- La structure mixte :

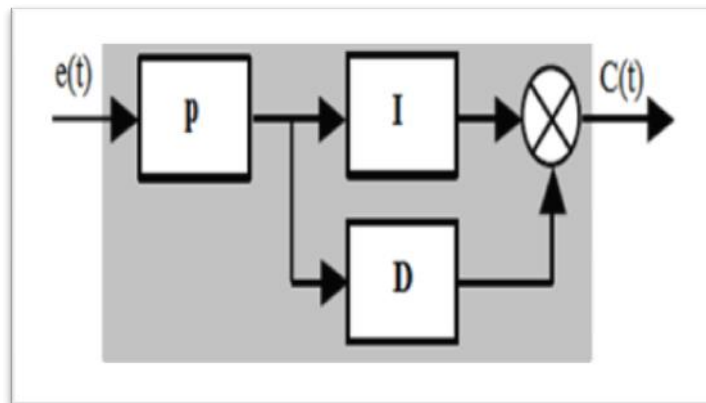


Figure 2-6 – La structure mixte

- La structure série :

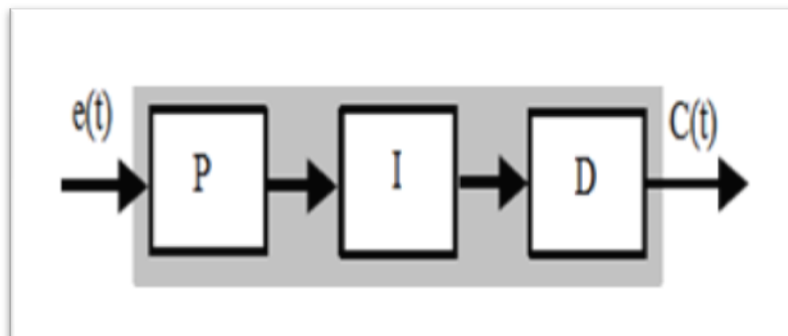


Figure 2-7 – La structure série.

II. Command Floue

Les connaissances sur lesquelles se base le raisonnement humain sont presque toujours entachées d'une quantité d'incertitudes et d'imprécisions, cette caractéristique est en réalité inhérente à l'homme et au monde puisqu'aucun de nos sens, ni de nos instruments de mesures, ne nous permet de décrire avec justesse et certitude ce que nous percevons du monde extérieur.

En systémique l'être humain est considéré comme un système à part entière, dont le raisonnement gère très bien les données imparfaites, et ce malgré la complexité et la diversité des situations rencontrées, ces performances ont retenues l'intérêt de certains chercheurs en théorie des systèmes dans les années 60, dont le fondateur de la logique floue, Lotfi Zadeh.

Notre objectif consiste à concevoir un système d'aide au diagnostique qui prend en charge ces imperfections sans modifier ni occulter la réalité sur les choses, les personnes et les pensées environnantes, en essayant de se rapprocher le plus possible des raisonnements que nous faisons tous les jours et qui vont des tâches les plus anodines aux décisions les plus conséquentes [22].

II.1 Historique

Quelques points de repère historique suivant, permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue et ses applications à la commande :

- 1965 la naissance du concept flou avec le Pr. Zadeh Lotfi (Californie) « Un contrôleur électromécanique doté d'un raisonnement humain serait plus performant qu'un contrôleur classique ». Théorie des « sous-ensembles flous ».
- En 1973 L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.
- En 1974, M. Mamdani introduisait la commande floue pour la régulation de processus industriel.
- En 1980 par une application sur un four à ciment, et en 1983 sur un épurateur d'eau.
- Grâce au chercheur japonais M. Sugene, la logique floue était introduite au Japon des 1985.
- 1995 J.S.R.Jang utilisé la logique floue élargie aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle.

II.2 Principe fondamental de la logique floue

Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est généralement fondé sur des données imprécises ou même incomplètes. En effet les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque sont généralement incertaines ou vagues, soit parce que nous avons un doute sur leur validité ou alors nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement.

Par exemple : dans la logique classique, une vitesse peut être qualifiée par le terme « Elevée ». Mais dans la logique floue, des échelons d'appréciation intermédiaires de la variable vitesse sont possibles. La «Vitesse» devient une variable linguistique dont les valeurs sont Par exemple : « Très faible », « Faible », « Moyenne », «Elevée », « Très élevée ». La logique floue peut être considérée comme une extension de la logique classique ou binaire.

II.3 Structure d'une commande floue

Un régulateur flou permet d'exprimer une loi de commande à l'aide d'un ensemble de règles de la forme « si prémisses alors conclusion». La majorité des contrôleurs flous développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani. Ce schéma est illustré par la Figure 2-8. Un régulateur est traditionnellement décomposé en quatre (04) blocs :

- **Fuzzification**
- **Base de connaissances**
- **Inférence**
- **Défuzzification**

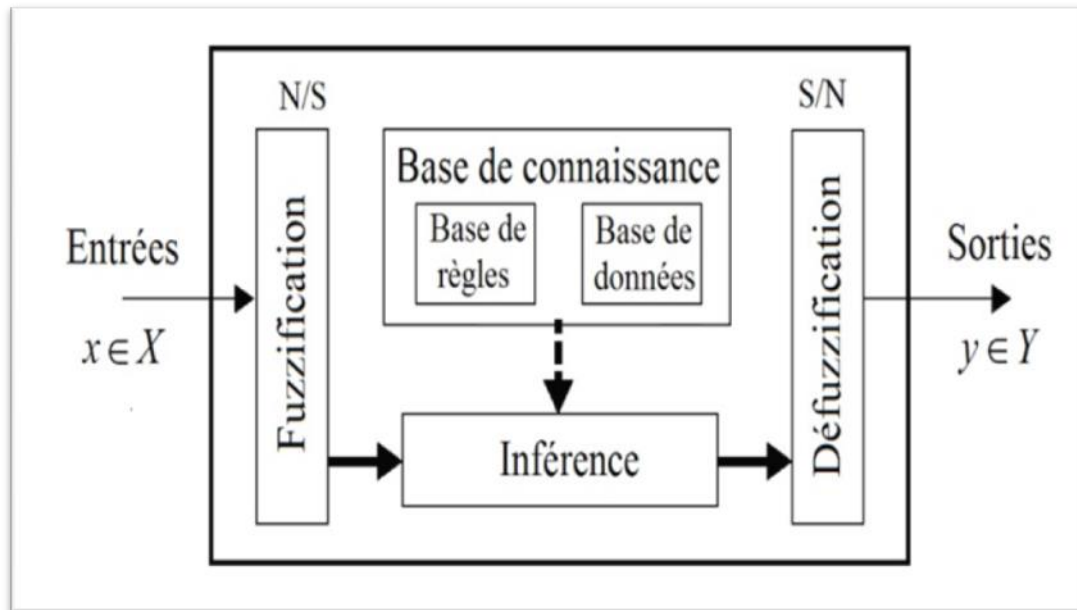


Figure 2-8 Structure interne d'un régulateur flou

- **Fuzzification**

La stratégie de cette opération consiste à convertir les grandeurs d'entrées et de sortie mesurées ou estimées en variables linguistiques, exprimées par des termes flous.

- **Base de connaissance**

Généralement cette base de connaissance est composée de l'ensemble des informations et des renseignements qu'on possède sur le processus à régler à partir d'une analyse empirique du système, et qui permet d'établir l'ensemble des fonctions et des règles floues du régulateur.

- **Inférences floues**

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme floue à partir d'une parfaite connaissance et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler.

Plusieurs approches sont proposées pour le traitement numérique des règles d'inférence à savoir :

- Méthode d'inférence max-min
- Méthode d'inférence max-produit
- Méthode d'inférence somme-produit

- **Défuzzification**

Cette étape consiste à transformer la valeur floue ou linguistique issue du régulateur flou en valeur numérique. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature, telles que la méthode du maximum, la méthode de la moyenne des maximums et la méthode du centre de gravité. Néanmoins, il n'existe pas des critères de choix de l'une de ces méthodes.

II.4 Opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs **ET** ou **OU**. Il s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. De plus il existe un opérateur **NON** (complément, négation, inverse).

- **Opérateur NON**

Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire.

$$\bar{c} = a = \text{NON}(a) \quad (2.4)$$

Est défini par les éléments de x qui n'appartiennent pas à l'ensemble a .

Dans le cas de la logique floue, cette définition peut être exprimée par les fonctions d'appartenance de la manière suivante :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), x \in u \quad (2.5)$$

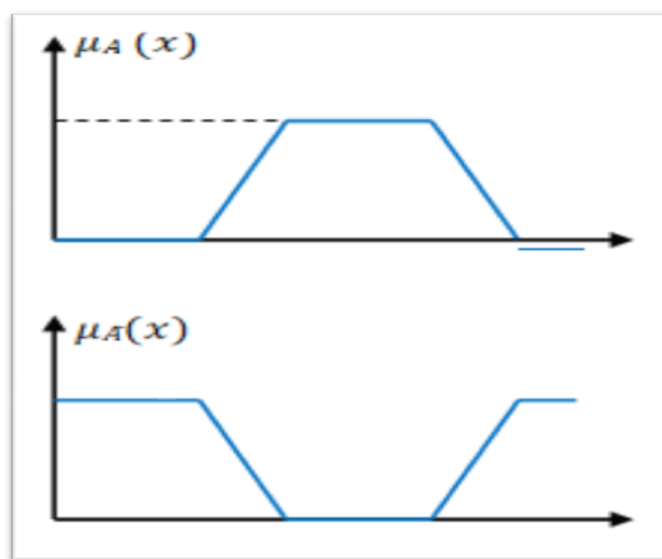


Figure 2-9: Opérateur NON

- **Opérateur ET**

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles a et b et on écrit :

$$C = a \cap b = a \text{ E } TB \quad (2.6)$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A et B à savoir :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), x \in u \quad (2.7)$$

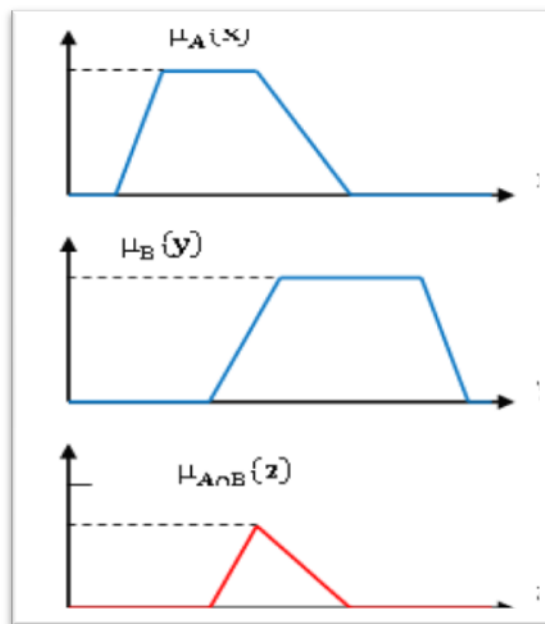


Figure 2-10: Opérateur ET

- **Opérateur OU**

L'opérateur OU correspond à l'union de deux ensembles a et b, on a donc :

$$c = a \cup b = a \text{ OU } b \quad (2.8)$$

La réalisation de l'opérateur OU au niveau de la logique floue se fait en général par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur maximum.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), x \in u \quad (2.9)$$

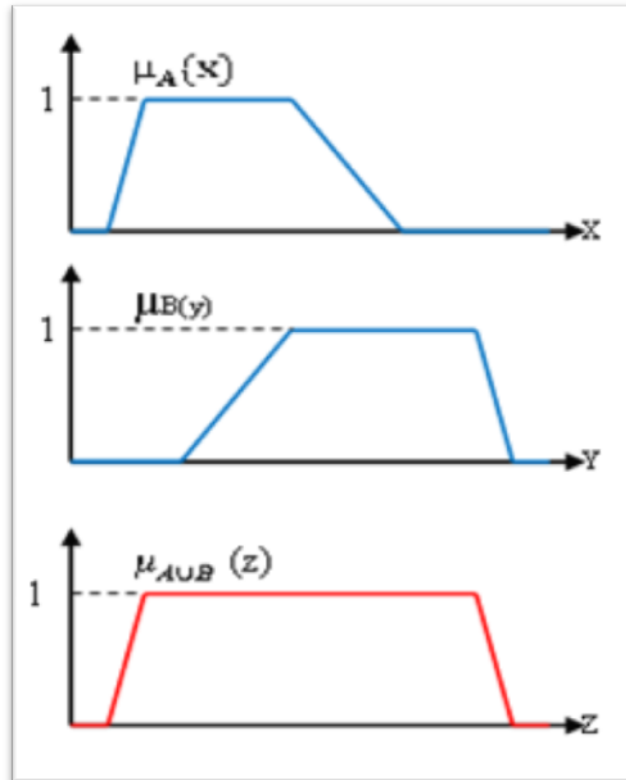


Figure 2-11 : Opérateur OU

II.5 Les ensembles flous

En logique binaire, la fonction d'appartenance caractérisant l'appartenance d'un élément, de l'univers de discours à un ensemble classique, prend uniquement la valeur 0 et 1 :

$$\mu_A(x):X \rightarrow \{0,1\} \quad (2.10)$$

$$x \rightarrow \mu_A(x)=1 \text{ si } x \in A \quad (2.11)$$

$$\mu_A(x) = 0 \text{ si } x \notin A \quad (2.12)$$

Un sous ensemble flou peut être vu comme une généralisation du concept d'ensemble classique. Dans la théorie des sous-ensembles flous, les valeurs de la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ sont comprises dans l'intervalle $[0,1]$:

$$x \rightarrow \mu_A(x)/X \rightarrow [0,1] \quad (2.13)$$

Un ensemble flou A est défini par l'ensemble de paires ordonnées $(\mu_A(x), x)$ tel que :

$$A = \{(\mu_A(x), x) / x \in X\} \quad (2.14)$$

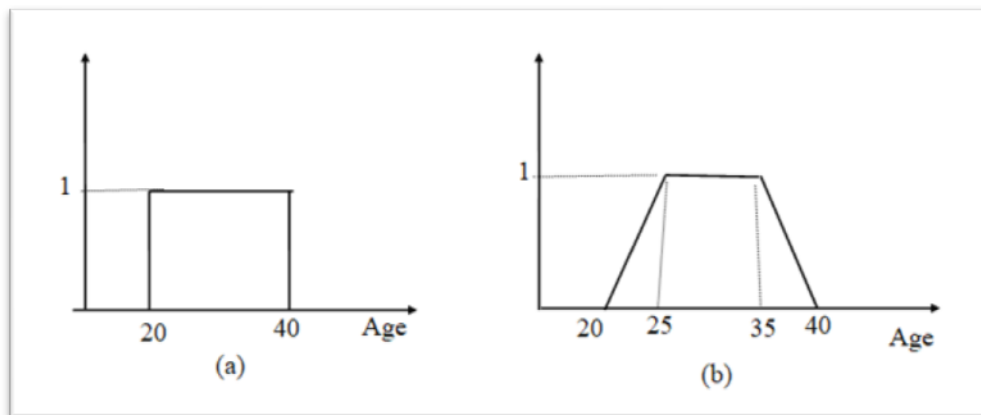


Figure 2-12 : Fonctions d'appartenance : (a) logique binaire, (b) logique floue

II.5.1 Caractéristiques d'un sous ensemble flou

Les fonctions d'appartenances sont définies par quatre caractéristiques :

- **Support**

Il décrit l'ensemble des éléments qui sont partiellement dans

$$S(A) = \{x \in U / \mu_A(x) > 0\} \quad (2.15)$$

- L'élément x de X tel que $\mu_A(x) = 0.5$ est appelé « **point de commutation** ».
- un ensemble flou dont le support est un singleton dans X avec $\mu_A(x)=1$ est appelé

« **Singleton flou** » [25].

- **Hauteur**

C'est la valeur maximale de la fonction d'appartenance, elle est donnée par la relation suivante :

$$h(A) = \max_{x \in X} \mu_A(x) \quad (2.16)$$

Un sous ensemble flou est dit normalisé sa hauteur vaut 1 [26].

- **Noyau**

On peut définir le noyau par l'équation suivante : C'est l'ensemble des éléments booléens qui appartiennent totalement à l'ensemble flou A , pour les fonctions de type triangulaire, le noyau est un singleton qui est appelé aussi valeur modale [25].

$$\eta(A) = \sum_{x \in X} \mu_A(x) = 1 + \tag{2.17}$$

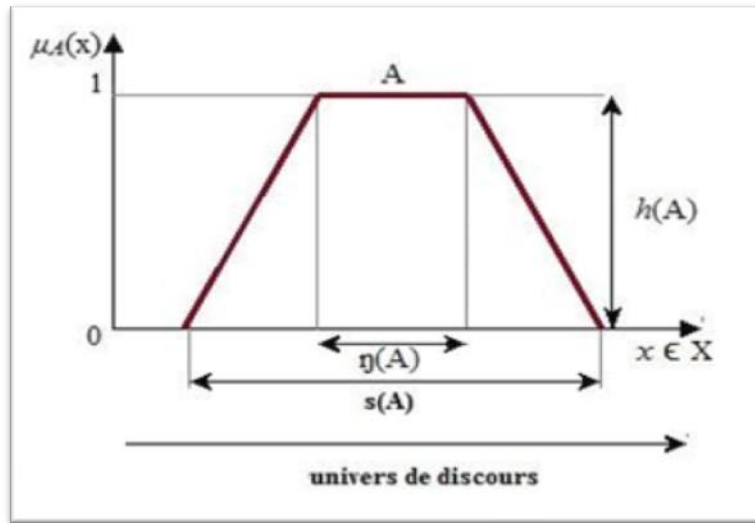


Figure. 2-13 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou A [27]

- **Fonction d'appartenance**

Elles peuvent être par exemple triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, sigmoïdes ou des singletons (figure 2.15).

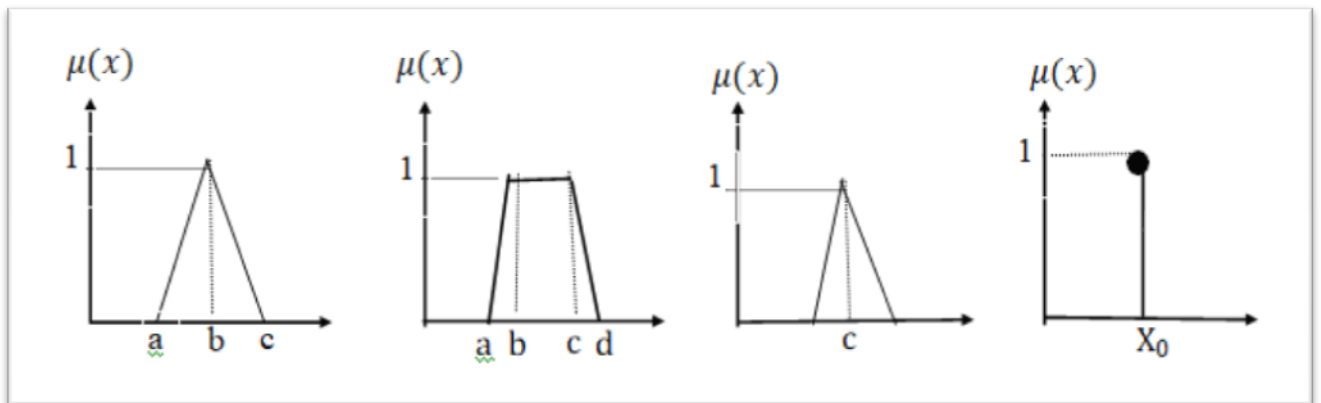


Figure 2-14: Types de fonctions d'appartenance

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions générales de la logique floue et la composition d'un système de commande floue. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un contrôleur flou et les différents types de commande en utilisant la logique floue.

Retenons que l'intérêt majeur de la logique floue en commande réside dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistique facilement interprétables.

Malheureusement la manipulation de règles non précises peut générer un nombre d'erreurs non négligeable. La mise en place d'un système flou nécessite donc une attention particulière lors de la phase de test de manière à détecter les éventuelles aberrations du système.

III

CHAPITRE 03 : Commande PID floue adaptative de la pile à combustible SOFC

III.1 Introduction

La PID floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie.

III.2 Stratégie de commande

La première étape pour la réalisation d'un régulateur PID flou adaptative est de choisir ses variables d'entrées et de sorties, de savoir avec quels paramètres on peut obtenir la commande, et définir les univers de discours de ses variables.

Les entrées de notre système sont l'erreur de la position «e» et sa dérivée «de/dt», sont été partitionnées en sept valeurs linguistiques .

Nous avons synthétisé le régulateur à PID Floue du type Mamdani pour le réglage de la tension de sortie, la stratégie de commande est comme dans la **figure 3-1**.

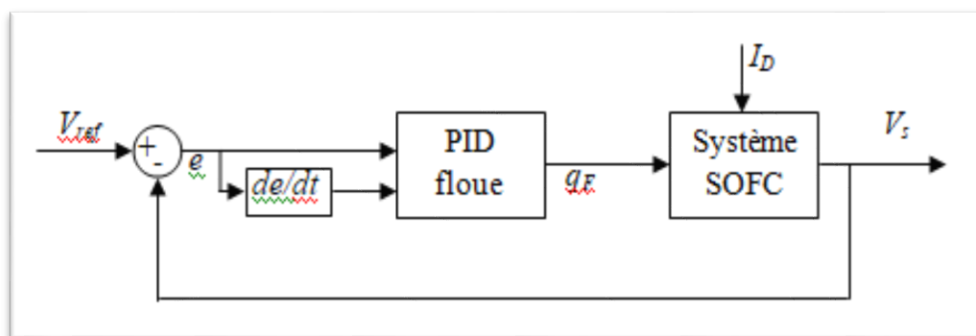


Figure 3-1 : Stratégie de commande floue du système SOFC

Pour les règles d'inférences nous allons construire les règles pour estimer le comportement du système SOFC selon ses paramètres, pour chacune des combinaisons des variable d'entrées, une action sur les variable de sortie lui associée.

Afin de simplifier la description des inférences, on utilise une matrice d'inférence .

Les ensembles flous de l'erreur « e » et la dérivé de l'erreur « de ».

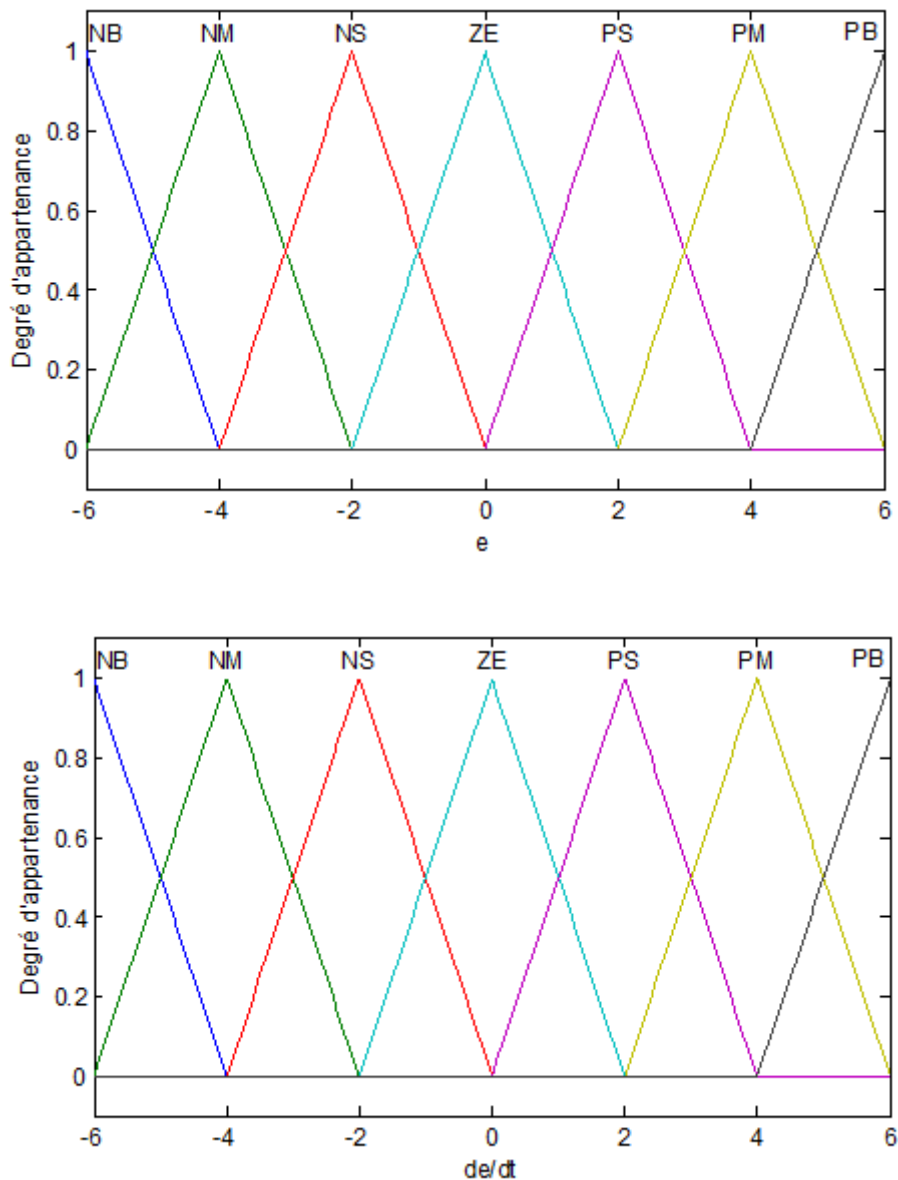


Figure 3-2 : Fonctions d'appartenance des entrées

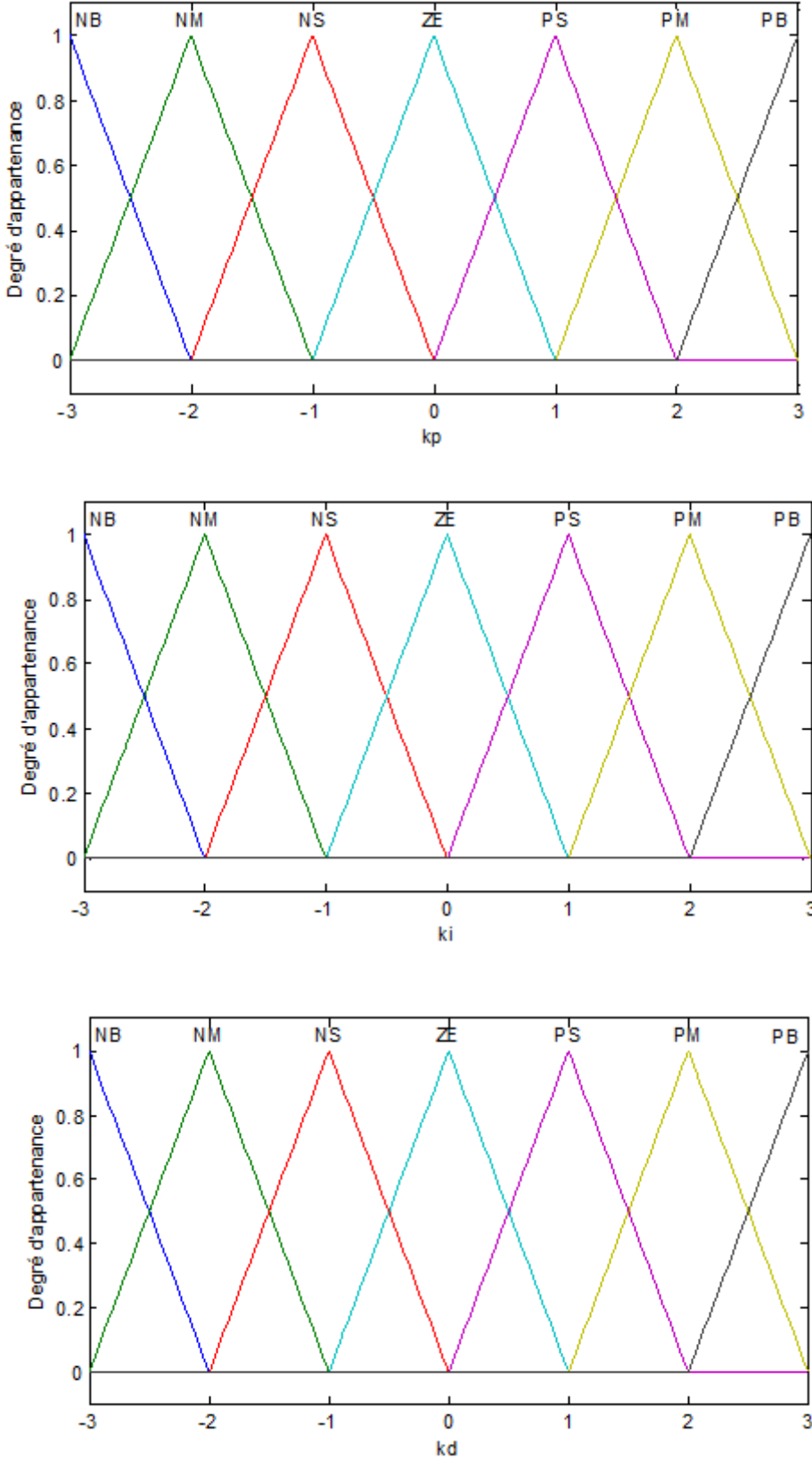


Figure 3-3 : Fonctions d'appartenance des sorties

Symbole	Signification
NB	Grand négatif
NM	Moyen négatif
NS	Petit négatif
ZE	Zéro
PS	Petit positif
PM	Moyen positif
PB	Grand positif

Tableau 3-1 : Symbole de sept intervalles ou sous-ensembles flous.

La méthode d'inférence utilisée est celle de Mamdani (Max- Min), où l'opérateur «**ET**» est réalisé par la fonction Min, l'opérateur «**ALORS**» de chaque règle par la fonction Min et la liaison entre toutes les règles (l'opérateur ET) par la fonction Min.

e \ de/dt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	NM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

Tableau 3-2 : Règles floues pour K_p

e \ de/dt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM

PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

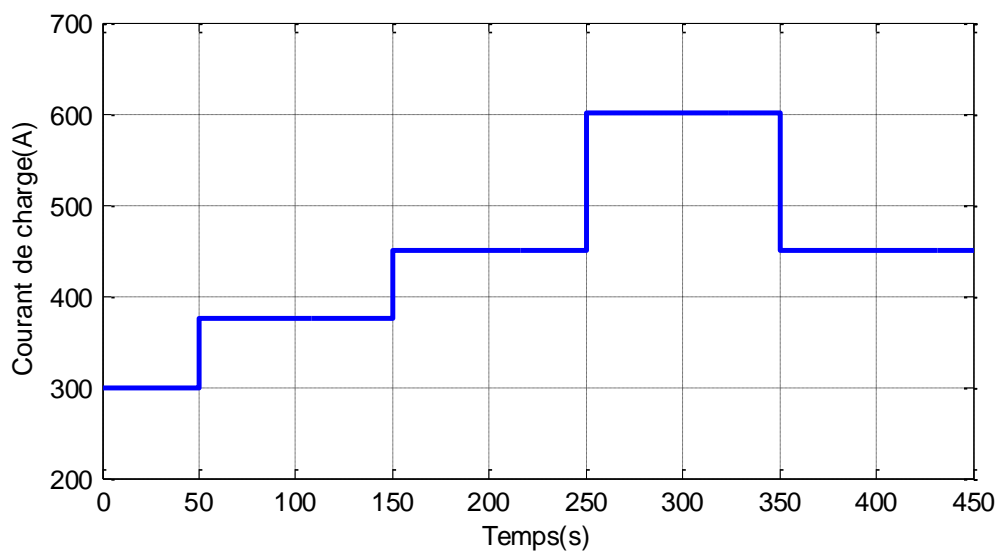
Tableau 3-3 : Règles floues pour K_i

e \ de/dt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZE	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
PB	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	PB	PS

Tableau 3-4 : Règles floues pour K_d

III.3 Résultats de simulation

Dans cette section, pour montrer la comparaison de la robustesse du contrôleur flou adaptative proposé et du contrôleur PID conventionnel. Pendant le processus de réponse aux perturbations, la tension nominale est maintenue à 305 V et le courant commence à 300 A, puis le courant est réglé pour augmenter de 150 A à 50 s et 150 s, puis diminue de 150 A à 250 s. Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures de III.4 à III.7 .

Figure 3-4 : Le courant de charge I_D

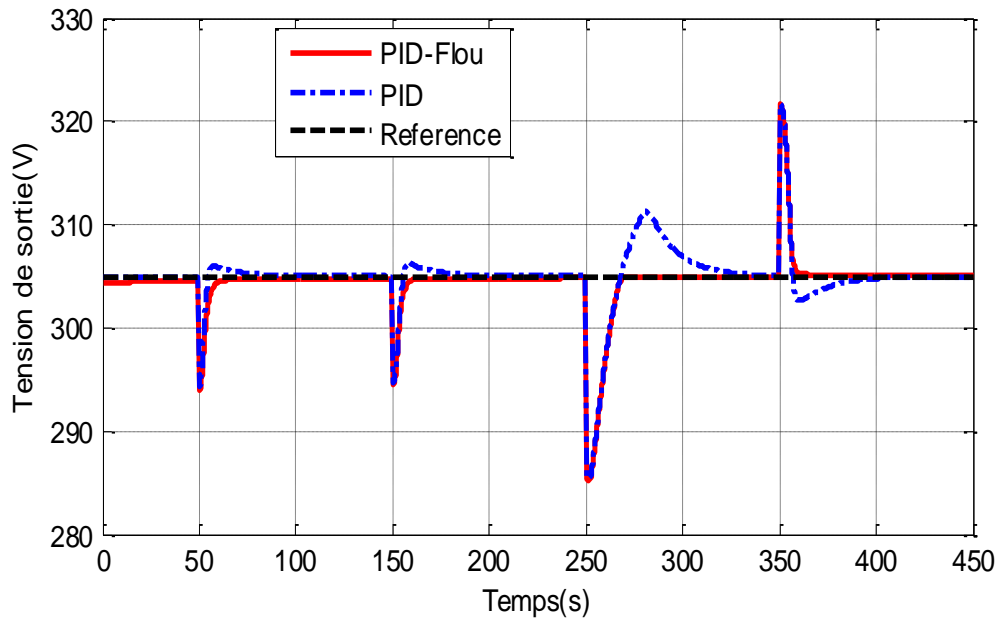


Figure 3-5 : La tension de sortie V_s

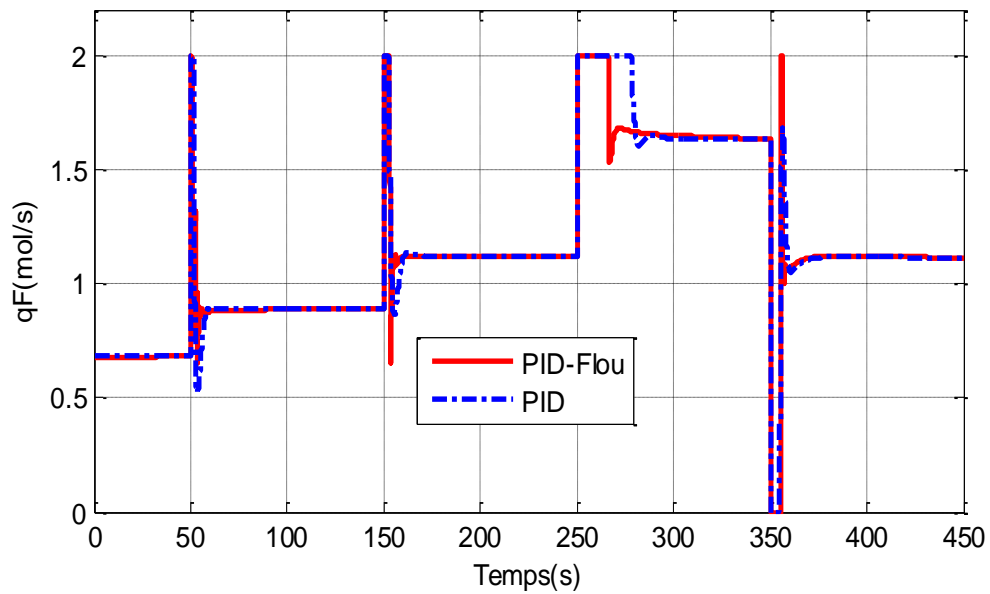


Figure 3-6 : Le débit du combustible q_F

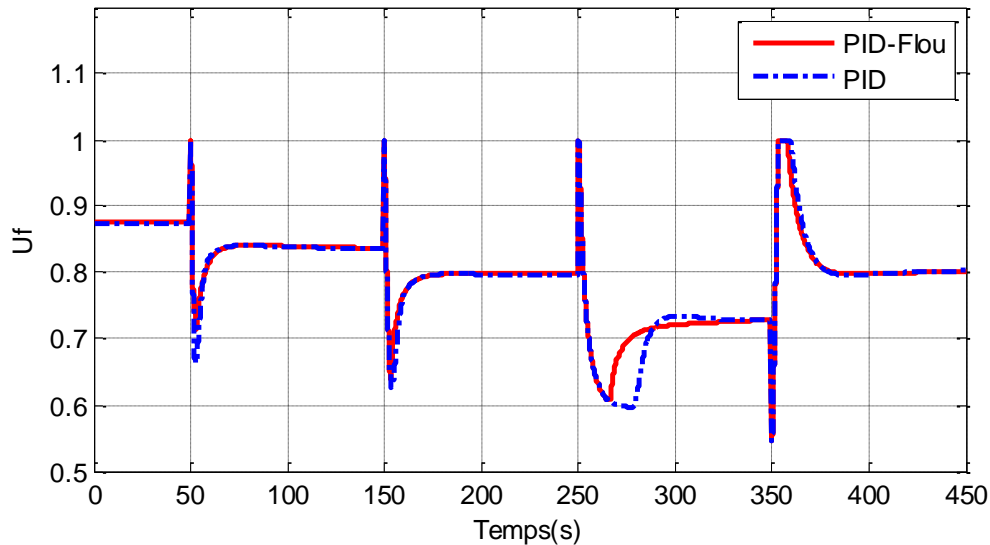


Figure 3-7 : Le taux d'utilisation du combustible U_f

D'après les résultats de la simulation, nous pouvons dire que le contrôleur pid flou propose présente l'avantage de ne pas dépasser, de réduire le temps de stabilisation et de réduire le temps de saturation. Dans les conditions de travail changeantes, les performances de fonctionnement du contrôleur PID se détériorent considérablement, tandis que le contrôleur proposé est moins affecté et fonctionne bien mieux que le contrôleur PID conventionnel. En conclusion, le contrôleur proposé est capable de gérer la non-linéarité de SOFC, et il devrait être une solution efficace pour le problème de la commande de la tension de sortie des SOFC.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions générales de la PID floue et la composition d'un système de commande floue, puis nous avons utilisé la commande par PID floue pour commander la tension de sortie de la pile à combustible de type SOFC, après la comparaison des résultats de simulation avec celles obtenus avec l'application de la commande PID, on peut conclure que le contrôleur proposé est devrait être une solution efficace pour le problème de la commande de la tension de sortie du système SOFC.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de étudierons de nouvelle technologie d'énergie, Parmi ces nouvelles technologies « propres » et « efficaces », les piles à combustible de type SOFC. Notre projet consiste a une simulation de la performance de la pile à combustible de type SOFC, Les résultats de la simulation ont validé la performance de suivi de la charge satisfaisante de la stratégie de commande de la SOFC étudié.

Dans le premier chapitre nous avons parlé sur les piles à combustible. Cette technologie produit de l'électricité et utilisée dans les différentes applications. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons étudié un modèle simple de la pile à combustible de type SOFC et a été mis au point dans le but de caractériser la tension de la pile en fonction du courant demandé. Ce modèle calcule la tension en fonction du courant débité ainsi que des pressions partielles de l'eau, l'oxygène et l'hydrogène présents respectivement dans la cathode et l'anode de la pile.

Dans le deuxième chapitre comporte une étude théorique de basse de la logique PID et la logique floue et la représentation d'un régulateur flou et de ses différents constituants. En fait le fonctionnement d'un contrôle flou dépend d'un nombre très important de paramètres qu'il faut réglés lors dela conception.

Dans la troisième chapitre nous avons présenté les résultats de simulation obtenus par l'application de la commande floue adaptative et la commande PID, Ces deux résultats nous ont permis de confirmer l'avantage d'une commande floue adaptative par rapport à une commande classique PID, notamment lorsque le procédé est non linéaire, ou présentait un retard important. Dans ce cas on peut dire que la commande floue adaptative constituera un complément précieux à la commande classique PID.

Références

- [1] OUAGUENI, F. (2021). *Modélisation et Commande des Piles à Combustible* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [2] Ouagueni F, Boumehraz M, Belhamdi S. A Fuzzy Model Feed Forward Predictive Control of the Nonlinear Tubular Solid-Oxide Fuel Cell System. IIETA. 2019.
- [3] OUAGUENI, F. (2021). A New Fuzzy Control Approach of the Nonlinear Solid-Oxide Fuel Cell System. 1st International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials, Ouargla, ALGERIA.
- [4] EL H. AGLZIM, « Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en charge ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré-Nancy1, 2009
- [5] W. VIELSTICH, Handbook of fuel cells. Fundamentals, Technology and Applications
- [6] K. KORDESCH et G. SIMADER, Fuel Cells and Their Applications, edVCH, Fuel Cell Handbook (5^{ième} édition) EG&G services, Parson, Inc. Science Applications, International Corporation (CD ROM). 1996
- [7] W. Friede, « Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible de type PEM» Thèse INPL, Nancy, 28 août 2003.
- [8] H. Oman, « Fuel cells for personal electricity ». Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, n° 9, septembre 2000, pp.43-45.
- [9] P.Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, « piles à combustible ». Technique de l'Ingénieur, D 3 340-1/28 .
- [10] A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n° 2, février 2002, pp. 8-9
- [11] E.Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci, N. Barry, « A fuel cell based Domestic uninterruptible power supply ». Applied Power Electronics Conference ,APEC'02,2002,vol.1, pp. 605-613
- [12] Fuel Cell Handbook EG&G Technical Services, Inc., 6ème édition, novembre 2002.
- [13] A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n° 2, février 2002, pp. 8-9.
- [14] G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjaer, F. Blaabjerg,« A new green power inverter for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'02, 2002, vol. 2, pp. 727-733

-
- [15] K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring, « the power system for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, 2001, vol. 4, pp. 2197-2202
- [16] BTS CIRA 1, « régulation industrielle », Lycée Rouvière
- [17] AUCLERC.M/RENE.P « *Régulation et automatisme des systèmes frigorifiques*»,
- [18] PROUVOST.P, « *Instrumentation et Régulation en 30 fiches* ».Edition Dunod, Paris, 2010
- [19] Ben Kherif O, Etude comparative en simulation entre un régulateur PID classique et un régulateur PID Intelligent, master en Electronique, Université MOHAMED BOUDIAF de M^{rs}SILA, 2016
- [20] B.Nezha .2013/2014. Evaluation du risque d'accident vasculaire cérébral à l'aide de la logique floue. Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen
- [21] F.LAHOUAZI « *mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro-floue : application à un pendule inversé* ». Mémoire de magister, UMMTO, Mars 2011.
- [22] BUHLER.H, « *Réglage par logique floue* » presses polytechnique et universitaire romandes, 1994.
- [23] Soufane H, Halim r. Optimisation de la commande de lévitation magnétique pour la recherche locale. Mester en électronique, université Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel. 2017.
- [24] BUHLER.H, « *Réglage par logique floue* » presses polytechnique et universitaire romandes, 1994.
- [25] Soufane H, Halim r. Optimisation de la commande de lévitation magnétique pour la recherche locale. Mester en électronique, université Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel. 2017.
- [26] Belhouane S. Étude et simulation d'une régulation thermique par la logique floue Masteren Electronique, Université ABDERRAHMANE MIRA de Bejaia,(2014).
- [27] Talbi N. Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Nonlinéaires. Thèse de Doctorat en Science, Université de Constantine 1. (2014).