

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



FACULTE : TECHNOLOGIE

DOMAINE : SCIENCE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : ENERGIE RENOUVELABLE

N° :

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

OPTION : ENERGIE RENOUVELABLE EN ELECTROTECHNIQUES

THEME

Commande Floue de la Pile à Combustible de Type SOFC

Proposé et dirigé Par:

- Dr. OUAGUENI Fayssal
- Dr. BENGUESMIA Hani

Réalisé par :

- SIYOUCEF Salima
- DHALIS SOUHILA

Année universitaire : 2019 /2020

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
honoré.*

A tous mes amis et mes collègues.

*A tous les enseignants du département de génie
électrique*

Remerciements

*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 OUAOUENI** 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.

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 classique et le régulateur flou.

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

ملخص

تُعرّف خلية الوقود بأنها نظام يحول الطاقة الكيميائية للتفاعل مباشرة إلى طاقة كهربائية. يحدد مصطلح " خلية الوقود " أن التفاعل يستمر بشكل مستمر طالما يتم توفير الوقود، والذي يمكن أن يكون ذا طبيعة مختلفة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الظواهر التي تتحكم في ديناميكية خلية الوقود من نوع SOFC (خلية وقود الأكسيد الصلب) لأجل تطوير الأساس النظري، نمذجة وتحليل و تصور وحدات التحكم للمتابعة السريعة للحمل ، المنهجان المستعملان من أجل تركيب وحدة التحكم هما : وحدة تحكم PID الكلاسيكي و وحدة تحكم ضبابي.

الكلمات المفتاحية : خلية وقود SOFC ، PID ، المنطق الضبابي.

Sommaire

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

CHAPITRE I : Généralités sur les piles à combustible

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique des piles à combustible.....	3
I.3 Structure générale.....	5
I.4 Principe de fonctionnement.....	6
I.5 Types des piles à combustible.....	7
I.5.1 Piles à acide phosphorique(PEMFC).....	8
I.5.2 Piles à méthanol direct (DMFC).....	9
I.5.3 Pile à acide phosphorique (PAFC).....	9
I.5.4 Piles alcalines (AFC).....	10
I.5.5 Piles à méthanol direct (MCFC).....	10
I.5.6 Piles à oxyde solide (SOFC).....	11
I.6 Stockage D'hydrogène.....	11
I.6.1 Sous forme comprimé.....	12
I.6.2 Sous forme liquéfié.....	12
I.6.3 NaBH ₄	12
I.6.4 Hydrures métalliques.....	13
I.7 Applications des piles à combustible.....	13
I.7.1 Application portables.....	13
I.7.2 Applications stationnaires.....	14
I.7.3 Application transport.....	15
I.8 Avantages et inconvénients des piles à combustible.....	16
I.9 Conclusion.....	18

CHAPITRE II : La pile à combustible SOFC

II.1 Introduction	19
II.2 Principe de fonctionnement.....	19
II.3 Les composants d'une cellule SOFC.....	20
II.3.1 Electrolyte.....	20
II.3.2 Anode.....	21
II.3.3 Cathode.....	21
II.3.4 Interconnexion.....	21
II.4 Les différentes technologies des SOFC.....	21
II.4.1 Technologie tubulaire.....	21
II.4.2 Technologie plane classique.....	22
II.4.3 Technologie plane monolithique.....	23
II.4.4 Technologie Sulzer Hexis.....	23
II.5 Raisons du choix.....	24
II.6 Modélisation d'un 'stack' SOFC.....	24
II.6.1 Energie libre de Gibbs, tension à vide.....	24
II.6.2 Tension idéale standard en fonction de la température.....	26
II.6.3 Calcul des pressions partielles.....	29
II.6.4 Performances réelles.....	32
II.6.5 Expression de la tension en charge de la pile.....	32
II.7 Système de commande d'une pile à combustible type SOFC.....	32
II.7.1 Rapport entre les débits réactants.....	32
II.7.2 Taux d'utilisation de combustible.....	33
II.7.3 Limitation du courant.....	33
II.7.4 Consigne du courant.....	34
II.8. Caractéristiques statique de la pile SOFC.....	35
II.9 Les réponses dynamique.....	36
II.9.1 La réponse dynamique due à l'effet de charge à double-couche.....	36
II.9.2 Les réponses dynamiques dues à l'effet des températures.....	37
II.10 Conclusion.....	37

Chapitre III : Commande floue de la pile à combustible SOFC

III.1 Introduction.....	38
III.2 Historique.....	38
III.3 Principe fondamental de la logique floue.....	39
III.4 Les ensembles flous.....	39
III.4.1 Caractéristiques d'un sous ensemble flou	40
III.4.2 Operateurs logique flous.....	41
III.4.3 Notion de règle linguistique	42
III.5 Les systèmes flous.....	42
III.5.1 Définition.....	42
III.5.2 Fuzzification.....	42
III.5.3 Base de règles floue.....	43
III.5.4 L'inférence floue.....	43
III.5.5 Défuzzification.....	44
III.6 Commande floue de la pile à combustible SOFC.....	45
III.7 Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	50
Références bibliographiques	51

Liste des figures

Figure I.1 : Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.....	2
Figure I.2 : Projet Gemini.....	3
Figure I.3 : Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.....	4
Figure I.4 : Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible.....	5
Figure I.5: Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie=20h, poids=900g.....	12
Figure I.6 : Unité de pile combustible.....	13
Figure I.7 : Bus Mercedes Citaro fonctionnant avec une PEMFC.....	13
Figure II.1 : Schéma de principe d'une pile à combustible SOFC.....	19
Figure II.2 : Les composants d'une cellule SOFC.....	20
Figure II.3 : Technologie tubulaire.....	22
Figure II.4 : Technologie plane classique.....	23
Figure II.5 : Technologie plane monolithique.....	23
Figure II.6 : Technologie Sulzer.....	24
Figure II.7 : Entrées/sorties d'une pile à combustible.....	25
Figure II.8 : Tension standard en fonction de la température (cas vapeur).....	29
Figure II.9 : Schémas bloc du modèle d'une pile SOFC.....	34
Figure II.10 : Les caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes températures.....	35
Figure II.11 : Les caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes températures.....	35
Figure II. 12 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (effet de charge à double couche).....	36
Figure II.13 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC à différentes températures.....	37
Figure III.1 : Fonctions d'appartenance : (a) logique binaire, (b) logique flou.....	40
Figure III.2 : Types de fonctions d'appartenance.....	40

Figure III.3 : Caractéristiques d'un sous-ensemble flou.....	41
Figure III.4 : Système flou standard.....	42
Figure III.5 : Stratégie de commande floue du système SOFC.....	45
Figure III.6 : Fonction d'appartenance des l'entrées.....	46
Figure III.7 : Le courant de charge I_D	47
Figure III.8 : La tension de sortie V_s	47
Figure III.9 : Le débit du combustible q_F	48
Figure III.10 : Le taux d'utilisation du combustible U_f	48

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Description des six grandes catégories des piles à combustible.....	6
Tableau II.1 : Entropie et enthalpie à 298.15K de H_2 , O_2 et H_2O	27
Tableau II.2 : Entropie et enthalpie aux conditions standard de la vapeur d'eau.....	28
Tableau III.1 : Symbole de sept intervalles ou sous ensembles flous.....	48
Tableau III.2 : Table de règles d'inférences.....	48

Liste des abréviations et symboles

Abréviations :

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

Symboles :

a	Anode
c	Cathode
τ	Constante de temps (s)
O ₂	Hydrogène
H ₂	Oxygène
H ₂ O	Eau
ΔG	La réaction chimique entre produits et réactifs qui est importante.
G _i	L'énergie libre de Gibbs du constituant (i) où i=(H ₂ O, H ₂ et O ₂)
W _{el}	Le travail électrique maximal
n	Nombre d'électrons participants à la réaction, où n=2 dans notre cas.
F	Constante de Faraday, qui correspond à la charge d'une mole d'électrons.
N	Nombre d'Avogadro.
E	Tension idéale dite aussi tension réversible (i=0).
ΔH	La variation de l'enthalpie en [J/mol].
ΔS	La variation de l'entropie en [J/mol/K].

T	Température de fonctionnement de la pile en [K].
E°	Tension idéale à pression standard ($P_0 = 1\text{atm}$) qui varie en fonction de la température
ΔH°	Variation de l'enthalpie à pression standard
ΔS°	Variation d'entropie à pression standard
H_i^0	L'enthalpie du constituant (i) ; $i = (\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2)$
S_i^0	L'entropie du constituant (i) ; $i = (\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2)$
E^0	Tension standard (pression standard et température variable) ;
R	Constante des gaz parfaits (8.314 J/mol/K) ;
T	Température de fonctionnement en Kelvin ;
$P_{\text{H}_2}, P_{\text{O}_2}$ et $P_{\text{H}_2\text{O}}$	Les pressions partielles de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau respectivement en [atm].
$q_{\text{H}_2}^{\text{in}}$	Le débit qui entre dans le compartiment anodique
$q_{\text{H}_2}^{\text{r}}$	Le débit consommé se qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et l'électricité définit par
V_{an}	Le volume de l'anode .
n_{H_2}	Le nombre de moles d'hydrogène dans le compartiment anodique [kmol] .
R	La constante des gaz parfaits en [(1.atm)/(kmol.K)] .
T	La température en [K].
N_{cel}	Le nombre de cellule constituant le stack ;
I_{fc}^{r}	Le courant circulant dans la pile ;
$K_r = N_{\text{cel}}/4F$	Constante définie afin de simplifier le modèle.
W	Le débit massique sortant du canal [kg/s] ;
K'	La constante qui dépend en principal de la surface d'orifice
K_{an}	La constante de la vanne coté anode .
M_{H_2}	La masse molaire de l'hydrogène.
P_{O_2}	Vapeur d'oxygène
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	Vapeur d'eau
q_{O}	Débit d'oxygène à l'entrée (mol/s)
q_{H}	Débit de carburant en entrée (mol / s)
<i>in</i>	Entrée
<i>out</i>	Sortie

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 [1]. 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.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

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 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.1. Introduction

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

I.2. Historique

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839. Toutefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation n'étant alors pas une nécessité.

Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une « redécouverte » vers la fin du 20e siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits.. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène. Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Christian Friedrich Schönbein observe en réalisant une électrolyse que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience.

En 1839, lors d'une conférence scientifique à Birmingham, Schönbein rencontre l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillaient à l'époque sur les batteries électriques. Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes. Ceci débouche sur la célèbre expérience de Grove avec une pile à combustible: il s'agissait d'une cellule hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Nous sommes en 1845, Grove génère un courant sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, c'est la première pile à combustible.

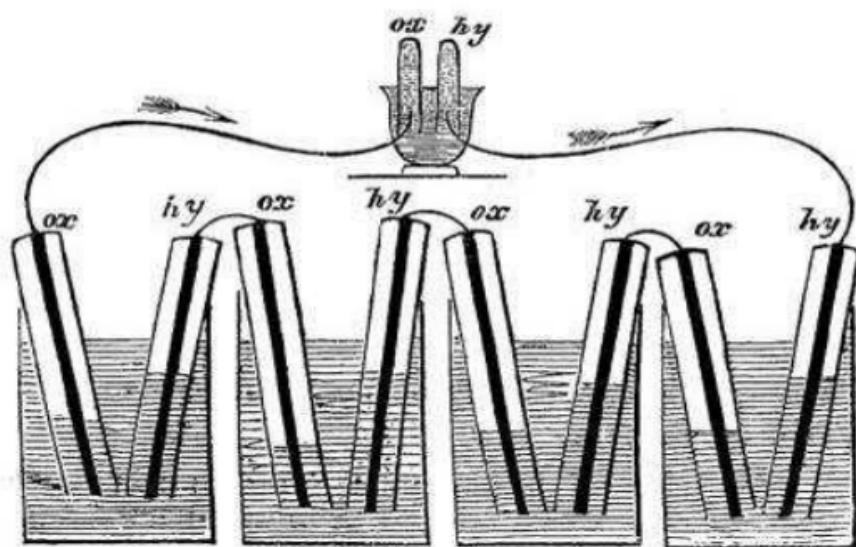


Figure I.1 : Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839

Par la suite, la pile à combustible resta plus ou moins en latence durant près d'un siècle et après quelques légères améliorations par différents scientifiques du début du 20ème siècle, c'est Francis T. Bacon qui en 1935 enclenche le progrès le plus important en réalisant un prototype de pile à combustible remplaçant l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique de 1kW.

Le principe physique est établi, des dizaines de laboratoires et d'industriels vont se lancer dans les piles à combustible. Néanmoins les coûts restant très élevés, ils sont un obstacle important à son utilisation, hormis pour la NASA qui peut se permettre de tels investissements. Ainsi elle l'utilise, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968.



Figure I.2: Projet Gemini

Dans les années 1980 alors que les Etats-Unis et le Japon vont poursuivre de manière très active leurs recherches, l'Europe (à l'exception de l'Allemagne) va se désintéresser de ces travaux. Ainsi, depuis sa découverte la pile à combustible a connu de nombreuses améliorations (perfectionnement des électrodes, optimisation de la température de fonctionnement ...), mais le principe reste le même [1].

I.3. Structure générale

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules.

Chaque cellule est constituée de :

- Deux plaques bipolaires ;
- Deux électrodes (anode et cathode) ;
- Electrolyte.

Alimentée par :

- Combustible : on utilise le méthanol ou H₂ (pur ou reformé) ;
- Oxydant : soit l'oxygène pur ou l'air.

La figure suivante montre la structure générale d'une cellule d'une pile à combustible.

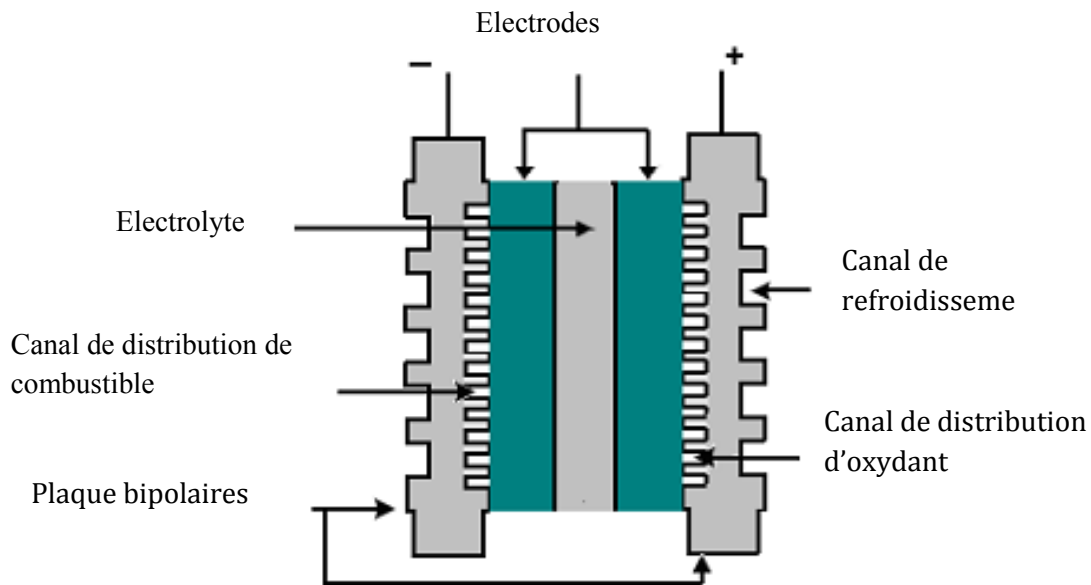


Figure I.3: Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible

I.4. Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un assemblage de cellules élémentaires, en nombre suffisant pour assurer la production électrochimique d'électricité dans les conditions de tension et courant voulues. Une cellule élémentaire forme le noyau de la pile à combustible. Cette cellule est responsable de la conversion électrochimique de l'énergie chimique (combustible) en une énergie électrique. La structure de base d'une cellule est constituée de deux compartiments disjoints alimentés chacun par les gaz réactifs. Les deux électrodes, séparées par un milieu conducteur ionique appelé électrolyte, complètent le dispositif formé. La figure I.4 en donne une illustration schématique.

Pour les piles de haut rendement fonctionnant à basse température, le combustible le plus employé est l'hydrogène sous forme gazeuse. Suivant la nature de l'électrolyte, acide ou basique, l'eau formée par oxydation de l'hydrogène est produite à la cathode (dans le premier cas) et à l'anode (dans le second cas). Dans les deux cas, le réacteur produit donc, de l'eau, de l'électricité et de la chaleur [2].

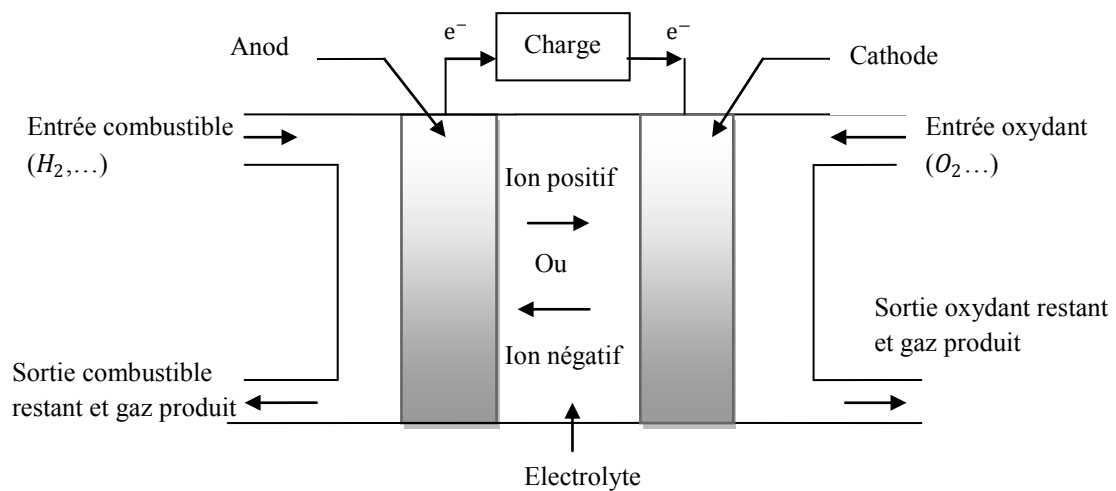


Figure. I.4 : Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible

I.5. Types des piles à combustible

Différentes familles de piles à combustible ont été développées. Les piles sont classées selon la nature de leur électrolyte (Solide, Liquide) et leur température de fonctionnement (basses températures, hautes températures), Nous pouvons distinguer six types de pile soit :

- 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 (PAFCP hosphoric 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)

Le tableau I.1 récapitule et compare les différents types de piles à combustibles.

D'après ce tableau :

- Les piles à basse Température : On distingue quatre types qui sont : PEMFC, DMFC, PAFC et AFC.
- Les Piles à haute température : On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC.

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline fuel cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Direct Méthanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère Conductrice de protons	Membrane polymère Conductrice de protons	Acide phosphorique	Li_2CO_3 et KCO_3 fondu dans matrice $LiAlO_2$	ZrO_2 et Y_2O_3
Ions dans l'électrolyte	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H_2	H_2 (pur ou reformé)	Méthanol	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)
Oxydants	O_2 (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	spatial	Automobile, Portable, Cogénération, maritime	Portable	Cogénération	Cogénération production centralisée d'électricité, maritime	Cogénération production centralisée d'électricité, automobile (APU), maritime
Niveau de développement	utilisée	utilisée	Prototypes	Technologie mûre	prototypes	prototypes

Tableau I.1: Description des six grandes catégories des piles à combustible [3].

I.5.1. Les piles à combustible à basse température :

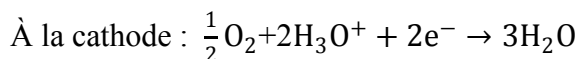
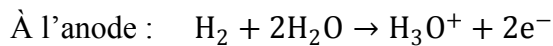
On distingue quatre types qui sont : PEMFC, DMFC, PAFC et AFC

I.5.1.1. 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

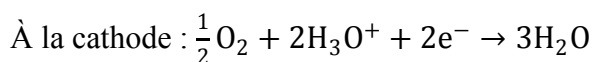
catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes, cependant, le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur. Quant aux plaques bipolaires, elles peuvent être conçues

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. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :



I .5.1.2. 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. Les plaques bipolaires sont, quant à elles, faites de graphite, de métal ou de composite [4,5]. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :



I .5.1.3. Pile à acide phosphorique (PAFC)

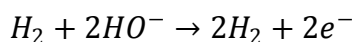
C'est une pile généralement réservée aux applications stationnaires, d'où un développement et une commercialisation plus importants comparés aux autres technologies de piles. Il existe déjà des centrales électriques installées dans le monde et qui fournissent des puissances entre 5 et 20 MW [6]. L'électrolyte est de l'acide phosphorique sous forme liquide. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone. Le catalyseur est à base de platine. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat dans lequel l'électrolyte est stocké.

I .5.1.4. Pile alcaline (AFC)

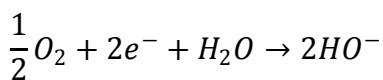
Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement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

Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

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



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



I .5.2. Piles à combustible à haute température

On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC

I .5.2.1. Pile à carbonate fondu (MCFC)

Elles sont des piles de seconde génération, car sont apparues bien après les piles fonctionnant à basses températures. Ces piles fonctionnent à des températures élevées (600°C à 700°C) ce qui améliore la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements électriques supérieurs à 50%. De plus, elles peuvent utiliser une large gamme de carburant, grâce au reformage interne et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO₂ comme c'est le cas pour les piles à basses températures.

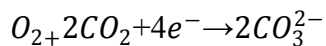
L'électrolyte est constitué d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenu par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de

nickel. Le choix des matériaux est important, en raison de la température de fonctionnement élevée et de la nature hautement corrosive de l'électrolyte [7].

Les réactions ayant lieu dans ce type de piles sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction: $2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$

Et à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a:



I.5.2.2. Pile à oxyde solide (SOFC)

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 se passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures.

L'électrolyte est solide, habituellement du Zirconium (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 [8] [9].

Les réactions mises en jeu sont les suivantes:

À l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction:



Et à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction: $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

I.6. Stockage D'hydrogène

Il y'a plusieurs modes pour stocker l'hydrogène, parmi ces modes on trouve stockage :

- Sous forme comprimé.
- Sous forme liquéfié.

- NaBH_4 .
- Hydrures métalliques

I.6.1 Stockage sous forme comprimé

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisé actuellement (Nissan, Daimler Chrysler) : la pression va de 200-350 à 700 bars. L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 L jusqu'à des réservoirs de 10.000 m³. Les bouteilles commercialisées actuellement permettent des pressions jusque 350 bars. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques : les premiers sont peu adaptés aux applications Automobiles pour des raisons de place, les seconds rendent une adaptation de la géométrie du véhicule nécessaire.

Comme avantages, on bénéficie de la rapidité du remplissage. Comme inconvénients, leur faible densité volumétrique, la nécessité de réservoirs résistants aux chocs et adaptés aux véhicules pour les applications automobiles, et surtout une technologie à améliorer pour les hautes pressions avec l'adaptation de tous les auxiliaires : valves, capteurs, détendeurs.

I.6.2. Stockage sous forme liquéfié

Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme liquide à -253°C . Le réservoir a une double paroi, avec entre les deux un espace sous vide ou avec des super isolants rempli d'air liquide. Il est en acier mais on tente d'utiliser des matériaux composites.

Comme avantages, le réservoir nécessite peu de place, d'où le choix de BMW, Opel et Daimler Chrysler pour ce type de stockage. Le remplissage est une technologie maîtrisée avec des stations services spécialisées.

Comme inconvénients, la faible température, les pertes thermiques sont inévitables de même que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil off).

I.6.3 NaBH_4

Cette méthode de stockage est destinée pour des applications portables, stationnaires et Automobiles. Elle se base sur la réaction entre le Bor-hydrure de sodium NaBH_4 et l'eau donnant de l'hydrogène (et du borate de sodium) NaBO_2 , cette réaction nécessite la présence d'un catalyseur qui peut être à base de cobalt ou de ruthénium.

Comme avantages, cette méthode permet l'utilisation d'un fluide non toxique, non inflammable, facilement manipulable qui peut être utilisé dans les applications automobiles ; il peut d'ailleurs être stocké dans des réservoirs traditionnels. Cette technologie offre aussi l'avantage d'être à température ambiante et faible pression et surtout de produire un hydrogène totalement pur de CO et autres impuretés.

Comme inconvénients, il faut éviter des émissions spontanées d'hydrogène, trouver un catalyseur moins cher que le ruthénium (le cobalt nécessite une température plus élevée).

I.6.4. Hydrures métalliques

Certains métaux ou alliages peuvent stocker des atomes d'hydrogène entre leurs atomes et créer des liaisons chimiques. Il s'agit par exemple du Palladium (Pd), du Magnésium (Mg), de Mg_2Ni ou d'alliages comme Mg- Mg_2Ni . Il existe deux classes d'hydrures : les hydrures hauts et basse température. Le stockage s'effectue à haute pression avec apport de chaleur. La pression de dissociation est fonction de la température : pour des températures entre 0 et 100°C, les pressions se situent entre 2 et 10 bars, mais elles atteignent 30 à 50 bars avec des températures plus élevées. Le déstockage a lieu à basse pression avec évacuation de chaleur.

Comme avantages, cette méthode est sûre et un prototype est déjà réalisé par Toyota. Les pressions mises en jeu sont faibles. L'hydrogène obtenu est très pur.

Comme inconvénients, la densité énergétique est encore limitée, ce qui donne des réservoirs trop lourds. De plus la cinétique de remplissage doit être améliorée, à basse température. Certains hydrures restent trop chers.

I.7. Domaine d'applications des piles à combustibles :

On a trois types d'applications distinguées :

- Portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts).
- Stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt),
- Transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts),

I.7.1. Applications portables :

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées

sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie privilégiée pour cette application est la filière PEMFC du fait notamment de sa faible température de fonctionnement (60 à 100°C)[10].



Figure I.5: Pile à combustible au méthanol Toshiba (2004), autonomie = 20h, poids = 900g

1.7.2. Applications stationnaires :

Secteur intéressé de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). la méthode de production de l'électricité de l'avenir]. Toutefois, actuellement, la commercialisation de la PAC ne vise que des utilisations finales et non des grands systèmes pour la vente au réseau de distribution. Il y a plusieurs raisons à cela : d'une part, le coût reste encore élevé par rapport à d'autres moyens de production d'énergie électrique qui demandent souvent de grandes puissances.

D'autre part, elle devient beaucoup plus fiable à petite taille et sa possibilité de production conjointe d'électricité et de chaleur est bien adaptée aux besoins de l'habitant d'un petit quartier. Par conséquent, les principales applications stationnaires se trouvent dans les secteurs commercial, industriel et résidentiel. Les stations à puissances supérieures de quelques centaines de kilowatts sont très rares.



Figure I.6 : Unité de pile combustible

1.7.3. Applications dans le transport

Le secteur du transport est un marché à fort potentiel pour la PAC grâce à ses caractéristiques intéressantes et au développement rapide de la technologie hybride dans les véhicules. En utilisant l'hydrogène comme combustible, le rendement du moteur électrique à PAC est bien meilleur que les moteurs à l'essence. D'autre part, la faible émission des gaz de la PAC lui apporte une position très concurrente alors que la pollution de l'air est devenue un problème Important, surtout dans les grandes villes. De plus, les moteurs silencieux sont un argument supplémentaire pour le transport urbain. D'après les experts de l'industrie automobile, on espère qu'un million de voitures à PAC seront commercialisées en 2025 [11].



Figure I.7 : Bus Mercedes Citaro fonctionnant avec une PEMFC

I.8. Avantages et inconvénients des piles à combustible

Les piles à combustible sont souvent présentées comme la solution du futur dans le domaine de production d'énergie électrique. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- **De hauts rendements énergétiques même à charge partielle** : Le rendement électrique dépend du type de pile, il varie entre 40 % et 70 %. Une spécificité Des piles est que le rendement électrique ne diminue pas et même augmente à charge par Ce rendement ne diminue donc pas dans le cas de petites installations, à la différence des installations conventionnelles où les petites unités de quelques kW ont de faibles rendements leur rendement chute à très faible charge en raison de la consommation des accessoires.
- **Émissions limitées** : On cite les piles à combustible comme a tout dans la lutte contre la pollution, en particulier la Limitation des gaz à effet de serre. Les émissions produites par un système pile dépendent étroitement du carburant utilisé et de son origine. Les émissions à considérer sont :
 - Les gaz à effet de serre, en particulier le CO_2 et le CH_4 ,
 - Les NO_x (oxydes d'azote),
 - Les particules carbonées,
 - Les poussières.
- **Modularité** : Les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible, en adaptant le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune, d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 kW et plusieurs MW Pour les piles de très petite puissance, on a recours à des technologies de miniaturisation.
- **Diverses températures de fonctionnement** : Pour les piles à basse températures de fonctionnement, c'est un avantage sur deux points : le Rendement électrique est meilleur à basse température et cette dernière est plus adaptée aux applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite par la pile. En revanche, pour les piles à températures de fonctionnement plus élevées, on peut utiliser la chaleur pour des applications domestiques ou industrielles voire un couplage avec une turbine.

Cependant il y a aussi des inconvénients, des nombreux points faibles qui sont à régler.

- **Le coût** : C'est le plus gros problème actuellement : dans les applications automobiles, le prix des piles est 100 fois supérieur à celui assurant la compétitivité. Cela est dû à plusieurs choses, notamment à l'utilisation de platine (matériau rare et relativement cher) et aussi à l'utilisation de membranes aux prix coûteux.
- **Durée de vie** : La durée de vie estimée est de 40000 heures pour les PAFC, de 20000 heures pour les MCFC et d'environ 8000 heures pour les AFC. Pour les PEM et les SOFC, on a donc peu de renseignements sur leur durée de vie, elles sont encore au stade de prototypes. Les contraintes diffèrent selon l'application :
 - Automobile : quelques milliers d'heures ;
 - Stationnaire : au moins 40000 heures.

Dans cette optique, il faut prendre en compte les frais de maintenance (inconnus pour le moment) et la possibilité de changer une ou plusieurs pièces dans le système. Seuls des prototypes qui seront testés dans les années à venir permettront d'apporter une réponse.

- **Gestion thermique du module** : Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des Applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile. Cela impose donc de la coupler à un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur sans pour autant devoir mettre de nombreux échangeurs de chaleur.
- **Quel carburant ?** : Pour le moment, rien n'est joué sur le carburant des piles. Même si à terme, c'est l'hydrogène qui s'imposera, la question est de savoir quand et sous quelle forme ; et quel carburant servira d'intermédiaire dans les applications.

Le fait d'utiliser de l'hydrogène suppose que l'on ait réglé le problème du stockage à bord : gazeux sous pression, liquide à de très basses températures, etc. L'autre problème vient des idées préconçues face à l'hydrogène : risque d'explosion, inflammabilité. En fait, l'hydrogène n'est pas plus dangereux qu'un autre carburant, du moment que les précautions sont prises.

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé aux piles à combustible. Nous avons abordé l'historique du développement des piles à combustible, leur principe de fonctionnement et l'architecture de ses systèmes. On a aussi présenté les différentes parties de la constitution d'une pile à combustible, leurs avantages et leurs inconvénients.

II.1 Introduction

La technologie SOFC est une technologie prometteuse; elle est basée essentiellement sur l'utilisation d'un électrolyte solide (ex. électrolyte en céramique) et d'une température élevée. Par rapport aux piles à basse et à moyenne température, elle est potentiellement plus intéressante par son rendement électrique élevé (50 % à 70 %), une moindre sensibilité au type de combustible, le remplacement des métaux précieux aux électrodes par d'autres moins chers, un reformage interne possible et l'utilisation de la chaleur produite (cogénération).

II.2.Principe de fonctionnement et composants :

Une cellule SOFC se compose d'une anode, d'un électrolyte, d'une cathode et les interconnexions. L'anode est alimentée en hydrogène ou en mélange de gaz (carburant) et la cathode est alimentée par l'air (comburant).

Le principe de fonctionnement de la SOFC est basé sur le mécanisme suivant : l'oxygène est dissocié à la cathode en O^{2-} , puis le cation migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température (à partir de 700°C) et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène pour former de l'eau et libérer des électrons qui traversent un circuit électrique externe (Figure II.1).

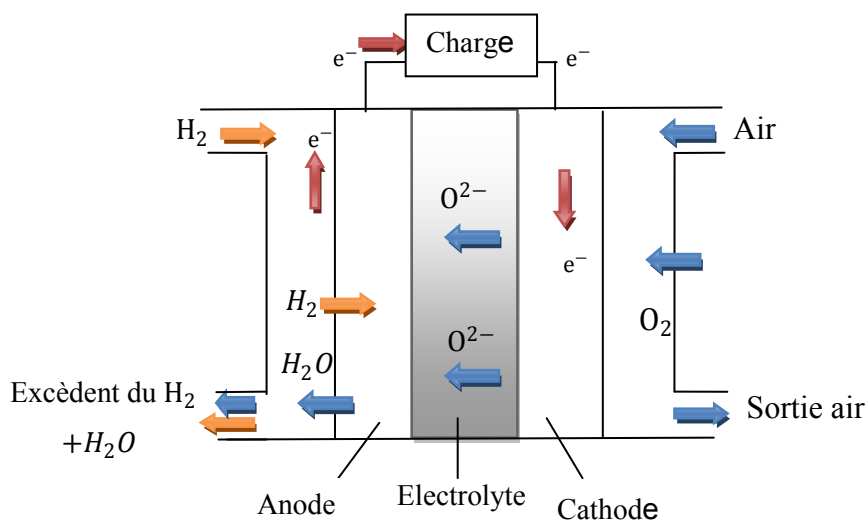


Figure II.1 : Schéma de principe d'une pile à combustible SOFC.

Les réactions chimiques présentes dans les sites catalytiques de l'anode et de la cathode sont :

Anode : Oxydation de l'hydrogène :



Cathode : Réduction de l'oxygène :



Réaction globale :



II.3. Les composants d'une cellule SOFC

La figure II.2 montre les composants d'une cellule SOFC.

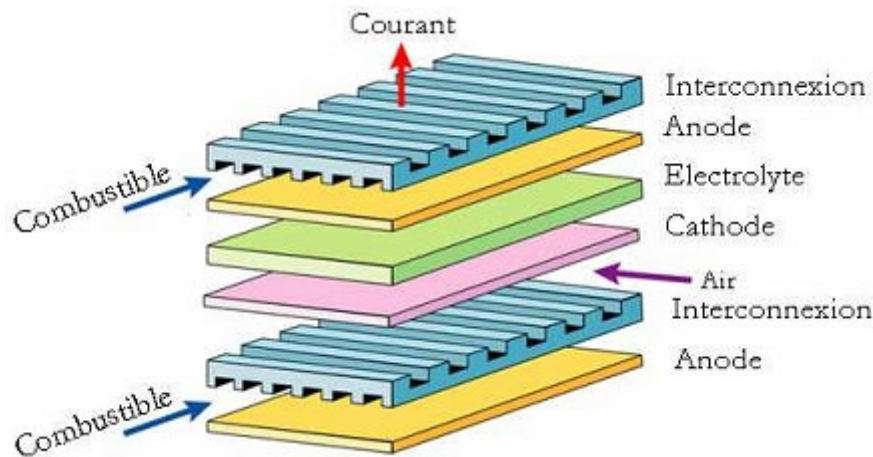


Figure II.2 : Les composants d'une cellule SOFC [12]

II.3.1. Electrolyte

C'est un électrolyte solide qui caractérise la pile SOFC. Celui-ci doit être un bon conducteur ionique pour les ions O^{2-} et doit avoir de bonnes résistances chimique et mécanique. L'électrolyte généralement utilisé est composé de Zircone Yttrée (YSZ, yttria stabilized zirconia) [13]. La zircone yttrée est très stable dans les milieux oxydant et réducteur et présente une conductivité ionique aux alentours de 0.02 Scm^{-1} à 800°C et 0.15 Scm^{-1} à 1000°C . La conductivité ionique est assurée par la mobilité de l'oxygène à travers des lacunes anioniques de la zircone yttrée [14].

II.3.2. Anode

Le matériau utilisé dans l'anode de la SOFC est un cermet de Nickel/ Zirconium avec proportion du nickel voisin de 50% et une porosité de l'ordre de 40%, il présente une bonne activité catalytique. Le mélange (Nickel-YSZ) peut fonctionner à des températures basses proches de 500°C [14, 15].

II.3.3. Cathode

Les matériaux de la cathode fonctionnent en conditions très oxydantes (air ou oxygène + haute température), ce qui interdit l'emploi de matériaux classiques et oblige à l'utilisation de matériaux nobles (oxydes semi-conducteurs, oxydes métalliques conducteurs). Le matériau le plus utilisé à la cathode est un manganite de lanthane dopée au strontium ($(L_{a_{0,84}}S_{r_{0,16}}M_nO_3) M_nO_3$) [15,16].

II.3.4 Interconnexion

Les interconnexions dans la SOFC doivent jouer le rôle du collecteur de courant et aussi assurer l'étanchéité. En raison de la température élevée de fonctionnement, les interconnexions doivent avoir une bonne résistance en milieu oxydant et réducteur. On utilise en général un métal à base de chrome [15,16].

II.4. Les différentes technologies des SOFC

Actuellement, il existe quatre technologies de pile au niveau de la géométrie : tubulaire, plane (classique et monolithique) et Sulzer Hexis :

II.4.1. Technologie tubulaire

La technologie à géométrie tubulaire a été développée essentiellement par le groupe Westinghouse Electric Corp. et Mitsubishi Heavy Industries.

Dans cette technologie, un cylindre en céramique poreuse (environ 50% de porosité) fermé à une extrémité, de diamètre 15 à 20 mm et de longueur pouvant atteindre 1,5m sert de support et est recouvert extérieurement de couches successives (Manganite de Lanthane dopé au Strontium ($(L_a, S_r)M_nO_3$) faisant office de cathode. L'anode est principalement du Nickel (bonne activité catalytique et moins cher) et enfin, un dépôt de matériau stable dans les milieux oxydant et réducteur, qui a une bonne conductivité électronique ($LaCrO_3$) servant d'interconnexions (voir figure II.3). L'intérieur du tube support sert à la distribution d'air, tandis que le combustible est amené par l'extérieur.

La dégradation de performance est voisine de 0,2%/1000 heures pour une alimentation en air et la montée en température est voisine de 200°C/heure, ce qui nécessite 5 heures pour un démarrage. Le rendement de cette technologie atteint 60% (pile couplée à une turbine à gaz) et la puissance est de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. L'inconvénient majeur de cette technologie est le coût élevé de fabrication. Un des avantages de la technologie tubulaire est la bonne étanchéité ce qui permet de réduire les contraintes mécaniques issues des contraintes thermiques et améliorer ainsi la fiabilité.

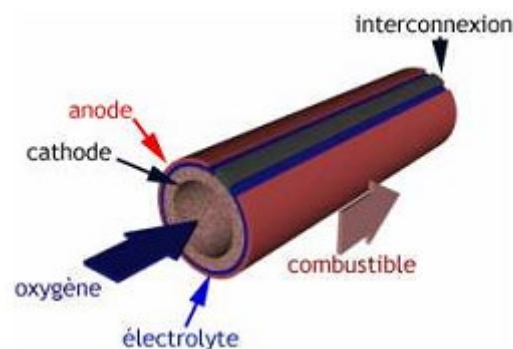


Figure II.3 : Technologie tubulaire [12]

II.4.2. Technologie plane classique

Cette technologie est plus récente et plus compacte comparée à la précédente. Elle présente une meilleure puissance par unité de volume. Tous ses composants étant actifs (contrairement à la technologie tubulaire où certains composants, comme les supports de tube, ne sont pas actifs), elle permet d'obtenir des blocs plus compacts conduisant aux améliorations suivantes : abaissement de la masse, de l'encombrement, des pertes thermiques et donc montée plus rapide en température. La difficulté de cette technologie réside dans la mise au point de plaques d'interconnexion assurant à la fois une bonne conduction électrique, une bonne tenue mécanique, une bonne tenue à la corrosion et une bonne étanchéité. La figure II.4 montre la structure de cette technologie :

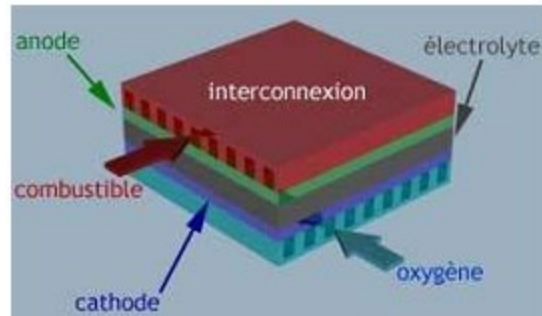


Figure II.4 : Technologie plane classique [12]

II.4.3 Technologie plane monolithique

Cette technologie est une variante de la technologie plane. La surface active est augmentée par repliement des supports d'électrode, ce qui offre une meilleure densité de puissance (environ $4\text{kW}/\text{dm}^3$). Elle est présentée pour la première fois par Argonne National Laboratory en 1984. La figure II.5 montre la structure de cette technologie :

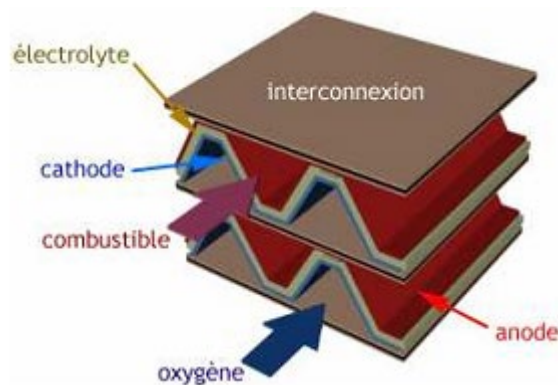


Figure II.5 Technologie plane monolithique [12]

II.4.4. Technologie Sulzer Hexis

C'est une technologie développée par Sulzer. Elle est à la fois plane et circulaire. La société Sulzer a présenté en 2001 une chaudière à gaz pour maison individuelle, qui délivre une puissance de 1kW (électrique) et 3kW (thermique) [17].

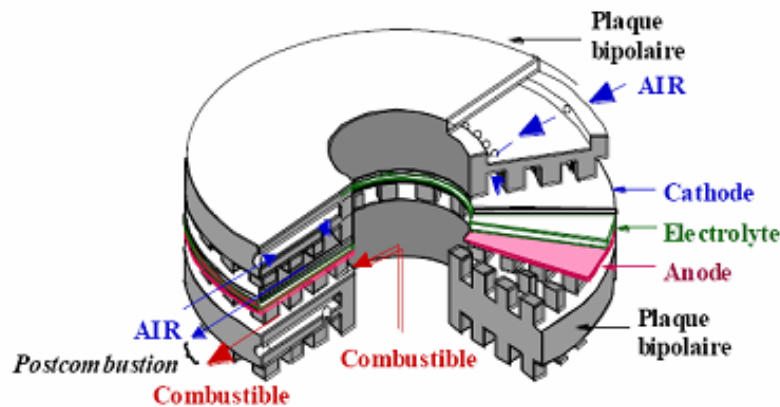


Figure II.6 Technologie Sulzer [18]

II.5 Raisons du choix

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

- 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.6. Modélisation d'un 'stack' SOFC

Dans cette partie, Nous étudierons une approximation grossière pour arriver à un modèle dynamique pour un empilement de piles à combustible SOFC tubulaire. Ce type des piles a la plus haute température de fonctionnement qu'elle peut atteindre 1050°C, donc l'eau produite dans ce cas est à l'état gazeux.

II.6.1. Energie libre de Gibbs, tension à vide

Généralement, un bilan d'énergie nécessite la connaissance de l'énergie apportée à un système et de celle qu'il fournit. Dans le cas des piles à combustible, l'énergie fournie est électrique et thermique et est facilement quantifiée. L'énergie apportée représente l'énergie chimique contenue dans les gaz entrant dans la pile (figure II.7).

Cependant, la définition de cette énergie peut présenter quelques ambiguïtés.

Pour une réaction électrochimique, on se base sur l'énergie libre de Gibbs qui représente l'énergie disponible pour un travail externe en négligeant celui effectué par des changements de pression ou de volume [19]. En effet, ces derniers n'interviennent pas dans la conversion d'énergie dans la pile à combustible puisque la réaction électrochimique a lieu à pression et température constantes.

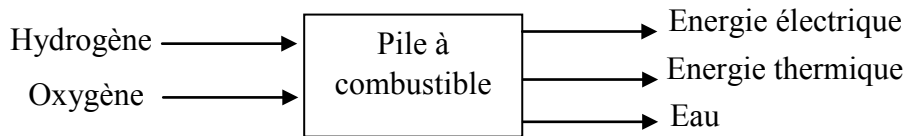


Figure II.7 : Entrées/sorties d'une pile à combustible [19].

Pour une réaction chimique, l'énergie ressemble à un potentiel et ce qui entre en compte, ce c'est la variation de l'énergie de Gibbs de formation ΔG de la réaction chimique entre produits et réactifs qui est importante. Elle s'exprime par

$$\Delta G = \sum G_{\text{produits}} - \sum G_{\text{réactants}}$$

Si l'on considère la réaction hydrogène/oxygène de la pile (II.3)

$$\Delta G = G_{\text{H}_2\text{O}} - G_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}G_{\text{O}_2} \quad (\text{II.4})$$

Tel que G_i : l'énergie libre de Gibbs du constituant (i) où $i=(\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2 \text{ et } \text{O}_2)$

Le travail électrique maximal W_{el} obtenu par une pile à combustible fonctionnant à température et à pression constante est donné par la variation de l'énergie libre de Gibbs de la réaction électrochimique [19,20]:

$$W_{\text{el}} = \Delta G = -nFE \quad (\text{II.5})$$

- n : nombre d'électrons participants à la réaction, où $n=2$ dans notre cas.
- F : constante de Faraday, qui correspond à la charge d'une mole d'électrons.
 $F = |e^-| N = (1.602 \cdot 10^{-19})(6.023 \cdot 10^{23}) \approx 96488 \text{ [C/mol]}$
 N : nombre d'Avogadro.
- E : tension idéale dite aussi tension réversible ($i=0$).

D'autre part, d'après la seconde loi de la thermodynamique, la variation de l'énergie libre de Gibbs est donnée comme suit :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- ΔH : la variation de l'enthalpie en [J/mol].
- ΔS : la variation de l'entropie en [J/mol/K].
- T : la température de fonctionnement de la pile en [K].

Où

$$\Delta H = H_{\text{H}_2\text{O}} - H_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}H_{\text{O}_2} \quad (\text{II.6.a})$$

- H_i : l'enthalpie du constituant (i) où $i=(\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2)$

$$\Delta S = S_{\text{H}_2\text{O}} - S_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}S_{\text{O}_2} \quad (\text{II.6.b})$$

- S_i : l'entropie du constituant (i) où $i=(\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2)$

En réalité, les grandeurs ($G, \Delta G, H, \Delta H, S$ et ΔS) dépendent de la température et de la pression.

A partir de l'équation (II.5) on peut écrire :

$$\Delta G^0 = -n F E^0 \quad (\text{II.7})$$

- E^0 : la tension idéale à pression standard ($P_0 = 1\text{atm}$) qui varie en fonction de la température.

II.6.2 Tension idéale standard en fonction de la température

Le calcul de E^0 se fait à partir du calcul de ΔG^0 .

D'après l'équation (II.6), on peut écrire :

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- ΔH^0 : la variation de l'enthalpie à pression standard
- ΔS^0 : la variation d'entropie à pression standard

D'après les équations (II.6.a) et (II.6.b) on écrit :

$$\Delta H^0 = H^0_{H_2O} - H^0_{H_2} - \frac{1}{2}H^0_{O_2} \quad (\text{II.8.a})$$

$$\Delta S^0 = S^0_{H_2O} - S^0_{H_2} - \frac{1}{2}S^0_{O_2} \quad (\text{II.8.b})$$

Tel que:

- H^0_i : l'enthalpie du constituant (i) ; $i = (H_2O, H_2, O_2)$
- S^0_i : l'entropie du constituant (i) ; $i = (H_2O, H_2, O_2)$

Les expressions d'entropie et d'enthalpie à pression constante standard de chaque constituant

(i) en fonction de leur coefficient de chaleur molaire $C_{p,i}$ est donné par :

$$H^0_i(T) = H^0_i(298.15) + \int_{298.15}^T C_{p,i} \cdot dT \quad (\text{II.9.a})$$

$$S^0_i(T) = S^0_i(298.15) + \int_{298.15}^T \frac{C_{p,i}}{T} \cdot dT \quad (\text{II.9.b})$$

Avec:

- $H^0_i(298.15)$: l'enthalpie du constituant (i) aux conditions standards (1atm et 298.15°K).
- $S^0_i(298.15)$: l'entropie du constituant (i) aux conditions standards (1atm et 298.15°K).

L'expression de C_p d'un gaz parfait est :

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 \quad (\text{II.9.c})$$

Les valeurs de $H^0(298.15)$ et $S^0(298.15)$ des constituants (H_2 , O_2 et H_2O) sont données dans le tableau suivant :

Gaz parfait	$H^0(298.15)$ [J/mol]	$S^0(298.15)$ [J/mol/K]
H_2	0	130.684
O_2	0	205.138
H_2O	-285.830	69.91

Tableau II.1 : Entropie et enthalpie à 298.15K de H_2 , O_2 et H_2O [21].

Posant ($T_0 = 298.15$) et faisant l'intégral pour les équations (II.9.a) et (II.9.b), on obtient :

$$H^0_i(T) = H^0_i(T_0) + a_i(T - T_0) + b_i\left(\frac{T^2 - T_0^2}{2}\right) + C_i\left(\frac{T^3 - T_0^3}{3}\right) \quad (\text{II.10})$$

$$S^0_i(T) = S^0_i(T_0) + a_i \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + b_i(T - T_0) + C_i\left(\frac{T^2 - T_0^2}{2}\right) \quad (\text{II.11})$$

L'application de la loi de Nernst sur l'équation (II.3) donne l'expression de la tension idéale en fonction des conditions de fonctionnement qui est comme suit :

$$E = E^0 + (RT/2F) \ln. (P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5} / P_{H_2O}) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- E^0 : la tension standard (pression standard et température variable) ;
- R : la constante des gaz parfaits (8.314 J/mol/K) ;
- T : la température de fonctionnement en Kelvin ;
- P_{H_2} , P_{O_2} et P_{H_2O} : les pressions partielles de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau respectivement en [atm].

La valeur de la tension standard E^0 dépend de la température et aussi de l'état des produits. et comme on a cette fois l'eau produite est sous forme gazeuse, donc deux nouveaux paramètres sont définies qui sont l'entropie et l'enthalpie de la vapeur d'eau à 25°C et 1atm.

Ces paramètres sont donnés dans le tableau suivant

	$H^0(298.15)[J/mol]$	$S^0(298.15)[J/mol/K]$
H_2Og	-241.8	188.7

Tableau II.2 : Entropie et enthalpie aux conditions standard de la vapeur d'eau [22].

A noter que les paramètres concernant l'hydrogène et l'oxygène ne seront pas changés, et leurs valeurs sont les mêmes données dans le tableau II.1

Les valeurs données par le tableau II.2 seront utilisées pour calculer l'entropie et l'enthalpie standard de la vapeur d'eau en fonction de la température. L'application numérique sur les relations : (II.10), (II.11), (II.8.a), (II.8.b), (II.8) et (II.7) permet le tracé de la tension standard en fonction de la température. L'allure obtenue est donnée par la figure suivante.

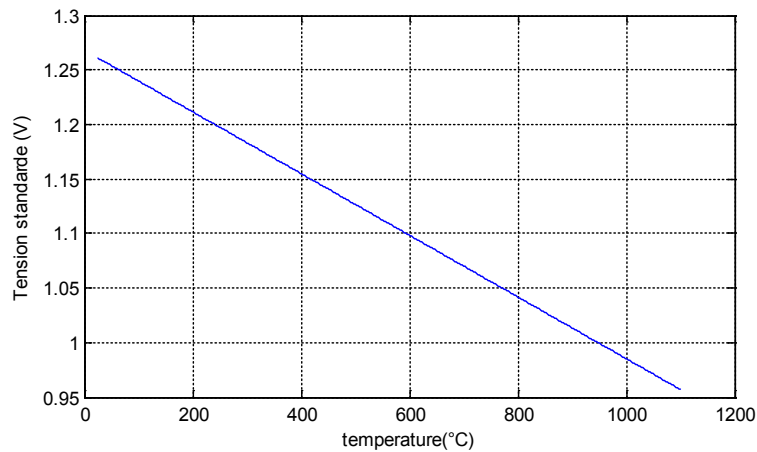


Figure II.8 : Tension standard en fonction de la température (cas vapeur).

L'équation de la droite présentée dans la figure précédente est :

$$E^0 = 1.184 - 2,83 \cdot 10^{-4}(T - 298,15) \quad (\text{II.13})$$

Pour une température de 1000°C, la valeur de E^0 est 0.91V.

Donc l'équation (II.12) devienne :

$$E = 1.184 - 2.83 \cdot 10^{-4} + (RT/2F) \ln. (P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5} / P_{H_2O}) \quad (\text{II.14})$$

D'après cette dernière équation, il nous reste à déterminer les différentes pressions partielles.

II.6.3. Calcul des pressions partielles

Dans ce cas ; le calcul des pressions est en fonction des débits molaires des gaz (entrants, sortants et consommés) de chaque compartiment anodique et cathodique. Prenons le cas d'hydrogène, qui est en réalité stocké dans une bouteille sous pression, et pour, qu'il sera utilisé pour alimenter une pile à combustible, une vanne placée entre le réservoir de stockage et la coté anode de la pile est nécessaire pour bien contrôler le débit d'hydrogène qui entre dans la pile. La pression aussi dans le compartiment anodique doit être contrôlée, pour cela une autre vanne est placée à la sortie de l'anode. L'ensemble des débits molaires qu'on peut les définir pour l'hydrogène sont :

- Le débit qui entre dans le compartiment anodique définit par $q_{H_2}^{\text{in}}$
- Le débit consommé se qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et l'électricité définit par $q_{H_2}^{\text{r}}$

- Le débit qui sort du compartiment sans participé dans la réaction définit par $q_{H_2}^{out}$

En considérant l'hydrogène comme un gaz parfait, et en appliquant l'équation des gaz parfaits on obtient :

$$P_{H_2} V_{an} = n_{H_2} RT \quad (II.15)$$

- V_{an} est le volume de l'anode ;
- n_{H_2} est le nombre de moles d'hydrogène dans le compartiment anodique [kmol] ;
- R est la constante des gaz parfaits en [(1.atm)/(kmol.K)] ;
- T est la température en [K].

Les paramètres V_{an} , R et T sont considérés constants. La dérivé de l'équation (II.15) donne .

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (II.16)$$

Tel que : q_{H_2} est le débit molaire de l'hydrogène et qui est la dérivé de n_{H_2} exprimé en [kmol/s].

Avec :

$$q_{H_2} = q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r \quad (II.17)$$

Ainsi :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (II.18)$$

D'après [23], l'expression du débit molaire consommé est donnée en fonction du Courant circulant dans la pile selon la loi de Faraday comme suit:

$$q_{H_2}^r = N_{cel} / (2F) I_{fc}^r = 2K_r I_{fc}^r \quad (II.19)$$

Tel que :

- N_{cel} est le nombre de cellule constituant le stack ;
- I_{fc}^r est le courant circulant dans la pile ;
- $K_r = N_{cel} / 4F$ est une constante définie afin de simplifier le modèle.

On doit exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode $q_{H_2}^{out}$ en fonction de sa pression à l'intérieur d'électrode P_{H_2} . Pour cela on prend le cas général d'un orifice

étouffé, alimenté avec une mixture de gaz ayant la masse molaire moyenne M [24]. A température constante, l'orifice présente la caractéristique suivante [25] :

$$W/P_u = K' \sqrt{M} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

- W est le débit massique sortant du canal [kg/s] ;
- K' est la constante qui dépend en principal de la surface d'orifice

On peut aussi, exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode en fonction de la pression à l'intérieur du compartiment anodique par l'équation suivante :

$$q_{\text{H}_2}^{\text{out}}/P_{\text{H}_2} = K_{\text{an}}/\sqrt{M_{\text{H}_2}} = K_{\text{H}_2} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

- K_{an} est la constante de la vanne coté anode ;
- M_{H_2} est la masse molaire de l'hydrogène.

En substituant (II.19) et (II.22) dans (II.18) on obtient :

$$\frac{d}{dt}(P_{\text{H}_2}) = RT/V_{\text{an}} (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - K_{\text{H}_2} P_{\text{H}_2} - 2K_r I_{\text{fc}}^r) \quad (\text{II.23})$$

Après simplification du (II.23) et application de la transformée de Laplace on trouve :

$$P_{\text{H}_2} = \frac{1/K_{\text{H}_2}}{(1 + \frac{V_{\text{an}}}{RTK_{\text{H}_2}} s)} q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - 2K_r I_{\text{fc}}^r \quad (\text{II.24})$$

On peut réécrire (II.24) sous la forme :

$$P_{\text{H}_2} = \frac{1/K_{\text{H}_2}}{(1 + \tau_{\text{H}_2} s)} (q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - 2K_r I_{\text{fc}}^r) \quad (\text{II.25})$$

Concernant la vapeur d'eau et l'oxygène, un travail similaire est fait afin de déterminer leurs pressions partielles, où on trouve finalement les deux expressions suivantes :

Pour l'oxygène :

$$P_{\text{O}_2} = \frac{1/K_{\text{O}_2}}{(1 + \tau_{\text{O}_2} s)} (q_{\text{O}_2}^{\text{in}} - 2K_r I_{\text{fc}}^r) \quad (\text{II.26})$$

Pour la vapeur d'eau :

$$P_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{(1+\tau_{H_2O} S)} 2K_r I_{fc}^r \quad (II.27)$$

On voit que la quantité d'oxygène consommée représente la moitié de celle de l'hydrogène. On peut expliquer ça par le fait que pour former une molécule d'eau, on a besoin de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène, comme le montre l'équation (II.3). Dans l'équation (II.27), on ne trouve pas l'expression du débit molaire d'eau entrant, car l'eau est produite à l'intérieur de la pile.

II.6.4. Performances réelles

Les différentes chutes qui apparaissent au niveau de la pile SOFC

1. Chutes d'activation
2. Chutes ohmique
3. Chutes de concentration.

D'après les références [24], [25] et [26], la seule source de pertes considérée est de type ohmique. Les pertes d'activation et les pertes de concentration de l'oxygène et de l'hydrogène sont négligeables.

L'expression des chutes ohmique est :

$$V_{ohm} = r I_{fc}^r \quad (II.29)$$

Avec : r représente la résistance totale de la pile.

II.6.5 Expression de la tension en charge de la pile

La tension à la sortie de la pile est donnée par l'expression suivante :

$$V_{pil} = N_{cel} (1.184 - 2.93 \cdot 10^{-4} (T - 298.15) + (RT/2F) \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5} / P_{H_2O})) - r I_{fc}^r \quad (II.30)$$

II.7 Système de commande d'une pile à combustible type SOFC

Dans cette partie, on va déterminer les valeurs de consignes pour les débits d'hydrogène et d'oxygène ainsi que pour le courant circulant dans la pile.

II.7.1 Rapport entre les débits réactants

Cet rapport est entre le débit d'hydrogène et le débit d'oxygène. donnée avec l'expression suivante :

$$r_{H-0} = q_{H_2}^{in}/q_{O_2}^{in} \quad (II.31)$$

pour des raisons de sécurité, la valeur de ce rapport est choisit de sorte que, la différence entre la pression d'hydrogène et celle de l'oxygène ne doit pas dépasser 4 kPa en conditions normales de fonctionnement et 8 kPa en conditions transitoires [24].

II.7.2. Taux d'utilisation de combustible :

C'est le rapport entre le débit d'hydrogène consommé ($q_{H_2}^r$) et le débit d'hydrogène fourni à la pile ($q_{H_2}^{in}$), il est donné par l'expression suivante :

$$U = q_{H_2}^r/q_{H_2}^{in} \quad (II.32)$$

La grandeur de référence du débit d'hydrogène fourni à la pile en fonction du courant définie comme suivant :

$$q_{H_2}^{ref} = 2 K_r I_{fc}^r / U_{opt} \quad (II.33)$$

Et du débit d'oxygène de référence définie par :

$$q_{O_2}^{ref} = q_{H_2}^{ref} / r_{H-0} \quad (II.34)$$

La réponse chimique dans le processeur de carburant est d'habitude lente et elle est associée au temps d'échange des paramètres dans la réaction chimique suite à un changement dans les débits des réactants. Cette fonction de réponse dynamique est modélisée comme une fonction de transfert de premier ordre avec une constante de temps [24].

$$q_{H_2}^{in}/q_{H_2}^{ref} = 1/(1 + \tau_f S) \quad (II.35)$$

$$q_{O_2}^{in}/q_{O_2}^{ref} = 1/(1 + \tau_r S) \quad (II.36)$$

II.7.3 Limitation du courant

Afin de limiter le courant lors du régime transitoire, on définit deux nouvelles grandeurs pour le taux d'utilisation qui sont : le taux d'utilisation maximum (U_{max}) et le taux d'utilisation minimum (U_{min}). Où le courant est limité comme suivant :

$$U_{min} q_{H_2}^{in} \leq 2 K_r I_{fc}^r \leq U_{max} q_{H_2}^{in} \quad (II.37)$$

Donc :

$$U_{\min} q_{H_2}^{in} / 2K_r \leq I_{fc}^r \leq U_{\max} q_{H_2}^{in} / 2K_r \tag{II.38}$$

II.7.4 Consigne du courant

Le courant de référence de la pile est calculé à partir de la puissance de référence P_{ref} que nous voulons que la pile la fournir :

$$I_{fc}^{ref} = P_{ref} / V_{pil} \tag{II.39}$$

Le temps de réponse électrique dans la pile est généralement rapide et associé à la vitesse à laquelle la réaction chimique est capable de restaurer le courant demandé par la charge. Cette fonction de réponse dynamique est modélisée par une fonction de transfert de premier ordre avec une constante de temps τ_e [26,27].

$$I_{fc}^r = I_{fc}^{ref} / (1 + \tau_e \cdot s) \tag{II.40}$$

Si on suppose que la dynamique de réglage du courant est quasi infinie, l'équation (II.38) s'écrit :

$$U_{\min} q_{H_2}^{in} / 2K_r \leq I_{fc}^r \leq U_{\max} q_{H_2}^{in} / 2K_r \tag{II.41}$$

Le schéma bloc de tout le modèle présenté dans ce chapitre est donné dans la figure suivante :

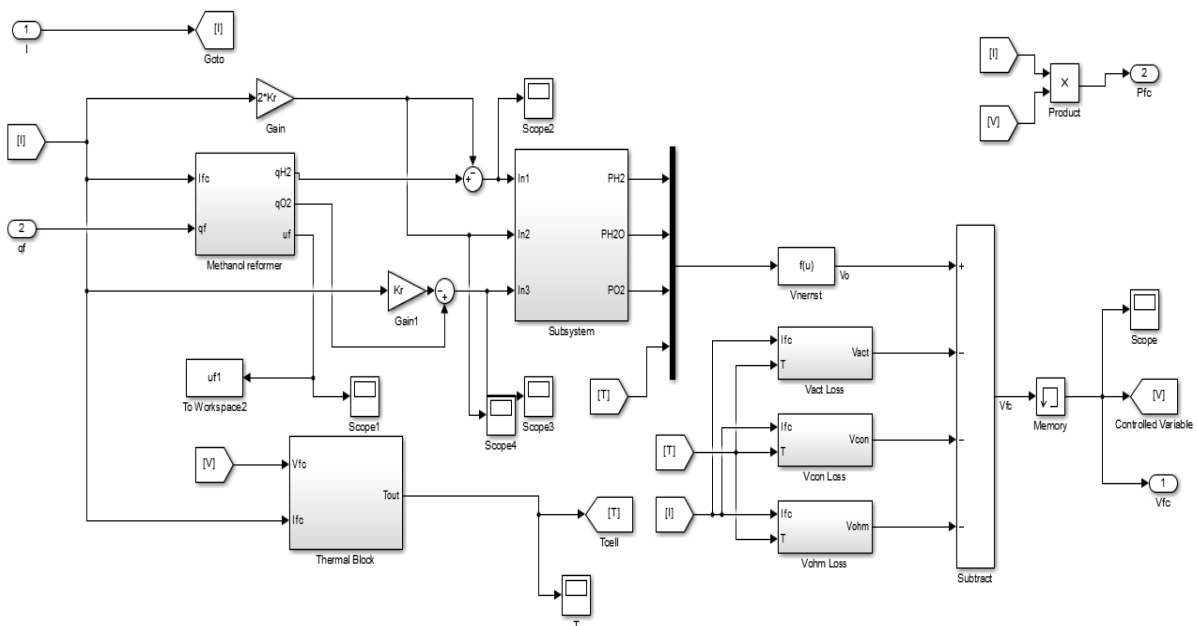


Figure II.9 : Schémas bloc du modèle d'une pile SOFC.

II.8. 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 II.10.

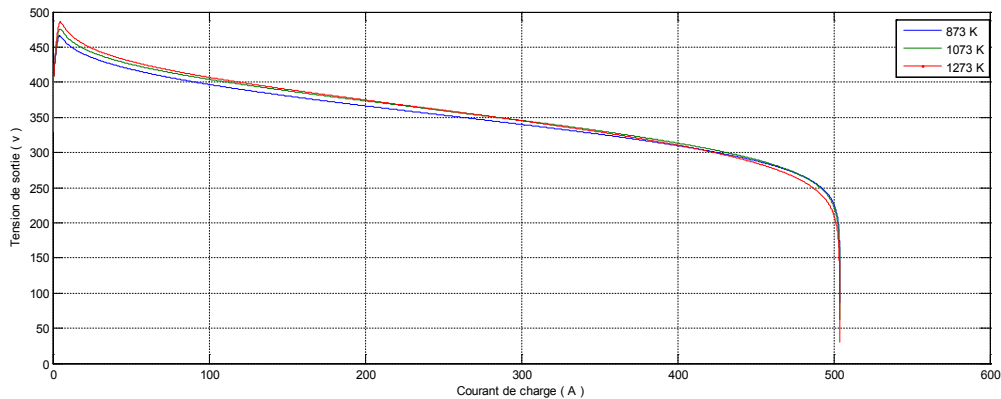


Figure II.10 : les caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes températures.

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.

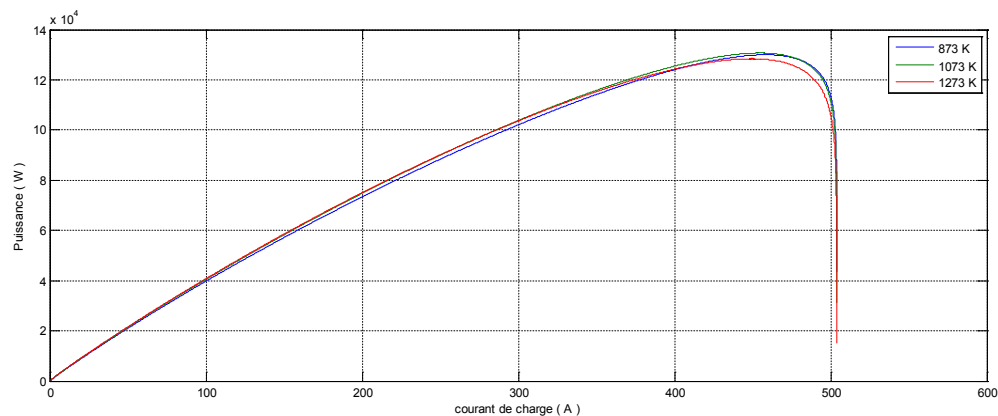


Figure II.11 : les caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes températures.

Les courbes de puissance en fonction du courant (P-I) du modèle SOFC à différentes températures sont illustrées à la (Fig. II.11). 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.

II.9. Les réponses dynamique

La réponse dynamique SOFC est principalement affectée par les éléments suivants :

- Temps est constant.
- Les pressions dépendantes des temps constants.
- La température dépendante du temps constant (propriété thermodynamique) .

II.9.1 La réponse dynamique due à l'effet de charge à double-couche :

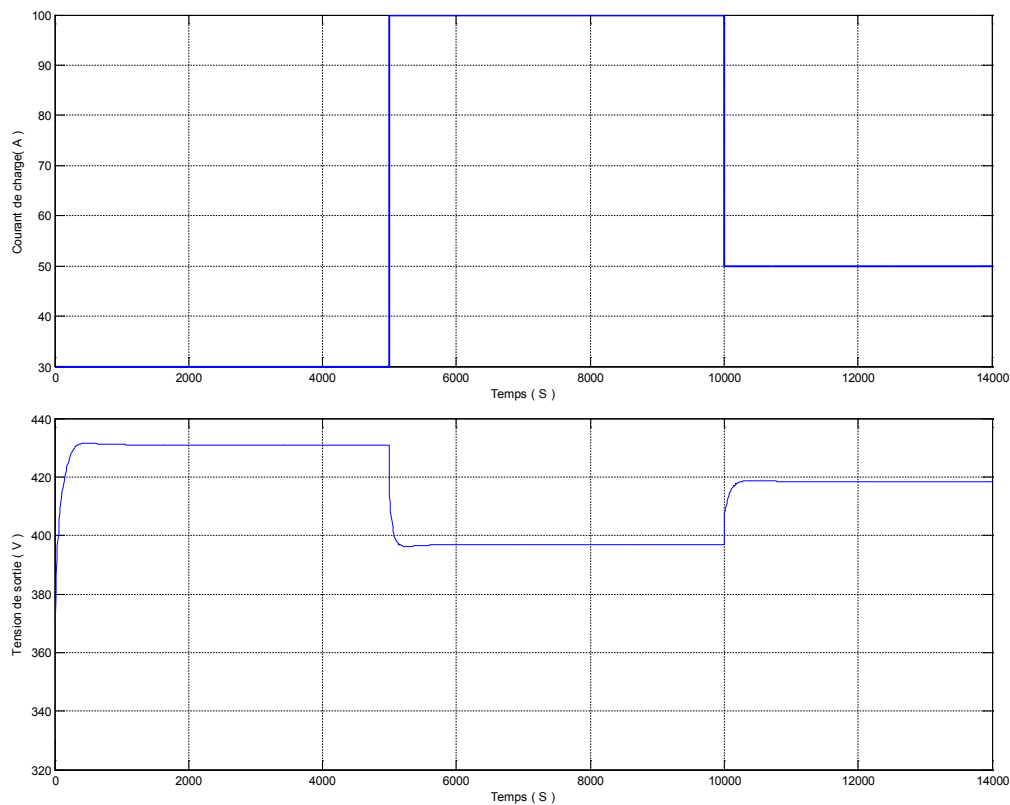


figure II. 12 : Réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (effet de charge à double couche)

La figure II.12 montre la réponse dynamique du modèle dans la petite échelle de temps (ms). Le courant de charge passe de 0 à 100 A à 5000s, puis à 50 A à 10000 s. La partie inférieure de la figure montre la réponse de tension de sortie du SOFC correspondante pour un effet de charge à double couche. Lorsque le courant de charge augmente, la tension de sortie de la pile à combustible chute immédiatement en raison de la chute de tension ohmique. Ensuite, la tension chute doucement jusqu'à sa valeur finale.

II.9.2 Les réponses dynamiques dues à l'effet des températures

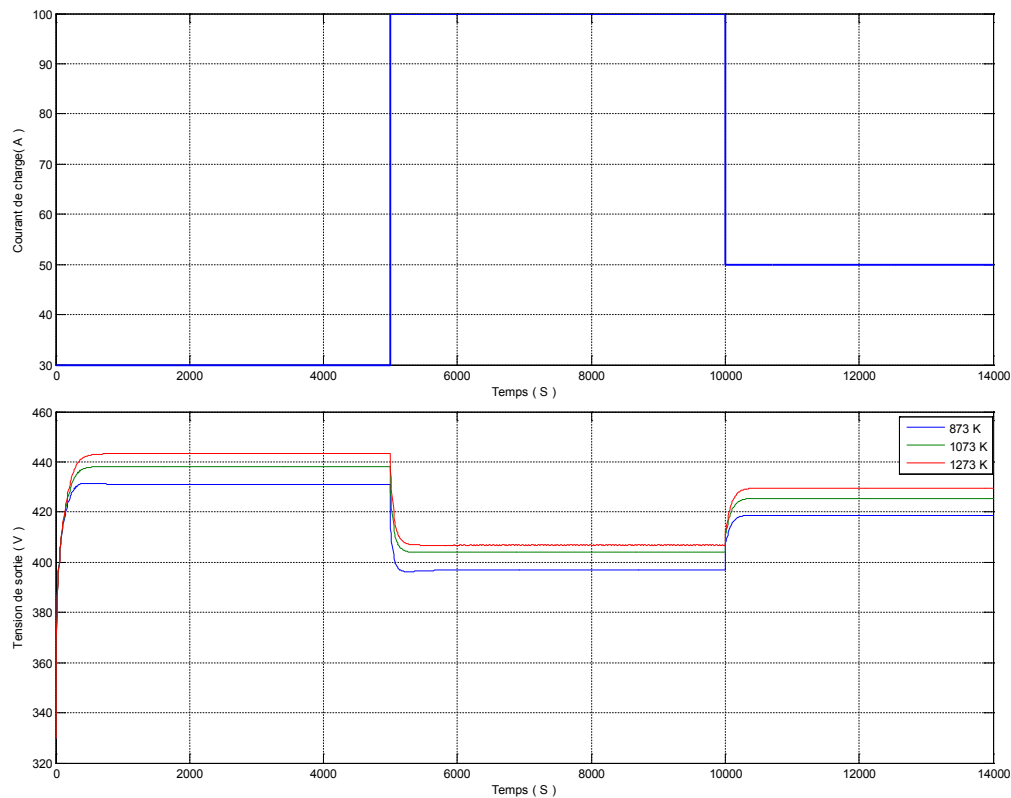


Figure II.13 : réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC à différentes températures.

Le temps thermique dynamique équivalent à SOFC peut être dans une dizaine de seconde (4500s).

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation et la simulation d'une pile à combustible SOFC de configuration géométrique tubulaire est présentée. Les résultats trouvés présentent les différentes réponses de la pile et l'influence de quelques paramètres comme la température, le courant de charge et les pressions sur le fonctionnement de cette pile.

III.1. Introduction

La logique 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.

Dans le domaine du génie électrique, la commande par logique floue a fait l'objet de plusieurs Travaux : dans la commande des convertisseurs statiques et dans la commande des machines électriques [28], [29], [30], dans la navigation de robots mobiles [31], [32]. Toutes ces applications ont démontré qu'un régulateur à logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel [29], [33].

Les performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système.

Dans ce chapitre nous citons d'abord les concepts de base, les opérations et structures des systèmes et des modèles flous, où nous donnons un aperçu sur les ensembles flous, principe de la logique floue à savoir la notion des règles floues, la fuzzification et la défuzzification. Dans la deuxième partie nous utilisons la technique de commande floue pour commander la tension de sortie de la pile à combustible de type SOFC développé dans le chapitre précédent.

III.2. 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. Zedeh 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.

III.3. 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 termes « 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.

III.4. 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 :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow \{0,1\} \quad (\text{III.1})$$

$$x \rightarrow \mu_A(x) = 1 \quad \text{si } x \in A \quad (\text{III.2})$$

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

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 $[0,1]$:

$$x \rightarrow \mu_A(x) / X \rightarrow [0,1] \tag{III.3}$$

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

$$A = \{ \mu_A(x), x / x \in X \} \tag{III.4}$$

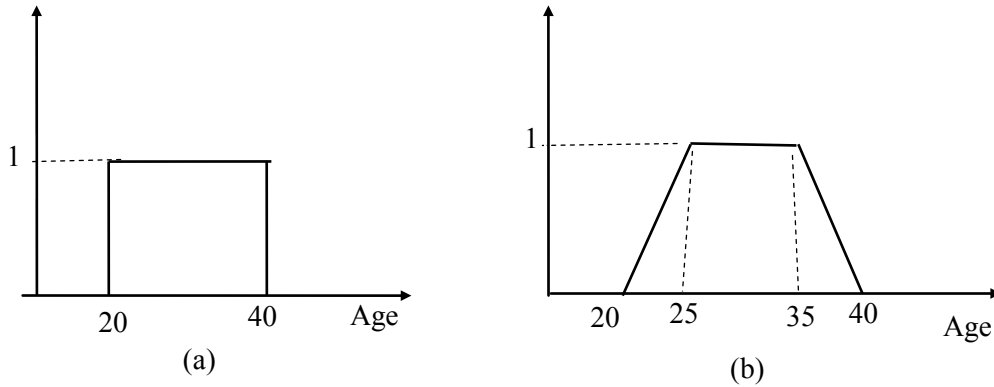


Figure III.1 : Fonctions d'appartenance : (a) logique binaire, (b) logique floue

III.4.1. Caractéristiques d'un sous ensemble flou

Les fonctions d'appartenances sont définies par quatre caractéristiques :

1. **Le type** : elles peuvent être par exemple triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, sigmoïdes ou des singletons (figure III.2).

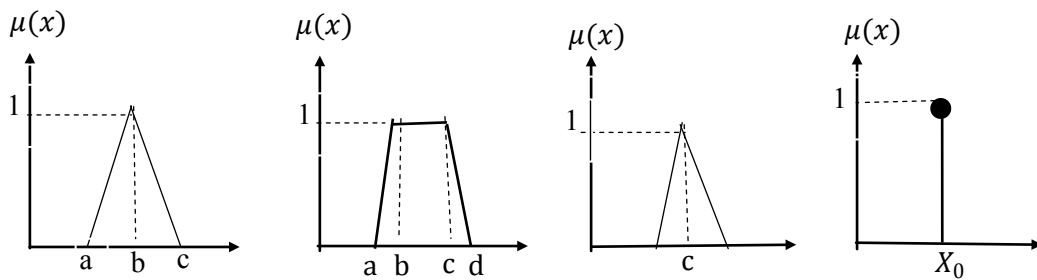


Figure III.2: Types de fonctions d'appartenance

2. **Le noyau** : c'est la valeur qui satisfait entièrement la propriété décrite par A. Quand le noyau est réduit à un point, celui-ci est appelé valeur modale. Il est donné par :

$$N(A) = \left\{ x \in \frac{x}{\mu_A(x)} = 1 \right\} \tag{III.5}$$

3. **Le support** : la propriété est vérifiée, au moins partiellement. Il est donné par :

$$S(A) = \{x \in X / (\mu_A(x) < 1)\} \quad (\text{III.5})$$

4. **La hauteur** : c'est la valeur maximale de la fonction d'appartenance qui est égale à 1 (figure III.3).

$$H(A) = \max (\mu_A(x)) \quad (\text{III.6})$$

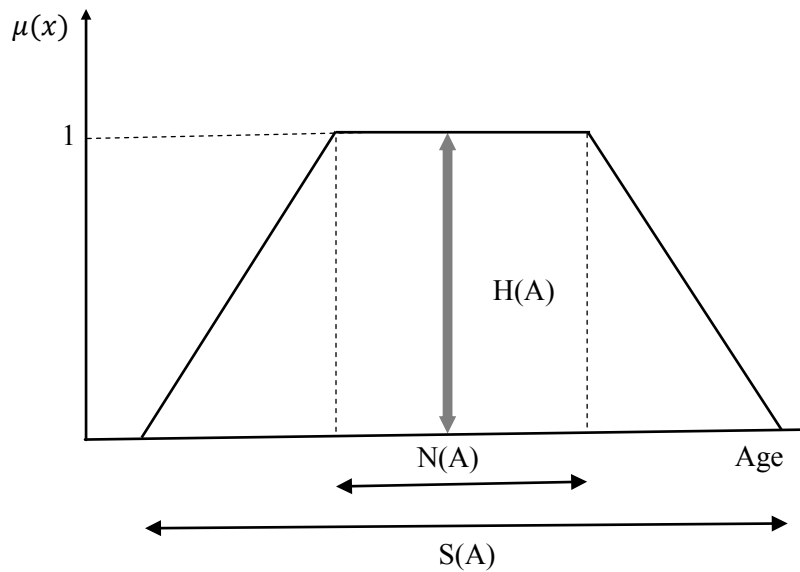


Figure III.3 : Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

III.4.2. Opérateurs logiques flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues. On peut définir des opérateurs par ET, OU, ou la négation.

a. **L'intersection « ET »** : Le degré de vérité (degré d'appartenance) de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés d'appartenance de A et de B :

$$\mu(A \text{ ET } B) = \min (\mu(A), \mu(B)) \quad (\text{III.7})$$

b. **L'union « OU »** : Le degré de vérité (degré d'appartenance) de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés d'appartenance de A et de B :

$$\mu(A \text{ OU } B) = \max (\mu(A), \mu(B)) \quad (\text{III.8})$$

c. **Complément** : L'opérateur correspondant est la négation.

III.4.3. Notion de variable linguistique

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent généralement la connaissance humaine sous forme de règles du type (Si ... Alors ...) La prémisse de la règle (l'antécédent) est constituée des conditions qu'il faut satisfaire afin de réaliser la conclusion de la règle (la conséquence).

III.5. Les systèmes flous

III.5.1. Définition

Tous simplement on peut qualifier un système flou lorsqu' un système est bas sur la logique floue, ou ce dernier peut être utilisé soit comme une base de représentation des différentes formes de connaissances de système, soit pour modeler les interactions et les relations entre les variables du systèmes.

Un système flou est constitué, généralement, de quatre composantes (figure III.4) : La fuzzification, la base de règles, le mécanisme d'inférence et la défuzzification.

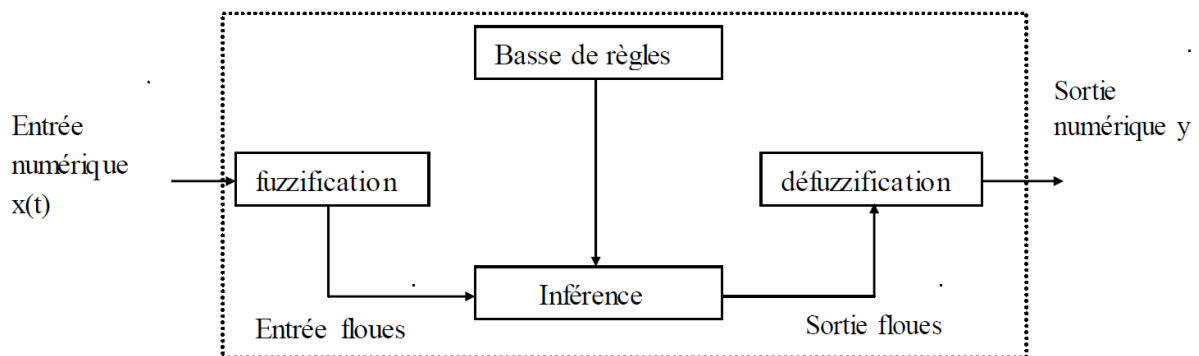
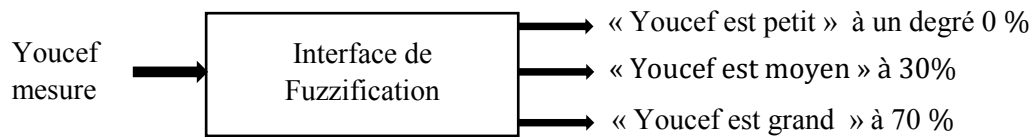


Figure III.4 : Système flou standard.

III.5.2. Fuzzification :

L'objet de la fuzzification est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour différentes variables d'entrée. Un degré de compatibilité est obtenu par superposition des variables numériques d'entrées est des variables linguistique.

Exemple :



Pour fuzzifier, il faut donner:

- L'univers du discours ; i.e. : Plage de variations possibles de l'entrée considérée.
- Une partition en classe floue de cet univers.
- Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes

Il faut fuzzifier les entrées ET les sorties du processus flou.

III.5.3. Base de règles floue

Les systèmes à logique floue utilisent une expertise exprimée sous forme d'une base de règles du type: Si....Alors...

Si (X est A) **Alors** (Y est B).

On appelle règles d'inférence l'ensemble des différentes règles reliant les variables linguistiques d'entrée d'un système aux variables linguistiques de sorties par des opérateurs flous. Les règles floues sont élaborées à partir de la base de connaissance du concepteur, la structure de ces règles est en générale du type :

Si	"Antécédent 1" ET/OU		"Conséquence 1"
	"Antécédent 2" ET/OU	Alors	"Conséquence 2"
	"Antécédent n"		"Conséquence n"

III.5.4 L'inférence floue

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance.

- **Méthode d'inférence max-min (Mamdani)** : Cette méthode réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max.

La dénomination de cette méthode, dite Max-Min ou "implication de Mamdani", est due à la façon de réaliser les opérateurs ALORS et OU de l'inférence.

- **Méthode d'inférence max-prod (Larsen)** : La différence par rapport à la méthode précédente réside dans la manière de réaliser la conclusion « ALORS ». Dans ce cas, on utilise le produit. Les fonctions d'appartenance partielles ici ont la même forme que la fonction d'appartenance dont elles sont issues multipliées par un facteur d'échelle vertical qui correspond au degré d'appartenance obtenu à travers l'opérateur « ET ». On l'appelle également « implication de Larsen ».

- **Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno)** : Dans ce cas, l'opérateur "ET" est réalisé par le produit, de même que la conclusion "ALORS". Cependant, l'opérateur "OU" est réalisé par la valeur moyenne des degrés d'appartenance intervenant dans l'inférence.

D'autres méthodes ont été élaborées, ayant chacune une variante spécifique. Néanmoins, la méthode Max-Min est de loin la plus utilisée à cause de sa simplicité.

III.5.5. Défuzzification

La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie. Cette étape consiste à transformer la valeur linguistique issue de régulateur flou en valeur numérique. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature, telles que la méthode du maximum et la méthode du centre gravité.

- **Défuzzification par centre de gravité** : La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x)$. Dans ce contexte, il suffit de calculer l'abscisse XGR.

L'abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale:

$$x_{GR} = \frac{\int x_R \cdot \mu_{RES}(x_R) dx_R}{\int \mu_{RES}(x_R) dx_R} \quad (III.10)$$

- **Défuzzification par centre maximum** : La défuzzification MM est plutôt utilisée lorsqu'il s'agit de discriminer une valeur de sortie (Ex: reconnaissance de formes).

C'est la moyenne des valeurs de sorties les plus vraisemblables

$$sortie = \frac{\int_S y \cdot dy}{\int_S dy} \quad (III.11)$$

$$où S = \left\{ y_0 \in U / \mu(y_0) = \sup_{y \in U} (\mu(y)) \right\}$$

III.6. Commande floue de la pile à combustible SOFC

La première étape pour la réalisation d'un régulateur flou 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 (tableau III.1, figure III.6).

Nous avons synthétisé le régulateur à logique Floue du type Mamdani pour le réglage de la tension de sortie, la stratégie de commande est comme dans la figure III.5.

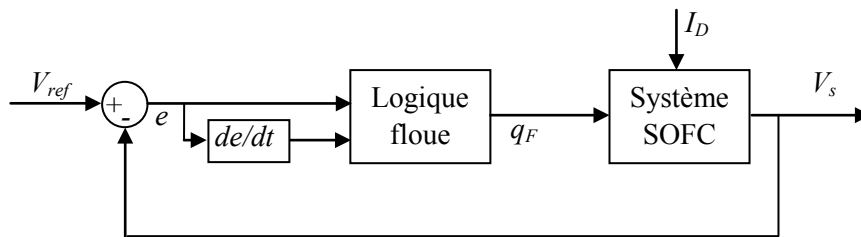


Figure III.5 : Stratégie de commande floue du système SOFC

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 (tableau III.2). ce tableau montre la table des règles du contrôleur flou relative au système ou toutes les entrées. Les ensembles flous de l'erreur « e » et la dérivé de l'erreur « de ».

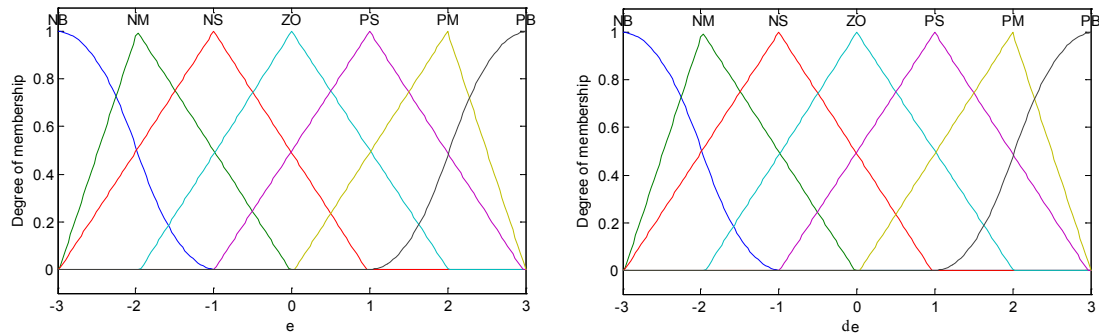


Figure III.6 : Fonction d'appartenance des l'entrées

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

Tableau III.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	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

Tableau III.2 : Table de règles d'inférences.

Résultats de simulation

Dans cette section, pour montrer la comparaison de la robustesse du contrôleur flou 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.7 à III.10.

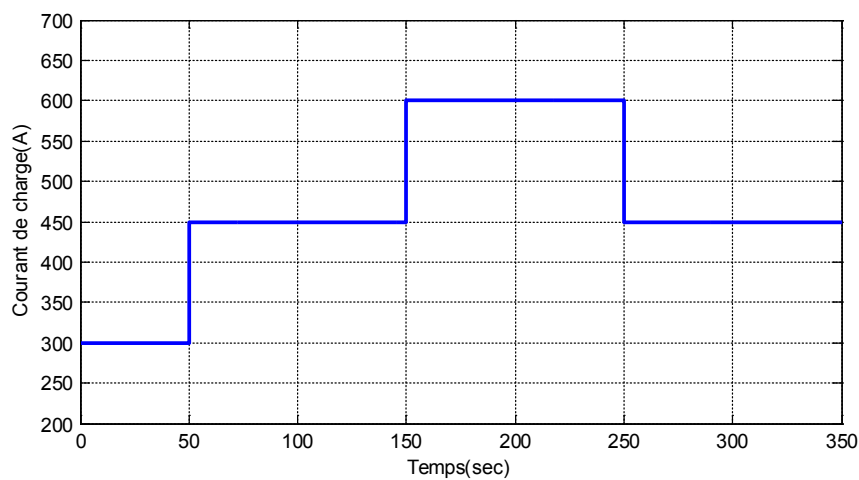


Figure III.7 : Le courant de charge I_D

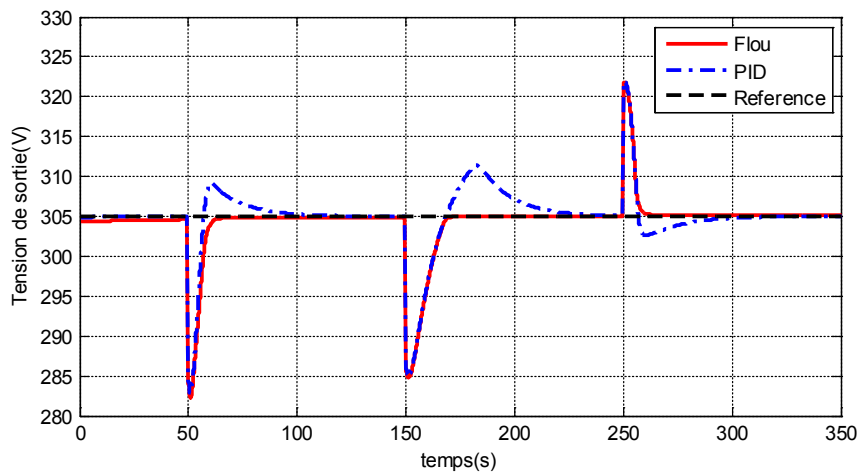
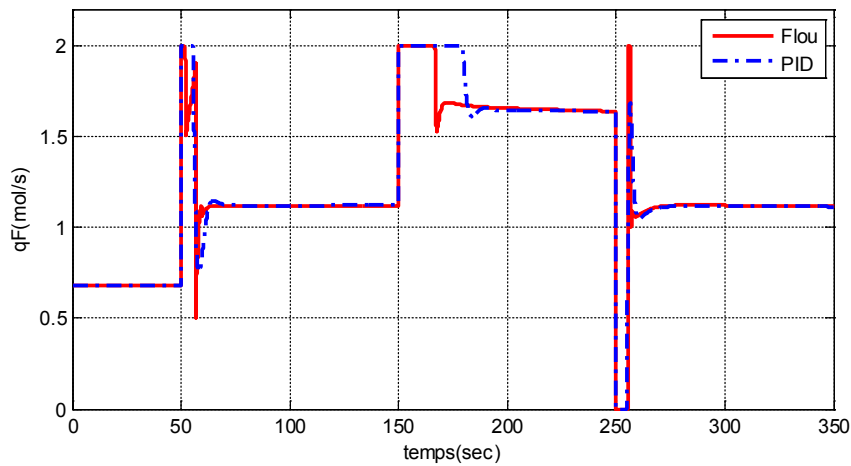
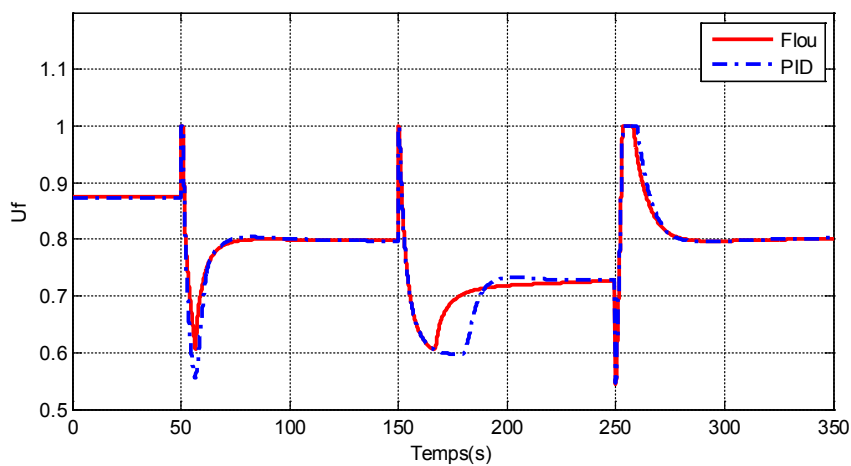


Figure III.8 : La tension de sortie V_s

Figure III.9 : Le débit du combustible q_F Figure III.10 : Le taux d'utilisation du combustible U_f

D'après les résultats de la simulation, nous pouvons dire que le contrôleur flou proposé 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.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les notions générales de la logique floue et la composition d'un système de commande floue, puis nous avons utilisé la commande par logique 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

L'objectif de ce travail est de étudions 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 le deuxième 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.

Le troisième chapitre comporte une étude théorique de basse de 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 de la conception. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation obtenus par l'application de la commande floue et la commande PID, Ces deux résultats nous ont permis de confirmer l'avantage d'une commande floue 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 constituera un complément précieux à la commande classique PID.

Références Bibliographiques

- [1] K. Kordesch et G. Simader, « Fuels Cells and Their Applications », ed VCH (1996).
- [2] www.annso.freesurf.fr
- [3] Toufik AZIB, « *Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible* », Thèse de Doctorat, 2010.
- [4] Lasgaa Habib Chaouki, « *Commande d'un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible* », mémoire de master, 2016.
- [5] K. Rajashekara, « *Propulsion system strategies for fuel cell vehicles* ». SAE Technical paperseries.
- [6] E. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci, N. Barry, « A fuel cell based domestic un interruptible power supply ». Applied Power Electronics Conference, APEC'02, 2002, vol. 1, pp. 605-613.
- [7] Fuel Cell Handbook EG&G Technical Services, Inc., 6ème édition, novembre 2002.
- [8] A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n° 2, février 2002, pp. 8-9.
- [9] 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.
- [10] K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring, « the power conditioning system for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, 2001, vol. 4, pp. 2197-2202.
- [11] G. LEFEVRE, « *Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible* », Doctorat d'Université Joseph Fourier, 26 Novembre 2004.
- [12] Electric & Hybrid : Vehicle technology international Annual review 2005.
- [13] http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/high_temp_sofc.php
- [14] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, D3360. «Fuel Cell Handbook», (Seventh Edition), U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, November 2004.

-
- [15] T. Alleau, «La pile SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) », Fiche 5.2.6 – reçue : nov. 2003, Révision de: janvier 2004, Source : AFH2.
- [16] yril GAUDILLERE, « *Développement de matériaux d'électrodes pour pile SOFC dans un fonctionnement sous gaz naturel/biogaz* ». Applications dans le cadre de procédés « pré-reformeur » et « monochambre », Université de bourgogne, 2010.
- [17] <http://www.clubpac.net/>
- [18] Fabrice Mauvy, “Les piles à combustibles produiront-elles l’énergie propre de demain ?”, Institut de la Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB-CNRS), octobre 2004.
- [19] Amel LACHICHI."Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant: Application aux convertisseurs pour pile à combustible". Thèse de Doctorat (2005). Université de franche comte.
- [20] :www.fuelcellknowledge.org
- [21] Guillaume FONTES, « *Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques* », thèse doctorat INPT, septembre 2005.
- [22] John W.Hill, Ralph H.Petrucci, Martin Dion et Martin Lamoureux, “Chimie Générale “, Livre. pp : A22 Annex C.
- [23] Caisheng Wang, “ Modeling and control of hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell distributed generation systems “, thèse doctorat de Montana State University, juillet 2006.
- [24] Emanuel Florin MOGOS, ““Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le control des sources“”, thèse doctorat de l’Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Lille, juillet 2005.
- [25] J. Padullés, G. W. Ault, J.R. McDonald, “An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation“, Journal of Power Sources, Vol.86, 2000, pp. 495-500.
- [26] F. Jurado, M. Valverde, « Genetic fuzzy control applied to the inverter of solid oxide fuel cell for power quality improvement », Electric Power Systems Research, Vol.76, 2005, pp. 93-105.
- [27] Y. Zhu, K. TOMSOVIC, “ Development of models for analyzing the load following performance of micro-turbines and fuel cells”, Electric Power Systems Research, Vol.62, 2002, pp. 1-11
-

-
- [28] R.Ketata, " *Méthodologies de régulation numérique incluant la logique floue* ", Thèse de Doctorat, L.A.A.S Toulouse, 1992.
- [29] M. Bauer" Application de contrôleurs à logique floue pour la commande vectorielle des machines à induction: commande en vitesse et en position "Rapport de stage ingénieur-ESIM-22 Février 1995.
- [30] A. Ibaliden" Implantation d'un régulateur de type flou sur des commandes d'onduleurs pilotant des machines alternatives : application à la détermination des correcteurs "- Rapport d'activités 1994-1995
- [31] B. Beaufre " *Application de la logique floue à la planification de trajectoires de robots mobiles dans des environnements inconnus* ", Thèse de Docteur de l'université de Poitiers, Décembre 1994.
- [32] P. Y. Glornec " *Algorithme d'apprentissage pour systèmes d'inférences floues* " - INSA de Rennes (IRISIA)- 1999.
- [33] B. Demaya," *Commande floue des systèmes à dynamiques complexes- Application à la commande d'un moteur thermique* ", Thèse de Doctorat LAAS Toulouse , 1994.