

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCINECE TECHNOLOGIE

FILIERE : ENERGIE REVENABLE

OPTION : ENERGIE RENOUEVABLE  
EN ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: CHOUIDIRA Mohmmmed Assil**

**BAKRI Akram**

**Intitulé**

**MODELISATION FLOU DE LA PILE A  
COMBUSTIBLE DE TYPE SOFC**

**Soutenu devant le jury composé de:**

BENGUESMIA Hani	Université M'sila	Président
OUGUENI Fayssal	Université M'sila	Rapporteur
HERIZI Abdelghafour	Université M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2018/2019**

## Remerciement

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donnée courage

Patience et force durant toutes ces années d'étude.

Nous sommes très heureux de témoigner de nos profond estime à notre encadreur **Dr.OUAGUENI.Fayssal**, enseignant à l'Université de M<sup>ed</sup> Boudiaf à m'sila, nous lui sommes très reconnaissant de nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et d'avoir proposé et dirigé ce travail.

Nous tenons à lui exprimer nos profond respect et nos grande admiration pour son personnalité et sa générosité et nous le remercions de nous avoir orientée pour la réalisation de ce travail et d'avoir énormément contribué à notre formation dans ce domaine.

## Dédicace

A la mémoire de ma mère ;

A la mémoire de mon père ;

A la mémoire de mon frère ABDELHAKIM ;

A mes sœurs ;

A mes frères ;

A mes nièces ;

Et à mes neveux.

## Dédicace

Je remercie Dieu tout puissant qui m'a fait compléter cette recherche humble

Et à ma chère mère la source d'amour et tendresse et mon père Que Dieu lui  
accorde la miséricorde et dieu fait du paradis son lieu de repos

A tous ceux qui portaient dans son coeur un amour pour moi et sont fleurs de  
ma maison mes freres et soeurs, à la meilleure fille de la maison et à la source de  
son ravissement

Et à toute la famille où qu'ils se trouvent sans en enlever un, ainsi qu'à tous les  
proches et amis a tous mes professeurs Et à tous les collègues de la Faculté des  
sciences et technologies

Et à qui conque se fâche de ne pas écrire son nom

أشكر الله العظيم الذي جعلني أكمل هذا البحث المتواضع

وإلى والدتي العزيزة مصدر الحب والحنان وأبي رحمه الله وجعل الجنة مكانه للراحة

لكل من حمل في قلبه حباً لي وزهور بيتي إخواني وأخواتي ، لأفضل ابنة البيت ومصدر نشوبها

وإلى جميع أفراد الأسرة أينما كانوا دون إزالة واحدة ، وكذلك لجميع أفراد العائلة والأصدقاء

لجميع أساتذتي

وإلى جميع الزملاء في كلية العلوم والتكنولوجيا

وكل من يغضب لعدم كتابة اسمه.

# Table des matières

Table de matières.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Notions et symboles.....	VII
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 01 : Les piles à Combustible</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Historique.....	3
1.3 Généralité sur les piles à combustible .....	5
1.3.1 Principe de fonctionnement .....	5
1.3.2 Différents types des piles à combustible.....	6
1.3.2.1 Les piles à combustible à Basse Température.....	7
1.3.2.1.1 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC).....	7
1.3.2.1.2 Pile à méthanol direct (DMFC) .....	8
1.3.2.1.3 Pile à acide phosphorique (PAFC).....	9
1.3.2.1.4 Pile alcaline (AFC) .....	10
1.3.2.2 Piles à combustible à haute température.....	11
1.3.2.2.1 Pile à carbonate fondu (MCFC).....	11
1.3.2.2.2 Pile à oxyde solide (SOFC) .....	12
1.4 les differences entre les types de pile à combustible .....	13
1.5 Applications.....	14
1.5.1 Les applications portables .....	14
1.5.2 Les applications stationnaires .....	15
1.5.3 Les applications de transport .....	16
1.6 Les avantages et inconvénients des piles à combustible.....	17
1.6.1 Avantages.....	18
1.6.1.1 Haut rendement énergétique.....	18
1.6.1.2 Silencieuses .....	18
1.6.1.3 Emissions de pollution limitées .....	19
1.6.3.4 Modularité.....	19
1.6.3.5 Diverses températures de fonctionnement .....	19
1. 6.3.6 Pas parties rotatives.....	20

1.6.2 Inconvénients.....	20
1.6.2.1 Le coût .....	20
1.6.2.2 Le poids et le volume.....	21
1.6.2.3 La durée de vie .....	21
1.6.2.4 La gestion thermique du module .....	21
1.6.2.5 Le carburant .....	22
1.7 Stockage D'hydrogène .....	22
1.7.1 Stockage sous forme comprimé.....	23
1.7.2 Stockage sous forme liquéfié.....	23
1.7.3 NaBH <sub>4</sub> .....	23
1.7.4 Hydrures métalliques .....	23
1.8 Conclusion.....	24

## **Chapitre 02 : Développement de Piles à Combustible de type SOFC**

2.1 Introduction.....	25
2.2 Les composants d'une cellule SOFC.....	25
2.2.1 Electrolyte .....	25
2.2.2 Anode.....	25
2.2.3 Cathode .....	26
2.2.4 Interconnexion.....	26
2.3 Les différentes technologies des SOFC.....	26
2.3.1 Technologie tubulaire.....	26
2.3.2 Technologie plane classique.....	27
2.3.3 Technologie Sulzer Hexis.....	28
2.3.4 Technologie monolithique.....	29
2.4 Développement dynamique d'un stack SOFC .....	30
2.4.1 Les pressions partielles .....	30
2.4.2 Conservation des matériaux .....	33
2.4.3 Tension de sortie de SOFC.....	35
2.4.4 la structure d'un modèle dynamique de SOFC réaliser par MATLAB .....	38
2.4.4.1 Paramètre de simulation .....	39
2.5 Système de commande d'une PAC type SOFC .....	39
2.5.1 Rapport entre les débits réactants .....	39
2.5.2 Taux d'utilisation de combustible .....	39
2.5.3 Limitation du courant .....	40
2.5.4 Consigne du courant.....	40

2.6 Validation du modèle ..... 41

    2.6.1 caractéristiques statique de la pile SOFC ..... 41

    2.6.2 Les réponses dynamique ..... 44

        2.6.2.1 La réponse dynamique due à l'effet de charge à double-couche ..... 44

        2.6.2.2 Les réponses dynamiques dues à l'effet des pressions ..... 45

        2.6.2. Les réponses dynamiques dues à l'effet de la température ..... 46

2.7 Conclusion ..... 47

## **Chapitre 03 : Modélisation Floue de la Pile à Combustible SOFC**

3.1 Introduction ..... 48

3.2 Structure générale des modèles flous ..... 50

3.3 Modèles flous de type Takagi-Sugeno..... 54

    3.3.1 1 Structure de zéro et premier ordre de TAKAJI-SUGENO (TS)..... 54

3.4 Modèles flous des systèmes dynamiques..... 59

    3.4.1 Modèle flou multi-variable TS NARX ..... 61

3.5 Identification des modèles flous..... 63

3.6 Modélisation de la pile SOFC ..... 66

    3.6.1 résultats de simulation.....70

3.7 Conclusion ..... 71

Conclusion générale.....72





## Liste des figures

### Chapitre 01

<b>Figure 1-1</b>	Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839.....	3
<b>Figure 1-2</b>	schéma de principe de fonctionnement de la pile à combustible .....	4
<b>Figure 1-3</b>	classification des différentes piles à combustible selon leur puissance électrique, leur rendement et leurs applications .....	7
<b>Figure 1-4</b>	Schéma de fonctionnement d'une PEMFC (Pile CEA de 80 kWe Genepac composée de deux modules de 40 kWe) .....	8
<b>Figure 1-5</b>	Schéma de principe de fonctionnement de la pile DMFC .....	9
<b>Figure 1-6</b>	Schéma de fonctionnement de la PAFC (PAC PureCell model 400) ....	9
<b>Figure 1-7</b>	Schéma de fonctionnement d'une pile AFC ( Module de PAC du « Space Shuttle » de la NASA).....	10
<b>Figure 1-8</b>	Schéma de fonctionnement d'une MCFC Pile MTU à l'OPAC de la Porte Briançon (Paris) .....	11
<b>Figure 1-9</b>	Schéma de fonctionnement d'une SOFC Module plan testé par le Centre de Jülich.....	12
<b>Figure 1-10</b>	un portable chargé par une PAC ( model POWERTREEK (MyFc)).....	15
<b>Figure 1-11</b>	L'installation Siemens-Westinghouse de Irvine (220 kW) (2002) .....	16
<b>Figure 1-12</b>	Schéma d'une voiture équipé de la pile à combustion .....	17

### Chapitre 02

<b>Figure 2-1</b>	Cellule élémentaire tubulaire avec tube support en zircone stabilisée (SiemensWestinghouse) La Technologie cylindrique (air Au centre, combustible à l'extérieur).....	27
<b>Figure 2-2</b>	Technologie planaire classique .....	28
<b>Figure 2-3</b>	cellule unité de chez Sulzer-Hexis .....	29
<b>Figure 2-4</b>	Technologie planaire monolithique.....	30
<b>Figure 2-5</b>	Schéma de principe d'une pile à combustible à oxyde solide.....	30

<b>Figure 2-6</b>	Circuit électrique équivalent de l'effet de charge à double couche à l'intérieur d'une SOFC.....	36
<b>Figure 2-7</b>	schéma de simulation d'une pile SOFC réalisé en MATLAB.....	38
<b>Figure 2-8</b>	les caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes températures .	41
<b>Figure 2-9</b>	les caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes températures...	42
<b>Figure 2-10</b>	l'influence de débit d'hydrogène sur les caractéristiques (V-I) .....	43
<b>Figure 2-11</b>	l'influence de débit d'hydrogène sur les caractéristiques (P-I).....	43
<b>Figure 2-12</b>	réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC (effet de charge à double couche).....	44
<b>Figure 2-13</b>	réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC à différentes pressions .....	45
<b>Figure 2-14</b>	réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC à différentes températures .....	46

### Chapitre 03

<b>Figure 3-1</b>	Représentation interne d'un système flou .....	56
<b>Figure 3-2</b>	Diverses méthodes pour partitionner l'espace d'entrée.....	55
<b>Figure 3-3</b>	Méthode d'inférence du modèle flou Takagi-Sugeno .....	57
<b>Figure 3-4</b>	paramétrage de Ruspini des fonctions d'appartenance triangulaire .....	58
<b>Figure 3-5</b>	Schéma d'identification de modèle flou .....	64
<b>Figure 3-6</b>	Diagramme de la structure de Modélisation du système SOFC.....	66
<b>Figure 3-7</b>	Fonctions d'appartenances du courant de charge $I_D$ .....	67
<b>Figure 3-8</b>	Signal d'entrée vers le système SOFC.....	70
<b>Figure 3-9</b>	Sorties dynamiques de SOFC.....	71

## Liste des Tableaux

**Tableau 1-1** : les différences entre les piles à combustibles.

**Tableau 2-1** : les paramètres de simulation.

**Tableau 3-1** : Paramètres dans le modèle dynamique SOFC.

## NOTIONS ET SYMBOLES

a	Anode
c	Cathode
$\tau$	Constante de temps (s)
$\partial$	Tafel constant
$\beta$	Pente de Tafel
n	Nombre d'électrons participant à la réaction
r	Résistance ohmique ( $\Omega$ )
$I_L$	Courant de limitation (A)
E	Potentiel réversible en circuit ouvert (V)
$E_o$	Potentiel cellulaire réversible standard (V)
I	Courant de pile (A)
$V_s$	Tension de pile (V)
$V_a, V_c$	Le volume (V)
$V_{act}$	Pertes d'activation (V)
$V_{ohm}$	Pertes ohmiques (V)
$V_{conc}$	Pertes de concentration (V)
R	Constante de gaz, 8.3143 j/(mol k)
T	Température du gaz (K)
$T_s$	Température cellulaire (K)
F	La constante de Faraday (96487 C/mol)
$N_0$	Nombre de cellules dans la pile
$M_i$	Débit molaire des espèces $i$ (mol/s)
$H_2$	Hydrogène
$O_2$	Oxygène
$H_2O$	Eau
$P_{H_2}$	Pression partielle d'hydrogène (atm)
$P_{H_2O}$	Pression partielle de l'eau (atm)
$P_{O_2}$	Pression partielle d'oxygène (atm)
$q_o$	Débit d'oxygène à l'entrée (mol/s)
$q_H$	Débit de carburant en entrée (mol / s)
in	Entrée
out	Sortie
PAC	pile à combustible
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membranes Fuel Cell

## Notion et symboles

---

DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell

### Introduction générale :

Non-linéaire signifie que les interactions entre les objets qui composent le système (et qui sont donc les causes des transformations) sont telles qu'il n'existe ni proportionnalité des effets aux causes qui les sous-tendent ni additivité des causes sur ces effets. Des cas simples de non-linéarité se manifestent dans la vie de tous les jours dans le pot de confiture qui ne s'ouvre qu'après beaucoup d'efforts infructueux, mais qui s'ouvre alors d'un seul coup (effet de seuil), dans la mayonnaise qui prend d'un coup et non pas progressivement, dans les tourbillons, dans les ouragans, dans les embouteillage. Mais jusqu'à une date relativement récente, les dynamiques non-linéaires, (dans lesquelles au moins une des interactions est non-linéaire) étaient peu étudiées, car les mathématiques ne savent pas résoudre les équations différentielles qui les représentent. Plus exactement, la difficulté mathématique pour calculer la majorité des systèmes non-linéaires est telle, qu'elle n'a pu être résolue que depuis l'invention des ordinateurs. Ce n'est pas que les systèmes linéaires soient plus nombreux que les systèmes non-linéaires dans la nature ou dans la société, bien au contraire. Jusque-là, même si on savait que la proportionnalité et l'additivité étaient des propriétés plutôt rares, c'étaient les seules qu'on savait traiter mathématiquement. Avant toute modélisation, il est aussi nécessaire de définir l'environnement du système. Il faut avant toute modélisation, il est aussi nécessaire de définir l'environnement du système. L'environnement du système revient à délimiter celui-ci par un certain nombre de variables indépendantes d'entrées (entrées exogènes : excitations et perturbations) qui conditionnent l'état du système, et par des variables de sortie qui permettent de rendre compte, à tout instant, de la réponse (c'est à dire de l'évolution) du système vis-à-vis des excitations.

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

selon le type d'électrolyte utilisé, nous citons les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC**), Les piles au méthanol direct (**DMFC**), Les piles à acide phosphorique (**PAFC**), Les piles alcalines (**AFC**), Les piles à oxydes solides (**SOFC**), Les piles à carbonates fondus (**MCFC**). Et dans une n'importe qu'un système les piles à combustible aussi ont des avantages et des inconvénients, nous allons les citer dans notre premier chapitre.

Notre travail que nous allons faire est centré sur la pile à combustible à oxyde solide SOFC ou l'analyse de cette pile à combustible peut être divisée en deux zones: modélisation en régime permanent et modélisation dynamique, et pour cette dernière la méthode la plus courante pour étudier un système avec un système non linéaire consiste à l'approcher par un seul modèle linéaire (linéarisation autour d'un point d'équilibre).

L'un des plusieurs solutions est la modélisation floue. La logique floue, concerne principalement la représentation du type de connaissances imprécises qui sont courantes dans les systèmes naturels. Il facilite la représentation de ce type de connaissances dans les ordinateurs numériques en utilisant des ensembles flous. À partir de cette base, la logique floue utilise des opérateurs logiques pour rassembler et intégrer ces connaissances afin d'approcher le type de raisonnement commun à l'intelligence naturelle. Un modèle flou est un cadre de calcul basé sur les concepts d'ensembles flous, de règles **SI-ALORS** floues et de raisonnement flou, et nous allons utiliser modèle floue de Takagi-Sugeno.

Les modèles dynamiques flous du type Takagi – Sugeno ont été largement acceptés dans la communauté des contrôles pour sa capacité à représenter la dynamique non linéaire. Il a été démontré que les modèles flous TS ont une très bonne capacité d'approximation et d'interprétation des systèmes non linéaires généraux. La modélisation floue TS du système de pile à combustible à oxyde solide a été largement utilisée dans plusieurs documents.

Dans ce travail, nous allons utiliser le modèle dynamique de la pile à combustible de type SOFC, pour obtenir un modèle dynamique floue à temps discret multi-entrées une sortie unique (MISO) avec des conséquences linéaires. Ce modèle facilite le contrôle du système de pile à combustible.

Le travail est organisé de la manière suivante. Chapitre 1 Les piles à combustible, chapitre 2 Développement de piles à combustible de type SOFC chapitre 3 Modélisation floue de la pile à combustible SOFC

# **Chapitre 01 :**

## **Les Piles à combustibles**

## 1.1 Introduction

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

Ce chapitre présente tout d'abord un historique et une généralité sur les piles à combustibles, ainsi que les différents types, les applications et leurs avantages et inconvénients.

## 1.2 Historique

Le principe de la pile à combustible fut mis en évidence en 1839 par Sir William Grove, Juriste à la Royal Institution de Londres. Il étudia ce qui se révélera être un précurseur de ce type de générateur électrochimique en plaçant du platine dans des tubes remplis d'hydrogène et d'oxygène et en plongeant le tout dans de l'acide sulfurique. Evidemment, il constata une faible tension aux bornes de la cellule, mais il avait aussi saisi l'importance du contact à trois phases (gaz, électrolyte et platine) nécessaire à la production d'énergie

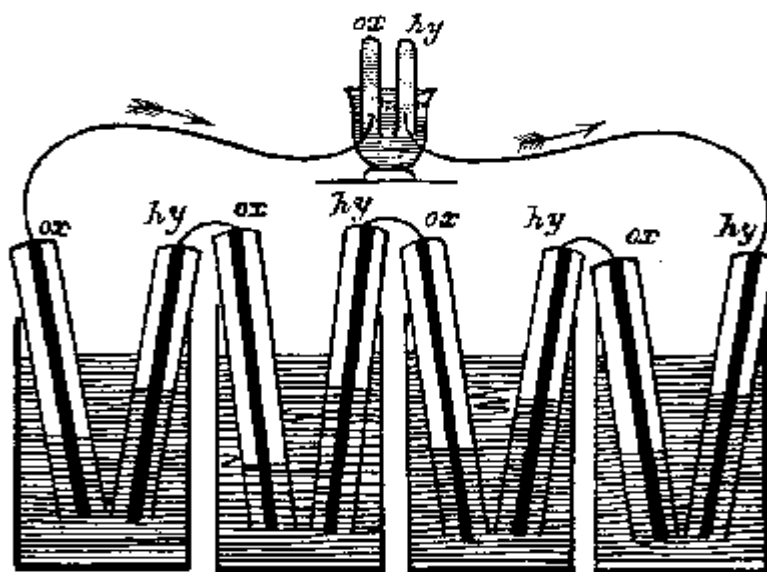


Fig1-1 :Expérience de sir WILLIAM GROVE en 1839

Il consacra ainsi son temps à la recherche d'un électrolyte permettant la production d'un courant électrique stable et fit remarquer, dès le départ, l'intérêt commercial que pouvait présenter un tel système si l'hydrogène venait à remplacer le bois et le charbon en tant que source énergétique. Une étape clé dans le développement des piles à combustible intervint en 1932. Francis Bacon mit au point une pile efficace en portant ses efforts sur les catalyseurs à base de nickel, moins coûteux que le platine. Sa pile fonctionnait avec de l'hydrogène et de l'oxygène, et il utilisa un électrolyte alcalin moins corrosif que ceux de ses prédécesseurs. Francis Bacon réussit, 27 ans plus tard, à surmonter des problèmes d'ordre technique en présentant une pile d'une puissance de 5 kilowatts, capable d'alimenter un poste de soudure. Cette même année, Harry Karl Ihrig (travaillant pour l'Allis Chalmers Manufacturing Company) présenta un tracteur équipé d'une pile alimentant un moteur d'une puissance de 20 chevaux.

Les plus grandes avancées sur le développement des piles à combustible provinrent certainement de la NASA dès la fin des années 1950. L'agence spatiale américaine cherchait alors à mettre au point un générateur électrique capable de fournir de l'énergie à bord des futures missions spatiales. Après avoir écarté les sources nucléaires, trop risquées, les batteries, trop lourdes et à durée de vie trop limitée, et l'énergie solaire, la NASA se tourna vers les piles à combustible. Plus de 200 contrats de recherche furent alors signés, destinés à couvrir tous les aspects du fonctionnement des piles à combustible. Nous savons maintenant l'importance du rôle des piles dans le succès des missions Gemini et Apollo.

Le succès de ces piles laissa augurer les perspectives les plus optimistes dès la fin des années 1960 : les piles pourraient constituer une réponse aux problèmes énergétiques du monde entier. Ce qui fit le succès des piles à bord des missions spatiales américaines (faible encombrement, hautes performances, peu ou pas d'émissions toxiques, production d'eau réutilisable) pourrait permettre de réaliser des centrales électriques stationnaires.

Malheureusement, ces piles, utilisant des électrolytes alcalins, nécessitaient un apport d'hydrogène pur, ce qui n'était techniquement pas compatible avec l'utilisation de combustibles ordinaires (gaz naturel, charbon) et peu coûteux comme source d'hydrogène. L'hydrogène ainsi produit contenait en effet des impuretés dommageables pour la pile (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone), ce qui écourtait considérablement la durée de vie des composants électrochimiques tels qu'ils avaient été conçus par la NASA

A ce jour et malgré les avancées technologiques réalisées au cours des trente dernières années, la commercialisation des piles à combustible reste marginale.

Depuis 160 ans, les chercheurs ont donc tenté d'améliorer les performances des piles d'un point de vue électrique, chimique et physique. De ces nombreuses recherches ont émergé cinq grandes familles de piles à combustible, classées selon le type d'électrolyte utilisé : les piles alcalines (AFC pour Alkaline Fuel Cells), les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell), les piles à acide phosphorique (PAFC pour Phosphoric Acid Fuel Cell), les piles à oxyde solide (SOFC pour Solid Oxide Fuel Cell) et les piles à carbonate fondu (MCFC pour Molten Carbonate Fuel Cell). Ces distinctions dans le mode de fonctionnement des différentes piles conditionnent leur champ d'application [7]

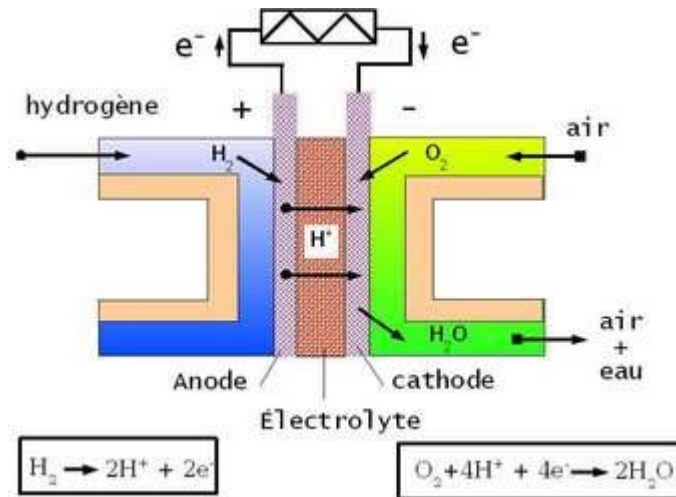
## **1.3 Généralité sur les piles à combustible**

### **1.3.1 Principe de fonctionnement**

Le principe de base de fonctionnement de la pile à combustible repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau. Les combustibles utilisés sont l'hydrogène pur ou les hydrocarbures. Pour pouvoir utiliser des combustibles de type méthane ou autres alcools, il faudrait des températures de fonctionnement élevées. Pour cette raison, on privilégie l'emploi de l'hydrogène pur pour les piles à combustible fonctionnant à basse température, les carburants traditionnels s'avérant trop peu réactifs à ces températures.

Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode qu'on nomme cellule . Cet empilement est contenu entre deux plaques bipolaires qui, par un système de rainure, assurent une arrivée des gaz combustible et comburant de manière homogène sur toute la surface des électrodes.

L'hydrogène entre dans la pile du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. Les gaz sont amenés sur les électrodes par des couches de diffusion, hydrophobes et conductrices qui permettent d'une part l'alimentation en gaz sur toute la surface des électrodes et d'autre part un contact électrique entre la couche réactive et la plaque bipolaire [8].



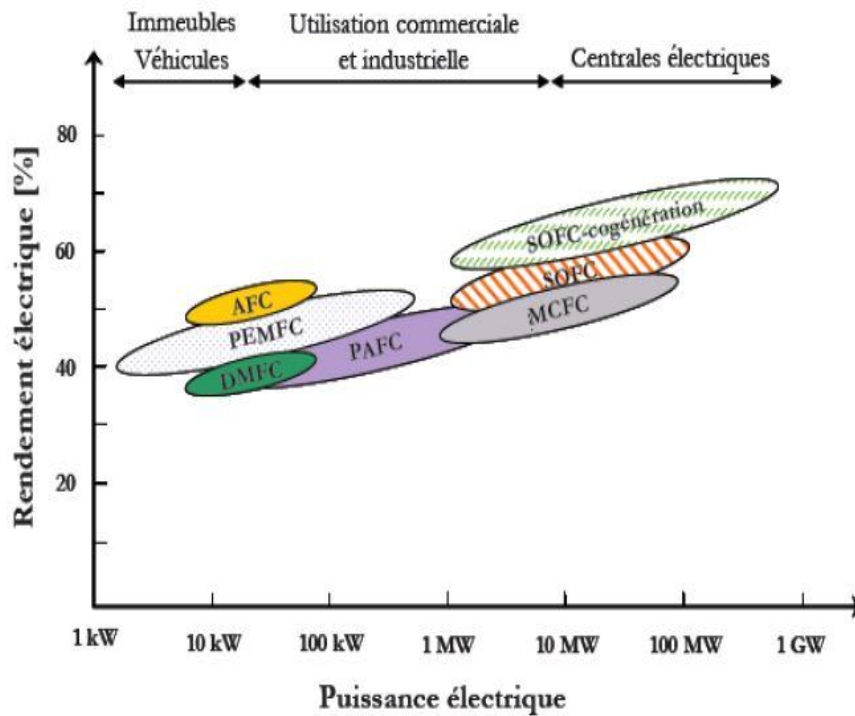
**Fig 1-2** : schéma de principe de fonctionnement de la pile à combustible

### 1.3.2 Différents types des piles à combustible :

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

La deuxième caractéristique utilisée pour classifier les piles à combustible est leur température de fonctionnement. On distingue six types les plus utilisés au stade de recherche et développement ou au stade de l'industrialisation qui sont :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange Membranes Fuel Cell) ;
- Les piles au méthanol direct (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell) ;
- Les piles à acide phosphorique (**PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell) ;
- Les piles 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)



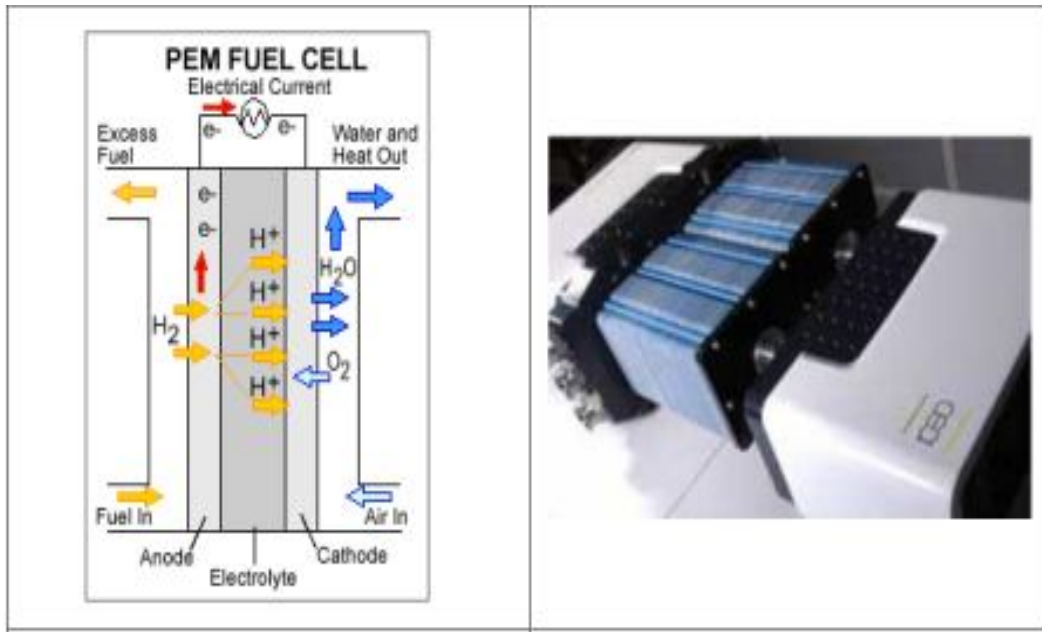
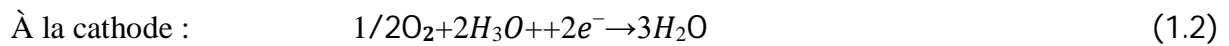
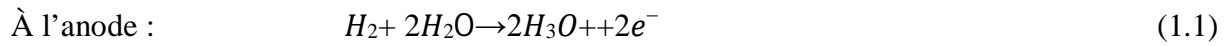
**Fig 1-3.** : la classification des différentes piles à combustible selon leur puissance électrique, leur rendement et leurs applications.

### 1.3.2.1 Les piles à combustible à Basse Température

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

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

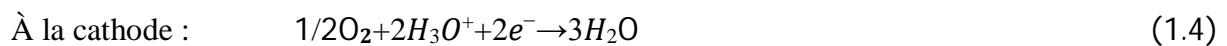
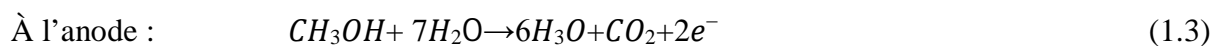
C'est la technologie la plus prisée surtout après l'avènement des membranes Nafion au début des années 80. Elle fonctionne à des températures basses (80°C) de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Cette dernière permet le passage des protons H<sup>+</sup>, un catalyseur à base de 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 [9] [10]. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :



**Fig 1-4** :Schéma de fonctionnement d'une PEMFC ( Pile CEA de 80 kWe Genepac composée de deux modules de 40 kW )

### 1.3.2.1.2 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 [11] [12]. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :



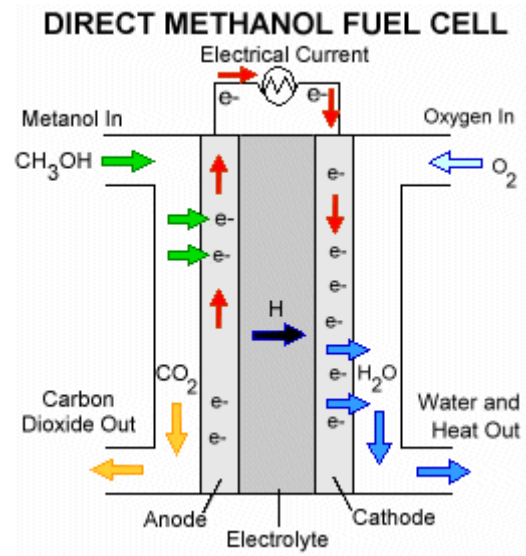


Fig 1-5 : Schéma de principe de fonctionnement de la pile DMFC

1.3.2.1.3 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 [13]. 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.

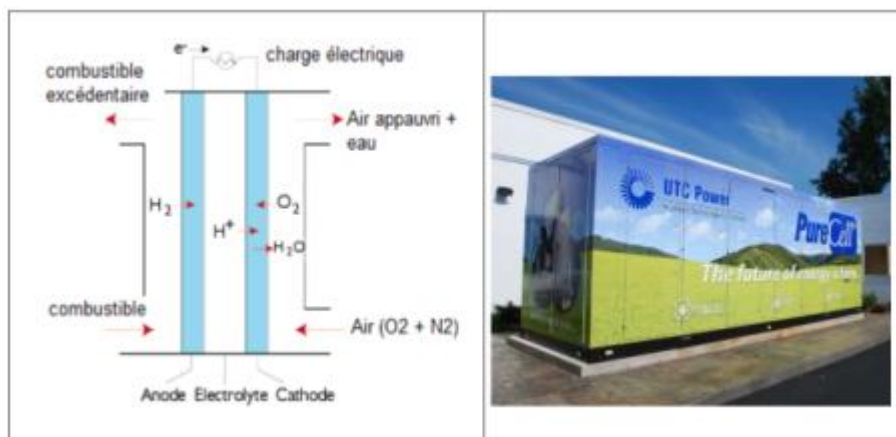


Fig 1-6 :Schéma de fonctionnement de la PAFC ( PAC PureCell model 400)

### 1.3.2.1.4 Pile alcaline (AFC)

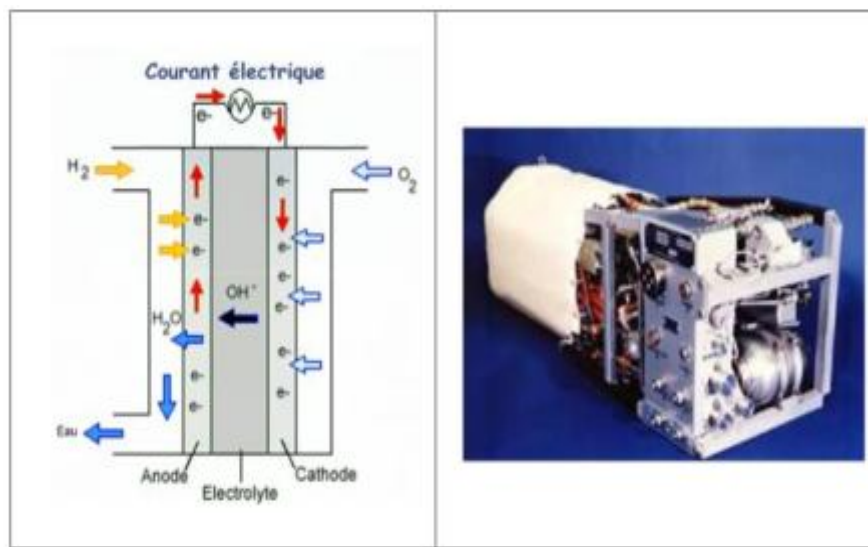
Les piles alcalines sont les piles à combustible développées au début des années 60 pour alimenter la navette spatiale Apollo. Elle utilise un électrolyte liquide, en général de l'hydroxyde de potassium (KOH) qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Cependant, elle ne travaille correctement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

Les 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 :



**Fig 1-7 :** Schéma de fonctionnement d'une pile AFC ( Module de PAC du « Space Shuttle » de la NASA )

### 1.3.2.2 Piles à combustible à haute température

On distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC

#### 1.3.2.2.1 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 CO<sub>2</sub> comme c'est le cas pour les piles à basses températures.

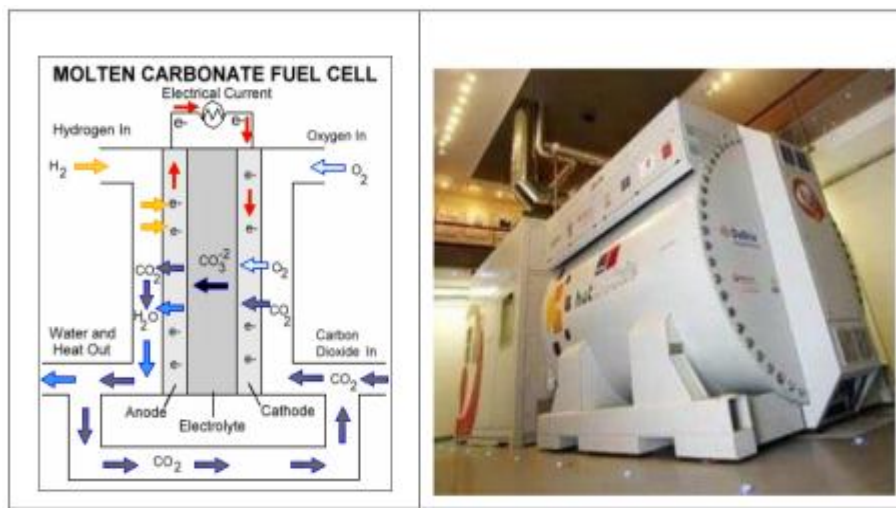
L'électrolyte est constitué d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenu par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO<sub>2</sub>). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel. Le choix des matériaux est important, en raison de la température de fonctionnement élevée et de la nature hautement corrosive de l'électrolyte [14].

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:

$$2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^- \quad (1.7)$$

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



**Fig 1-8 :** Schéma de fonctionnement d'une MCFC ( Pile MTU à l'OPAC de la Porte Briançon (Paris))

### 1.3.2.2 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.

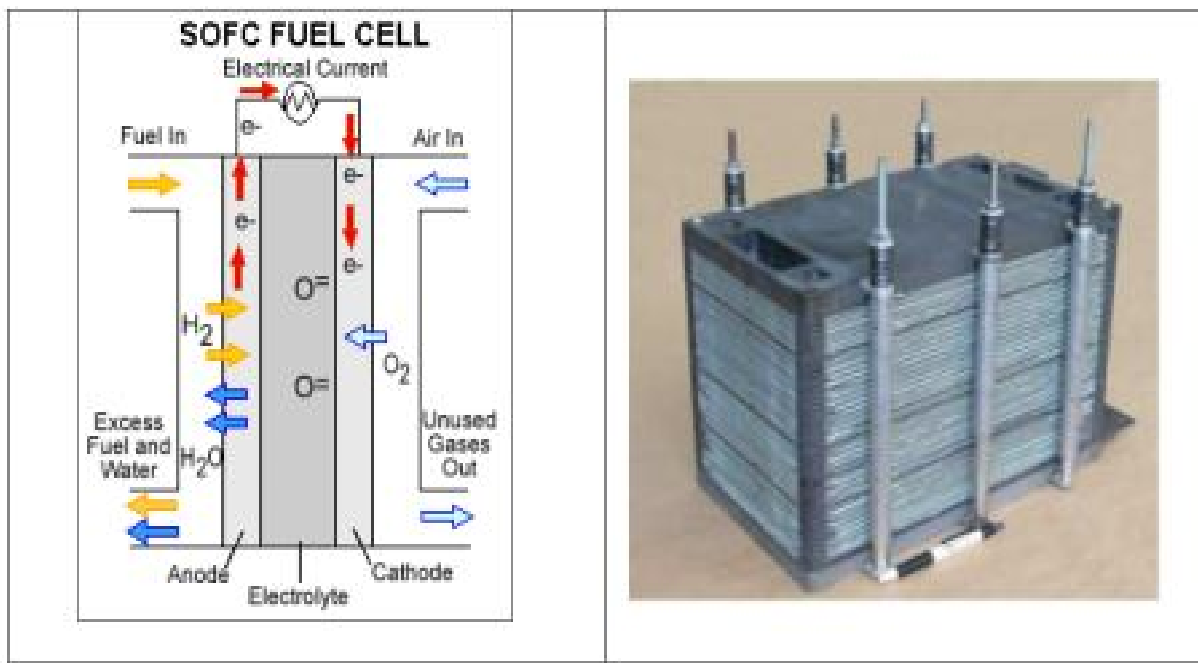
L'électrolyte est solide, habituellement du Zirconium (Zr<sub>2</sub>) dopé avec de l'ytterbium (Y<sup>3+</sup>), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O<sup>2-</sup>). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [15] [16].

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:



**Fig 1-9** : Schéma de fonctionnement d'une SOFC( Module plan testé par le Centre de Jülich )

## 1.4 les différences entre les types de pile à combustible [17]

Type de pile	SOFC	MCFC	AFC	PAFC	DMFC	PEMFC
Nom	Solide Oxide Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Alkaline Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Direct Methanol Fuel Cell	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
Type de charge transféré	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> fondu dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	Solution de KOH	Acide Phosphoric	Membrane conductrice de protons	Membrane conductrice de protons
Ion dans l'électrolyte	O <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
Température de fonctionnement (C°)	700-1000	600-660	60-80	180-220	60-100	60-100
Combustible	H <sub>2</sub> (Pour ou reformé)	H <sub>2</sub> (Pour ou reformé)	H <sub>2</sub> (Pour ou reformé)	H <sub>2</sub> (Pour ou reformé)	Méthanol	H <sub>2</sub> (Pour ou reformé)
Oxydant	Air	Air	O <sub>2</sub> pur	Air	Air	Air
Domaine d'application	Cogénération Production centralisée d'électricité -Automobile -Maritime..	Cogénération, Production centralisée d'électricité	Spatial	Cogénération	Applications portables	-Automobile -Maritime -Application portables Cogénération

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

## 1.5 Applications

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

### 1.5.1 Les applications portables

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW, 50 mW en veille et quelques watts en conversation) et l'ordinateur portable (qui consomme en moyenne 10 W). Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même la plus performante comme la batterie lithium-ion. Cette dernière atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse généralement quelques jours d'autonomie à un téléphone portable et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux alors que la batterie électrochimique est proche de ses limites. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des «portables»: 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions en 2005; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions en 2005.

La solution qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux États-Unis, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

Des prototypes existent déjà et les premiers produits commerciaux sont prévus d'ici trois à quatre ans. La technologie qui sera utilisée est la PEMFC du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide, alimentée soit directement en hydrogène, soit méthanol dans sa version méthanol direct. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle, soit environ 0,80 \$/Wh.

En ce qui concerne les applications portables, les critères économiques seront probablement d'une importance moindre que pour les autres domaines, car la qualité du nouveau service rendu justifiera, au moins dans un premier temps, un surcoût par rapport à la solution actuelle.



**Fig 1-10** : un portable chargé par une PAC model POWERTREEK (MyFc).

### 1.5.2 Les applications stationnaires

Compte tenu de la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux États-Unis. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications: la production collective (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 200 kW à quelques MW) et la production individuelle ou domestique (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC, même si d'autres technologies (MCFC et SOFC) font également l'objet de tests, mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation proche.

Dans le domaine de la production individuelle (habitat), plusieurs projets sont en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle et la première commercialisation était en 2002, avec un coût annoncé autour de 0,10 \$/kWh électrique. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur à 60°C (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques: un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène.

Le marché mondial potentiel des piles à combustible, pour le seul stationnaire, est estimé à près de 60 milliards de dollars à l'horizon 2030. Quant au coût objectif, il se situe autour de 1300 \$/kWh installé pour le système complet. Il correspond au niveau actuel de développement de

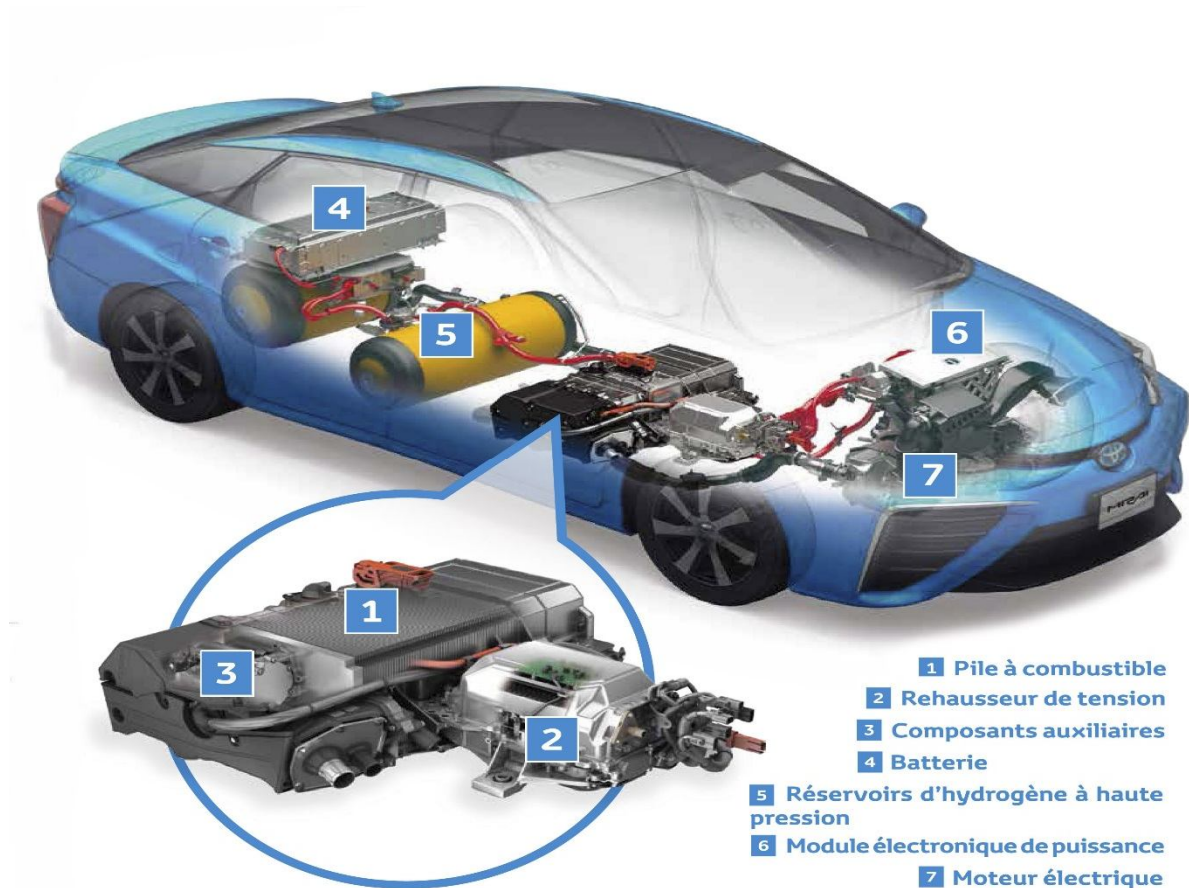
cette technologie ce qui explique les délais proches (à partir de 2002) généralement annoncés par les divers constructeurs (essentiellement américains jusqu'à maintenant) déjà engagés sur ce marché. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.



**Fig1- 11** : L'installation Siemens-Westinghouse de Irvine (220 kW) (2002)

### 1.5.3 Les applications de transport

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs besoins, suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement (donc les coûts admissibles) ne seront pas du tous les mêmes.



**Fig 1-12:** Schéma d'une voiture équipée de la pile à combustion.

## 1.6 Les avantages et inconvénients des piles à combustible :

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

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

## 1.6.1 Avantages

### 1.6.1.1 Haut rendement énergétique

Le rendement énergétique net électrique dépend du type de pile, il varie entre 40 et 70%. Il faut cependant tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur...), du fonctionnement sous pression ou de la surstoéchiométrie en carburant et en air qui font baisser cette valeur. Une spécificité des piles est que le rendement électrique ne diminue pas et même augmente à charge partielle. Ce rendement ne diminue donc pas dans le cas de petites installations, à la différence des installations conventionnelles (turbines à gaz) où les petites unités de quelques kW ont de faibles rendements. Le rendement chute à très faible charge en raison de la consommation des accessoires.

En ce qui concerne les véhicules automobiles, on ne peut considérer le seul rendement du système pile : il faut comparer les véhicules avec des bilans du "puits à la roue" en comptabilisant la transformation du carburant (extraction, transport, procédés de raffinage, transport et distribution). Les chiffres donnés sont souvent issus de simulations faites avec des modèles de véhicules sur un parcours type.

Pour les applications stationnaires, on doit considérer le rendement énergétique global, qui est bien plus élevé : l'énergie qui ne passe pas sous forme électrique peut être récupérée sous forme de chaleur. La valorisation de cette chaleur dépend alors du niveau de température de la pile, mais on peut atteindre des rendements globaux de 85 à 90%. Pour une PAFC, la littérature donne les valeurs de 40 % pour le rendement électrique et entre 35 et 40% pour le rendement thermique selon le niveau de température.

### 1.6.1.2 Silencieuses

Lors de leur fonctionnement, les piles sont silencieuses : dans les systèmes PAC, seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes, le système de ventilation, produisent un léger bruit. Les émissions sonores de la pile ONSI PC25 sont de 58dB à 10m. Ceux qui ont déjà conduit un véhicule électrique savent qu'il est très silencieux, au point qu'on ne l'entend pas arriver. Il en est de même pour tous les véhicules à pile et pour les piles stationnaires : un avantage pour leur insertion en milieu urbain.

---

### 1.6.1.3. Emissions de pollution limitées

On cite les piles à combustible comme atout dans la lutte contre la pollution, en particulier la limitation des gaz à effet de serre définie par la Conférence de Kyoto.

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<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le CO, les NO<sub>x</sub> (oxydes d'azote), les particules carbonées, le SO<sub>2</sub>, les poussières.

En matière de propulsion automobile, une classification a été faite selon leurs émissions : ZEV : Zero Emissions Vehicles, SULEV : Super Ultra Low Emission Vehicles, ULEV : Ultra Low Emission Vehicles. Les véhicules utilisant de l'hydrogène sont classés ZEV. Ceux qui ont un reformeur seront des ULEV ou SULEV. Si on ne considère que le véhicule, il ne produit rien s'il fonctionne à l'hydrogène, un peu de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO s'il fonctionne au méthanol ou à l'éthanol, et un peu de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, SO<sub>2</sub> pour de l'essence.

Mais si on considère toute la chaîne du "puits à la roue", les gains apparaissent surtout au niveau du CO, NO<sub>x</sub>, particules et poussières (FVV, 97). Ces calculs dépendent des hypothèses faites sur la provenance des carburants et la méthode d'obtention de l'hydrogène.

On peut avoir un très large spectre de résultats selon la façon de produire du H<sub>2</sub>. On obtient les plus faibles émissions quand on a un véhicule PAC fonctionnant à l'hydrogène, celui-ci étant produit par une électrolyse avec de l'électricité renouvelable.

### 1.6.1.4. 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 techniques de miniaturisation.

### 1.6.1.5. Diverses températures de fonctionnement

Pour les piles de faible température de fonctionnement, c'est un avantage sur deux points : le rendement électrique est meilleur à basse température et cette température 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 de température de fonctionnement plus élevée, on peut utiliser la chaleur pour des applications domestiques ou industrielles voire un couplage avec une turbine.

### 1.6.1.6. Pas de parties rotatives :

Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible, aucun mouvement : il n'y a donc pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile. Sa tenue chimique et sa longévité restent encore à prouver car les prototypes actuels ont une durée de vie encore limitée.

### 1.6.2 Inconvénients :

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ?

En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler :

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

#### 1.6.2.1 Le coût :

C'est le plus gros problème actuellement : dans les applications automobiles, le prix des piles est 5 fois supérieur à celui assurant la compétitivité et de 20 à 50% trop élevé pour les applications stationnaires.

Ce coût se répartit entre les composants suivants (sachant que cela dépend fortement du type de pile et de sa puissance et que cela variera dans le futur avec les progrès technologiques) : la pile, le reformeur et le convertisseur AC/DC. Pour la pile (PEMFC), le coût va se répartir entre la membrane, les électrodes, le catalyseur, les plaques bipolaires :

- le platine qui recouvre les électrodes et dont le prix est voisin de 17 €/g (un prix appelé à évoluer à la hausse en fonction de la demande...), sachant que pour une pile de 70 kW, il faut un peu plus de 400g,
- les membranes qui coûtent autour de 400 €/m<sup>2</sup>
- les plaques d'interconnexion et de refroidissement qui sont en graphite usiné et dont la fabrication est coûteuse,

A cela s'ajoutent des auxiliaires et l'assemblage des éléments. De nombreux progrès ont déjà été faits en termes de teneur en platine, mais pour les membranes et les plaques, il faudrait revoir le processus de production et l'impact d'une production en série sur les coûts.

### 1.6.2.2 Le poids et le volume :

Si ces deux aspects ne sont pas une contrainte pour les applications stationnaires, elles le sont pour les applications portables et surtout automobiles.

D'une part, il faut que la pile et le module de stockage de carburant soit intégrable au véhicule sans que cela n'affecte l'habitabilité . C'est encore plus délicat avec un reformeur qui est une usine à gaz à intégrer en plus de la pile et où les transferts thermiques devront être gérés.

D'autres part, le système pile ne doit pas être trop lourd pour ne pas affecter les performances du véhicule

### 1.6.2.3 La durée de vie :

La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application :

Automobile : quelques milliers d'heures,

Stationnaire : au moins 40 000 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 les prototypes qui seront testés dans les années à venir permettront d'apporter une réponse. Pour le moment, les seules données sur les piles stationnaires dont on dispose viennent des PAFC ONSI 25.

Il se pose également le problème de la dégradation des membranes due à a mauvaise gestion de l'eau dans les piles à combustible. En effet, pour que la pile à combustible fonctionne de façon optimale, la membrane doit être plus ou moins humidifiée (ni trop sèche, ni trop humide). La mauvaise gestion de l'eau au sein d'une pile, peut entraîner la dégradation prématurée de cette dernière et peut amener la pile à un mauvais rendement.

### 1.6.2.4 La 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 (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage), on peut utiliser cette chaleur pour l'habitacle. Cela impose donc un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur ; cela dépend du type de pile utilisée et du type d'application.

### 1.6.2.5 Le 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 automobiles. On a souvent avancé le méthanol mais cela impose de mettre en place tout le système de production, transport et distribution pour un carburant qui ne durera peut être que 10 ans. En utilisant l'essence, on n'a pas ce problème mais il faut utiliser de l'essence à faible teneur en soufre et avoir un reformeur adéquat. Il est aussi question d'utiliser l'éthanol qui n'est pas toxique et est biodégradable. Dans tous les cas, un autre carburant que l'hydrogène impose l'utilisation d'un reformeur : une contrainte du point de vue place, poids et temps de démarrage.

Dans les applications stationnaires, l'utilisation du gaz naturel semble être un consensus, car c'est le plus simple à mettre en place et l'un des seuls pour lequel on a déjà l'infrastructure. Mais il faudra faire attention aux différentes qualités de celui-ci. Certains gaz contiennent des impuretés comme du soufre.

Le fait d'utiliser de l'hydrogène suppose que l'on ait réglé le problème du stockage à bord : gazeux sous pression, liquide à très basse température, stocké dans des hydrures métalliques, des nanotubes. 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. Néanmoins, la mise en place de normes pour le transport de l'hydrogène dans un milieu confiné est essentielle.

## 1.7 Stockage D'hydrogène

Il y'a plusieurs modes pour stocker l'hydrogène ,parmices modes on trouve :

- Sous forme comprimé.
- Sous forme liquéfié.
- $\text{NaBH}_4$ .
- Hydrures métalliques

### 1.7.1 Stockage sous forme comprimé

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisés 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 m<sup>3</sup>

. 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.

### 1.7.2 Stockage sous forme liquéfié

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

### 1.7.3 NaBH<sub>4</sub>

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<sub>4</sub> et l'eau donnant de l'hydrogène (et du borate de sodium NaBO<sub>2</sub>), cette réaction nécessite la présence d'un catalyseur qui peut être à base de cobalt ou de ruthénium.

### 1.7.4 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<sub>2</sub>Ni ou d'alliages comme Mg-Mg<sub>2</sub>Ni. 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.

## 1.8 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons décrit le principe général de la pile à combustible et ses avantages par rapport à d'autres moyens de production d'électricité. Les trois grands champs d'application sont la production stationnaire d'électricité et de chaleur en cogénération, le transport et les appareils portables. La transformation d'énergie chimique en énergie électrique et thermique se fait, selon le type de pile, par des réactions différentes. Chaque type de pile a ses propres conditions de fonctionnement : milieu acide ou alcalin, température haute ou basse et électrolyte liquide ou solide. Après une présentation des six types de piles actuellement existants, la pile de type sofc a été choisi comme étant la plus adaptée à diverses applications.

## **Chapitre 02 :**

### **Développement de Piles à Combustible de type SOFC**

## 2.1 Introduction

les piles à combustible à oxyde solide sont très élevées convertisseurs d'énergie directe de température (600-1000 ° C), qui transporter l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. En raison de leur fonctionnement à haute température, ils permettent le reformage interne du combustible gazeux à l'intérieur de la pile à combustible, ce qui leur confère une capacité multi-combustible. Leur efficacité de conversion énergétique est supérieure à celle des méthodes de combustion traditionnelles et peut atteindre jusqu'à 65%. De plus, les SOFC peuvent être utilisées dans des applications de production combinée de chaleur et d'électricité. Ils tirent parti de leurs flux de gaz d'échappement à haute température pour des applications telles que le chauffage résidentiel ou commercial ou pour la production d'électricité ultérieure. Dans certains cas, l'efficacité globale des SOFC peut atteindre 80%. Leur inconvénient est leur démarrage relativement lent et leurs contraintes thermiques dues à la température de fonctionnement élevée. Actuellement, il existe quatre technologies de pile au niveau de la géométrie : tubulaire, plane (classique et monolithique) et Sulzer Hexis, on s'intéresse dans notre étude à SOFC tubulaire. Dans ce chapitre, le développement d'un modèle dynamique d'empilement SOFC tubulaire est présenté sur la base de ses propriétés électrochimiques et thermodynamiques, ainsi que des lois de conservation de la masse et de l'énergie, en mettant l'accent sur les caractéristiques électriques du terminal de pile à combustible.

## 2.2 Les composants d'une cellule SOFC

### 2.2.1 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) –  $(ZrO_2)_{0.92} (Y_3O_2)_{0.08}$  [18]. La zircone yttrée est très stable dans les milieux oxydant et réducteur et présente une conductivité ionique aux alentours de  $0.02 \text{ Scm}^{-1}$  à  $800^\circ\text{C}$  et  $0.1 \text{ Scm}^{-1}$  à  $1000^\circ\text{C}$ . La conductivité ionique est assurée par la mobilité de l'oxygène à travers des lacunes anioniques de la zircone yttrée [19].

### 2.2.2 Anode

Le matériau utilisé dans l'anode de la SOFC est un cermet de Nickel/ Zircone 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 [20-21].

### 2.2.3 Cathod

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 ( $\text{La}_{0.84}\text{Sr}_{0.16}\text{MnO}_3$ ) [20-21].

### 2.2.4 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 [20-21].

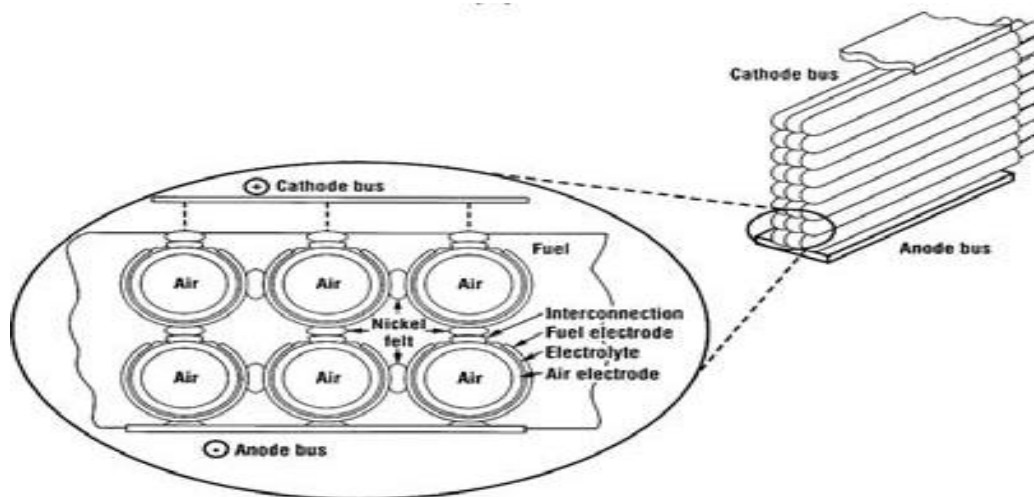
## 2.3 Les différentes technologies des SOFC

Actuellement, il existe quatre technologies de pile au niveau de la géométrie : tubulaire, plane (classique et monolithique) et Sulzer Hexis, on s'intéresse dans notre étude à SOFC tubulaire.

### 2.3.1 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 1,5 m sert de support et est recouvert extérieurement de couches successives (Manganite de lanthane dopée au strontium ((La,Sr)MnO<sub>3</sub>) 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<sub>2.5</sub>) servant d'interconnexions (Figure 2-13). L'intérieur du tube support sert à la distribution d'air, tandis que le combustible est amené par l'extérieur [22]. 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

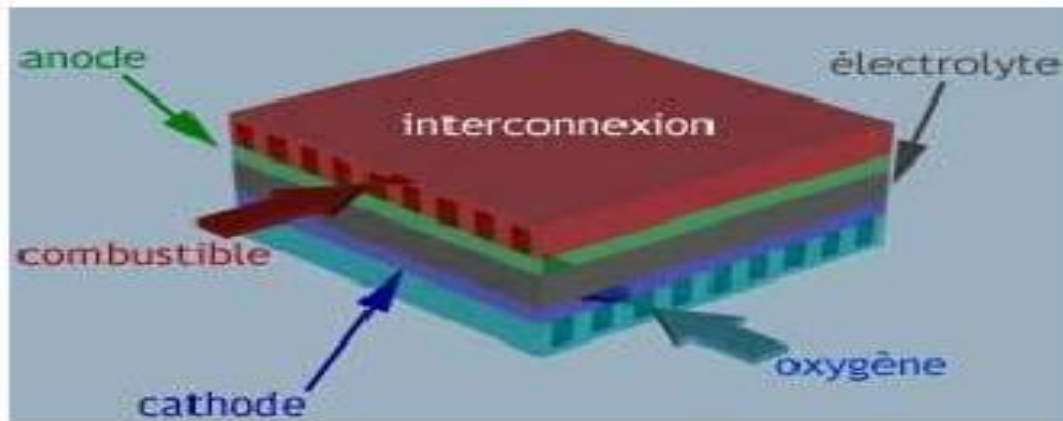
couplée à une turbine à gaz) et la puissance est de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. L'inconvénient majeur de cette technologie est le coût élevé de fabrication. Un des avantages de la technologie tubulaire est la bonne étanchéité ce qui permet de réduire les contraintes mécaniques issues des contraintes thermiques et améliorer ainsi la fiabilité [19][21].



**Fig 2-1** : Cellule élémentaire tubulaire avec tube support en zircone stabilisée (SiemensWestinghouse) La Technologie cylindrique (air Au centre,combustibleà l'extérieur)[19].

### 2.3.2 Technologie plane classique

La géométrie plane peut être mise en forme sous diverses configurations. Chaque élément composant le cœur de pile est de forme plate et de faible épaisseur. La différenciation des géométries se fait par l'élément support. Une des électrodes ou l'électrolyte peut être le support et les autres éléments sont élaborés en couches minces.

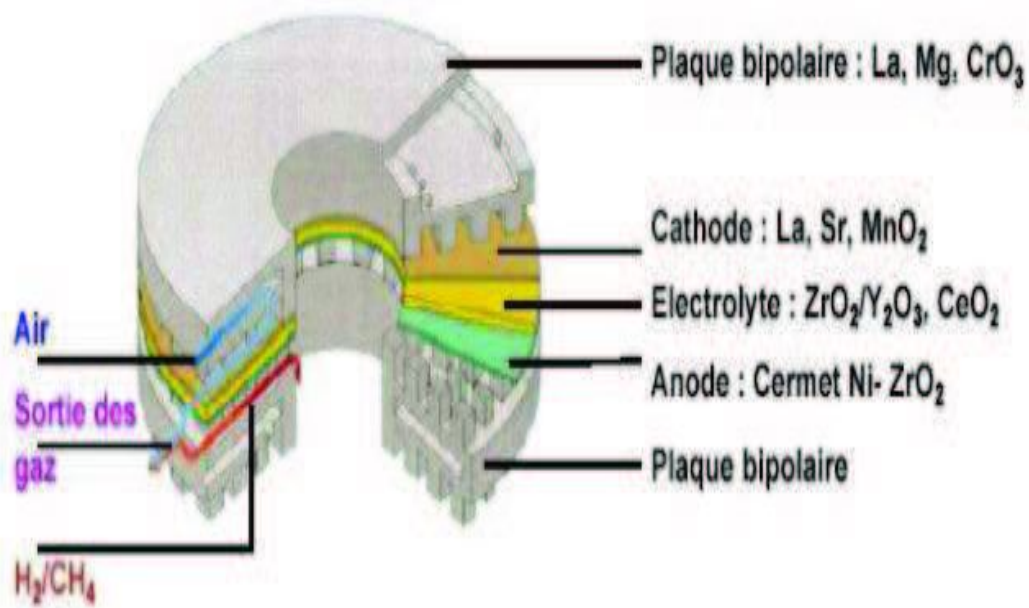


**Fig 2-2** : Technologie planaire classique[19]

Le sens des flux gazeux permet également de différencier les deux configurations : cross-flow ou co-flow. Dans le cas d'une configuration cross-flow, les flux gazeux forment un angle de  $90^\circ$  entre eux et pour la co-flow, ils sont dans le même sens. Cette technologie permet l'obtention de fortes densités de puissance; contrairement au cas de la technologie tubulaire, la conduction et les pertes résistives sont indépendantes de la surface. Les caractéristiques électriques obtenues offrent un large domaine d'applications (mobile et/ou stationnaire). La mise en forme utilise des techniques qui sont peu onéreuses. Néanmoins, l'étanchéité de ces cellules est plus complexe à assurer que pour la configuration tubulaire. De plus, à cette température, les contraintes thermiques générées par la différence des coefficients de dilatation linéaire des différents éléments limitent la hauteur des "stacks".

### 2.3.3 Technologie Sulzer Hexis

Cette technologie planaire industrialisée de nos jours est présentée avec la figure 2-15 s'agit de la configuration développée par Sulzer-Hexis qui fait appel à la technologie planaire avec une mise en forme circulaire. L'hydrogène arrive par le centre de la pile alors que l'air provient de l'extérieur. Le "stack" est réalisé avec 50 mono cellules montées en série. Cette SOFC permet d'atteindre des rendements d'environ 85 % lorsqu'elle est utilisée en cogénération, avec une puissance électrique maximale de 1 kW [23].



**Fig 2-3** : cellule unitaire de chez Sulzer-Hexis [23].

#### 2.3.4 Technologie monolithique

La structure monolithique est formée d'une partie plane et d'une partie ondulée. Dans le cas où les flux de gaz sont dans le même sens, la partie plane est un empilement anode, interconnecteurs, cathode et la partie ondulée est composée de l'ensemble cathode, électrolyte. La composition des différentes parties est inversée quand la configuration est en flux croisés. L'épaisseur des cellules est d'environ  $100\ \mu\text{m}$  et la distance qui les sépare est de 1-2 mm. La géométrie monolithique présente de faibles dimensions et offre une forte densité de puissance, rendue possible par une grande surface active, une forte densité de courant et une faible masse. Dans cette mise en forme, le gain de masse s'est fait en éliminant les éléments porteurs inactifs. Cet ensemble de propriétés, faible masse et faible encombrement pour une puissance maximale, permet d'envisager son utilisation dans le domaine spatial et comme source d'énergie mobile. Un des inconvénients majeurs de cette géométrie réside dans la mise en forme qui nécessite l'utilisation de techniques onéreuses et relativement complexes. De plus, cet assemblage supporte mal les contraintes provoquées par la différence de coefficients d'expansion linéaire [23].

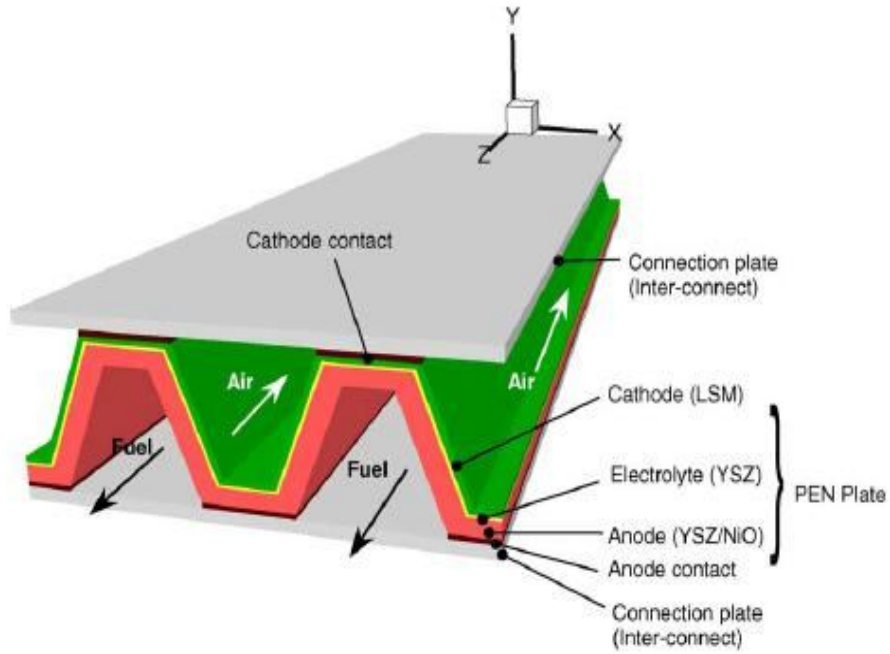


Fig 2-4 : Technologie planaire monolithique [19]

### 2.4 Développement dynamique 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.

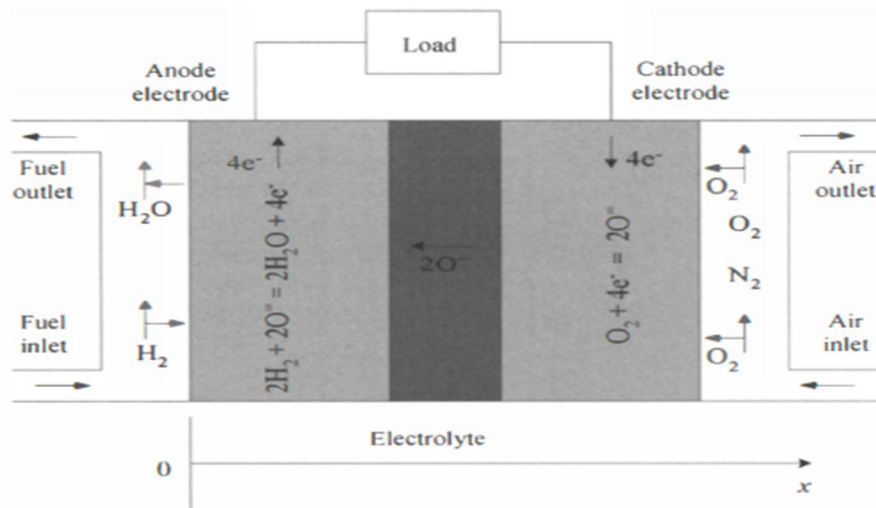


Fig 2-5 : Schéma de principe d'une pile à combustible à oxyde solide.[24]

#### 2.4.1 Les pressions partielles :

Comme le montre la figure 2-5, lorsque le courant de charge est tiré de la pile à combustible, H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> diffuseront à travers l'anode et la cathode poreuses.

respectivement, pour atteindre les sites de réaction. Le réactif  $H_2O$ , qui est le produit des réactions chimiques, diffusera ensuite des sites de réaction au canal anodique. En conséquence, lorsque SOFC est sous charge, des gradients des pressions partielles d'hydrogène, d'eau et d'oxygène se formeront le long des canaux anodique et cathodique. En supposant des variations uniformes de ces pressions partielles de gaz, les pressions partielles effectives globales sont données par leurs valeurs arithmétiques moyennes dans les canaux de gaz (électrodes).

$$P_{H_2}^{ch} = \frac{P_{H_2}^{in} + P_{H_2}^{out}}{2} \quad (2.1a)$$

$$P_{H_2O}^{ch} = \frac{P_{H_2O}^{in} + P_{H_2O}^{out}}{2} \quad (2.1b)$$

$$P_{O_2}^{ch} = \frac{P_{O_2}^{in} + P_{O_2}^{out}}{2} \quad (2.1c)$$

Par conséquent, les pressions partielles effectives d'hydrogène et d'oxygène sur les sites de réaction réels seront inférieures à celles des canaux d'écoulement de gaz en raison de la diffusion en masse. En revanche, la pression partielle de la vapeur sur les sites de réaction est supérieure à celle du canal d'écoulement d'anode. Afin de calculer la tension de sortie de la pile à combustible, il est nécessaire de déterminer les pressions partielles effectives d'hydrogène, d'eau et d'oxygène sur les sites de réaction. Le gradient peut être décrit à partir de la propagation de types de gaz à travers des électrodes poreuses à travers la formulation de Stephan Maxwell comme suit [25] :

$$\nabla x_i = \frac{RT}{P} \sum_{j=1}^N \frac{x_i N_j - x_j N_i}{D_{i,j}} \quad (2.2)$$

Où :

- $\nabla$  : est l'opérateur de gradient
- $x_i(x_j)$  : les fractions molaires d'espèces  $i(j)$
- $D_{i,j}$  : Diffusivité binaire efficace de la paire  $i-j$  d'espèces de gaz ( $m^2 / s$ )
- $N_i(N_j)$  : le flux de gaz superficiel d'espèces  $i(j)$  ( $mol/(m^2 \cdot s)$ )
- $R$  : le constant de gaz  $8.3143 J/(mol \cdot K)$
- $T$  : température du gaz (K)
- $P$  : la pression globale du mélange de gaz (Pa).

Dans le canal anodique, le flux de gaz est un mélange d'hydrogène et d'eau. Dans le processus de transport unidimensionnel supposé le long de l'axe des  $x$ , comme indiqué dans la figure 2-17, en utilisant (2.2), la diffusion de l'hydrogène peut être écrite comme suit :

$$\frac{dx_{H_2}}{dx} = \frac{RT}{P_a^{ch}} \left( \frac{x_{H_2} N_{H_2O} - x_{H_2O} N_{H_2}}{D_{H_2, H_2O}} \right) \quad (2.3)$$

Le flux molaire d'hydrogène et de vapeur d'eau au niveau du canal anodique peut être déterminé par la loi de Faraday comme suit [26] :

$$N_{H_2} = -N_{H_2O} = \frac{i_{den}}{2F} \quad (2.4)$$

Ou' :

- $i_{den}$  : la densité de courant (A / m<sup>2</sup>).
- $F$  : la constante de Faraday (96487 C/ mol).

Le gaz présent dans le canal anodique est supposé être un mélange de H<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O, donc  $x_{H_2} + x_{H_2O} \approx 1$ . Rappelant que  $dp_{H_2} dx_{H_2} \propto P_a^{ch}$  et  $dp_{H_2O} dx_{H_2O} \propto P_a^{ch}$ , alors (2.3) et (2.4) peuvent être combinés pour donner les pressions partielles de H<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O par rapport à  $x$ , comme suit:

$$\frac{dp_{H_2}}{dx} = -\frac{RT}{D_{H_2, H_2O}} \frac{i_{den}}{2F} \quad (2.5)$$

$$\frac{dp_{H_2O}}{dx} = -\frac{RT}{D_{H_2, H_2O}} \frac{i_{den}}{2F} \quad (2.6)$$

L'intégration des équations (2.5) et (2.6) par rapport à  $x$  de la surface du canal anodique au site de réaction réel donnera :

$$P_{H_2}^* = \int_0^{l_a} \frac{dp_{H_2}}{dx} + P_{H_2}^{ch} = P_{H_2}^{ch} - \frac{RT l_a}{2F D_{H_2, H_2O}} i_{den} \quad (2.7)$$

$$P_{H_2O}^* = \int_0^{l_a} \frac{dp_{H_2O}}{dx} + P_{H_2O}^{ch} = P_{H_2O}^{ch} - \frac{RT l_a}{2F D_{H_2, H_2O}} i_{den} \quad (2.8)$$

Ou' :

- $P_{H_2O}^*$  et  $P_{H_2}^{ch}$  les pressions partielles de H<sub>2</sub>O et H<sub>2</sub> au canal d'anode.

Dans le canal cathodique, l'oxydant est de l'air composé principalement d'O<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>, c'est-à-dire  $x_{O_2} + x_{N_2} \approx 1$ . En appliquant une procédure similaire pour la cathode, l'équation de diffusion unidimensionnelle de Stefan-Maxwell pour l'oxygène peut être exprimée comme suit:

$$\frac{dx_{O_2}}{dx} = \frac{RT}{P_c^{ch}} \left( \frac{x_{O_2} N_{N_2} - x_{N_2} N_{O_2}}{D_{O_2, N_2}} \right) \quad (2.9)$$

Puisque l'azote ne participe pas à la réaction chimique, le flux molaire d'azote nette normale perpendiculaire à la surface de la cathode est supposé être nul ( $N_{N_2} = 0$ ). Le flux molaire d' $O_2$  est ensuite déterminé par la loi de Faraday comme suit:

$$N_{O_2} = \frac{i_{den}}{4F} \quad (2.10)$$

Le nombre d'électrons participants est de 4 pour la réaction à la cathode, ce qui est également montré à la Fig. 2-17. C'est-à-dire qu'une mole d'oxygène nécessite 4 moles d'électrons pour compléter la réaction.

L'équation (2.9) peut donc réécrire comme :

$$\frac{dx_{O_2}}{dx} = \frac{RT i_{den}}{4F P_c^{ch} D_{O_2, N_2}} (x_{O_2} - 1) \quad (2.11)$$

La pression partielle efficace de l'oxygène au site de la réaction peut être trouvée similaire à l'analyse de l'anode:

$$P_{O_2}^* = P_c^{ch} - (P_c^{ch} - P_{O_2}^{ch}) \left( \frac{RT i_{den} l_c}{4F P_c^{ch} D_{O_2, N_2}} \right) \quad (2.12)$$

Les pressions partielles effectives ( $P_{O_2}^*$ ,  $P_{H_2}^*$  et  $P_{H_2O}^*$ ), calculées à partir de (2.7), (2.8) et (2.12), seront utilisées dans l'équation de Nernst pour trouver la tension de sortie de la SOFC.

## 2.4.2 Conservation des matériaux

la variation instantanée des pressions partielles effectives de l'hydrogène et de la vapeur d'eau dans le canal d'écoulement du gaz anodique et de l'oxygène dans la cathode peut être déterminée à l'aide des équations du gaz idéal, comme suit [27] comme suit :

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dp_{H_2}}{dt} = M_{H_2}^{in} - M_{H_2}^{out} - \frac{i}{2F} \quad (2.13)$$

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dp_{H_2O}}{dt} = M_{H_2O}^{in} - M_{H_2O}^{out} - \frac{i}{2F} \quad (2.14)$$

$$\int_{channel}^{reaction\ site} \frac{d(x_{O_2} - 1)}{x_{O_2} - 1} = \int_0^{l_c} \frac{RT i_{den}}{4F P_c^{ch} D_{O_2, N_2}} dx \Rightarrow \ln \left( \frac{P_{O_2}^* - P_c^{ch}}{P_{O_2}^{ch} - P_c^{ch}} \right) = \frac{RT i_{den} l_c}{4F P_c^{ch} D_{O_2, N_2}}$$

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dO_2^{ch}}{dt} = M_{O_2}^{in} - M_{O_2}^{out} - \frac{i}{4F} \quad (2.15)$$

En supposant que de l'hydrogène soit disponible en grandes quantités et que des quantités égales de mesures de vapeur d'eau et d'oxygène dans la cathode soient établies, le débit massique de  $H_2$ ,  $H_2O$  et  $O_2$  peut être exprimé au niveau des canaux d'écoulement et de sortie de l'anode et de la cathode, comme suit :

$$\begin{cases} M_{H_2}^{in} = M_a \cdot x_{H_2}^{in} = M_a \frac{P_{H_2}^{in}}{P_a^{ch}} \\ M_{H_2}^{out} = M_a \cdot x_{H_2}^{out} = M_a \frac{P_{H_2}^{out}}{P_a^{ch}} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} M_{H_2O}^{in} = M_a \cdot x_{H_2O}^{in} = M_a \frac{P_{H_2O}^{in}}{P_a^{ch}} \\ M_{O_2}^{out} = M_a \cdot x_{O_2}^{out} = M_a \frac{P_{O_2}^{out}}{P_a^{ch}} \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} M_{O_2}^{in} = M_a \cdot x_{O_2}^{in} = M_a \frac{P_{O_2}^{in}}{P_a^{ch}} \\ M_{O_2}^{out} = M_a \cdot x_{O_2}^{out} = M_a \frac{P_{O_2}^{out}}{P_a^{ch}} \end{cases} \quad (2.18)$$

En substituant les termes de débit en utilisant (2.16) - (2.18), les équations (4.13)-(4.15) peuvent être écrites comme suit :

$$\frac{dP_{H_2}^{ch}}{dt} = \frac{2M_a RT}{V_a P_a^{ch}} P_{H_2}^{in} - \frac{2M_a RT}{V_a P_a^{ch}} P_{H_2}^{ch} \frac{RT}{2FV_a} i \quad (2.19)$$

$$\frac{dP_{H_2O}^{ch}}{dt} = \frac{2M_a RT}{V_a P_a^{ch}} P_{H_2O}^{in} - \frac{2M_a RT}{V_a P_a^{ch}} P_{H_2O}^{ch} \frac{RT}{2FV_a} i \quad (2.20)$$

$$\frac{dP_{O_2}^{ch}}{dt} = \frac{2M_a RT}{V_a P_a^{ch}} P_{O_2}^{in} - \frac{2M_a RT}{V_a P_a^{ch}} P_{O_2}^{ch} \frac{RT}{2FV_a} i \quad (2.21)$$

Les équations différentielles ci-dessus (2.19) - (2.21) peuvent être écrites comme suit dans le domaine de transformation de Laplace:

$$P_{H_2}(s) = \frac{1}{(1+\tau_a s)} + \left[ q_F(s) + \tau_a P_{H_2}(0) - \frac{P_a}{4FM_a} I(s) \right] \quad (2.22)$$

$$P_{H_2O}(s) = \frac{1}{(1+\tau_a s)} + \left[ q_{H_2O}(s) + \tau_a P_{H_2O}(0) - \frac{P_a}{4FM_a} I(s) \right] \quad (2.23)$$

$$P_{O_2}(s) = \frac{1}{(1+\tau_c s)} + \left[ q_o(s) + \tau_c P_{O_2}(0) - \frac{P_c}{4FM_c} I(s) \right] \quad (2.24)$$

Ou' :

- $q_F$  et  $q_o$  sont les flux molaires d'hydrogène et d'oxygène à l'entrée de la pile.
- Les constantes de temps  $\tau_a = V_a P_a / 2M_a RT$  et  $\tau_c = V_c P_c / 2M_c RT$  (avec l'unité de secondes) sont associées à la pression à l'anode et cathode, respectivement, indiquant la vitesse à laquelle la pression de l'hydrogène et de la vapeur d'eau (dans le canal de l'anode) et de l'oxygène (dans le canal de la cathode) varie en fonction des variations de charge. La signification physique de la constante de temps,  $\tau_a$ , est qu'il faudra  $\tau_a$  secondes pour remplir un réservoir de volume  $V_a / 2$  à la pression  $P_a^{ch}$  si le débit massique est  $M_a$ . Une signification physique similaire vaut pour  $\tau_c$ .

### 2.4.3 Tension de sortie de SOFC

la réaction globale dans une pile à combustible à oxyde solide est :



où l'indice "g" signifie que le produit  $H_2O$  est sous forme gazeuse. L'équation de Nernst utilisée pour calculer le potentiel réversible de la SOFC est :

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{4F} \ln \left[ \frac{(P_{H_2}^{ch})^2 \cdot P_{O_2}^{ch}}{(P_{H_2O}^{ch})^2} \right] \quad (2.26)$$

$E_{0,cell}$  consiste en un terme constant et un terme dépendant de la température, comme suit [20]:

$$E_{0,cell} = E_{0,cell}^\circ - K_E (T - 298) \quad (2.27)$$

Ou' :

- $E_{0,cell}$  : le potentiel de référence standard à l'état standard, 298 K, 1 atm

$E_{cell}$ , calculé à partir de (2.26), est la tension à vide de la SOFC, qui dépend à la fois de la température et de la pression. Lorsque la pile à combustible est en charge, sa tension de sortie est inférieure à  $E_{cell}$  en raison de la perte d'activation, de la chute de tension de la résistance ohmique et du surpotentiel de concentration. la tension de sortie SOFC peut donc être écrite comme :

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{act,cell} - V_{ohm,cell} - V_{conc,cell} \quad (2.28)$$

La tension de sortie des cellules individuelles connectées en série peut être regroupée pour obtenir la tension de sortie d'une pile SOFC en considérant une comportement idéal et une température constante :

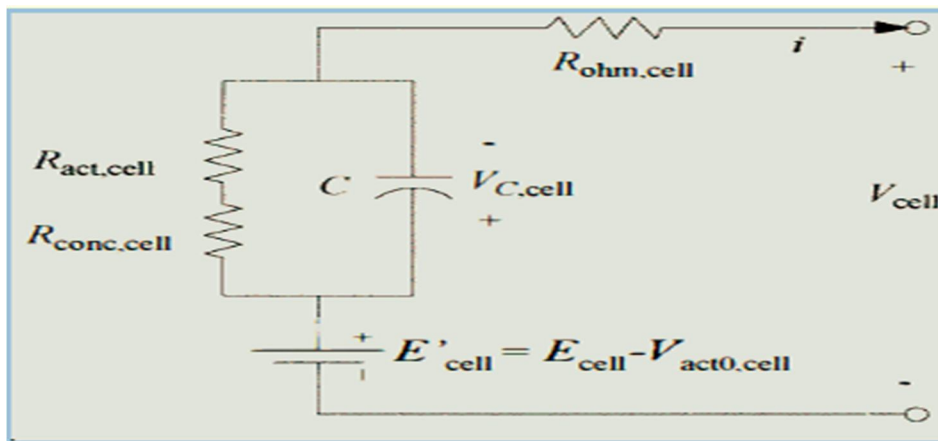
$$V_S = N_{cell} V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (2.29)$$

$E$ , la tension en circuit ouverte peut écrire sou la forme :

$$E = N_{cell} \left( E_0 + \frac{RT}{4F} \ln \left[ \frac{(P_{H_2})^2 \cdot P_{O_2}}{P_{H_2O}} \right] \right) \quad (2.30)$$

➤  $E_0$  :le potentiel de référence standard à l'état standard ,298 K, 1 atm

La tension de sortie de la pile SOFC peut donc être calculée une fois les chutes de tension calculées.



**Fig 2-6 :** Circuit électrique équivalent de l'effet de charge à double couche à l'intérieur d'une SOFC.

L'effet de charge à double couche :

dans une SOFC, les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte et deux couches limites sont formées, à savoir une couche anode-électrolyte et une couche électrolyte-cathode (Fig 2-5).

En raison de l'effet de polarisation, ces couches, connues sous le nom d'effet de charge électrochimique à double couche, peuvent stocker de l'énergie électrique et se comporter comme un super-condensateur.

Dans le circuit ci-dessus,  $C$  est la capacité équivalente de l'effet de charge double couche, et  $R_{act,cell}$ ,  $R_{ohm,cell}$ , et  $R_{conc,cell}$  sont des résistances équivalentes des baisses de tension d'activation, ohmique et de concentration, respectivement. Comme les électrodes SOFC sont poreuses, la valeur de  $C$  est grande et peut être de l'ordre de plusieurs Farads [28].

Le potentiel cellulaire réel est diminué de son potentiel idéal en raison de plusieurs types de pertes irréversibles, telles que les pertes d'activation, de concentration et ohmiques. L'équation de polarisation est la suivante [29]:

$$V_{act} = \vartheta + \beta \log I \quad (2.31)$$

$$V_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{ch}} \right) \quad (2.32)$$

$$V_{ohm} = Ir \quad (2.33)$$

Et la résistance de la cellule peut être écrite :

$$r = r_0 \exp \left[ \alpha \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (2.34)$$

### 2.4.3 la structure d'un modèle dynamique de SOFC réaliser par MATLAB :

Un modèle dynamique pour une pile SOFC tubulaire peut être développé sur la base des caractéristiques électrochimiques et thermodynamiques de la SOFC. La tension de sortie de la cellule / pile dépend de conditions telles que la composition du combustible, les écoulements de combustible et d'oxydant, les pressions anodique et cathodique, les propriétés électriques et thermiques de la pile, matériaux, température de la cellule et courant de charge.

Les entrées : pressions d'anode et de cathode ( $P_a$  et  $P_c$ ), débit de carburant (hydrogène) ( $M_{H_2}$ ), débit de vapeur d'eau ( $M_{H_2O}$ ), débit d'air ( $M_{air}$ ) et pile à combustible initiale et température de l'air ( $T_{carburant}$  et  $T_{air}$ ). La température de la cellule est déterminée à tout moment et courant de charge donnés. Le courant de charge et la température sont tous deux renvoyés aux différents blocs, qui participent au calcul de la tension de sortie de la pile à combustible.

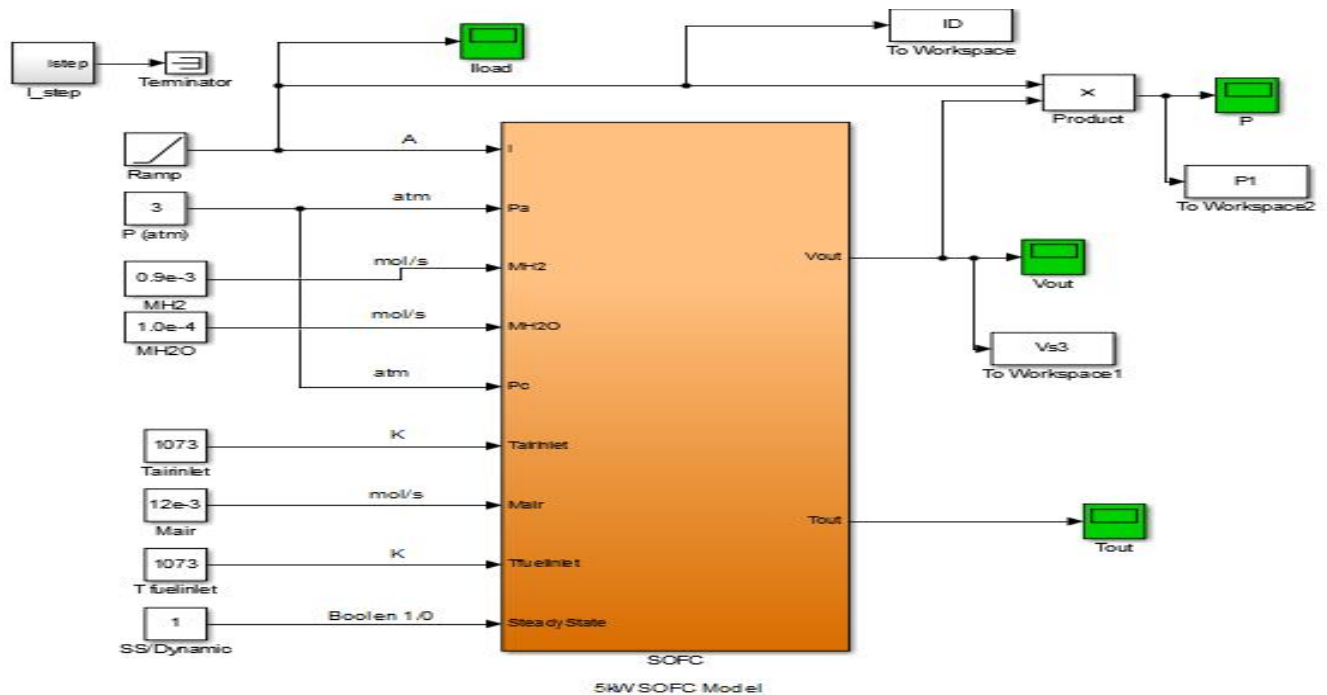


Fig 2-7 : schéma de simulation d'une pile SOFC réalisé en MATLAB.

Les entrées : pressions d'anode et de cathode ( $P_a$  et  $P_c$ ), débit de carburant (hydrogène) ( $M_{H_2}$ ), débit de vapeur d'eau ( $M_{H_2O}$ ), débit d'air ( $M_{air}$ ) et pile à combustible initiale et température de l'air ( $T_{carburant}$  et  $T_{air}$ ). La température de la cellule est déterminée à tout moment et courant de charge donnés. Le courant de charge et la température sont tous deux renvoyés aux différents blocs, qui participent au calcul de la tension de sortie de la pile à combustible.

### 2.4.3.1 Paramètre de simulation

Paramètre	Valeur	Unité
Puissance nominale	5	KW
$N_{\text{cell}}$	96	/
$P_a$	3	Atm
$P_c$	3	Atm
$M_{\text{air}}$	$12 \times 10^{-3}$	Mol/S
$M_{\text{H}_2\text{O}}$	$1 \times 10^{-4}$	Mol/S
$M_{\text{H}_2}$	$0.9 \times 10^{-3}$	Mol/S
$T_{\text{carburant}}$	1073	K
$T_{\text{air}}$	1073	K
$ID_{\text{Max}}$	160	A
$V_{\text{out}}$	110	V

Tableau 2-1 : les paramètres de simulation

## 2.5 Système de commande d'une PAC 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

### 2.5.1 Rapport entre les débit réactants

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

$$r_{H-O} = q_{H_2}^{in} / q_{O_2}^{in} \quad (2.35)$$

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[30]

### 2.5.2 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 donné par :

$$U = q_{H_2}^r / q_{H_2}^{in} \quad (2.36)$$

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

$$q_{H_2}^{ref} = 2K_r I_{fc}^r / U_{opt} \quad (2.37)$$

Et du débit d'oxygène de référence définie par :

$$q_{O_2}^{ref} = q_{H_2}^{ref} / r_{H-O} \quad (2.38)$$

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 [30]

$$\frac{q_{H_2}^{in}}{q_{H_2}^{ref}} = 1 / (1 + \tau_f s) \quad (2.39)$$

$$\frac{q_{O_2}^{in}}{q_{O_2}^{ref}} = 1 / (1 + \tau_f s) \quad (2.40)$$

### 2.5.3 Limitation du courant

Quand on limite le courant dans le régime transitoire, on va définir deux grandeurs d'utilisation :

- Le taux d'utilisation maximum  $U_{Max}$
- Le taux d'utilisation minimum  $U_{Min}$

Et le courant est limité comme :

$$U_{min} q_{H_2}^{in} \leq 2K_r I_{fc}^r \leq U_{max} q_{H_2}^{in} \quad (2.41)$$

Donc :

$$U_{min} q_{H_2}^{in} / 2K_r \leq I_{fc}^r \leq U_{max} q_{H_2}^{in} / 2K_r \quad (2.42)$$

### 2.5.4 Consigne du courant

Le courant de référence de la pile est calculé à partir de la pression de référence, donc le courant fourni :

$$I_{fc}^{ref} = P_{ref} / V_{pil} \quad (2.43)$$

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  $\tau_e$  [31] [32]

$$I_{fc}^{ref} = I_{fc}^{ref} / (1 + \tau_e \cdot s) \quad (2.44)$$

Si on suppose que la dynamique de réglage du courant est quasi infinie, l'équation (2.42) s'écrit :

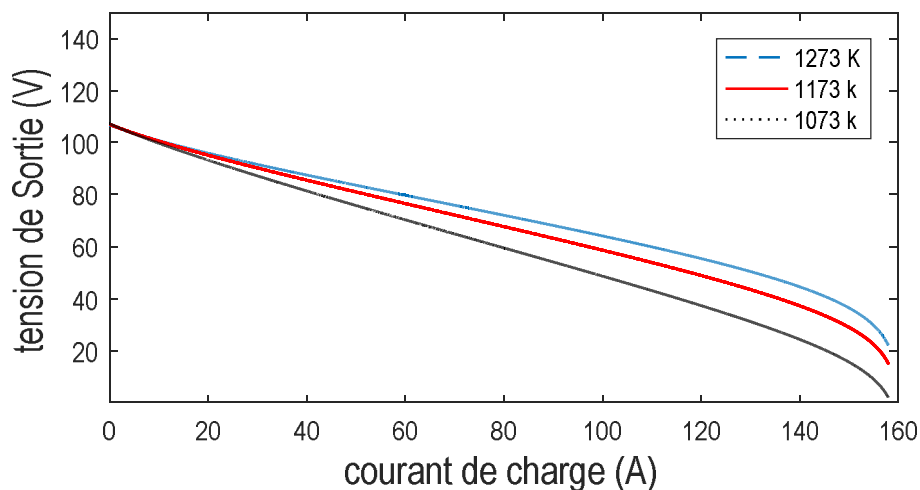
$$U_{min} q_{H_2}^{in} / 2K_r \leq I_{fc}^{ref} \leq U_{max} q_{H_2}^{in} / 2K_r \quad (2.45)$$

## 2.6 Validation du modèle

Dans cette section, les réponses en régime permanent et dynamique d'un modèle de pile SOFC de 5 kW obtenu à partir du modèle SOFC (dont le développement a été présenté dans la section précédente) sont présentées.

### 2.6.1 caractéristiques statique de la pile SOFC

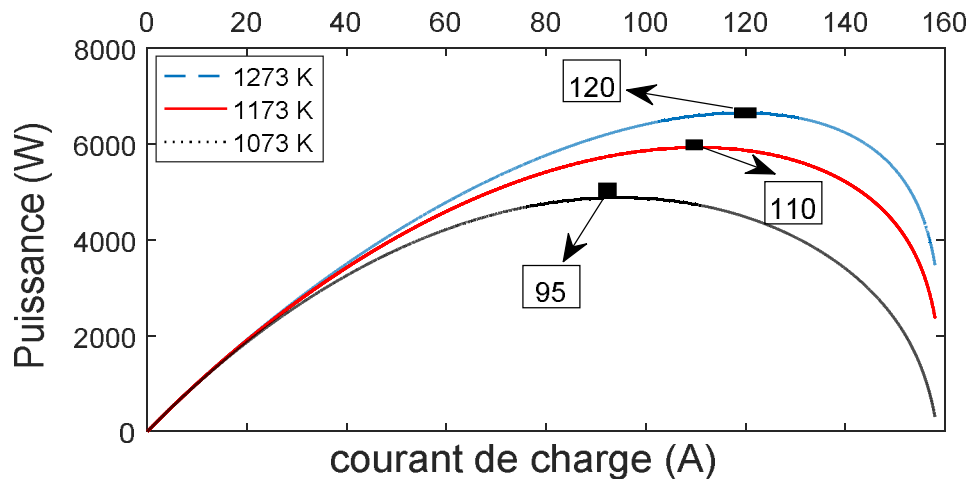
-Les courbes caractéristiques de la tension en fonction du courant (V-I) en régime permanent du modèle d'empilement SOFC à différentes températures sont illustrées à la Fig. 2-20. Comme indiqué à la section 2.4.2, dans la région des courants faibles, il se produit une chute de tension due à une barrière d'énergie d'activation qui doit être surmontée avant le début de la réaction chimique à l'intérieur de la SOFC.



**Fig 2-8** : les caractéristiques (V-I) du modèle SOFC à différentes températures.

La (Fig 2-8) montre l'effet de la température sur la caractéristique tension-courant (V-I) de SOFC . Dans la région à faible courant, la tension de sortie de la SOFC est légèrement

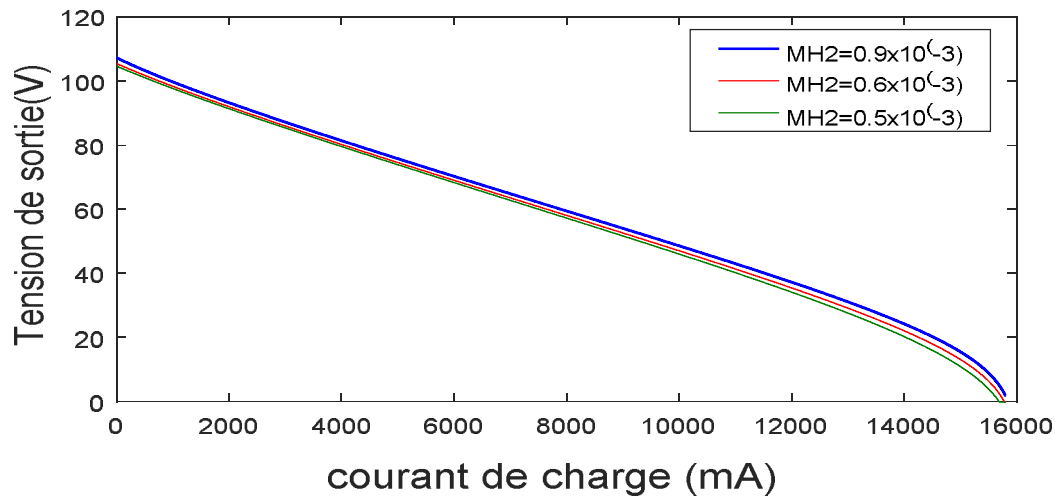
supérieure à des températures plus basses, tandis que dans la région à courant élevé, la tension est plus élevée à des températures plus élevées. La raison principale est le terme négatif dans l'expression du potentiel interne en circuit ouvert  $E_{0,cell}$ , équation (2.15), ainsi que de l'activation et de la chute de la tension ohmique en fonction de la température.



**Fig 2-9** : les caractéristiques (P-I) du modèle SOFC à différentes températures.

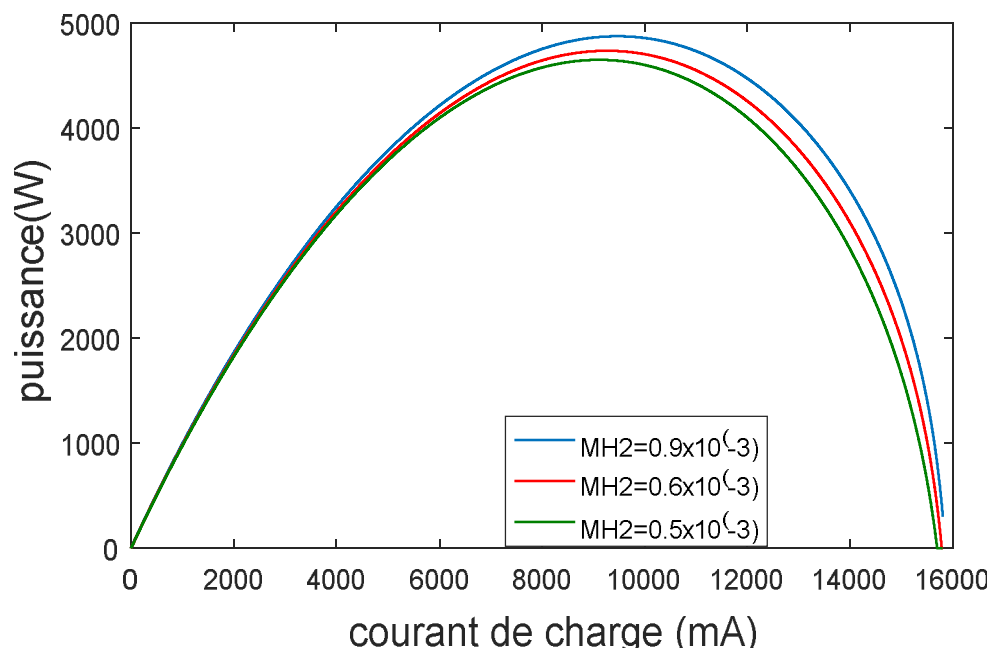
Les courbes de puissance en fonction du courant (P-I) du modèle SOFC à différentes températures sont illustrées à la ( Fig. 2-9). Avec des courants de charge plus élevés, une puissance de sortie plus élevée peut être obtenue à des températures de fonctionnement plus élevées. Sous chaque température de fonctionnement, il existe un courant critique, où la puissance de sortie du modèle atteint sa valeur maximale. Ce courant critique est de 95 A à 1073 K, de 110 A à 1173 K et de 120 A à 1273 K. Au-delà de ces points, une augmentation du courant de charge réduira la puissance de sortie en raison de fortes chutes de tension ohmique et de concentration.

Après avoir l'influence de la température sur notre pile à combustible SOFC, maintenant on va voir l'effet de débit d'hydrogène sur la pile.



**Fig 2-10** : l'influence de débit d'hydrogène sur les caractéristiques (V-I)

La (Fig 2.10) montre l'effet de débit d'hydrogène sur la caractéristique (V-I) de SOFC. Dans la région à faible courant, la tension de sortie de la SOFC est légèrement supérieure au débit plus bas, tandis que dans la région à courant élevé, la tension est plus élevée à des flux plus élevés. Donc il y'a une proportionnalité avec le débit d'hydrogène.



**Fig 2-11** : l'influence de débit d'hydrogène sur les caractéristiques (P-I)

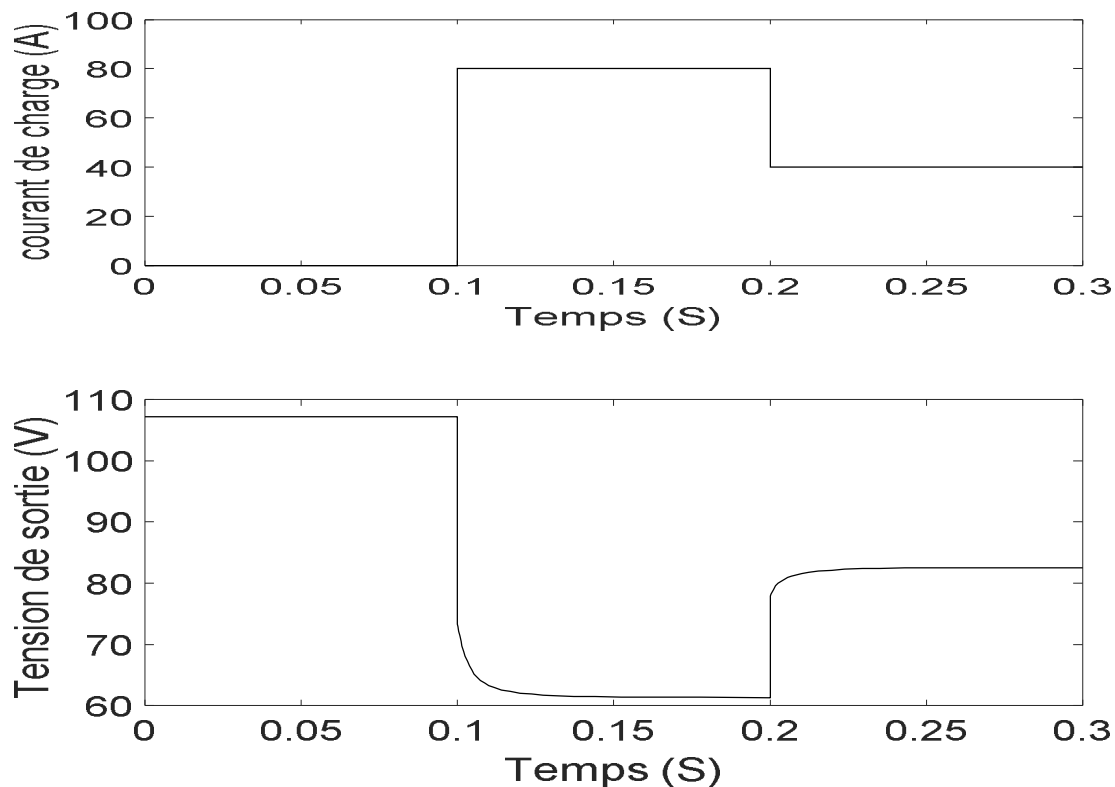
Les courbes de puissance en fonction du courant (P-I) du modèle SOFC à différents flux d'hydrogène sont illustrées à la ( Fig. 2-11). Avec des courants de charge plus élevés, une puissance de sortie plus élevée peut être obtenue à des flux de fonctionnement plus élevés.

### 2.6.2 Les réponses dynamique

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

- Temps est constant (intervalle en millisecondes).
- Les pressions dépendantes des temps constants  $\tau_a$  et  $\tau_c$  (en secondes).
- La température dépendante du temps constant (propriété thermodynamique) .

#### 2.6.2.1 La réponse dynamique due à l'effet de charge à double-couche :



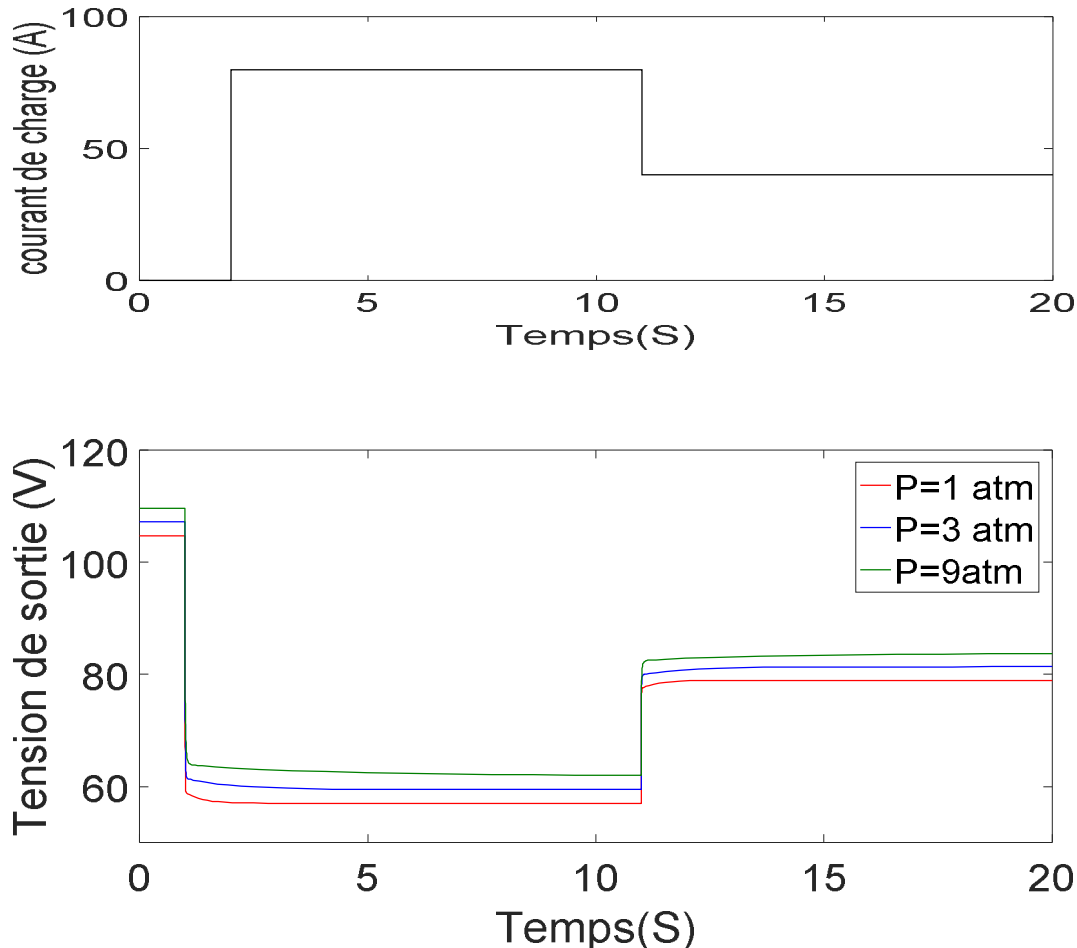
**Fig 2-12** : réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC

(effet de charge à double couche)

La figure (2-12) montre la réponse dynamique du modèle dans la petite échelle de temps (ms). Le courant de charge passe de 0 à 80 A à 0,1 s, puis à 40 A à 0,2 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.

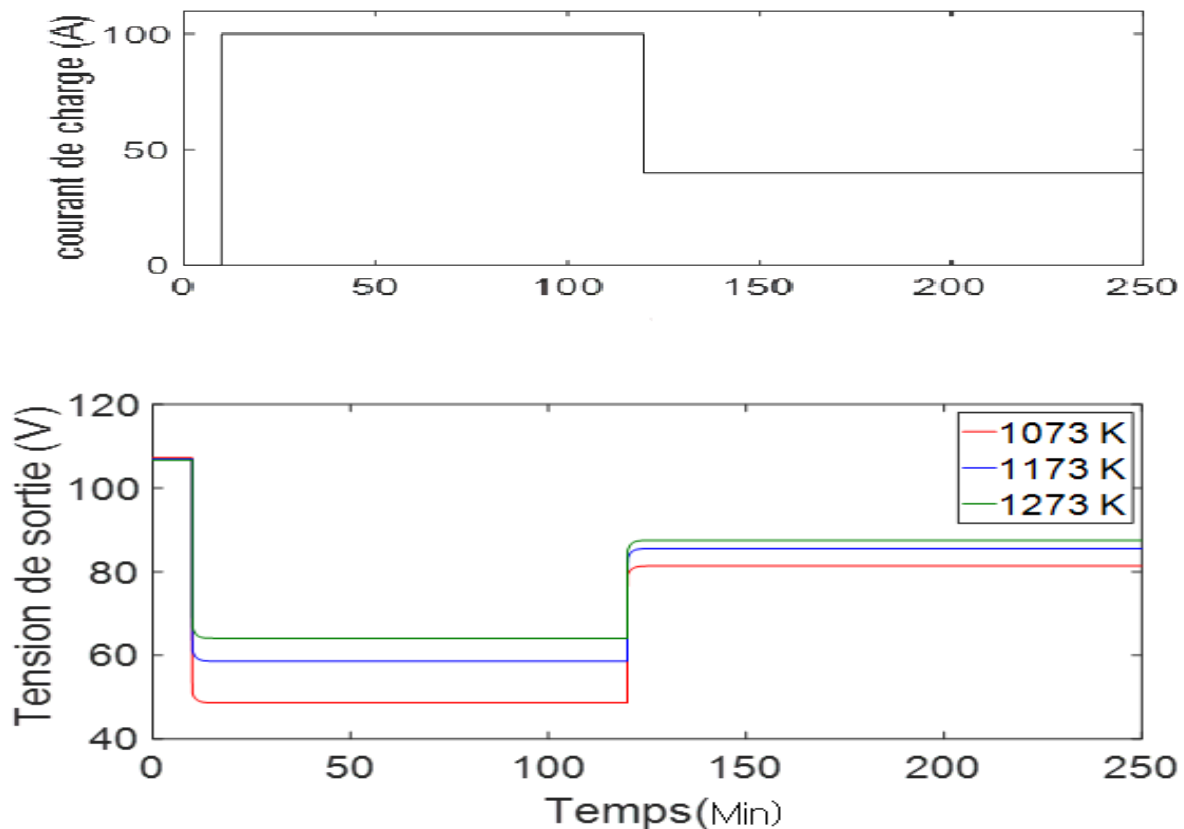
### 2.6.2.2 Les réponses dynamiques dues à l'effet des pressions



**Fig 2-13** : réponse dynamique de la tension de sortie pour SOFC à différentes pressions .

es constantes de temps  $T_a = V_a h / 2MaRT$  et  $T_c = V_{cp} h / 2McRT$  sont comprises dans la plage des secondes; par conséquent, ils affectent la réponse dynamique du modèle dans l'échelle de temps des secondes, que nous appellerons échelle de temps moyen. La figure 4. 11 montre la réponse de la tension SOFC à l'échelle de temps moyen sous différentes pressions de fonctionnement; les pressions des canaux cathodiques et anodiques sont supposées égales ( $P_a = P_c = P$ ). Le courant de charge augmente jusqu'à 80 A à 1 s, puis à 30 A à 11 s. Il est à noter que la tension de sortie de la SOFC est plus élevée sous une pression de fonctionnement plus élevée . En outre, il est à noter que la constante de temps associée à la réponse à la tension de sortie augmente avec une augmentation de la pression de fonctionnement.

### 2.6.2.3 Les réponses dynamiques dues à l'effet des températures



**Fig 2-14 :** 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 minutes [27].

Sur une grande échelle de temps ( $10^2$ - $10^3$  s), la dynamique de l'effet de charge à double couche et de la pression de fonctionnement est diminuée, et l'effet de la température (dû à la caractéristique thermodynamique de la SOFC) dominera la réponse dynamique de la SOFC. La (fig 2-14) montre la réponse en tension dynamique du modèle SOFC lorsqu'il est soumis à une augmentation progressive du courant de charge de 0 à 100 A à  $t = 10$  min, puis à 30 A à  $t = 120$  min. Les températures d'entrée du carburant et de l'air sont supposées égales et sont indiquées sur la figure par T (entrée). Lorsque le courant de charge augmente, la tension de sortie de la SOFC chute brusquement puis monte à sa valeur finale. La chute de tension brutale est due aux réactions chimiques relativement lentes à l'intérieur de la SOFC.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons a présenté la modélisation d'une pile SOFC, et on a visualisé les différentes réponses des paramètres influents sur son fonctionnement. Nous avons trouvé que le système réagit correctement pendant la variation du courant de consigne demandée par la charge avec un temps de réponse relativement lent. Dans les applications qui nécessitent un temps de réponse plus rapide se système ne peut être utilisé seul et l'utilisation d'un organe de stockage d'énergie électrique conjointe (comme les super condensateurs et les batteries) est nécessaire pour satisfaire le besoin de la charge pendant le régime transitoire

## **Chapitre 03 :**

# **Modélisation Floue de la Pile à Combustible SOFC**

### 3.1 Introduction

Pour de nombreuses applications du monde réel, de nombreux renseignements sont fournis par des experts qui ne raisonnent pas en termes mathématiques mais décrivent le système verbalement au moyen d'énoncés vagues ou imprécis, tels que :

*Si la température est élevée alors la pression est haute* (3.1)

Étant donné que de nombreuses connaissances et compétences humaines relèvent de règles verbales, l'une des méthodes d'ingénierie saines consiste à essayer d'intégrer de telles informations linguistiques dans le processus de modélisation. Une approche commode et courante consiste à utiliser des concepts de logique floue pour transformer les connaissances verbales en une représentation mathématique classique (structure de modèle), qui peut ensuite être affinée à l'aide de données d'entrée-sortie.

La logique floue, proposée pour la première fois par Lotfi Zadeh en 1965 [28], concerne principalement la représentation du type de connaissances imprécises qui sont courantes dans les systèmes naturels. Il facilite la représentation de ce type de connaissances dans les ordinateurs numériques en utilisant des ensembles flous. À partir de cette base, la logique floue utilise des opérateurs logiques pour rassembler et intégrer ces connaissances afin d'approcher le type de raisonnement commun à l'intelligence naturelle.

Un modèle flou est un cadre de calcul basé sur les concepts d'ensembles flous, de règles **SI-ALORS** floues et de raisonnement flou.

La théorie des ensembles conventionnelle est basée sur le principe qu'un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble donné. La théorie des ensembles flous adopte une vision moins rigide et permet aux éléments d'avoir des degrés d'appartenance à un ensemble particulier, de telle sorte que les éléments ne soient pas limités à un ensemble ou à un ensemble, mais qu'ils soient autorisés à être "un peu" dans une approche plus naturelle. Par exemple, considérons le cas d'une personne décrivant la température atmosphérique comme étant "chaude". Si l'on voulait exprimer ce concept dans la théorie conventionnelle des ensembles, on serait obligé de désigner une plage distincte de températures, telle que 25 ° C et plus, comme appartenant à l'ensemble à chaud.

Cela semble artificiel, car toute température tombant légèrement en dehors de cette plage ne ferait pas partie du décor, même si un être humain ne peut peut-être pas le distinguer de celui qui se trouve juste à l'intérieur du réglage.

Dans la théorie des ensembles flous, une représentation précise d'une connaissance imprécise n'est pas imposée car il n'est pas nécessaire de définir les limites strictes d'un ensemble ; à la place, une fonction d'appartenance est définie. Une fonction d'appartenance décrit la relation entre une variable et le degré d'appartenance à l'ensemble flou qui correspond à des valeurs particulières de cette variable. Ce degré d'appartenance est généralement défini en termes de nombre compris entre 0 et 1, inclus, 0 signifiant une absence totale d'adhésion, 1 signifiant une adhésion complète et toute valeur intermédiaire interdisant une appartenance partielle à l'ensemble flou.

La configuration de base d'un modèle flou Le modèle flou implique les composants suivants [29] :

- Prétraitement des données.
- Fuzzification.
- Règle de base .
- moteur d'inférence.
- Defuzzification.
- Analyse des résultats.

Dans ce chapitre nous présentons les éléments de base concernant l'identification de modèles flous à partir des données entrée-sortie du procédé. Nous nous intéressons particulièrement aux modèles de type Takagi-Sugeno et à leur construction en utilisant des techniques de coalescence floue, pour simplifier la commande de la pile à combustible de type SOFC .....

### 3.2 Structure générale des modèles flous

En général les systèmes flous s'appuient sur une représentation de la connaissance sous forme de règles « Si-Alors » qui permettent de représenter les relations entre les variables d'entrée et de sortie dont l'expression générique est de la forme :

**Si** antécédent **Alors** conséquent

Si antécédent Alors conséquent Dans un premier temps et afin de faciliter l'interprétation, on peut considérer l'antécédent (prémisse) comme une description linguistique qui indique les conditions de validité du phénomène représenté. Pour sa part, le conséquent (conclusion) représente le comportement associé aux conditions de validité décrites par l'antécédent. Selon la structure particulière de la proposition conséquent, on peut distinguer trois types de modèles flous basés sur des règles suivantes [30] :

- *Modèle flou linguistique*, (ou modèle Mamdani), dans lequel l'antécédent et le conséquent sont tout les deux des propositions floues qui utilisent des variables linguistiques [31] [32].
- *Modèle flou relationnel*, qui peut être considéré comme une généralisation du modèle linguistique dans lequel il est possible d'associer une proposition antécédent spécifique avec plusieurs propositions conséquents différentes via une relation floue. Cette relation floue représente des associations entre les ensembles flous individuels définis dans les domaines d'entrée/sortie du modèle [33] [34].
- *Modèle flou Takagi-Sugeno (TS)*, dans lequel le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à la proposition antécédent [35].

Dans le contexte des applications de logique floue dans le contrôle de système, les types de modèles les plus couramment utilisés sont ceux de Mamdani et Takagi-Sugeno (noté TS). Les exemples suivants correspondent à ces deux types de règles :

**Si A** est élevé et **B** est faible **Alors** temps est long

**Si A** est élevé et **B** est faible **Alors**  $t=30A+50B+10$

La première règle est celle d'un modèle de type Mamdani utilisant les variables linguistiques associées aux concentrations de A , B et le temps de dégradation tandis que la seconde est celle d'un modèle de type Takagi-Sugeno où la variable t du conséquent (temps de dégradation) est numérique sous la forme d'une fonction des variables associées à l'antécédent.

Dans un cadre plus formel, la représentation d'un modèle flou nécessite souvent l'utilisation de plusieurs règles et implique diverses opérations mathématiques pour le traitement des informations symboliques, qui vont au-delà de la portée du présent document. Dans ce qui suit, nous discutons brièvement des notions de base de la logique floue appliquées à la modélisation et au contrôle

Afin d'établir certains éléments de base de la logique floue nécessaires à notre travail, considérons une règle linguistique  $R_i$  de la forme générale suivante:

$$R_i : \mathbf{Si} \ x \text{ est } A_i \ \mathbf{Alors} \ y \text{ est } B_i \quad i=1, \dots, r \quad (3.2)$$

où

- $R_i$  : dénote la nombre de règle du modèle.
- $x \in X \subset \mathbf{R}^p$  : est la variable de l'antécédent qui représente l'entrée du système et
- $y \in Y \subset \mathbf{R}$  : est la variable de sortie (conséquent).
- $X, Y$  : correspondent respectivement aux domaines des variables d'entrée et de sortie .
- $A_i , B_i$  : sont des termes linguistiques qui correspondent aux valeurs qualitatives associées aux variables de base  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{y}$  .

Ces termes linguistiques sont  $i$  décrits par des ensembles flous définis par des fonctions d'appartenance  $\mu$ , qui établissent une correspondance de chacun des univers de discours vers l'intervalle  $[0,1]$ , ainsi :

$$\begin{aligned} u_{A_i}(x) : X &\longrightarrow [0,1] \\ u_{B_i}(y) : Y &\longrightarrow [0,1] \end{aligned} \quad (3.3)$$

La théorie des groupes flous [36], permet l'appartenance partielle d'un élément à un groupe. (Prenons un exemple  $\mu_{A_i}(x)$ ). Ce qui indique la valeur de la fonction d'appartenance à  $A_i$  (nommée degré d'appartenance) de  $x$  au groupe caractérisé par  $A_i$ .

Si le degré d'appartenance est égal à 1, l'élément  $x$  appartient entièrement au groupe. Si 0, l'élément  $x$  n'appartient pas à ce groupe. Si le degré d'appartenance se trouve entre zéro et un, alors  $x$  appartient partiellement à l'ensemble flou. Le degré d'appartenance permet alors une gradation du degré de constatation des faits.

Les ensembles flous  $A_i$  définissent des zones floues dans l'espace de l'antécédent pour lesquels la prémisse du conséquent est valide. Le niveau de précision auquel un système particulier est représenté par un modèle flou est lié à la précision du traitement de l'information, qui dépend notamment du nombre de termes linguistiques ainsi que de la forme et du degré de chevauchement des informations identifiées des fonctions d'appartenance utilisées dans le formulaire.

Les groupes mystérieux sont définis analytiquement par des fonctions appartenance. Afin de faciliter les calculs, ils sont souvent identifiés [37]. Regardons deux cas assez généraux..

Fonction d'appartenance trapézoïdale :

$$\mu(x; a, b, c, d) = \max \left( 0, \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right) \right) \quad (3.4)$$

Où :  $a, b, c, d$  sont les coordonnées des sommets du trapèze. Il faut remarquer que quand  $b=c$  on obtient une fonction d'appartenance triangulaire.

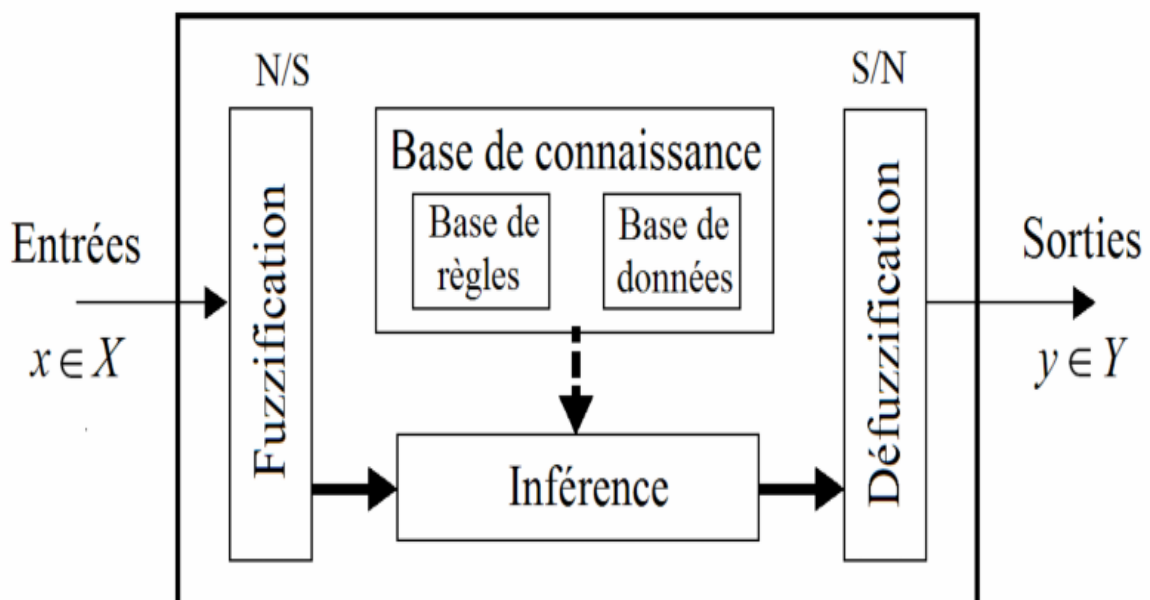
Fonction d'appartenance exponentielle par morceaux :

$$\mu(x; c_l, c_r, w_l, w_r) = \begin{cases} \exp \left( - \left( \frac{x-c_l}{2w_l} \right)^2 \right) & \text{si } x < c_l \\ \exp \left( - \left( \frac{x-c_r}{2w_r} \right)^2 \right) & \text{si } x > c_r \\ 1 & \text{les autres cas} \end{cases} \quad (3.5)$$

Pour les conditions  $c_l = c_r$  et  $w_l = w_r$  on obtient la fonction d'appartenance Gaussienne.

En revenant sur la règle linguistique générale décrite par l'expression (3.2), les systèmes flous basés sur des règles du type « Si...Alors » ont des antécédents et des conséquents qui sont spécifiés de manière symbolique. Dans le cadre de la modélisation et la commande de systèmes, l'exploitation d'une telle connaissance nécessite en général la mise en place d'interfaces numérique/symbolique (N/S) et symbolique/numérique (S/N). Ces dernières sont en effet des passerelles indispensables à l'établissement d'un lien entre l'ensemble de règles (*base de règles*) qui interfacent le système flou et le procédé, sur lequel seules des mesures et des actions numériques sont envisageables. De manière classique, le fonctionnement interne des systèmes flous repose sur une structure, représentée sur la Figure (3-1) [37] [38], qui inclus :

- la fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information .
- l'inférence à partir d'une base de connaissance,
- la défuzzification, avec éventuellement un post-traitement d'information.



**Fig 3-1** : Représentation interne d'un système flou

### 3.3 Modèles flous de type Takagi-Sugeno

Un autre type de modèle flou, approprié pour l'approximation d'une classe générale de systèmes non linéaires est celui proposé par Takagi et Sugeno. Ce type de modèle est, comme celui de Mamdani, construit à partir d'une base de règles "Si...Alors...", dans laquelle si la prémisse est toujours exprimée linguistiquement, le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques. Le conséquent peut s'exprimer par exemple, sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou de manière plus générale d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à l'antécédent. généralement ce type est basé sur une collection des règles  $R_i$  :

$$R_i : \mathbf{Si } x \text{ est } A_i \quad \mathbf{Alors } y_i = f_i(x_i) \quad i=1, \dots, r \quad (3.6)$$

où  $R_i$  dénote la  $i$ -ème règle du modèle et  $r$  est le nombre de règles que contient la base de règles.  $x \in \mathcal{R}^p$  est la variable d'entrée (*antécédent*) et  $y \in \mathcal{R}$  est la variable de sortie (*conséquent*).  $A_i$  est le sous-ensemble flou de l'antécédent de l' $i$ -ème règle, définie, dans ce cas, par une fonction d'appartenance (*multivariable*) de la forme :

$$u_{A_i}(x) : \mathcal{R}^p \longrightarrow [0,1] \quad (3.7)$$

#### 3.3.1 Structure de zéro et premier ordre de Takagi-Sugeno (TS)

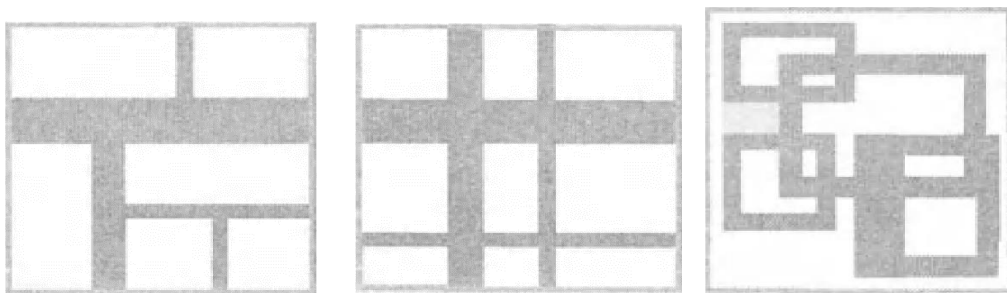
Le modèle TS est une combinaison d'un modèle logique et d'un modèle mathématique. Ce modèle est également formé par des règles logiques consistant en un antécédent flou et une fonction mathématique en tant que partie conséquente. Les antécédents de règles flous partitionnent l'espace d'entrée en un certain nombre de régions floues, tandis que les fonctions qui en découlent décrivent le comportement du système dans une région donnée :

$$R_i : \mathbf{Si } z_1 \text{ est } A_{1,j} \quad \mathbf{et } \dots \mathbf{et } z_n \text{ est } A_{i,n} \quad \mathbf{Alors } y = f_i(q_1, \dots, q_m) \quad (3.8)$$

Où  $z = [z_1, \dots, z_n]^T$  est le vecteur de 'n' dimensions des variables antécédentes, et  $z \in x$ ,

$q=[q_1.....q_m]^T$  est le vecteur de 'm' dimensions des variables résultantes,  $q \in x$ , où 'x' indique l'ensemble de toutes les entrées du modèle  $Y = f(x)$ ,  $A_{i,j}$  est l'ensemble des antécédents flous pour 'i'ème entrées. Les antécédents de règles flou partitionnent l'espace d'entrée en un certain nombre de régions floues, tandis que les fonctions résultantes de  $f_j(q)$  décrivent le comportement du système dans une région donnée.

En ce qui concerne les fonctions d'appartenance des antécédents et la structure des règles, il est possible d'obtenir trois méthodes typiques de partitionnement de l'espace d'entrée. La figure (3-2) illustre ces partitions dans un espace d'entrée bidimensionnel.



**Fig 3-2 :** Diverses méthodes pour partitionner l'espace d'entrée.

- **Partition de grille** L'antécédent conjonctif divise l'espace antécédent en un réseau de boîtes hyper axiales-orthogonales. Dans ce cas, le nombre de règles nécessaires pour couvrir l'ensemble du domaine est une fonction exponentielle de la dimension d'espace d'entrée et des ensembles flous utilisés dans chaque variable. Cette méthode de partition est souvent choisie lors de la conception d'un système flou qui implique généralement quelques variables d'entrée. Cette stratégie de partition n'a besoin que d'un petit nombre de fonctions d'appartenance pour chaque entrée. Cependant, il y a des problèmes lorsque nous avons un nombre modérément grand d'entrées. Par exemple, un modèle flou avec dix entrées et deux fonctions d'appartenance sur chaque entrée donnerait  $2^{10} = 1024$  règles floues si-alors. Ce problème, généralement appelé malédiction de la dimensionnalité, peut être atténué par d'autres stratégies de partitionnement présentées ci-dessous.
- **Partition d'arbre** Cette partition soulage le problème de l'augmentation exponentielle du nombre de règles. Cependant, davantage de fonctions d'appartenance pour chaque entrée sont nécessaires pour définir ces régions floues. Ces fonctions d'appartenance

ne peuvent pas être interprétées car elles ne portent pas de signification linguistique claire, telle que "petit".

- **Partition à dispersion** En couvrant un sous-ensemble de tout l'espace d'entrée qui caractérise une région d'occurrence possible des vecteurs d'entrée, il est possible d'obtenir une partition à dispersion qui peut également limiter le nombre de règles à un nombre raisonnable. Dans ce cas, l'utilisation de fonctions d'appartenance à plusieurs variables est la plus générale, car il n'existe aucune restriction quant à la forme des ensembles flous. Les limites entre les ensembles flous peuvent être arbitrairement courbes et opaques aux axes.

Habituellement, la fonction  $f_j$  résultante est un polynôme dans les variables d'entrée, mais il peut s'agir de n'importe quelle fonction choisie arbitrairement, capable de décrire de manière appropriée la sortie du système dans la région spécifiée par l'antécédent de la règle. Lorsque  $f_j(q)$  est un polynôme de premier ordre.

$$f_j(q) = p_j^0 + p_j^1 q + \dots + p_j^n q_m = \sum_{i=0}^m p_j^i q_i \quad \text{ou} : q_0 = 1 \quad (3.9)$$

le système d'inférence flou résultant est appelé Takagi-Sugeno de premier ordre ou simplement un modèle flou Takagi-Sugeno. Si  $f_j(q)$  est une constante (singleton flou),  $f_j = p_j$ , nous avons un modèle Takagi-Sugeno ou singleton fuzzy d'ordre zéro, qui est un cas particulier des systèmes d'inférence floue linguistique [39] et du modèle flou TS ( $m = 0$ )

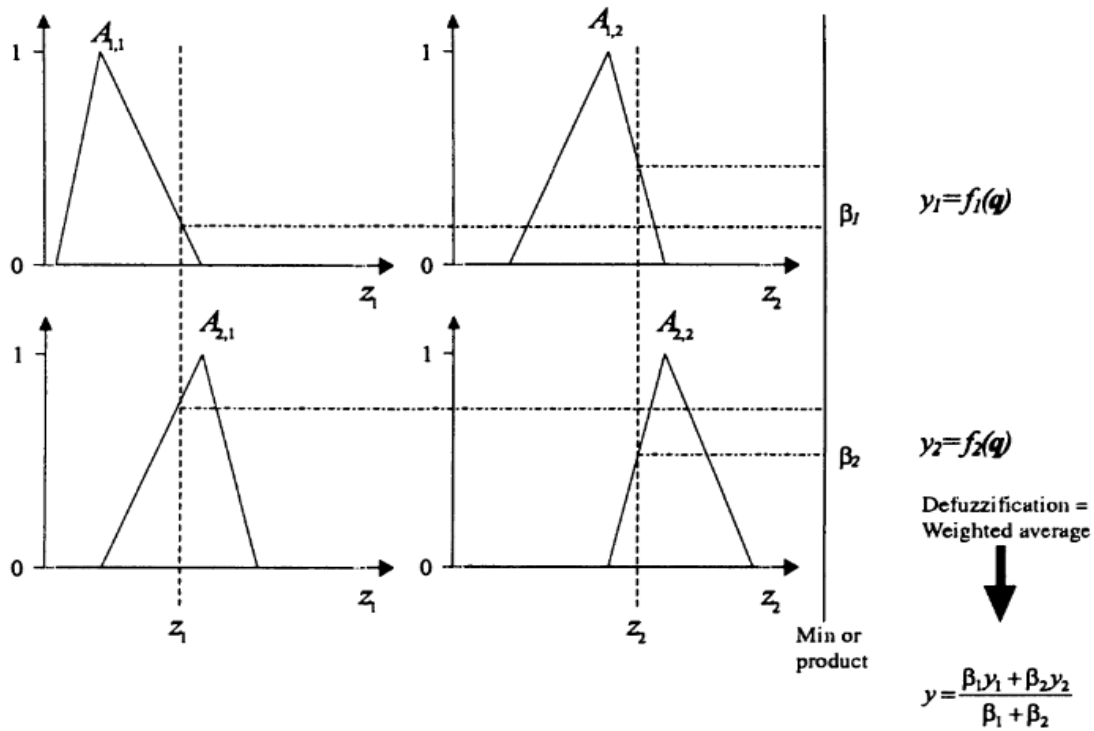
En utilisant une inférence floue basée sur la gravité somme-produit pour une entrée donnée [40], la sortie finale du modèle flou,  $y$ , est déduite en prenant la moyenne pondérée des fonctions résultantes, comme illustré à la figure (3-3) :

$$y = \frac{\sum_{j=1}^{n_r} B_j(z) f_j(q)}{\sum_{j=1}^{n_r} B_j(z)} \quad (3.10)$$

Où le poids,  $0 \leq B_j(z) \leq 1$  représente la valeur de vérité globale (degré d'accomplissement) de la  $j$ ème règle calculée sur la base des degrés d'appartenance :

$$B_j(z) = \prod_{i=1}^n A_{i,j}(z_i) \quad (3.11)$$

La figure (3-3) montre la procédure de raisonnement flou pour un modèle flou TS



**Fig 3-3** : Méthode d'inférence du modèle flou Takagi-Sugeno [41]

Pour simplifier l'analyse et la mise en œuvre, la plupart des résultats présentés sont indépendants du type de fonction d'appartenance, les fonctions d'appartenance sont classées par partition de type Ruspini, la somme des degrés d'appartenance étant égale à 1.

$$\sum_{i_l=1}^{i_l=M_l} A_{l,i_l} z(l) = 1 \quad , l = 1, \dots, n, \quad (3.12)$$

Où  $M_l$  représente le nombre d'ensembles flous sur le  $l$  ième domaine d'entrée.

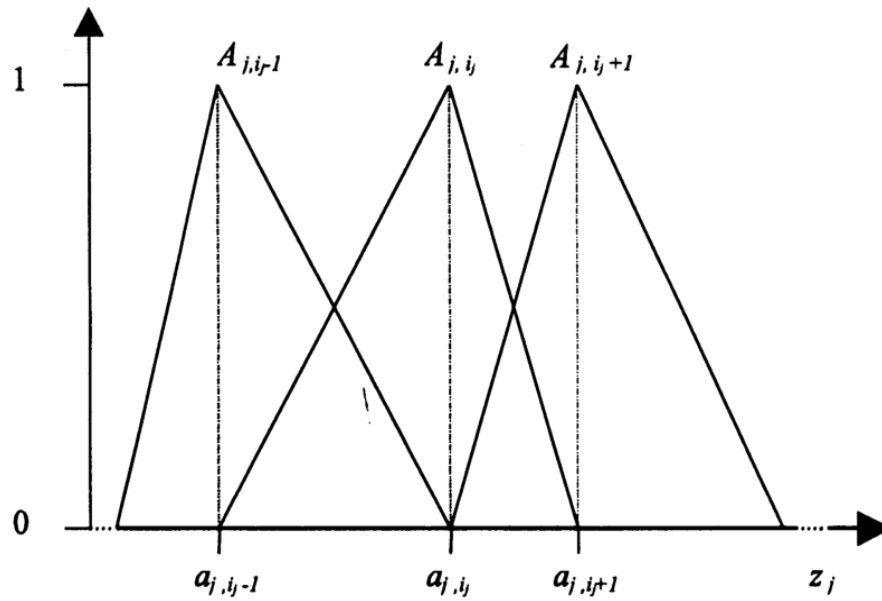


Fig 3-4 : Paramétrage de Ruspini des fonctions d'appartenance triangulaire [41].

Alors, les fonctions d'appartenance triangulaire sont définies par :

$$\begin{aligned}
 A_{l,i_l}(z_l) &= \frac{z_l - a_{l,i_l-1}}{a_{l,i_l} - a_{l,i_l-1}} & a_{l,i_l-1} \leq z_l < a_{l,i_l} \\
 A_{l,i_l}(z_l) &= \frac{a_{l,i_l+1} - z_l}{a_{l,i_l+1} - a_{l,i_l}} & a_{l,i_l} \leq z_l < a_{l,i_l+1}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Ou'  $a_{l,i_l}$  , les noyaux des ensembles de flou adjacentes déterminent le support ( $supa_{l,i_l} = a_{l,i_l+1} - a_{l,i_l-1}$ ) d'une ensemble .

$$a_{l,i_l} = core(a_{l,i_l}(z_l)) = \{z_l | A_{l,i_l}(z_l) = 1\}
 \tag{3.14}$$

Dans le cas du partitionnement de type grille, les règles-index peuvent être écrites sous forme vectorielle :  $j = i_1, \dots, i_n$  ou'  $j = 1, \dots, N_r$  ,  $N_r = \prod_j M_j$ ,

$$\begin{aligned}
 R_{i_1, \dots, i_n} : \text{Si } z_1 \text{ est } A_{l,i_1} \text{ et } \dots \text{ et } z_n \text{ est } A_{l,i_n} \quad \text{Alors} \\
 y = f_{i_1, \dots, i_n}(q_1 \dots q_m)
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Dans le cas de ce partitionnement de Ruspini, les valeurs de vérité globales des règles remplissent

$$\sum_{i_1=1, i_n=1}^{M_1, M_n} B_{i_1, \dots, i_n} = \prod_{l=1}^n A_{l, i_l}(z_l) = 1 \quad (3.16)$$

en tant qu'opérateur de produit (3.10) est utilisé pour les connecteurs "et" et un opérateur "somme" est utilisé pour l'agrégation. Par conséquent, la sortie du modèle peut être calculée comme suit:

$$y = \sum_{i_1=1, i_n=1}^{M_1, M_n} \left[ \left( \prod_{l=1}^n A_{l, i_l}(z_l) \right) f_{i_1, \dots, i_n}(q) \right] = 1 \quad (3.17)$$

Ou' :

$$\sum_{i_1=1, i_n=1}^{M_1, M_n} = \sum_{i_1=1}^{M_1} \dots \dots \sum_{i_n=1}^{M_n}.$$

Pour simplifier la notation, ces index de règles de type vectoriel peuvent être réécrits comme suit:

$$j = i_n + \sum_{l=1}^{n-1} (i_l - 1) \prod_{k=l+1}^n M_k \quad (3.18)$$

Comme les fonctions d'appartenance sont définies par des relations fonctionnelles linéaires par morceaux qu'il est facile d'évaluer et que les ensembles flous constituent une partition d'unité qui facilite l'étape de défuzzification, le système flou proposé est facilement implémenté. Cette simplicité se traduit par une efficacité de calcul qui permet des applications en temps réel.

### 3.4 Modèles flous des systèmes dynamiques

Comme la nomenclature des modèles dynamiques non linéaires est basée sur la terminologie utilisée pour catégoriser les modèles linéaires d'entrées-sorties, les structures de modèles empiriques linéaires suivantes peuvent être résumées par la famille générale [42, 43]

$$A(q) y(k) = \frac{B_q}{F_q} u(k) + \frac{C_q}{D_q} e(k) \quad (3.19)$$

sont discutés, où  $q$  désigne l'opérateur de décalage. Par exemple,  $A(q)$  est un polynôme de  $q$ -1. Ce modèle peut être donné sous forme de régression "pseudo-linéaire" :

$$\hat{y}(k) = \theta^T x(k) \tag{3.20}$$

où les régresseurs, i.e., les composants de  $x(k)$  peuvent être trouvés comme :

- $u(k-i)$ ,  $i=1 \dots n_b$ , signaux de commande (associé au polynôme B).
- $u(k-i)$ ,  $i=1 \dots n_a$ , signaux de commande (associé au polynôme A).
- $\hat{y}_u(k-i)$  sorties simulées de  $u(k)$  précédent (associé au polynôme F).
- $e(k-i) = y(k-i) - \hat{y}_u(k-i)$  erreurs de prédiction (associé au polynôme C).
- $e_u(k-i) = y(k-i) - \hat{y}_u(k-i)$  erreurs de simulation (associé au polynôme D).

Sur la base de ces régresseurs, différents types de structures de modèle peuvent être construits. Par exemple, le modèle dynamique linéaire le plus simple est le modèle de réponse impulsionnelle finie (FIR) :

$$\hat{y}(k) = B_q u(k) + e(k) = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n_b) + e(k) \tag{3.21}$$

Dans cette équation, le facteur prédictif correspondant  $\hat{y}(k) = B_q u(k)$  est donc basé sur la  $u(k) = [u(k-1), \dots, u(k-n_b)]$  vecteur de régression.

Suivant cette nomenclature de modèles linéaires, il est naturel de construire des structures de modèle non linéaires similaires :

- NRAX, Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input models, qui utilisent des régresseurs :

$$x(k) = [y(k-1), \dots, y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]$$

- NOE, Nonlinear Output Error Models, qui utilisent :

$$x(k) = [\hat{y}(k-1), \dots, \hat{y}(k-n_b), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]$$

- NARMAX, Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous input models, ou :

$$x(k) = [y(k-1), \dots, y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b), \varepsilon(k-1), \dots, \varepsilon(k-n_\varepsilon)]$$

- NBJ , Nonlinear Box-Jenkins models , où les régresseurs sont des entrées précédentes, des sorties estimées antérieures, des erreurs d'estimation utilisant des sorties précédentes et des erreurs d'estimation utilisant des sorties estimées antérieures

$$x(k)=[\hat{y}(k-1), \dots, \hat{y}(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b), \varepsilon_u(k-1), \dots, \varepsilon_u(k-n_n), \varepsilon(k-1), \dots, \varepsilon(k-n_g)]$$

Dans la communauté de l'informatique douce, le modèle NARX est appelé modèle série parallèle, tandis que le NOE est appelé modèle parallèle [44]. Les modèles NARMAX, NOE et NBJ sont des modèles récurrents, car ils utilisent la sortie estimée qui constitue un retour. Cela rend l'identification de ces modèles difficile. La structure du modèle NARX étant non récursive, ses paramètres sont faciles à estimer. Par conséquent, le modèle NARX est fréquemment utilisé pour l'identification. Le modèle parallèle NARX ou série identifié est souvent utilisé et testé en tant que modèle NOE ou parallèle lorsque les sorties précédentes du modèle non linéaire sont utilisées à la place des sorties réelles de l'installation. En utilisant cette approche, une prédiction multi-étapes peut être faite, en utilisant les prédictions antérieures du système. Cette procédure est souvent appelée simulation "free run"(test libre). Ce "free run"(test libre) est un test très rigoureux du pouvoir prédictif du modèle, car de petites erreurs peuvent ainsi s'accumuler pour devenir des erreurs majeures.

### 3.4.1 Modél flou multi-variables TS NARX

Considérons un MIMO (Multi-Input Multiple Output) général système non linéaire à  $m$  entrées :

$u \in U \subset \mathcal{R}^m$ , et  $p$  sorties :  $y \in Y \subset \mathcal{R}^m$ . Ce système est approximé par une collection de modèles dynamiques flous Takagi-Sugeno (TS) temps discrets à multi-entrées (Multi-Input) couplées à une seule sortie (Single-output) (MISO) du type entrée-sortie de type NARX (Non Linéaire, Autorégressif, Exogène) [45]:

$$y_l(k+1) = R_l(\Psi_l(k), u(k)), \quad l=1,2,\dots,p \tag{3.22}$$

Où  $u(k) \in \mathcal{R}^m$  est le vecteur d'entrée contient les entrées actuelles , et  $\Psi_l(k) \in \mathcal{R}^q$  est le vecteur de régression comporte le courant et les sorties et les entrées actuelles et retardées.

$$\Psi_l(k) = [y_1(k), \dots, y_p(k), u_1(k-1), \dots, u_m(k-1)]^T \tag{3.23}$$

Avec :

$$y_i(k) = [y_i(k), y_i(k-1), \dots, y_i(k-n_{y,i})], i = 1, \dots, p \quad (3.24)$$

$$u_j(k-1) = [u_j(k-1), u_j(k-2), \dots, u_j(k-n_{u,j})], i = 1, \dots, m \quad (3.25)$$

Où  $n_{y,i}$  est le nombre de valeurs décalées pour la  $i$ ème sortie,  $n_{u,j}$  est le nombre de valeurs décalées pour la  $j$ ème entrée.

Le modèle flou TS MISO est décrit par  $l$  règles floues comme [46] :

$$R_{li} : \text{Si } \Psi_{l1}(k) \text{ est } M_{li,1} \text{ et } \dots \text{ et } \Psi_{lq}(k) \text{ est } M_{li,q} \text{ et } u_1(k) \text{ est } M_{li,q+1} \text{ et } \dots \text{ et } u_m(k) \text{ est } M_{li,q+m} \text{ Alors } y_{li}(k+1) = \zeta_{li} \Psi_l(k) + \eta_{li} u(k) + \theta_{li} \\ I=1,2,\dots,r_l \quad l=1,2,\dots,L \quad (3.26)$$

où  $R$  indique la  $l$ ème règle d'inférence floue,  $L$  le nombre de règles d'inférence,  $\Psi_l(k)$  les prémisses variables mesurables,  $M_{li}$  sont les ensembles flous antécédents de la  $i$ ème règle,  $\zeta_{li}$  et  $\eta_{li}$  sont des vecteurs contenant les paramètres conséquents,  $\theta_{li}$  est le décalage,  $u_l(k)$  est le nombre de règles pour la  $l$ ème sortie.

La sortie du modèle est calculée comme la moyenne pondérée de la conséquences linéaires dans les règles individuelles [47]

$$y_l(k-1) = \frac{\sum_{i=1}^{r_l} \alpha_{li} (\zeta_{li} \psi_l(k) + \eta_{li} u(k) + \theta_{li})}{\sum_{i=1}^{r_l} \alpha_{li}} \quad (3.27)$$

Où le degré de réalisation de la  $i$ ème règle  $\alpha$  est le produit des degrés d'appartenance des variables antécédentes (états et entrées) de cette règle.

Une fois la structure du modèle NARX déterminée, les paramètres du modèle NARX peuvent être estimés à l'aide de l'algorithme des moindres carrés.

$$\hat{\theta} = [H^T H]^{-1} H^T Y \quad (3.28)$$

Où  $\hat{\theta} = [\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_{y,i}, \hat{b}_1, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{u,j}]$  est les paramètres estimés du modèle NARX et :

$$H = [h(1), h(2), \dots, h(N - 1)]^T \quad (3.29)$$

$$Y = [y(1), y(2), \dots, y(N)] \quad (3.30)$$

➤ **La méthode du moindre carré non-linéaire**

Formellement, nous considérons la spécification non linéaire :

$$y = f(x; \beta) + e(\beta) \quad (3.31)$$

Où  $f: \mathbf{R}^l \times \theta_1 \rightarrow \mathbf{R}$ ,  $\theta_1$  indique l'espace des paramètres, un sous-espace de  $\mathbf{R}^k$  et  $e(\beta)$  est l'erreur de spécification. Étant donné  $T$  observations de  $y$  et  $x$ , laissez :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_T \end{bmatrix}, \quad f(x, \dots, x_T; \beta) + e(\beta) = \begin{bmatrix} f(x_1; \beta) \\ f(x_2; \beta) \\ \vdots \\ f(x_T; \beta) \end{bmatrix}$$

La spécification non linéaire (3.22) peut maintenant être exprimée sous la forme

$$y = f(x, \dots, x_T; \beta) + e(\beta)$$

Où  $e(\beta)$  est le vecteur d'erreurs.

### 3.5 Identification des modèles flous

Lorsque la structure du modèle flou est connue a priori, le but de l'identification est de déterminer la  $\theta = \{a_{j,i}, p_j^i\}$  paramètres des ensembles flous et les fonctions conséquentes du modèle.

Considérez notre modèle flou

$$\hat{y}(k) = f(x(k), \theta) \quad (3.32)$$

dans lequel les paramètres  $a_{j,i}$  et  $p_j^i$ , ont été inclus dans le vecteur de paramètre  $\theta$  et  $k$  indique le temps instantané discret ou / et l'indice des  $k$ -èmes données d'apprentissage.

L'identification de  $\theta$  est basée sur l'erreur entre la sortie du modèle et la sortie mesurée

$$\theta = \arg \min_{\theta} V_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|y(k) - f(x(k), \theta)\|^2 \quad (3.33)$$

Où  $N$  représente le nombre de paires de données d'entrée-sortie disponibles pour l'identification,

$V(k)$  est la mesure d'erreur pour la  $k$ -ème entrée des données d'apprentissage, Évidemment, lorsque  $V(k)$  est égal à zéro, le modèle flou est capable de reproduire exactement la sortie dans le  $k$ -ème data pair. En supposant que le jeu de données d'apprentissage  $Z$  comporte  $N$  entrées,

$$Z = \{y(k), x(k) : k = 1, \dots, N\} \quad (3.34)$$

la méthode d'identification cherche à diminuer la valeur de la fonction objectif quadratique en se basant sur l'erreur de modélisation décrite à la figure (3-4)

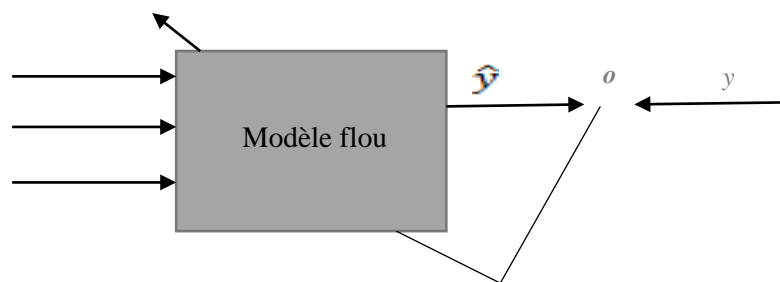


Fig 3-5 : Schéma d'identification de modèle flou

En général, le minimum de  $V_N$  ne peut pas être calculé analytiquement, la minimisation doit donc être effectuée par optimisation non linéaire. Les routines d'optimisation les plus efficaces sont basées sur une recherche locale itérative dans une direction descendante à partir du point actuel:

$$\theta^{(i+1)} = \theta^i + \Delta\theta^i = \theta^i - \mu_i R_i^{-1} \nabla \hat{f}_i \quad (3.35)$$

Où  $\theta^i$  est l'estimation du paramètre après le nombre d'itérations  $i$ ,  $\mu_i$  est un paramètre d'adaptation,  $R_i^{-1}$  est une matrice qui modifie le sens de la recherche et  $\nabla \hat{f}_i$  indique le gradient  $V'_N(\theta^i)$ .

Selon les applications qui nous intéressent, deux types de paradigmes d'apprentissage sont appropriés. Dans l'apprentissage hors ligne (ou apprentissage par lots), la mise à jour du paramètre  $\mu_i R_i^{-1} \nabla \hat{f}_i$  est basée sur l'ensemble des données disponibles. L'identification

recherche donc le minimum de  $V_N$ . Pendant l'apprentissage en ligne (ou apprentissage de modèle), les paramètres sont mis à jour immédiatement après qu'une nouvelle donnée d'entrée en entrée a été présentée au modèle. En pratique, il est souvent possible de combiner ces méthodes et de mettre à jour le jeu de paramètres après la présentation de données d'entraînement comprises entre 1 et N. Le nombre de motifs est souvent appelé taille d'époque. Dans ce qui suit, les règles d'apprentissage de type batch sont dérivées. Sur la base de ces règles, les versions en ligne des algorithmes d'identification peuvent être facilement développées.

Le schéma de recherche est constitué des trois entités suivantes :

➤ **Estimer la pente de la fonction de coût**

La base de la recherche locale est le gradient

$$V'_N(\theta^i) = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - f(X(k), \theta)) h(X(k), \theta) \quad (3.36)$$

Où,

$$h(X(k), \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} f(X(k), \theta). \quad (3.37)$$

➤ **Calculer la matrice de  $R_i$  qui modifie le sens de la recherche**

Si le sens de la recherche n'est pas modifié,  $R_i = I$ , où  $I$  représente une matrice d'identité, l'algorithme résultant est appelé méthode de gradient-descente (GD).

Il est bien connu que cette méthode est inefficace proche du minimum, en particulier pour les problèmes mal conditionnés. Ensuite, il est optimal d'utiliser la méthode Newton, où :

$$R(\theta) = V''_N(\theta) = \frac{1}{N} h(X(k), \theta) h^T(X(k), \theta) + \frac{1}{N} (y(k) - f(X(k), \theta)) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} f(X(k), \theta). \quad (3.38)$$

La vraie direction de Newton nécessite l'évaluation de la dérivée seconde

$$\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} f(X(k), \theta)$$

Cela pourrait être problématique et coûteux en calcul. Par conséquent, des directions de recherche alternatives sont utilisées dans la pratique

-Direction de Gauss-Newton

$$R_i = H_i = \frac{1}{N} h(X(k), \theta^{(i)}) h^T(X(k), \theta^{(i)}) \quad (3.39)$$

-Direction Levenberg-Marquardt

$$R_i = H_i + \delta I \quad (3.40)$$

où le terme  $\delta I$  est utilisé pour éviter les problèmes de conditionnement.

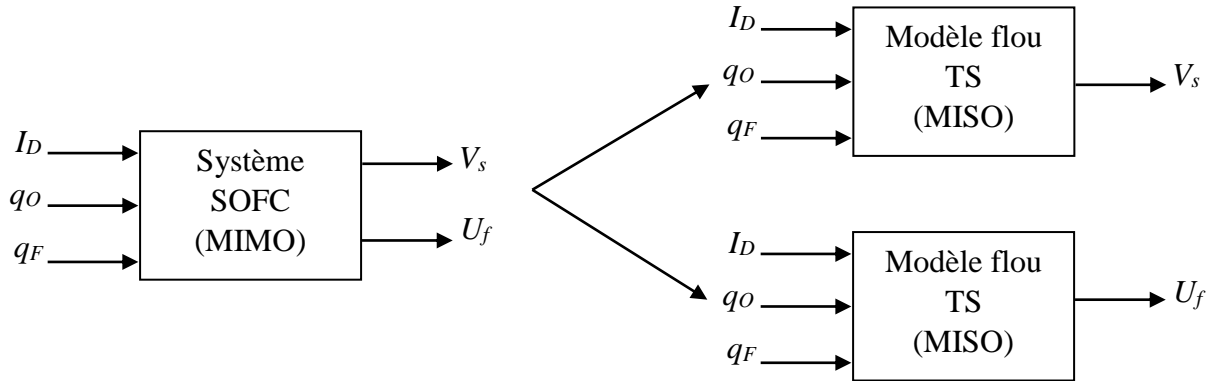
### ➤ Déterminer la taille du pas $\mu_i$

Le pas idéal serait  $\mu_i = 1$  si le critère sous-jacent est réellement quadratique. Si  $\mu_i$  est optimisé à chaque itération par un algorithme de recherche de ligne, jusqu'à ce qu'une nouvelle valeur de paramètre donnant une valeur inférieure au critère soit trouvée, l'optimisation est appelée méthode de Gauss-Newton amortie.

L'équation (3.25) estime tous les paramètres de chaque itération. Il existe également des algorithmes à deux et plusieurs étapes dans lesquels seuls certains paramètres sont mis à jour simultanément. En considérant uniquement la mise à jour du sous-ensemble de paramètres, la charge de calcul de chaque itération devient plus petite. Par exemple, les paramètres connectés à la partie antécédente du modèle flou peuvent être mis à jour indépendamment des paramètres correspondants.

### 3.6 Modélisation floue de la pile à combustible SOFC

Pour cette modélisation nous allons répartir notre système MIMO (multi-entrées, multi-sorties) à deux sous systèmes MISO (multi-entrées, mono-sortie) comme suit :



**Fig 3-6 :** Diagramme de la structure de Modélisation du système SOFC.

Avec

- $I_D$  le courant de charge
- $q_O$  le débit d'oxygène
- $q_F$  le débit de carburant
- $V_s$  la tension de sortie
- $U_f$  le taux d'utilisation

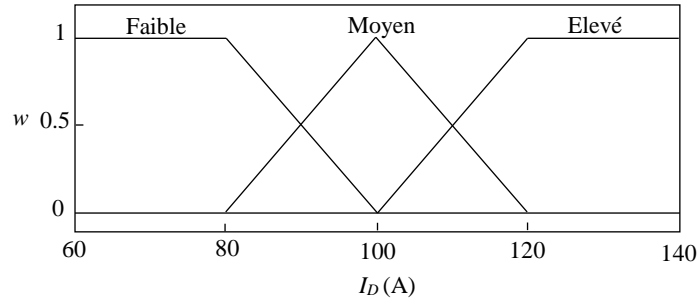
En choisissant les fonctions d'appartenance pour la variable de prémisses  $I_D$  comme :

$$\text{"Faible"} : MF^1 = \begin{cases} 1, & \text{Si } I_D \leq 80 \\ 1 - \frac{I_D - 80}{100 - 80}, & \text{Si } 80 \leq I_D \leq 100 \\ 0, & \text{Si } I_D \geq 100 \end{cases} \quad (3.41)$$

$$\text{"Moyen"} : MF^2 = \begin{cases} 1 - MF^1 & \text{Si } I_D \leq 100 \\ 1 - MF^3 & \text{Si } I_D \geq 120 \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\text{"Elevé"} : MF^3 = \begin{cases} 0, & \text{Si } I_D \leq 100 \\ \frac{I_D - 100}{120 - 100}, & \text{Si } 100 \leq I_D \leq 120 \\ 1, & \text{Si } I_D \geq 120 \end{cases} \quad (3.43)$$

qui sont représentés sur la figure (3-6)



**Fig 3-7** : Fonctions d'appartenance du courant de charge  $I_D$

Et en utilisant la méthode décrite dans la section 3.4.1, avec les vecteurs de régression  $q_1(k)$  et  $q_2(k)$  sont donnés par :

$$q_1(k) = [V_s(k), V_s(k-1), V_s(k-2), q_F(k), q_F(k-1), q_F(k-2), q_O(k), q_O(k-1), q_O(k-2), I_D(k), I_D(k-1), I_D(k-2)]^T \quad (3.44)$$

$$q_2(k) = [U_f(k), U_f(k-1), U_f(k-2), q_F(k), q_F(k-1), q_F(k-2), q_O(k), q_O(k-1), q_O(k-2), I_D(k), I_D(k-1), I_D(k-2)]^T \quad (3.45)$$

Donc les deux modèles flous TS MISO qui seront identifiés sont de la forme :

Modèle 1 (pour  $V_s$ )

Règle  $i$  : Si le courant de charge  $I_D$  est  $M_i$  Alors

$$\begin{aligned} V_s(k+1) = & a_{11}^i V_s(k) + a_{12}^i V_s(k-1) + a_{13}^i V_s(k-2) \\ & + b_{11}^i q_F(k) + b_{12}^i q_F(k-1) + b_{13}^i q_F(k-2) \\ & + c_{11}^i q_O(k) + c_{12}^i q_O(k-1) + c_{13}^i q_O(k-2) \\ & + d_{11}^i I_D(k) + d_{12}^i I_D(k-1) + d_{13}^i I_D(k-2) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Modèle 2 (pour  $U_f$ )

Règle  $i$  : Si le courant de charge  $I_D$  est  $M_i$  Alors

$$\begin{aligned}
 U_f(k+1) = & a_{21}^i U_f(k) + a_{22}^i U_f(k-1) + a_{23}^i U_f(k-2) \\
 & + b_{21}^i q_F(k) + b_{22}^i q_F(k-1) + b_{23}^i q_F(k-2) \\
 & + c_{21}^i q_O(k) + c_{22}^i q_O(k-1) + c_{23}^i q_O(k-2) \\
 & + d_{21}^i I_D(k) + d_{22}^i I_D(k-1) + d_{23}^i I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Donc Il est facile d'identifier les modèles dynamiques flous TS du système pile à combustible de type SOFC comme suit :

Modèle 1 ( pour  $V_s$ )

Règle 1 : Si le courant de charge  $I_D$  est *Faible* Alors

$$\begin{aligned}
 V_s(k+1) = & 1.15778V_s(k) + 0.55134V_s(k-1) - 0.70898V_s(k-2) \\
 & + 0.35258q_F(k) - 0.42206q_F(k-1) + 0.34322q_F(k-2) \\
 & - 0.39029q_O(k) - 0.86401q_O(k-1) - 0.49042q_O(k-2) \\
 & - 0.04630I_D(k) + 0.01094I_D(k-1) + 0.03489I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Règle 2 : Si le courant de charge  $I_D$  est *Moyen* Alors

$$\begin{aligned}
 V_s(k+1) = & 0.54731V_s(k) + 0.61559V_s(k-1) - 0.21283V_s(k-2) \\
 & - 0.98644q_F(k) + 0.20439q_F(k-1) - 0.22678q_F(k-2) \\
 & + 0.83198q_O(k) - 0.99770q_O(k-1) - 0.07510q_O(k-2) \\
 & + 0.03764I_D(k) - 0.02100I_D(k-1) + 0.01478I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

Règle 3 : Si le courant de charge  $I_D$  est *Elevé* Alors

$$\begin{aligned}
 V_s(k+1) = & 1.04761V_s(k) + 0.69987V_s(k-1) - 0.74506V_s(k-2) \\
 & - 0.92862q_F(k) - 0.64784q_F(k-1) + 0.44326q_F(k-2) \\
 & - 0.05303q_O(k) - 0.69455q_O(k-1) - 0.31775q_O(k-2) \\
 & - 0.04519I_D(k) + 0.00618I_D(k-1) + 0.03769I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Modèle 2 ( pour  $U_f$

Règle 1 : Si le courant de charge  $I_D$  est *Faible* Alors

$$\begin{aligned}
 U_f(k+1) = & 0.0844U_f(k) + 0.1577U_f(k-1) - 0.0590U_f(k-2) \\
 & - 0.5880q_F(k) + 0.8959q_F(k-1) - 0.8359q_F(k-2) \\
 & - 0.7886q_O(k) - 0.7159q_O(k-1) - 0.6671q_O(k-2) \\
 & + 0.0172I_D(k) + 0.0074I_D(k-1) - 0.0218I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

Règle 2 : Si le courant de charge  $I_D$  est *Moyen* Alors

$$\begin{aligned}
 U_f(k+1) = & 0.8624U_f(k) + 0.4573U_f(k-1) + 0.4757U_f(k-2) \\
 & - 0.8732q_F(k) + 0.7209q_F(k-1) + 0.8688q_F(k-2) \\
 & + 0.9688q_O(k) + 0.7179q_O(k-1) + 0.5711q_O(k-2) \\
 & + 0.0268I_D(k) - 0.6448I_D(k-1) - 0.2028I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

Règle 3 : Si le courant de charge  $I_D$  est *Elevé* Alors

$$\begin{aligned}
 U_f(k+1) = & -0.7321U_f(k) - 0.9382U_f(k-1) + 0.8783U_f(k-2) \\
 & - 0.3974q_F(k) - 0.4089q_F(k-1) - 0.3341q_F(k-2) \\
 & - 0.0659q_O(k) + 0.2964q_O(k-1) - 0.9495q_O(k-2) \\
 & + 0.6844I_D(k) + 0.1181I_D(k-1) + 0.7082I_D(k-2)
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

Tableau des Paramètres dans le modèle dynamique SOFC

Paramètre	T	R	N <sub>cell</sub>	F	P <sub>a</sub>	P <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>c</sub>	E <sup>0</sup>
Valeur	1173	8.3143	96	96487	3	3	61.7138x10 <sup>-6</sup>	99.2x10 <sup>-6</sup>	1.18
Unité	K	J/(mol.K)	-	C/mol	atm	atm	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	V

**Tableau 3-1** : Paramètres dans le modèle dynamique SOFC

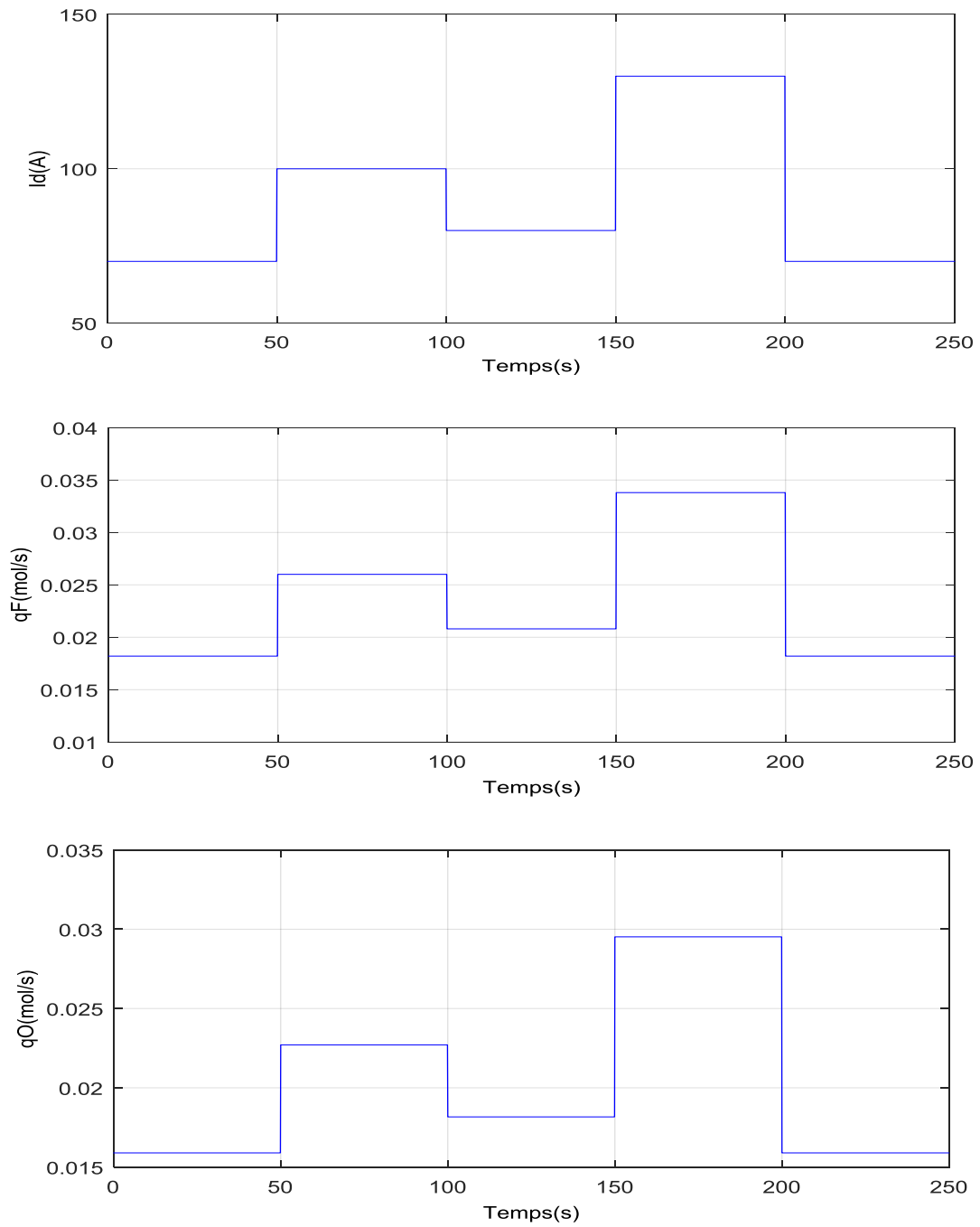
**Critère d'évaluation :**

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée ici pour évaluer résultat de la modélisation, qui est calculé par :

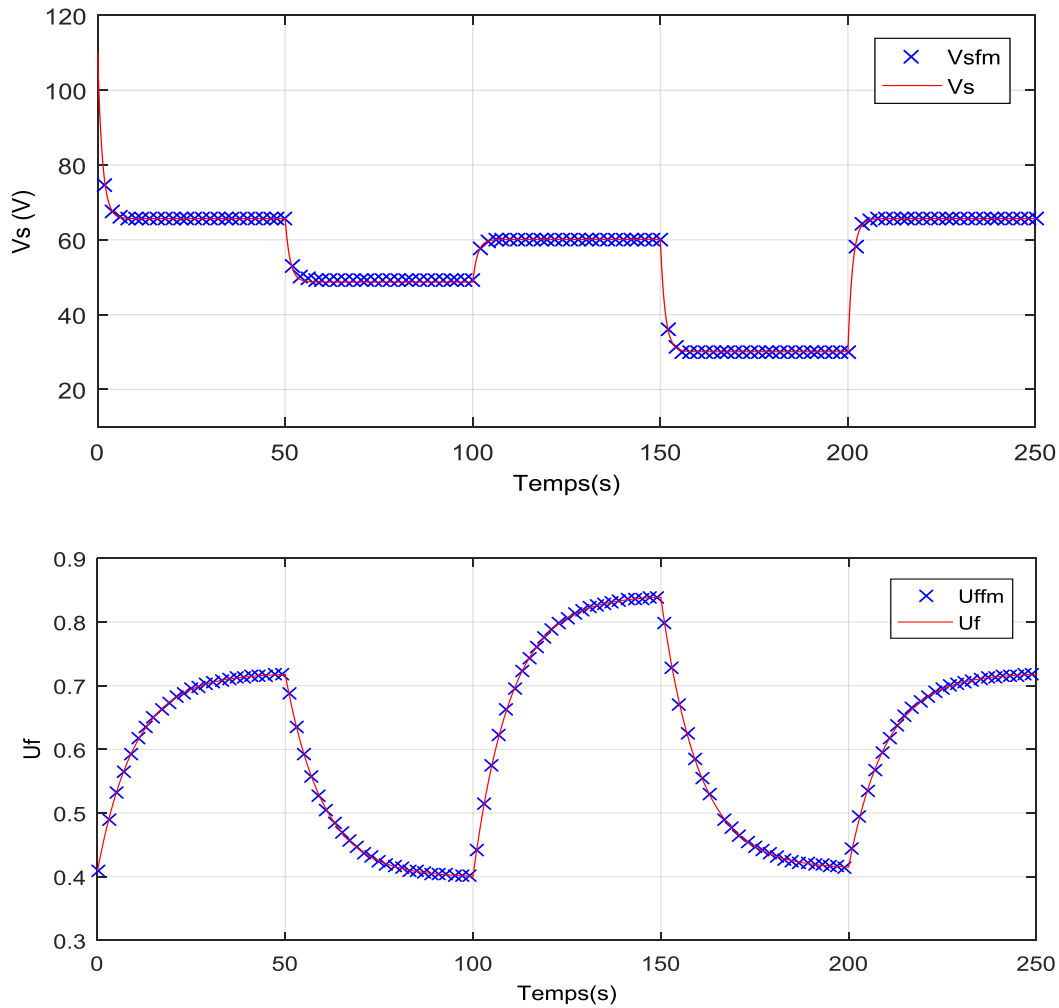
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2} \tag{3.54}$$

- N est le nombre d'échantillons de données pris en compte pour la modélisation
- $y(k)$  est la sortie réelle
- $\hat{y}(k)$  est la sortie du système flou

### 3.6.1 Résultats de simulation



**Fig 3-8** : Signal d'entrée vers le système SOFC



**Fig 3-9 : Sorties dynamiques de SOFC**

Le RMSE de la tension de sortie et du taux d'utilisation de combustible est respectivement de 0,1436 et 0,1332. Donc on peut conclure que, à l'aide des modèles flous TS proposés, le comportement dynamique du modèle physique SOFC peut être approché avec une bonne précision.

### 3.7 Conclusion

Le modèle dynamique SOFC est hautement non linéaire, difficile à analyser et à concevoir les stratégies de contrôle. Pour résoudre ce problème, nous utilisons une modélisation en utilisant un modèle flou TS. Ce type de modèles flous est très approprié pour représenter des modèles non linéaires. Dans ce chapitre, un modèle dynamique flou TS à temps discret MISO est obtenu pour décrire les propriétés dynamiques de tension et du taux d'utilisation non linéaire

du système SOFC tubulaire. Les résultats de la simulation montrent que l'erreur de modélisation est négligeable

## Conclusion générale

Le travail qui nous avons présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la modélisation floue de la pile à combustible de type SOFC.

Cette pile a un modèle dynamique hautement non-linéaire, donc notre objectif est de proposer un modèle flou, on utilise le modèle Takagi-Sugeno pour simplifier la commande de cette pile

Dans un premier temps, un premier chapitre a traité les points suivant :

- description générale d'une pile à combustible, sa principe de fonctionnement, et ces différents types, nous pouvons dire que la pile à combustible est perçue comme l'un des systèmes de production d'énergie les plus propres. Elle est utilisée dans différentes applications stationnaire, transport et portable. Ce système est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur et de l'eau.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté :

- une étude précisée pour la pile SOFC
- un développement dynamique d'un stack et ces équations mathématiques
- validation du modèle dynamique, supposons que nous connaissions le comportement du courant de la charge  $I_D$

Et finalement :

- nous avons présenté la technique de modélisation de la pile à combustible de type SOFC, utilisant le modèle Takagi-Sugeno NARX, cependant cette modélisation, peut commander la pile facilement.

Ce travaille montre que notre modèle développé pourraient atteindre des performances très intéressante. Ce modèle peut également être utilisé après vérification de sa validité avec une probabilité d'erreur presque égale à zéro. À l'avenir, sur la base de ce modèle flou TS, certaines études de schémas de commande telles que la commande prédictive pourront être développées.

# Références

- [1] T. Takagi, and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control ", IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, vol. 115, 1985 , pp. 116-132
- [2] G. Feng, "A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 14, no. 5, 2006, pp. 676-697.
- [3] J. Yen, L. Wang, and C.W. Gillespie, "Improving the Interpretability of TSK Fuzzy Models by Combining Global IEEE Transactions on Fuzzy System vol. 6, no. 4, 1998, pp. 530–537
- [4] T. A. Johansen and R. Babuska, "Multiobjective identification of Takagi– Sugeno fuzzy models", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 11, no. 6, 2003, pp. 847-860.
- [5] T. Zhang, and G. Feng "Rapid Load Following of an SOFC Power System via Stable Fuzzy Predictive Tracking Controller", IEEE Transactions on Fuzzy Systèmes, vol. 17, 2009, pp. 357-371
- [6] J. Yang, X. Li, H. G. Mou, and L. Jian, " Predictive Control of Solid Oxide Fuel Cell Based on An Improved Takagi–Sugeno Fuzzy Model", Journal of Power Source, vol. 193, 2009, pp.699-705 ..
- [7] Medour nejma, «Simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide».juin 2010.
- [8] W. Friede, « Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible de type PEM» Thèse INPL, Nancy, 28 août 2003.
- [9] H . Oman, « Fuel cells for personal electricity ». Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, n° 9, septembre 2000, pp.43-45.
- [10] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, « piles à combustible ». Technique de l'Ingénieur, D 3 340-1/28 .
- [11] A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n° 2, février 2002, pp. 8-9
- [12] E. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci, N. Barry, « A fuel cell based domestic uninterruptible power supply ». Applied Power Electronics Conference, APEC'02, 2002, vol. 1, pp. 605-613
- [13] Fuel Cell Handbook EG&G Technical Services, Inc., 6ème édition, novembre 2002.
- [14] A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n° 2, février 2002, pp. 8-9.

- [15] 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
- [16] K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring, « the power system for fuel cell ». Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, 2001, vol. 4, pp. 2197- 2202
- [17] Medour nejma, «Simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide». Juin 2010.
- [18] L. Protin, S. Astier, « **Convertisseurs photovoltaïques** », Techniques de l'ingénieur, D3360.
- [19] «**Fuel Cell Handbook**», (Seventh Edition), U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, November 2004.
- [20] T. Alleau, «**La pile SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)** », Fiche 5.2.6 – reçue : nov. 2003, Révision de: janvier 2004, Source : AFH2.
- [21] 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  
Soutenu le 6 octobre 2010.
- [22] Moussa CHNANI, « **Modélisation Macroscopique de piles PEFC et SOFC pour l'étude de leur couplage** », Docteur de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté, octobre 2008 .
- [23] Medour nejma, «Simulation numérique du transfert thermique incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible à oxyde solide».juin 2010.
- [24] M.Hashem Nehrir, Caisheng Wang «Modeling and control of fuel cell» ,page 50 .
- [25] S. Singhal, and K. Kendall, Solid Oxide Fuel Cells: Science and Technology, Elsevier, Amsterdam, 2003.
- [26] Wang, F.Z. Peng, J. Anderson, A. Joseph, and R. Buffenbarger, Low cost fuel cell converter system for residential power generation, IEEE Transactions on power electronic (5),1315-1322,2002
- [27] J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, 2nd edn, Wiley, Hoboken, NJ, 2003
- [28] TN. Sammes, Fuel Cell Technology: Reaching Toward Commercialization, Springer, New York, 2006.

- [29] X. J. Wu, X. j. Zhu, G. y. Cao, and H. y. Tu, “Dynamic Modeling of SOFC Based on a T-S Fuzzy Model”, *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol. 16, 2008, pp.
- [30] F.Z. Peng, H. Li, G.-J. Su, and IS. Lawler, A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application, *IEEE Transactions on Power Electronics*, , 2004.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] M.e. Johnson, Hot anode recirculation blower for SOFC systems, Office of Fossil Energy Annual Fuel Cell Report, 211-212, 2007
- [34] L. A. Zadeh. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8:338-353, 1965
- [35] RR Yager and D.P. Filev. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. John Wiley, New York, 1994.
- [36] BABUŠKA, R., *Fuzzy Modeling for Control*. Kluwer Academic Publishers, Mass., USA, 1998.
- [37] ZADEH , L ., Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol.1, pp.28-44, 1973.
- [38] MAMDANI, E., Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems, *Fuzzy Sets and Systems*, vol.26, pp.1182-1191, 1977.
- [39] PEDRYCZ, W., An identification algorithm in fuzzy relational systems , *Fuzzy Sets and Systems*, vol.13, pp.153-167, 1984.
- [40] YI, S., CHUNG, M., Identification of fuzzy relational model and its application to control, *Fuzzy Sets and Systems*, vol.59, pp.25-33, 1993.
- [41] TAKAGI, T., SUGENO, M., Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol.15, n1, pp.116-132, 1985.
- [42] ZENG, X., SINGH, M., Approximation theory of fuzzy systems – MIMO case, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol.3, n2, pp.219-235, 1995.

- [43] BABUŠKA, R., *Fuzzy Modeling for Control*. Kluwer Academic Publishers, Mass., USA, 1998 .
- [44] GALICHET, S., *Contrôle flou : de l'interpolation numérique au codage de l'expertise*. Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire LAMII. Université de Savoie, Annecy, France, 2001 .
- [45] A. Grauel and H. Mackenberg. Mathematical analysis of the Sugeno controller leading to general design rules. *Fuzzy Sets and Systems*, 85:165-175, 199.
- [46] RR Yager and D.P. Filev. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. John Wiley, New York, 1994.
- [47] «Fuzzy Model Identification for Control», Abonyi, Janos, 1974 , University of Veszpném , Department of Process Engineering, Hungary.
- [48] L. Ljung. *System Identification, Theory for the User*. Prentice-Hall, New Jersey, 1987
- [49] RR Yager and D.P. Filev. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. John Wiley, New York, 1994
- [50] KS. Narendra and K Parthasarathy. Identification and control of dynamical systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1:4-27, 1990.
- [51] S. Mollov, R. Babuška, J. Abonyi, and H. B. Verbruggen, “Effective Optimization for Fuzzy Model Predictive Control”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. vol. 12, 2004, pp. 661675.
- [52] T. Takagi, and M. Sugeno, “Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control ”, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* vol. 115, 1985, pp. 116-132...
- [53] T. Anderson and P. Pucar. Estimation of residence time in continu-ous flow systems with dynamics. *Journal of Process Control*, 5:9-17, 1995.

**Résumé** ☺ La pile à combustible à oxyde solide (SOFC) est largement acceptée pour une utilisation de production d'énergie propre. Le modèle SOFC appartient aux systèmes hautement non linéaires où une parfaite connaissance de leurs paramètres est inaccessible par les techniques de modélisation classiques.

Dans ce travail, le problème du non linéarité du modèle dynamique de la SOFC est étudié, le modèle dynamique flou Takagi-Sugeno (TS) est utilisé pour décrire les propriétés dynamiques de tension de sortie et du taux d'utilisation du combustible du système SOFC de géométrie tubulaire. Les résultats de simulation montrent qu'il est possible d'établir le modèle dynamique de SOFC en utilisant la méthode d'identification floue TS. La précision et la validité ont également été testées.

**Mots clés** ☺ : La pile à combustible à oxyde solide (SOFC), Modèle flou Takagi-Sugeno (TS), Modélisation des systèmes non linéaires.

**Abstract** ☺ The solid oxide fuel cell (SOFC) is widely accepted for clean and distributed power generation use. The model of SOFC is belongs to highly nonlinear systems where perfect knowledge of their parameters is unattainable by conventional modeling techniques.

In this work the problem of the non linearity of the dynamic model of the SOFC is studied by using a multiple input single output (MISO) discrete time Takagi-Sugeno (TS) fuzzy dynamic model to describe the nonlinear voltage and fuel utilization rate dynamic properties of the tubular SOFC system. Simulation results show that it is possible to establish the dynamic model of SOFC by using the TS fuzzy identification method. The accuracy and validity were also tested.

**Keywords** ☺ : Solid oxide fuel cell (SOFC), Takagi-Sugeno (TS) fuzzy model, modeling of nonlinear system.

**ملخص** ☺ خلية وقود التي تستخدم أكسيد صلب كوقود (SOFC) تستعمل على نطاق واسع لتوليد الطاقة النظيفة. ينتمي نموذج (SOFC) إلى الأنظمة الخطية للغاية حيث يتعذر الوصول إلى المعرفة الكاملة بسلوكها عن طريق تقنيات النمذجة التقليدية.

في هذا العمل، تتم دراسة مشكلة الخطية في النموذج الديناميكي لـ SOFC باستخدام وقت منفصل مع مدخلات متعددة ومخرج فردي (MISO)، وباستخدام النموذج الديناميكي الضبابي من نوع ((Takagi-Sugeno (TS) لوصف الخصائص الديناميكية لـ معدل استخدام الجهد و معدل استهلاك الوقود الغير ل (SOFC) من نوع أنبوبي. تظهر نتائج المحاكاة أنه من الممكن إنشاء النموذج الديناميكي لـ (SOFC) باستخدام نماذج غامضة من نوع TS. كما تم اختبار الدقة والصلاحية.

**كلمات مفتاحية** ☺ خلية وقود بأكسيد صلب (SOFC). نموذج غامض من نوع ((Takagi-Sugeno (TS), نمذجة الأنظمة الخطية.