

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

## **THEME**

---

**MODELISATION DES PILES A COMBUSTIBLE**

**APPLICATION A L'ENTRAINEMENT DU MOTEUR**

**ASYNCHRONE**

---

Proposé et dirigé par :

Monsieur: Said BARKATI

Présenté par :

Fahed MEKHALFIA

Laid LAMRI

Année Universitaire : 2007/2008

*« Avant tout on remercie le dieu tout puissant »*

*Nous adressons nos sincères remerciements au Monsieur Aïssa DAHMAYNI -ingénieur au niveau de la centrale de production d'électricité de M'sila (DRAA EL-HADJA) qui nous a aidé à accomplir ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre encadreur Mr. Saïd BARKATI pour avoir d'abord proposé ce sujet, pour les conseils qu'il a également pu nous fournir durant ce travail.*

*Nous remercions tous nos enseignants durant toutes nos années d'étude.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude aux membres jury.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui ont nous aidé à élaborer ce mémoire.*

*Enfin, nous tenons à remercier également tous nos collègues de la promotion 2007\_2008 pour leurs aides inestimables.*

*Mékhalfia Fahed & Lamri Laid*

---

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
------------------------------------	---

## **CHAPITRE I**

### **LES PILES A COMBUSTIBLE**

<b>I.1</b> Introduction .....	3
<b>I.2</b> Historique des piles à combustible .....	3
<b>I.3</b> Généralités sur les piles à combustible.....	4
<b>I.3.1</b> Définition.....	4
<b>I.3.2</b> Structure générale.....	4
<b>I.3.3</b> Principe de fonctionnement.....	5
<b>I.3.4</b> Types des piles à combustible.....	6
<b>I.3.4.1</b> Piles à acide phosphorique (PAFC).....	8
<b>I.3.4.2</b> Piles alcalines (AFC).....	8
<b>I.3.4.3</b> Piles à oxyde solide (SOFC).....	9
<b>I.3.4.4</b> Piles à carbonate fondu (MCFC).....	9
<b>I.3.4.5</b> Piles à méthanol direct (DMFC).....	9
<b>I.3.4.6</b> Pile à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC)...	10
<b>I.3.5</b> Applications des piles à combustible.....	10
<b>I.3.5.1</b> Application stationnaires.....	10
<b>I.3.5.2</b> Application transport.....	10
<b>I.3.5.3</b> Application portables.....	11
<b>I.4</b> Développement des PEMFC et SOFC .....	11
<b>I.4.1</b> Les piles à combustible de type PEM.....	11
<b>I.4.1.1</b> Raisons de choix.....	11
<b>I.4.1.2</b> Structure d'une PEMFC.....	12
<b>I.4.1.2.1</b> Membrane polymère échangeuse de protons.....	12
<b>I.4.1.2.2</b> Les électrodes.....	13

<b>I.4.1.2.3</b>	Les plaques bipolaires.....	14
<b>I.4.1.3</b>	Principe de fonctionnement des PEMFC.....	14
<b>I.4.2</b>	Les piles à oxyde solide (SOFC).....	15
<b>I.4.2.1</b>	Raisons du choix.....	15
<b>I.4.2.2</b>	Structure d'une SOFC.....	16
<b>I.4.2.2.1</b>	L'électrolyte.....	16
<b>I.4.2.2.2</b>	Les électrodes .....	16
<b>I.4.2.3</b>	Formes d'une SOFC .....	16
<b>I.4.2.4</b>	Principe de fonctionnement .....	17
<b>I.5</b>	Obtention de l'hydrogène.....	18
<b>I.5.1</b>	Reformage des carburants fossiles.....	18
<b>I.5.1.1</b>	Le vapo-reformage.....	18
<b>I.5.1.2</b>	L'oxydation partielle.....	19
<b>I.5.1.3</b>	Le reformage auto-thermique.....	19
<b>I.5.2</b>	L'électrolyse de l'eau.....	19
<b>I.5.3</b>	Nucléaire.....	19
<b>I.6</b>	Stockage de l'hydrogène.....	20
<b>I.6.1</b>	Stockage sous forme comprimé.....	20
<b>I.6.2</b>	Stockage sous forme liquéfié.....	20
<b>I.6.3</b>	NaBH <sub>4</sub> .....	21
<b>I.6.4</b>	Hydrures métalliques.....	21
<b>I.7</b>	Conclusion.....	22

## **CHAPITRE II**

### **MODELISATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE TYPE PEM**

<b>II.1</b>	Introduction .....	23
<b>II.2</b>	Type de la modélisation de la pile à combustible PEM.....	23
	Modélisation par impédance.....	23

---

Modélisation à l'échelle microscopique.....	24
Modélisation à l'échelle macroscopique.....	25
<b>II.3</b> Modèle empirique.....	25
<b>II.3.1</b> Performance idéales d'une cellule PEM.....	25
Equation de Nernst.....	27
Tension idéale standard en fonction de la température.....	29
Influence de la température.....	32
Influence de la pression.....	32
Influence de la composition des gaz.....	33
<b>II.3.2</b> Performance réels d'une cellule PEM.....	33
<b>II.3.2.1</b> Les pertes d'activation.....	33
<b>II.3.2.2</b> Les pertes de concentration (diffusion).....	34
<b>II.3.2.3</b> Les pertes ohmiques.....	35
<b>II.3.3</b> Rendement de la cellule.....	36
<b>II.4</b> Modèle semi-empirique.....	38
<b>II.4.1</b> Performance idéals d'une cellule PEM.....	38
<b>II.4.2</b> Performance réels d'une cellule PEM.....	39
<b>II.4.2.1</b> Pertes d'activation.....	39
<b>II.4.2.2</b> Pertes ohmiques.....	39
<b>II.5</b> Modèle adopté.....	40
<b>II.6</b> Hypothèses et paramètres de simulation.....	40
<b>II.7</b> Calcul des pressions partielles et simulation.....	41
<b>II.8</b> Choix du point de fonctionnement.....	43
<b>II.9</b> Dimensionnement de la pile à utiliser.....	43
<b>II.9.1</b> Nombre de cellules.....	43
<b>II.9.2</b> Surface active de la cellule.....	44
<b>II.10</b> La puissance maximale nette délivrée par la pile.....	44
<b>II.11</b> Rendement de la pile.....	45

<b>II.12</b> Conclusion.....	45
------------------------------	----

### **CHAPITRE III**

#### **MODELISATION D'UNE PILE SOFC**

<b>III.1</b> Introduction.....	47
<b>III.2</b> Modélisation d'un 'stack' SOFC.....	47
<b>III.2.1</b> Performance idéals.....	47
<b>III.2.2</b> Performances réelles.....	53
<b>III.2.3</b> Expression de la tension en charge de la pile.....	53
<b>III.3</b> Système de commande d'une pile à combustible type SOFC.....	53
<b>III.3.1</b> Rapport entre les débits des réactants.....	54
<b>III.3.2</b> Taux d'utilisation du combustible.....	54
<b>III.3.3</b> Limitation du courant.....	55
<b>III.3.4</b> Consigne du courant.....	55
<b>III.4</b> Paramètres de simulation.....	56
<b>III.5</b> Simulation et interprétation des résultats.....	57
<b>III.6</b> Conclusion.....	60

### **CHAPITRE IV**

#### **APPLICATION DU 'PEM' DANS UNE CHAINE D'ENTRAINEMENT POUR MOTEUR ASYNCHRONE**

<b>IV.1</b> Introduction.....	61
<b>IV.2</b> Architecture d'un système électromécanique à pile combustible.....	61
<b>IV.3</b> Etude d'un hacheur élévateur de tension.....	62
<b>IV.3.1</b> Structure idéale.....	62
<b>IV.3.2</b> Modélisation du hacheur.....	62
<b>IV.3.2.1</b> Modélisation en valeurs instantanées.....	63
<b>IV.3.2.2</b> Modélisation moyenne.....	64
<b>IV.3.3</b> Dimensionnement du hacheur.....	64

<b>IV.3.3.1</b> Calcul de l'inductance.....	64
<b>IV.3.3.2</b> Calcul de la capacité.....	66
<b>IV.3.4</b> Commande du hacheur.....	67
<b>IV.3.4.1</b> Boucle de la tension.....	67
<b>IV.3.4.2</b> Boucle de courant.....	68
<b>IV.4</b> Etude d'un onduleur de tension.....	68
<b>IV.4.1</b> Modélisation de l'onduleur.....	68
<b>IV.4.2</b> Commande de l'onduleur.....	69
<b>IV.4.3</b> Stratégie de commande MLI.....	69
<b>IV.4.4</b> Algorithme de commande.....	70
<b>IV.5</b> Modélisation de la machine asynchrone.....	70
<b>IV.5.1</b> Hypothèse simplificatrices.....	70
<b>IV.5.2</b> Modèle triphasé de la machine.....	71
<b>IV.5.3</b> Mise en équations du modèle.....	72
<b>IV.5.3.1</b> Equation électriques.....	72
<b>IV.5.3.2</b> Equation magnétiques.....	73
<b>IV.5.3.3</b> Equation mécaniques.....	74
<b>IV.5.4</b> Transformation de Park.....	74
<b>IV.5.5</b> Référentiel lié au champ tournant.....	75
<b>IV.6</b> Résultats de simulation.....	77
Performance de la pile.....	78
Performances du hacheur.....	79
Performances de l'onduleur.....	81
Performances de la machine.....	82
<b>IV.7</b> Conclusion.....	84
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	85

## *Introduction générale*

L'épuisement prévu à moyen terme des ressources fossiles et fissiles, et l'effet indésirable de ces derniers sur l'environnement, sont deux problèmes qui menacent l'avenir de l'industrie et de la planète. En effet, les sources d'énergie utilisées actuellement sont à réserve finies, aussi bien pour les combustibles fossiles (hydrocarbure, charbon, ...) que pour les combustibles fissiles (uranium). Les problèmes environnementaux recouvrent l'émission de gaz à effet de serre dans le cas des hydrocarbures, et la production de déchets difficiles à traiter dans le cas nucléaire [Font-05].

Ces raisons ont fortement relancées, depuis quelques années l'intérêt pour les piles à combustible qui est une technologie à faibles émission de gaz nocifs et à faible nuisance sonores [Sad-06]. Cette technologie n'est pas récente, car la première pile à combustible a vu le jour en 1839, inventée par Sir William Robert Grove [Thou-05]. En premier temps, les piles à combustible sont réservées exclusivement aux applications spatiales, mais à nos jours leurs domaines d'utilisation commencent à s'étendre grâce aux récents progrès liés à leurs techniques de fabrication [Lachichi-05].

Par définition, une pile à combustible, est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique [Sad-06]. Le combustible à utiliser doit posséder les mêmes propriétés que les hydrocarbures en termes de stockage et de transport, et qu'il soit non polluant, et ainsi que sa production doit être indépendante de la géographie. L'un des vecteurs énergétiques qui regroupe tous ces propriétés c'est l'hydrogène, qui est l'élément le plus abondant de notre univers, mais il n'existe pas à l'état naturel [Lachaize-04]. La production de l'hydrogène peut être réalisée dans n'importe quel pays en utilisant une variété des méthodes, son transport est effectué à l'aide des citernes ou des pipes line.

Lorsqu'on fait bruler l'hydrogène, l'oxygène se réagit avec lui pour produire une nouvelle substance et l'énergie dégagée est sous forme chaleur. Par contre, la pile à combustible met en jeu la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène sans bruler l'hydrogène pour donner de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Ce procédé est l'électrolyse inverse de l'eau.

Une pile à combustible est constituée de deux électrodes et d'un électrolyte, cette structure est semblable du celle d'une batterie. Cette dernière est un dispositif de stockage d'énergie, où l'énergie maximale utilisable est déterminée par la quantité de réactant chimique stocké dans

la batterie elle-même. La batterie cesse donc de produire l'électricité lorsque tout le réactant chimique est consommé. Par contre, dans une pile à combustible les électrodes ne sont pas consommées par le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Ainsi, tant que l'hydrogène et l'oxygène sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler.

Dans ce mémoire, nous allons présenter la modélisation des piles à combustible, et aussi développer une application à base des PEMFC dans un système d'entraînement d'un moteur asynchrone.

Dans le premier chapitre, après avoir brièvement rappelé l'histoire de la pile à combustible, on donnera une description générale de sa structure, de son principe de fonctionnement et de ses différents types existants et les principaux caractères qui les différencient et ainsi leur domaines d'application. Ensuite, parmi les types présentés on s'intéressera par deux filières qui sont les piles à membrane conductrice protonique et les piles à oxyde solide. Des procédés de production et de stockage de l'hydrogène sont mis afin de s'entourer par le maximum des exigences des piles à combustible.

Dans le second chapitre, on va mentionner les différents modèles de la pile à combustible qu'on peut les rencontrer dans la littérature. Ensuite une modélisation de la pile à combustible à membrane conductrice protonique sera faite afin de tracer la caractéristique densité de courant-tension d'une cellule élémentaire sur laquelle on se basera pour dimensionner la pile.

Dans le troisième chapitre, on va procéder à la modélisation de la pile à combustible à oxyde solide afin de visualiser son comportement lors de la variation de la puissance demandée. Ce modèle tient en compte les temps de réponse chimique et électrique dans la pile.

Dans le dernier chapitre, on va raccorder une pile à combustible à membrane conductrice protonique avec l'ensemble convertisseur continu-continu et onduleur. Ce montage sera utilisé pour entraîner un moteur asynchrone triphasé. Le convertisseur DC/DC à utiliser est un hacheur élévateur de tension où son dimensionnement sera calculé. Et afin d'assurer la stabilité du système, une régulation cascade tension-courant sera mise en œuvre.

# *Les piles à combustible*

## *1.1 Introduction*

Dans ce chapitre introductif, on va essayer d'écrire un bref historique sur l'évolution des piles à combustible. On présente ensuite leur structure générale, leur principe de fonctionnement, leurs types et leurs différents domaines d'application.

Suivant le besoin comme puissance et le domaine d'application, deux types de ces piles seront présentées dans ce travail qui sont les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC)<sup>1</sup> et les piles à oxyde solide (SOFC)<sup>2</sup> pour des raisons qu'on va les voir ultérieurement.

En suite, on s'intéresse à d'autres points essentiels concernant quelques procédés de production et de stockage de l'hydrogène.

## *1.2 Historique des piles à combustible*

C'est un peu avant 1840 que William Robert Grove décrit la première pile à combustible, elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte [Lachaize-04]. Depuis, il est connu comme le père de la pile à combustible. Son principe est l'inverse de l'électrolyse de l'eau: l'hydrogène se combine avec de l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur.

La pile à combustible a connu une renaissance au début des années 60 lorsque un nouvel organisme gouvernemental des USA « National Aeronautique and Space Administration » (NASA) rechercha comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La (NASA) avait déjà éliminé les batteries car trop lourdes, l'énergie solaire car source trop chère et l'énergie nucléaire car trop risquée.

---

<sup>1</sup> Proton Exchange Membrane Fuel Cell (en anglais)

<sup>2</sup> Solide Oxyde Fuel Cell (en anglais)

La pile à combustible est apparue comme une solution possible, pour cela, elle a été utilisée comme source d'énergie pour les véhicules habités Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de Général Electric) et Apollo en 1968 (piles AFC<sup>3</sup> de Pratt and Whitney).

L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Depuis, la recherche sur les piles à combustible a continué et des piles à combustible ont été utilisées avec succès dans une grande variété d'application.

Les piles à combustible connaissent actuellement un regain d'intérêt tant sur le plan industriel qu'en recherche. Des industriels de différents secteurs (électronique, automobile, chauffage...) investissent dans le développement de cette technologie à faibles émissions de gaz nocifs et à faibles nuisances sonores.

### ***1.3 Généralités sur la pile à combustible***

#### ***1.3.1 Définition***

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique.

#### ***1.3.2 Structure générale***

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

Chaque cellule est constituée de :

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

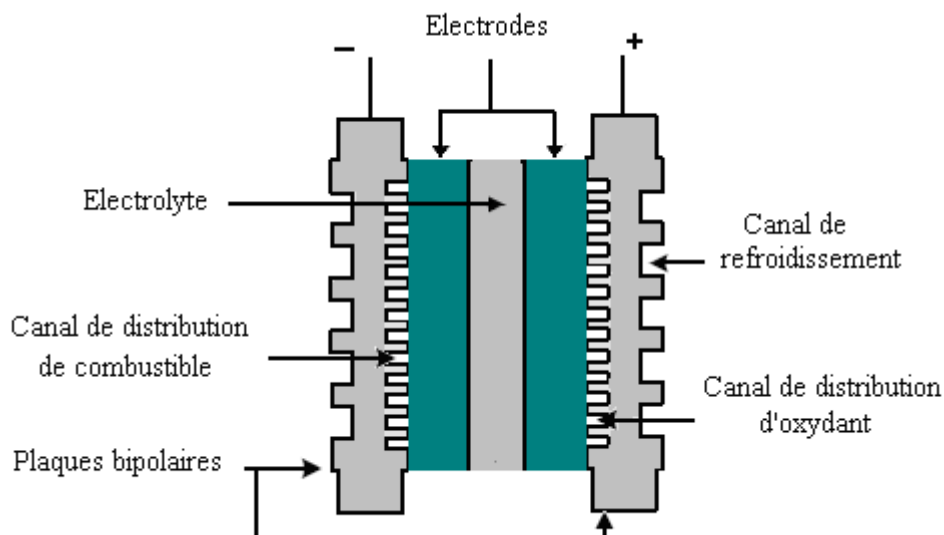
Alimentée par :

- Combustible : on utilise le méthanol ou H<sub>2</sub> (pur ou reformé) ;
- Oxydant : soit l'oxygène pur ou l'air.

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

---

<sup>3</sup> Alkaline Fuel Cell (en anglais)



**Figure I.1 :** Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible [Sad-06].

### *I.3.3 Principe de fonctionnement*

Les piles à combustible peuvent fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Le méthanol peut aussi être utilisé directement dans certaines piles à combustible. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

Dans une pile hydrogène-oxygène, le principe de base de fonctionnement repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau, l'hydrogène se combine avec l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'une réaction chimique de type redox<sup>(4)</sup>, mais malheureusement le mélange direct de l'hydrogène avec l'oxygène ne génère que la vapeur de l'eau, **pour cela on adopte sur la séparation de la demi réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène.**

L'hydrogène entre dans chaque cellule de la pile du côté de l'anode et l'oxygène du côté de la cathode. Et comme le montre la (figure I-1), la structure de la cellule assure une arrivée des combustibles et du comburant de manière homogène sur toute la surface des électrodes à raison de la présence des canaux de distribution.

<sup>(4)</sup> Réduction oxydation.

La structure poreuse des électrodes, permet la pénétration des gaz jusqu'aux surfaces de contact des électrodes avec l'électrolyte utilisé où se trouve le catalyseur <sup>(5)</sup>. Ce dernier est utilisé à raison pour augmenter la vitesse de chaque demi réaction.

L'électrolyte, exactement dans cette étape, joue un rôle essentiel, puisque selon leur type (acide ou basique), la réaction chimique conduisant à la production d'électricité et de chaleur différent.

Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) résultants à la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène qui se déplacent de l'anode vers la cathode à travers cet électrolyte.

Par contre, dans un électrolyte basique, ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode vers l'anode à travers cet électrolyte.

Ce qui nous intéresse, sont les électrons libres qui apparaissent au niveau de l'anode comme résultat d'oxydation. Ces électrons doivent être transportés de l'anode vers la cathode pour participer dans la réduction de l'oxygène. Mais l'électrolyte n'est pas un chemin, car plus qu'il est imperméable au gaz, il ne laisse passer que les ions.

Pour cela, les électrons sont conduits de l'anode à la cathode par un circuit extérieur à travers une charge électrique.

### ***1.3.4 Types des piles à combustible***

En règle générale, les piles à combustible sont classées selon le type d'électrolyte utilisé (liquide ou solide) et leur température de fonctionnement (basse ou haute).

Nous pouvons distinguer six types de piles soient :

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

---

<sup>(5)</sup> Matériau capable d'accélérer une réaction chimique sans subir lui même de modifications, sinon temporaires.

Le tableau suivant donne les caractéristiques principales des différents types des piles citées précédemment.

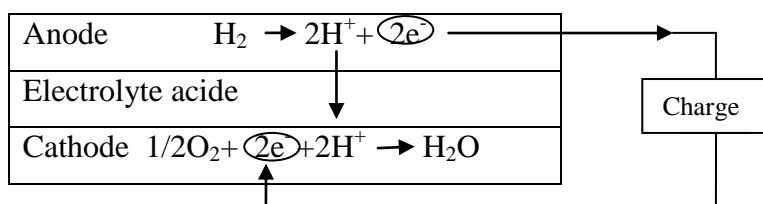
		PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
		Basse Température				Haute Température	
Température		70 à 100°	70 à 90°	150 à 220°	50 à 250°	700 à 1050°	600 à 800°
Electrolyte		Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide Phosphorique (PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub> ) liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Mélange de Li <sub>3</sub> CO <sub>3</sub> et K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Combustibles possibles		H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)
Oxydant		Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> (pur)	Air/O <sub>2</sub>	Air/O <sub>2</sub>
Réaction à l'anode		H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> OH + H <sub>2</sub> O → 6H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup> + CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> + 2(OH <sup>-</sup> ) → 2H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> + O <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup>
Réaction à la cathode		½O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O	¾O <sub>2</sub> + 6e <sup>-</sup> + 6H <sup>+</sup> → 2H <sub>2</sub> O	½O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O	½O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → 2(OH <sup>-</sup> )	½O <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → O <sup>2-</sup>	½O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
Ion mobile		H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	O <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
Catalyseur	anode	platine	Mélange de ruthénium et platine	platine	Nickel ou Platine-palladium	nickel-zircone (Cermet)	Nickel et l'oxyde de nickel
	cathode	platine	platine	platine	Charbon actif	(LaSr)MnO <sub>3</sub>	l'oxyde de nickel + ions Li

**Tableau I.1 :** Caractéristiques des différents types de piles à combustible [Lachaize-04].

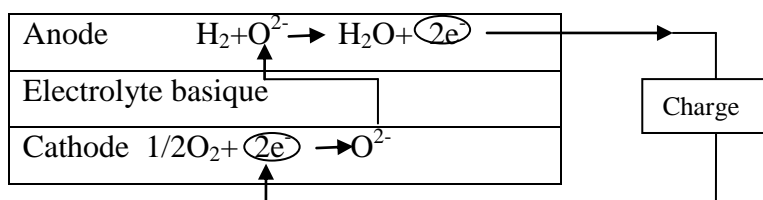
D'après ce tableau :

Les piles à électrolyte acide sont : PEMFC, DMFC et PAFC. La figure I.2 montre le principe de fonctionnement dans ce cas d'électrolyte.

Les piles à électrolyte basique sont : AFC, MCFC et SOFC. A titre d'exemple la figure I.3 montre le principe de fonctionnement d'une pile SOFC.



**Figure I.2 :** Principe des piles à combustible à électrolyte acide.



**Figure I.3 :** principe des piles à combustible à électrolyte basique.

#### ***1.3.4.1 Piles à acide phosphorique (PAFC)***

Elle utilise comme électrolyte l'acide phosphorique à l'état liquide, qui ne réagit pas avec le  $\text{CO}_2$ , c'est pour ça qu'on peut utiliser un gaz ( $\text{H}_2$ ) issus du reformage et donc contenant du  $\text{CO}_2$ .

L'acide phosphorique est maintenu grâce à une matrice poreuse à base de SiC. Il se solidifie à  $42^\circ\text{C}$ , alors il faut maintenir la pile au dessus de cette température à l'arrêt.

La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion des électrodes.

Les électrodes sont en carbone, le catalyseur est à base de platine, la température de fonctionnement est comprise entre  $150$  et  $220^\circ\text{C}$ , d'où une meilleure tolérance vis à vis du monoxyde de carbone par rapport aux filières PEMFC et AFC, pour cette raison, la présence du CO dans le gaz issu du reformage n'influe pas beaucoup sur le catalyseur.

#### ***1.3.4.2 Piles alcalines (AFC)***

L'électrolyte utilisé est le (KOH) sous forme liquide, qui a, comparativement aux piles à électrolyte acide, l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Ces piles nous imposent à utiliser comme combustible le  $\text{H}_2$  pur, et comme oxydant le  $\text{O}_2$  pur, car le  $\text{CO}_2$  contenu dans l'aire ou issu du reformage, réagit avec le  $\text{OH}^-$  pour former le carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Ce dernier réduit la conductivité de l'électrolyte.

Ces piles ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible. [Lachichi-05]. Et aussi on a le choix d'utiliser une variété de catalyseurs, soit une combinaison de nickel et d'un métal inactif comme l'aluminium, soit au platine-palladium, soit à base de charbon actif permettant ainsi de réduire le coût.

#### ***1.3.4.3 Piles à oxyde solide (SOFC)***

Ce type des piles à combustible génère la plus haute température comparativement aux autres types, elle peut atteindre 1050°C. Cette température élevée ; augmente la conductivité ionique de l'électrolyte qui est en céramique, le plus souvent, il s'agit de zircone stabilisée à l'yttrium, et aussi permet l'utilisation directe comme combustible des hydrocarbures. Ces derniers, seront facilement reformés pour produire essentiellement de l'hydrogène et le monoxyde de carbone.

Contrairement aux autres types qu'ont une forme plane, les piles de type SOFC peuvent être de plusieurs formes ; tubulaires, planes...

#### ***1.3.4.4 Piles à carbonate fondu (MCFC)***

D'après le tableau (I.1), il est nécessaire d'alimenter la cathode par le CO<sub>2</sub>, où on peut le récupérer au côté de l'anode. Sa température élevée, nous permet d'utiliser des catalyseurs non nobles, donc moins coûteux. Son comportement et application sont généralement semblables à celle du SOFC.

#### ***1.3.4.5 Piles à méthanol direct (DMFC)***

Les piles à méthanol direct ont la même construction que les piles de type PEM, mais l'utilisation du méthanol comme combustible crée la différence. Comme le montre le tableau I.1, le méthanol réagit directement à l'anode avec l'eau pour produire des protons, des électrons et le CO<sub>2</sub>. A cause des réactions parasites, et une réaction incomplète du méthanol, ils se produisent des composants comme le monoxyde de carbone qui contaminent le catalyseur en platine, pour cela on utilise du côté anode un catalyseur composé du ruthénium et platine pour empêcher cette contamination. L'état liquide du méthanol facilite son transport et son stockage, mais il est nocif pour l'être humain lors du contact direct avec la peau.

#### ***1.3.4.6 Pile à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC)***

La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisées dans la majorité des prototypes construits [Thou-05]. Sa température de fonctionnement est environ de 80°C, des travaux cherchent à faire fonctionner la pile plus loin de cette température, à raison d'augmenter la cinétique des réactions et surtout du côté cathode, et donc réduire la quantité du catalyseur qui est du matériau noble.

#### ***1.3.5 Applications des piles à combustible***

Les piles à combustible peuvent être utilisées dans quasiment toutes les situations où de l'énergie électrique est demandée [Friede-03]. On classe généralement les piles en trois catégories : les applications stationnaires, les applications transport et les applications portables [Gond-06].

##### ***1.3.5.1 Applications stationnaires***

Dans ce domaine, les piles à combustible sont utilisées pour produire l'énergie électrique et la distribuée à travers un réseau. On distingue deux secteurs d'applications : la production collective où la puissance varie de 200kW à quelque MW et la production domestique, où la puissance varie de 2 à 7kW. Un grand nombre d'installations de démonstration avec une puissance entre 1 kW pour des maisons individuelles et quelques centaines de kW pour des résidences a été installé dans différents pays [Friede-03]. Les piles les plus utilisés sont qui ont une température de fonctionnement élevée (SOFC, MCFC), où l'utilisation de la chaleur dégagée pour le chauffage et la production de la vapeur d'eau permet d'accéder le maximum rendement énergétique.

##### ***1.3.5.2 Applications transport***

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90 [Lachichi-05]. On distingue deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Ce domaine

conditionne que la pile à utiliser soit prête à l'utilisation dans un temps le plus court possible, a une durée de vie importante et a une densité de puissance volumique et massique acceptable. Sa convient avec les piles qui ont une température de fonctionnement basse, et particulièrement les piles de type PEMFC.

### ***1.3.5.3 Applications portables***

Dans les applications portables, sa concerne le téléphone mobile et l'ordinateur portable. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. Les piles les plus utilisées dans ce domaine sont de type DMFC.

## ***1.4 Développement des PEMFC et SOFC***

Deux technologies de pile à combustible, les PEMFC fonctionnant à basse température (80°C) et les SOFC fonctionnant à haute température (750 à 1050°C) font l'objet de recherches importantes tant au niveau européen (150 MEuros/an) qu'au niveau international (200 MEuros/an au Japon et 160 MEuros/an aux USA en 2003) [GAT-04].

### ***1.4.1 Les piles à combustible de type PEM***

#### ***1.4.1.1 Raisons du choix***

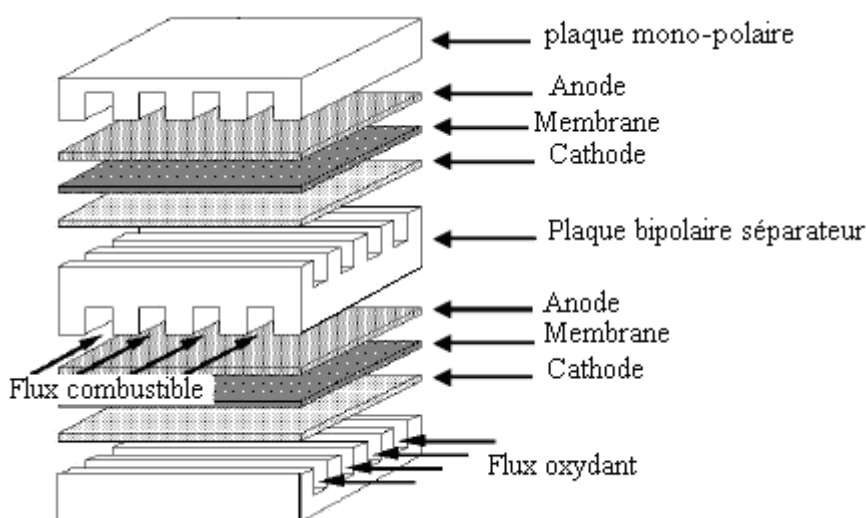
Cette technologie retient l'attention pour trois raisons essentielles :

- Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante.
- Elle est insensible à la présence de CO<sub>2</sub> dans l'air, contrairement à la filière alcaline (AFC).
- Elle est de technologie tout solide et peut à la fois prétendre à des durées de vie supérieure aux piles à électrolyte liquide dans des conditions normales de fonctionnement ainsi qu'à une industrialisation plus simple.

### I.4.1.2 Structure d'une PEMFC

Comme on a dit précédemment, qu'une cellule élémentaire est constituée d'un électrolyte, des électrodes et des plaques bipolaires. L'électrolyte dans une PEMFC est une membrane solide. L'association de nombreuses cellules va former une pile, ou on peut utiliser un autre nom qui est le 'stack'.

La figure suivante représente la structure d'un empilement de deux cellules.



**Figure I.4 :** Structure d'un empilement des cellules PEM [Lachaize-04].

#### I.4.1.2.1 Membrane polymère échangeuse de protons

Le rôle de la membrane est de transporter les protons résultants de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène de l'anode vers la cathode (à travers lui-même). Leur localisation entre les électrodes conditionne qu'elle doit être isolante électroniquement, supporter les efforts mécaniques qu'elle peut subir lors du serrage et imperméable pour l'hydrogène et l'oxygène, aussi elle doit supporter la température et être inerte chimiquement.

Les matériaux des électrolytes actuels sont [Font-05] :

- Le Nafion® et le Gore de Dupont™<sup>6</sup>.
- Le DOW® de DOW Chemical™.
- L'Aciplex® d'Asahi Chemical Industry Company.

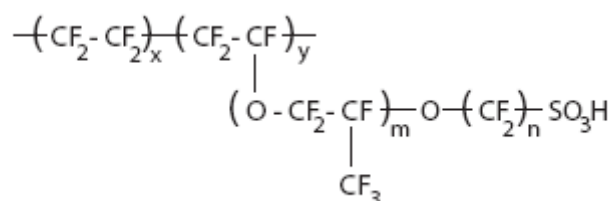
<sup>6</sup>® : Marque déposée, ™ : Trade marque

La figure I-5 donne la structure chimique générale de ces électrolytes, où on a [NOP-04]:

Pour le : Nafion 117 :  $m \geq 1$ ,  $n=2$ ,  $x=5-13.5$ ,  $y=1000$

L'Aciplex:  $m=0.3$ ,  $n=2-5$ ,  $x=1.5-14$

DOW:  $m=0$ ,  $n=2$ ,  $x=3.6-10$



**Figure I.5** : Structure chimique générale des différents électrolytes [NOP-04].

Les membranes possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de protons, généralement de terminaison  $-\text{SO}_3\text{H}$  ou  $\text{COOH}$  permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode [Lachaize-04].

Le matériau le plus utilisé est le Nafion, où il existe trois générations qui sont : le Nafion 117, le Nafion 115 et le Nafion 112. La différence entre eux est au niveau de l'épaisseur. Ce dernier est compris entre 50 et 150  $\mu\text{m}$  [Lachaize-04], et plus qu'il est petit, la résistance est faible. Il existe aussi un autre paramètre essentiel qui influe fortement sur la résistance de la membrane, c'est son taux d'hydratation qui traduit son niveau de contenance d'eau. Où une membrane bien hydratée, signifie résistance faible.

#### ***1.4.1.2.2 Les électrodes***

Les électrodes sont généralement des électrodes poreuses à base d'un matériau carboné permettant la diffusion des gaz et ont une triple fonction :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques.

Certains auteurs décomposent l'électrode en deux zones : la zone de diffusion et la zone active. Dans la zone de diffusion le gaz ne subit aucune réaction ou transformation et il suffit qu'il la dépasse pour arriver à la zone active, où se trouve le catalyseur, donc cette zone est le siège des deux demi-réactions d'oxydoréduction.

Le catalyseur utilisé est du platine car seul ce métal noble possède l'activité électro catalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène et peut, de plus résister durablement à la corrosion dans cet environnement chimique très acide. Parmi ses inconvénients, leur prix élevé et son contamination par le monoxyde de carbone.

#### ***1.4.1.2.3 Les plaques bipolaires***

Les plaques bipolaires sont en contact avec la surface des électrodes et permettent sur toute la surface de l'électrode :

- La collecte des électrons.
- La distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- L'évacuation des produits formés.

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder :

- Un niveau de conductivité électrique suffisant.
- Une imperméabilité aux gaz.
- Une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de la pile (eau, acide, oxygène, etc.).

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Le procédé d'usinage a participé essentiellement à l'élévation du coût de ces plaques. Pour cela, les constructeurs ont trouvés autres matériaux de substitution comme les plaques bipolaires métalliques et les plaques en matériaux composites.

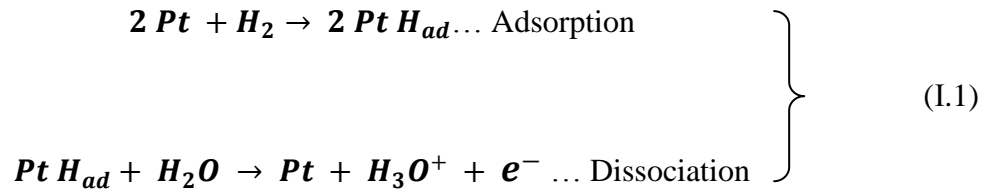
#### ***1.4.1.3 Principe de fonctionnement des PEMFC***

Le principe de fonctionnement reste le même expliqué dans le paragraphe (1.3.3), notons que l'électrolyte est un acide.

Dans ce paragraphe, on va donner les différentes équations chimiques qui décrivent les réactions chimiques et leurs étapes.

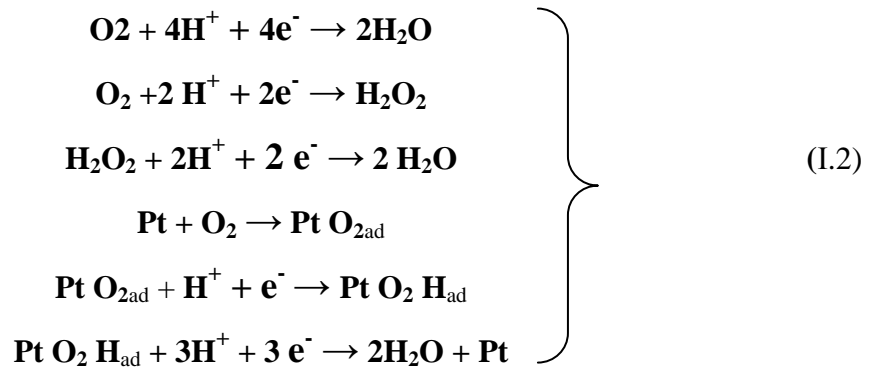
Coté anode :

Du coté anode, l'hydrogène diffuse à travers la couche de diffusion jusqu'à la couche active, où il rencontre une particule de platine. Sous l'action du catalyseur, la molécule d'hydrogène se scinde en deux atomes d'hydrogène. Ceux ci forment alors une liaison avec deux atomes de platine, puis chacun se scinde en un électron et un proton  $H^+$  qui pourra alors traverser la membrane de l'anode vers la cathode.



Coté cathode :

Le mécanisme de réaction est là aussi assez complexe (étapes multiples).



## 1.4.2 Les piles à oxyde solide (SOFC)

### 1.4.2.1 Raisons du choix

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

- Elle peut fonctionner avec divers carburants : hydrogène, gaz naturel, monoxyde de carbone qui peuvent être utilisés directement à raison de la température élevée.
- Une résistance au soufre d'une ou deux fois plus supérieurs à celle des piles à acide phosphorique (PAFC) et à carbonate fondue (MCFC).

- L'absence des métaux nobles permet de réduire son coût.
- Son rendement élevé (70%) si elle est utilisée dans la cogénération (production simultanée de l'électricité et de la chaleur) ou elle est couplée avec turbine à gaz.

#### ***1.4.2.2 Structure d'une SOFC***

La structure générale d'une cellule d'une pile (SOFC) est semblable à celle présentée dans le paragraphe (1.3.2).

##### ***1.4.2.2.1 L'électrolyte***

Comme on a dit précédemment, l'électrolyte est solide, habituellement du Zirconium ( $Zr_2$ ) dopé avec de l'yttrium ( $Y^{3+}$ ), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène ( $O^{2-}$ ). Où La température de fonctionnement élevée est nécessaire pour qu'il ait une conductivité ionique suffisante (la conductivité ionique est en fonction de la température de fonctionnement). L'épaisseur de l'électrolyte dépend de la température de fonctionnement : pour des températures de 850 à 900 °C, l'électrolyte est généralement entre 80 et 120  $\mu m$  d'épaisseur ; à basse température de l'ordre de 700 à 850 °C l'épaisseur est abaissée à 5 à 20  $\mu m$  pour une conductivité suffisante [D.Lar-05].

##### ***1.4.2.2.2 Les électrodes***

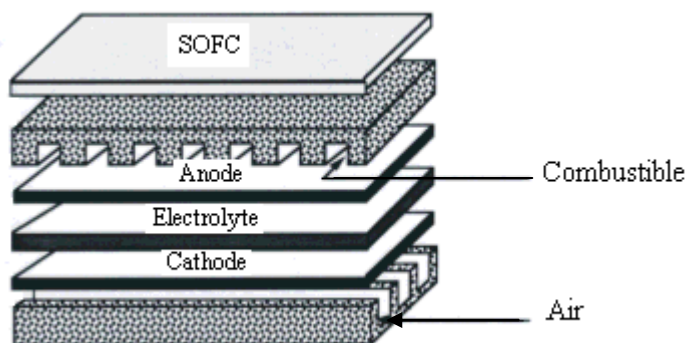
L'électrode du côté combustible est au cermet de zirconium et nickel. Le nickel est choisi à raison de sa haute activité catalytique et conductivité électrique [D.Lar-05].

Du côté comburant, le matériau le plus utilisé est le manganite de lanthane dopé au strontium.

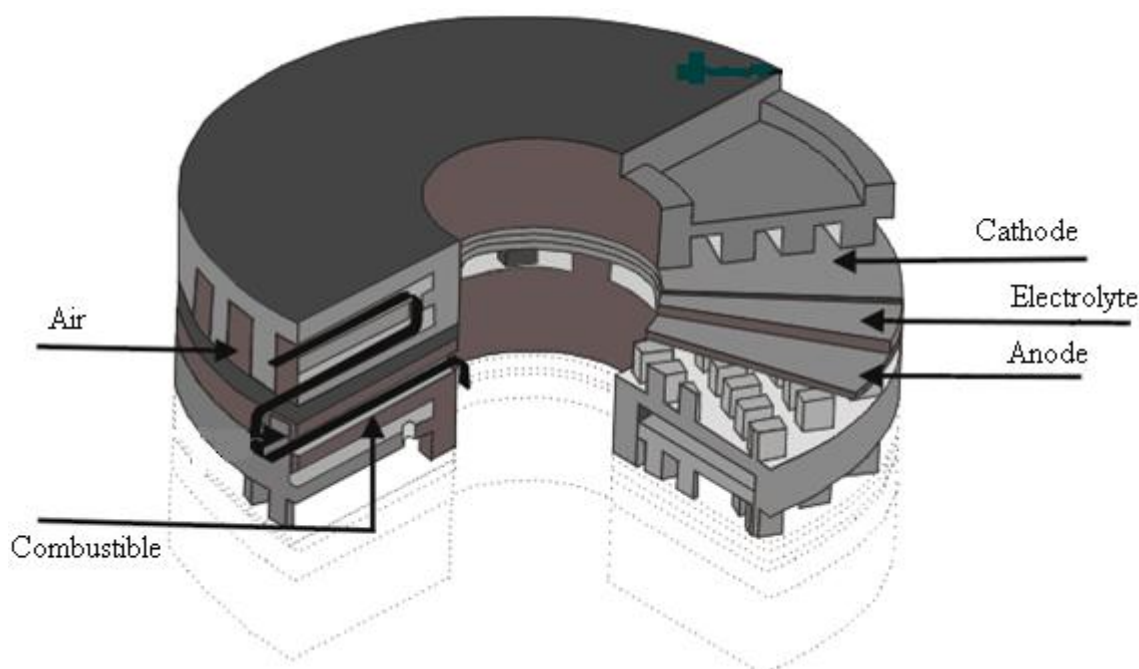
#### ***1.4.2.3 Formes d'une SOFC***

Deux types de conception sont possibles pour les SOFC :

- l'une planaire ;
- l'autre tubulaire.



**Figure I.6 :** Forme planaire d'une SOFC [FcFAp-01]



**Figure I.7 :** Forme tubulaire d'une SOFC [FcFAp-01]

#### ***1.4.2.4 Principe de fonctionnement***

Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme suivant: l'oxygène est dissocié à la cathode en  $O_2^-$ , puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, pour former de l'eau et libérer des électrons. Le tableau I.1 donne les différentes équations chimiques de la réaction.

### *1.5 Obtention de l'hydrogène*

Pour produire de l'hydrogène, plusieurs possibilités sont étudiées, certaines sont déjà arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement, parmi les possibilités on trouve :

- à partir de carburants fossiles.
- à partir de l'électrolyse de l'eau.
- à partir du nucléaire.

#### *1.5.1 Reformage des carburants fossiles*

La production d'hydrogène à partir de carburants fossiles est actuellement la plus répandue, mais elle ne constitue pas une solution à terme puisque tous ces carburants ont une durée de vie limitée. Elle pourrait constituer une solution pour le début pour des petites quantités, mais cette technique génère du CO<sub>2</sub>.

On distingue trois procédés :

- Le vapo-reformage.
- L'oxydation partielle.
- Le reformage auto-thermique.

##### *1.5.1.1 Le vapo-reformage :*

Le vapo-reformage consiste à faire réagir un hydrocarbure avec la vapeur d'eau sous l'action d'un catalyseur. Actuellement il est surtout fait avec du gaz naturel.

Le gaz naturel est composé en majeure partie de méthane, mais contient aussi du CO<sub>2</sub> et du soufre. Ce dernier doit être d'abord éliminé avec la désulfuration. Le procédé de vapo-reformage se scinde alors en deux réactions, la première est la réaction du méthane avec l'eau qui produit du CO et de l'hydrogène, la seconde est la réaction de ' **Water Gas Shift**' entre l'eau et le CO :



La première réaction du reformage à lieu vers 800-900°C pour une pression de 25 bars elle est endothermique. La seconde réaction est due à la nécessité d'éliminer le CO.

### ***1.5.1.2 L'oxydation partielle***

L'oxydation partielle consiste en une réaction entre un carburant (gaz naturel, hydrocarbures légers, voire le charbon) avec l'oxygène. Prenons l'exemple du gaz naturel, la réaction se fait selon :



Cette réaction à lieu à plus haute température (1200 à 1500°C) et pression (20 à 90bar). Elle est exothermique.

### ***1.5.1.3 Le reformage auto-thermique***

Le reformage auto-thermique est une combinaison des deux procédés précédents puisque le carburant est mélangé avec de l'air et de l'eau. L'oxydation partielle est exothermique et la chaleur dégagée permet de fournir de la chaleur au vapo-reformage qui est une réaction endothermique. Au total donc on n'a pas besoin d'apport de chaleur. Ce procédé permet d'atteindre une très bonne efficacité et peut être utilisé pour plusieurs carburants : le gaz naturel, le méthanol ou des hydrocarbures. C'est ce procédé qui est envisagé dans les applications automobiles pour un reformage embarqué.

## ***1.5.2 L'électrolyse de l'eau***

On parle souvent de l'électrolyse de l'eau comme un moyen de production d'hydrogène à long terme ; cette ressource étant a priori illimitée et cette technique ne produisant pas de CO<sub>2</sub>. Cela permettrait de stocker l'électricité sous forme chimique et de réutiliser plus tard l'hydrogène.

## ***1.5.3 Nucléaire***

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4<sup>ème</sup> génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire,

une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène.

### ***1.6 Stockage de l'hydrogène***

Le stockage de l'hydrogène peut être effectué par plusieurs modes. Parmi ces modes, on trouve :

1. Sous forme comprimé.
2. Sous forme liquéfié.
3.  $\text{NaBH}_4$ .
4. hydrures métalliques.

L'évaluation des performances de ces modes se fait surtout par les conditions générales de stockage et de déstockage de l'hydrogène, la densité volumique, la sécurité et le coût.

#### ***1.6.1 Stockage sous forme comprimé***

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisé actuellement (Nissan, Daimler Chrysler) : la pression va de 200-350 à 700 bars. L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 L jusqu'à des réservoirs de 10.000 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.

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

#### ***1.6.2 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.

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

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

### ***1.6.3 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.

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

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

### ***1.6.4 Hydrures métalliques***

Certains métaux ou alliages peuvent stocker des atomes d'hydrogène entre leurs atomes et créer des liaisons chimiques. Il s'agit par exemple du Palladium (Pd), du Magnésium (Mg), de Mg<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.

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

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

### ***1.7 Conclusion***

Malgré qu'elles ont un long temps depuis son invention, et qu'elles sont utilisées dans trois grands champs d'application (transport, production et portable), les piles à combustible n'ont pas encore atteintes le niveau de commercialisation, c'est à cause du coût élevé de son fabrication, par exemple, la construction d'une pile à combustible de type PEM met en œuvre des matériaux onéreux comme le platine, le graphite et la membrane ionique.

La classification des différents types des piles présentées dans ce chapitre est faite selon la température de fonctionnement, où on a distingué deux familles. L'une regroupe les piles à basse température et l'autre les piles à haute température. Dans la première famille, on a trouvé que la pile PEM est la plus utilisée et qu'elle peut recouvrir tous les domaines d'application. Dans la seconde famille, l'utilisation des piles SOFC dans la production d'énergie électrique est déjà appliquée dans plusieurs pays comme USA et Japon. Ce type des piles est souvent accouplé à une turbine à gaz pour augmenter son rendement énergétique.

Si l'élimination de l'émission du CO<sub>2</sub> est l'un des objectifs de la pile, on voit parallèlement que la majorité des méthodes utilisées pour produire le H<sub>2</sub> ne marchent pas avec cet objectif, et qu'elles reposent essentiellement sur les hydrocarbures fossiles.

Donc, il faut travailler à minimiser le coût des piles à combustible et rendre la production de l'hydrogène indépendante à l'énergie fossile, comme on trouve dans l'Amérique de sud que l'hydrogène se produit à partir des biomasses.

Ajoutant que les méthodes de stockage de l'hydrogène doivent être sécuritaires, avec une densité énergétique élevée, et un remplissage simple et rapide.

# ***Modélisation de la pile à combustible type PEM***

## ***II-1 Introduction***

Il existe un grand nombre de modèles quasi statique pour décrire la réaction chimique présente dans une cellule de pile à combustible [Lachaize-04]. Ces modèles se différencient suivant les objectifs fixés. Ils permettent généralement de prédire les caractéristiques courant-tension, et les spectres d'impédances électrochimiques [Sad-06].

Dans ce qui suit dans ce chapitre, on va présenter brièvement les différentes modélisations de la pile à combustible, ensuite, une étude électrochimique basée sur les lois de la thermodynamique est faite afin de comprendre l'origine de quelques équations qu'on peut les rencontrer dans la littérature. Deux modèles seront expliqués dans ce travail, à partir des quels, on va former un modèle qui nous permet de tracer la caractéristique densité de courant-tension de la pile et définir son dimensionnement.

## ***II-2 Types de la modélisation de la pile à combustible PEM***

### ***A. Modélisation par impédance***

Dans ce modèle, la pile à combustible est modélisée par une source de tension continue associée à une impédance électrique.

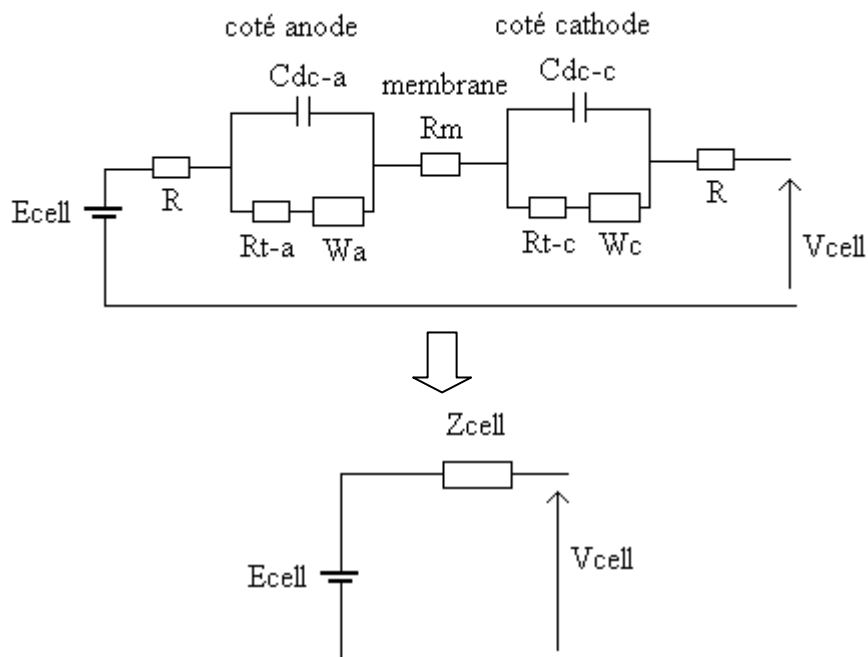
Cette impédance décrit d'une part ;

- ✓ le comportement résistif des différentes couches conductrices protoniques (membrane) et électroniques (plaques bipolaires et électrodes) noté respectivement par  $R_m$  et  $R$ .

D'autre part ;

- ✓ L'effet capacitif entre chaque électrode et la membrane lié à un phénomène qu'on appelle la double couche électrique. Ce phénomène est dû à la présence de charges positives sur la surface de l'électrolyte (membrane) et de charges négatives sur la surface de l'électrode, noté par ( $C_{dc-a}$  et  $C_{dc-c}$ ) pour l'anode et cathode respectivement.
- ✓ Une résistance qui décrit les phénomènes de transfert de charge de la réaction liée à la cinétique de la réaction noté par ( $R_{t-a}$  et  $R_{t-c}$ ) pour l'anode et la cathode.
- ✓ Une impédance qui décrit les phénomènes de transfert de masse vers le site de réaction, elle est appelée impédance de Warburg (W).

Une cellule peut être représentée dans ce modèle par le schéma électrique suivant :



**Figure II.1** : Modélisation par impédance d'une cellule PEM. [Friede-03][Sad-06].

La mesure de l'impédance ( $Z_{cell}$ ) est réalisée à partir de la méthode de la spectroscopie d'impédance.

### **B. Modélisation à l'échelle microscopique**

C'est un modèle à base de flux molaires des différents espèces (gaz et liquide) entrants et sortants à et de la pile. Afin de donner une description détaillée des effets physiques dans la

pille, tels que les mécanismes réactionnels et les phénomènes de transport (matière et charge), ce modèle nécessite la connaissance d'un grand nombre de paramètres tels que les caractéristiques des matériaux utilisés, les gaz alimentant la pile, leurs débits et la géométrie des différents éléments de la pile (plaques bipolaires, couches de diffusion, couches de réaction...). [Friede-03][Sad-06].

### **C. Modélisation à l'échelle macroscopique**

Dans ce modèle, la variation de la tension aux bornes d'une cellule PEM en fonction du courant débité est donnée par des équations simples, où les différentes chutes qui apparaissent au niveau de la cellule lors du fonctionnement en charge sont prises en compte et aussi les conditions de fonctionnement (pression, température...).

On distingue deux écritures :

1. Par des équations empiriques (modèle empirique).
2. Par des équations semi-empiriques (modèle semi-empirique).

Dans ce qui suit dans ce chapitre, on va détailler ces deux derniers points.

#### **II-3- Modèle empirique**

Dans ce modèle on va essayer d'étudier le comportement idéal d'une cellule PEM à partir d'une étude basée sur les lois de la thermodynamique, en suite on passe au comportement réel par l'identification des différentes pertes qui engendrent la chute de la tension idéal.

##### **II.3.1- Performances idéales d'une cellule PEM**

Dans une pile PEM qui utilise comme combustible le H<sub>2</sub>, la réaction globale se fait selon :



Cette réaction transforme l'énergie chimique contenue dans les gaz entrant dans la pile en énergie électrique et thermique.

S'il n'y avait aucune perte dans la pile ( $i=0$ ), le travail électrique maximal ( $W_{el}$ ) obtenu à température et à pression constante (ainsi le volume) est donné par la variation de l'énergie libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) :

$$W_{el} = \Delta G \quad (\text{II.2})$$

Cette énergie et la tension idéale d'une cellule sont liées par la relation suivante :

$$\Delta G = -n F E \quad (\text{II.3})$$

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

D'une part, la variation de l'énergie libre de Gibbs est la différence entre la somme des énergies libres des produits et la somme des énergies libres des réactants ; à partir de l'équation chimique (II.1) on peut écrire :

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Sigma G_{\text{produits}} - \Sigma G_{\text{réactants}} \\ &= G_{\text{H}_2\text{O}} - G_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}G_{\text{O}_2} \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

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

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

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- ✓  $\Delta H$  : la variation de l'enthalpie en [J/mol].
- ✓  $\Delta S$  : la variation de l'entropie en [J/mol/K].
- ✓  $T$  : la température de fonctionnement de la pile en [K].

Où:

$$\Delta H = H_{\text{H}_2\text{O}} - H_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} H_{\text{O}_2} \quad (\text{II.5.a})$$

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

$$\Delta S = S_{\text{H}_2\text{O}} - S_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} S_{\text{O}_2} \quad (\text{II.5.b})$$

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

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

Il est possible d'isoler la dépendance par rapport à la pression et de définir ainsi des grandeurs de référence à l'état standard qui impose une pression de un bar. Cette équation est connue sous le nom de loi de *Nernst* [Font-05].

### Equation de Nernst

Le bilan d'une réaction chimique s'écrit généralement sous la forme suivante :



Où : A et B sont les réactants et C est le produit de la réaction

x, y et z sont les coefficients stœchiométriques.

Par l'intermédiaire de la loi de Nernst, la variation de l'énergie libre de Gibbs est donnée par :

$$\Delta G = \Delta G^\circ - R T \ln \left( \frac{a_A^x a_B^y}{a_C^z} \right) \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

- ✓  $\Delta G^\circ$  : la variation de l'énergie libre de Gibbs à pression standard (1bar $\approx$ 1atm)<sup>1</sup> qui dépend de la température.
- ✓ R : constante des gaz parfaits (R=8.314 [J/mol/K])
- ✓ T : la température de fonctionnement en [K]
- ✓ a : l'activité (sans unité)

A partir de l'équation (II.3) on peut écrire :

$$\Delta G^\circ = -n F E^\circ \quad (\text{II.8})$$

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

Substituant les équations (II.3) et (II.8) dans (II.7) on obtient :

$$E = E^\circ + \frac{R T}{n F} \ln \left( \frac{a_A^x a_B^y}{a_C^z} \right) \quad (\text{II.9})$$

---

<sup>1</sup> 1atm=1.01325bar

Cette équation est la forme générale de la loi de Nernst.

Dans notre cas, les réactants sont des gaz considérés parfaits ; l'activité est :

$a = \frac{P_{partielle}}{P_0}$ . Puisque c'est un rapport entre pressions, on prend l'unité de ces dernières en (atm), et on a  $P_0=1$ , donc :  $a_{H_2}=p_{H_2}$  et  $a_{O_2}=p_{O_2}$ .

$P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  sont respectivement les pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène à l'interface de la membrane.

L'eau produite peut être sous une forme gazeuse, ou sous une forme liquide. Mais à raison qu'une pile PEM fonctionne à température inférieure à 100°C, donc on prend le cas où l'eau est sous forme liquide, où son activité est égale à 1.

Les valeurs des coefficients stœchiométriques sont :  $x=1$ ,  $y=1/2$  et  $z=1$ .

L'équation (II.9) devient alors pour  $n=2$  :

$$E = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}) \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II.10) décrit la dépendance de la tension idéale avec la pression à température donnée.

Des applications travaillent souvent à pression égale à l'anode et à la cathode de part de la fragilité de la membrane [Lachichi-05]. Si on note par ( $P_f$ ) la pression de fonctionnement, on peut référencer les pressions partielles des gaz par rapport à cette pression comme suite :

$$P_{H_2} = \alpha P_f \quad (\text{II.11.a})$$

$$P_{O_2} = \beta P_f \quad (\text{II.11.b})$$

Substituant ces deux dernières équations dans (II.10), et après simplification on obtient :

$$E = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln(\alpha \beta^{1/2}) + \frac{3RT}{4F} \ln(P_f) \quad (\text{II.12})$$

$\alpha$  et  $\beta$  sont les fractions molaires des gaz hydrogène et oxygène respectivement.

Par exemple  $\alpha=1$  si le gaz entrant du côté de l'anode est le  $H_2$  pur,  $\beta=1$  si le gaz entrant du côté de la cathode est le  $O_2$  pur et  $\beta=0.21$  si le gaz entrant côté cathode est de l'air<sup>2</sup>.

Jusqu'à maintenant, si on connaît les conditions de fonctionnements qui sont les pressions partielles ou la pression ( $P_f$ ) et la température ( $T$ ), il reste à déterminer l'expression de  $E^\circ$  en fonction de la température ( $T$ ).

<sup>2</sup> On suppose que l'air contient 21% Oxygène et 79% Azote.

**Tension idéale standard en fonction de la température**

Le calcul de  $E^\circ$  se fait à partir du calcul de  $\Delta G^\circ$ .

D'après l'équation (II.5), on peut écrire :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- ✓  $\Delta H^\circ$  : la variation de l'enthalpie à pression standard
- ✓  $\Delta S^\circ$  : la variation d'entropie à pression standard

D'après les équations (II.5.a) et (II.5.b) on écrit :

$$\Delta H^\circ = H^\circ_{\text{H}_2\text{O}} - H^\circ_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} H^\circ_{\text{O}_2} \quad (\text{II.13.a})$$

$$\Delta S^\circ = S^\circ_{\text{H}_2\text{O}} - S^\circ_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} S^\circ_{\text{O}_2} \quad (\text{II.13.b})$$

Tel que:

- ✓  $H^\circ_i$  : l'enthalpie du constituant (i) ;  $i = (\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2)$ .
- ✓  $S^\circ_i$  : l'entropie du constituant (i) ;  $i = (\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2)$ .

Les expressions d'entropie et d'enthalpie à pression constante standard de chaque constituant (i) en fonction de leur coefficient de chaleur molaire  $C_{p,i}$  est donné par :

$$H^\circ_i(T) = H^\circ_i(298.15) + \int_{298.15}^T C_{p,i} \cdot dT \quad (\text{II.14.a})$$

$$S^\circ_i(T) = S^\circ_i(298.15) + \int_{298.15}^T \frac{C_{p,i}}{T} \cdot dT \quad (\text{II.14.b})$$

Avec:

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

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

$$C_p(T) = a + b T + c T^2 \quad (\text{II.14.c})$$

Où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont les capacités thermiques molaires, qui sont données pour les constituants  $H_2$ ,  $H_2O$  et  $O_2$  dans le tableau suivant :

Gaz parfait	$a$ [J/mol/K]	$b$ [J/mol/K <sup>2</sup> ]	$c$ [J/mol/K <sup>3</sup> ]
$H_2$	29,038	$-0,8356 \cdot 10^{-3}$	$2,0097 \cdot 10^{-6}$
$O_2$	25,699	$12,966 \cdot 10^{-3}$	$-3,8581 \cdot 10^{-6}$
$H_2O_l$	30,33	$9,6056 \cdot 10^{-3}$	$1,1829 \cdot 10^{-6}$

**Tableau II.1** : Les capacités thermiques molaires du  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  [Font-05].

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

Gaz parfait	$H^\circ$ (298,15) [J/mol]	$S^\circ$ (298.15) [J/mol/K]
$H_2$	0	130,684
$O_2$	0	205,138
$H_2O_l$	-285830	69,91

**Tableau II.2** : Entropie et enthalpie à 298.15K de  $H_2$ ,  $O_2$  et  $H_2O$  [Font-05].

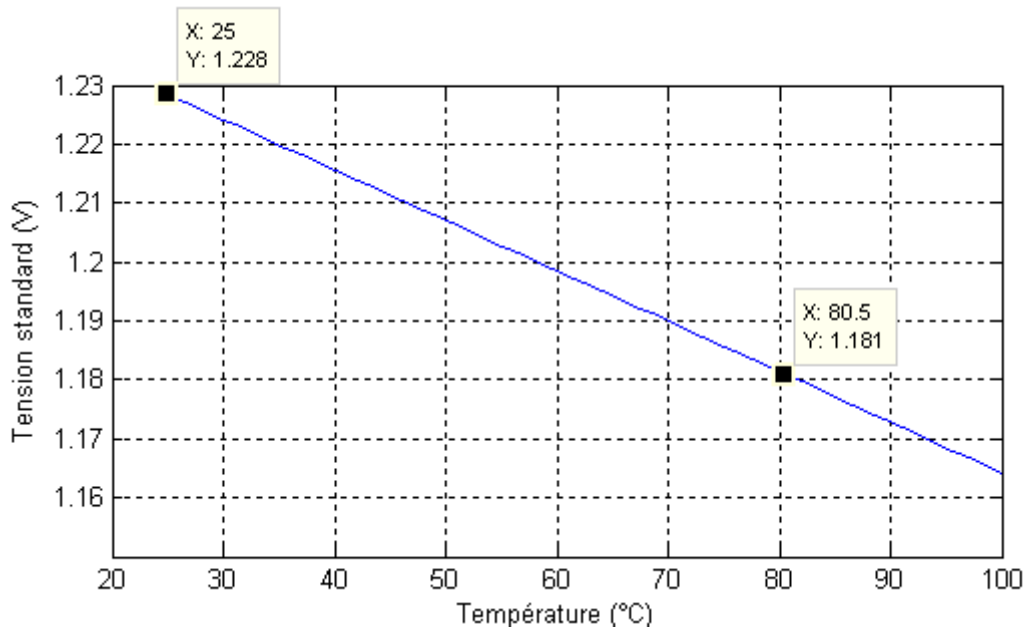
Posant ( $T_0=298.15$ ) et faisant l'intégral pour les équations (II.14.a) et (II.14.b), on obtient :

$$H_i^\circ(T) = H_i^\circ(T_0) + a_i(T - T_0) + b_i \left( \frac{T^2 - T_0^2}{2} \right) + c_i \left( \frac{T^3 - T_0^3}{3} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$S_i^\circ(T) = S_i^\circ(T_0) + a_i \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + b_i(T - T_0) + c_i \left( \frac{T^2 - T_0^2}{2} \right) \quad (\text{II.16})$$

Finalement, on a trouvé tous ce qui est nécessaire pour calculer la tension idéale standard  $E^\circ$ . Un tracé de  $E^\circ$  en fonction de la température ( $T$ ) est représenté dans la figure (II.2).

D'après cette courbe, on remarque que la dépendance de  $E^\circ$  avec la température est linéaire où l'augmentation de la température engendre la diminution de la tension standard.



**Figure II.2** : Tension standard en fonction de la température.

L'équation de la droite est :

$$E = 1,228 - 8,5 \cdot 10^{-4}(T - 298,15) \quad (\text{II.17})$$

Avec T : la température en Kelvin.

Substituant (II.17) dans (II.10) on obtient :

$$E = 1,228 - 8,5 \cdot 10^{-4}(T - 298,15) + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}) \quad (\text{II.18})$$

Substituant aussi dans (II.12) on obtient :

$$E = 1,228 - 8,5 \cdot 10^{-4}(T - 298,15) + \frac{RT}{2F} \ln(\alpha \beta^{1/2}) + \frac{3RT}{4F} \ln(P_f) \quad (\text{II.19})$$

D'après cette dernière équation, on remarque il existe plusieurs paramètres qui influent sur la valeur de  $E$  citant :

- ✓ la température ( $T$ ).
- ✓ la pression ( $P_f$ ).
- ✓ la composition des gaz ( $\alpha, \beta$ ).

### a- Influence de la température

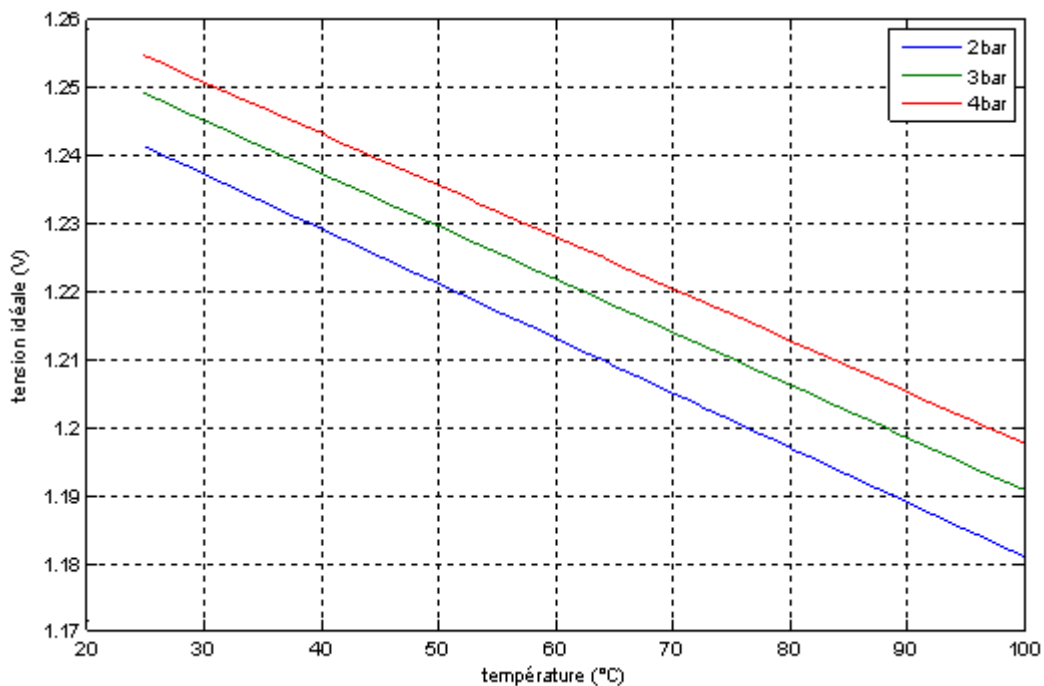
Avec une simple application, où on pose par exemple  $P_f=1\text{atm}$  et  $\alpha=\beta=1$  ( $\text{H}_2$  et  $\text{O}_2$  purs), on remarque que les deux derniers termes du second membre de l'équation (II.19) s'annulent, et il ne reste que le terme  $E^\circ$ .

Donc d'après la figure (II.2), la tension idéale  $E$  diminue avec l'augmentation de la température, et avec un simple calcul on trouve que cette diminution est de l'ordre de  $0,85\text{mV}/^\circ\text{C}$ .

### b- Influence de la pression :

Le terme qui indique la variation de la tension  $E$  en fonction de la pression de fonctionnement  $P_f$  est  $\frac{3RT}{4F}\ln(P_f)$ , on pose  $\alpha=\beta=1$ , et on trace pour différentes valeurs de  $P_f$  la caractéristique  $E=f(T)$ .

D'après cette caractéristique, pour une valeur de température donnée, on voit que plus la pression augmente, la tension idéale augmente aussi. L'augmentation maximale est de l'ordre de  $0.01\text{V}/\text{bar}$  (de 1bar à 2bar).



**Figure II.3 :** Variation de la tension idéale en fonction de la température et la pression de fonctionnement.

### *c- Influence de la composition des gaz*

Dans une pile PEM, le combustible est généralement le H<sub>2</sub> pur donc  $\alpha=1$ , mais pour le comburant on peut utiliser soit l'oxygène pur ( $\beta=1$ ) ou l'air ( $\beta=0.21$ ).

A température constante, par exemple  $T = 353K$ , on pose aussi  $P_f=1$ , pour  $\beta = 1$  le terme  $\ln(\beta)$  s'annule, mais pour  $\beta = 0.21$  on remarque une chute de tension de l'ordre de 0.012V.

D'après cette analyse, on remarque que la valeur de la tension idéale E repose essentiellement sur la valeur de la tension standard E°. Cette dernière prend une valeur maximale de 1.228Volt à 25°C, pour cette raison l'association en série de plusieurs cellules permet d'obtenir une tension élevée.

### **II.3.2- Performances réels d'une cellule PEM**

La tension utilisable lorsque la pile est parcourue par un courant raisonnable s'éloigne de celle idéale à cause des différentes chutes qui apparaissent au niveau de la cellule lors du fonctionnement en charge. Les pertes appelées souvent polarisations proviennent principalement de trois sources :

- Les pertes d'activation ;
- Les pertes de concentration ;
- Les pertes ohmiques.

#### **II.3.2.1 Les pertes d'activation**

Les pertes d'activation sont dues à la lenteur du démarrage de la réaction chimique à la surface de l'électrode, pour cela, pour que la réaction puisse démarrer, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. Ces pertes sont présentes dans les deux électrodes.

L'expression de la chute d'activation totale due par les deux électrodes est donnée comme suite :

$$\eta_{act} = \frac{R T}{\alpha^* n F} \ln\left(\frac{i}{i_0^*}\right) \quad (\text{II.20})$$

Où :

$$\alpha^* = \frac{\alpha_a \alpha_c}{\alpha_a + \alpha_c} \quad (\text{II.20.a})$$

et

$$i_0^* = i_{0.a}^{\alpha_a + \alpha_c} \cdot i_{0.c}^{\alpha_a + \alpha_c} \quad (\text{II.20.b})$$

Où  $n = 2$

- ✓  $\alpha^*$  : coefficient de transfert de charge global (équivalent).
- ✓  $i$  : la densité de courant débité par la pile [A/cm<sup>2</sup>]
- ✓  $i_0^*$  : la densité de courant d'échange global (équivalent) [A/cm<sup>2</sup>].
- ✓  $\alpha_a$  et  $\alpha_c$  : les coefficients de transfert de charge de l'anode et la cathode respectivement.
- ✓  $i_{0,a}$  et  $i_{0,c}$  : la densité des courants d'échange à l'anode et à la cathode respectivement.

La détermination des paramètres  $\alpha^*$  et  $i_0^*$  se fait à partir de la loi de **Tafel** qui consiste à tracer la droite (dite droite de *Tafel*) :

$$\eta_{act} = a + b \log(i) \quad (\text{II.21.a})$$

Où :

$$a = -\frac{2,3.R.T}{\alpha^* n F} \log(i_0^*) \quad (\text{II.21.b})$$

$$b = \frac{2,3 R T}{\alpha^* n F} \quad (\text{II.21.c})$$

Généralement, dans une pile à combustible à hydrogène les pertes d'activation à l'anode sont négligeables devant celle de la cathode [Sad-06].

### II.3.2.2 Les pertes de concentration (diffusion)

Lorsque la demande en courant augmente, le système devient incapable de maintenir la concentration nécessaire des réactifs. Ceci conduit à un effondrement rapide de la tension aux bornes de la pile. [Lachichi-05]

Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$\eta_{con} = -\frac{R T}{n F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (\text{II.22})$$

- ✓  $\eta_{con}$  : pertes par diffusion globale en [V] ;
- ✓  $i_L$  : la densité de courant limite (maximale) en [A/cm<sup>2</sup>].

Les pertes par diffusion sont nulles pour des densités de courant inférieure à ( $i_L$ ) et sont de forme exponentielles au-delà [Rap-01].

Concernant la densité de courant maximale qui peut délivrer une pile à combustible, des auteurs posent une valeur par défaut de 1A/cm<sup>2</sup> [Sad-06] [Rap-01] [Font-05].

### II.3.2.3 Les pertes ohmiques

Ces pertes sont dues à :

- La résistance à la circulation des électrons dans les plaques bipolaires et les électrodes.
- La résistance à la circulation des protons ( $H^+$ ) dans la membrane.
- La résistance de contact.

L'expression des pertes ohmiques est :

$$\eta_{ohm} = R_t \cdot i \quad (\text{II.23})$$

- ✓  $R_t$  : résistance totale d'une cellule exprimée en [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] ;
- ✓  $i$  : la densité de courant exprimée en [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ].

Généralement, les pertes ohmiques sont dues principalement à la résistance de la membrane, où les autres résistances sont souvent négligées. Il existe dans la littérature deux formules donnant la résistance de la membrane de type **Nafion**. La différence entre les deux formules c'est au niveau de la conductivité ( $\sigma$ ) :

Formule de (*Springer et al*) :

$$\sigma(\lambda, T) = (0,005139 \cdot \lambda - 0,00326) \cdot \exp\left(1267 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (\text{II.24.a})$$

La seconde formule :

$$\sigma(\lambda, T, i) = \frac{5,5 \cdot 10^{-3} (\lambda - 0,634 - 3 \cdot i) \exp\left(1267 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right)}{(1 + 0,03 \cdot i + 0,062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \cdot i^{2,5})} \quad (\text{II.24.b})$$

Avec :

$$R_m = \frac{e}{\sigma} \quad (\text{II.25})$$

- ✓  $R_m$  : résistance de la membrane exprimée en [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]
- ✓  $i$  : la densité de courant en [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]
- ✓  $T$  : la température en [K]
- ✓  $e$  : l'épaisseur de la membrane en [cm]
- ✓  $\sigma$  : la conductivité de la membrane en [ $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]
- ✓  $\lambda$  : le taux d'hydratation de la membrane (sans unité).

Concernant le taux d'hydratation, sa valeur est comprise entre 0 et 22. Où on distingue d'après [Font-05] :

- $\lambda = 7$  : membrane assez sèche ;

- $\lambda = 14$  : membrane bien hydratée ;
- $\lambda = 22$  : membrane noyée.

### *L'expression de la tension en charge*

Après identification des différentes chutes, l'expression de la tension en charge aux bornes d'une cellule est comme suit :

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{con} - \eta_{ohm} \quad (\text{II.26})$$

### *II.3.3- Rendement de la cellule*

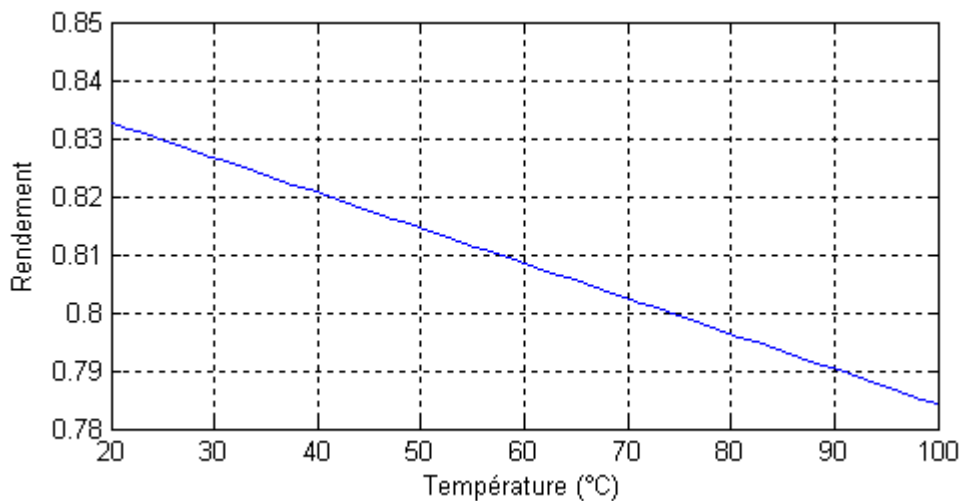
Le rendement global d'une cellule est le produit de plusieurs rendements, où on distingue :

- **Rendement thermodynamique ( $r_{th}$ ) :**

Ce rendement est calculé à pression standard en fonction de la température, son expression est donnée par :

$$r_{th}(T) = \Delta G^\circ(T) / \Delta H^\circ(T) \quad (\text{II.27.a})$$

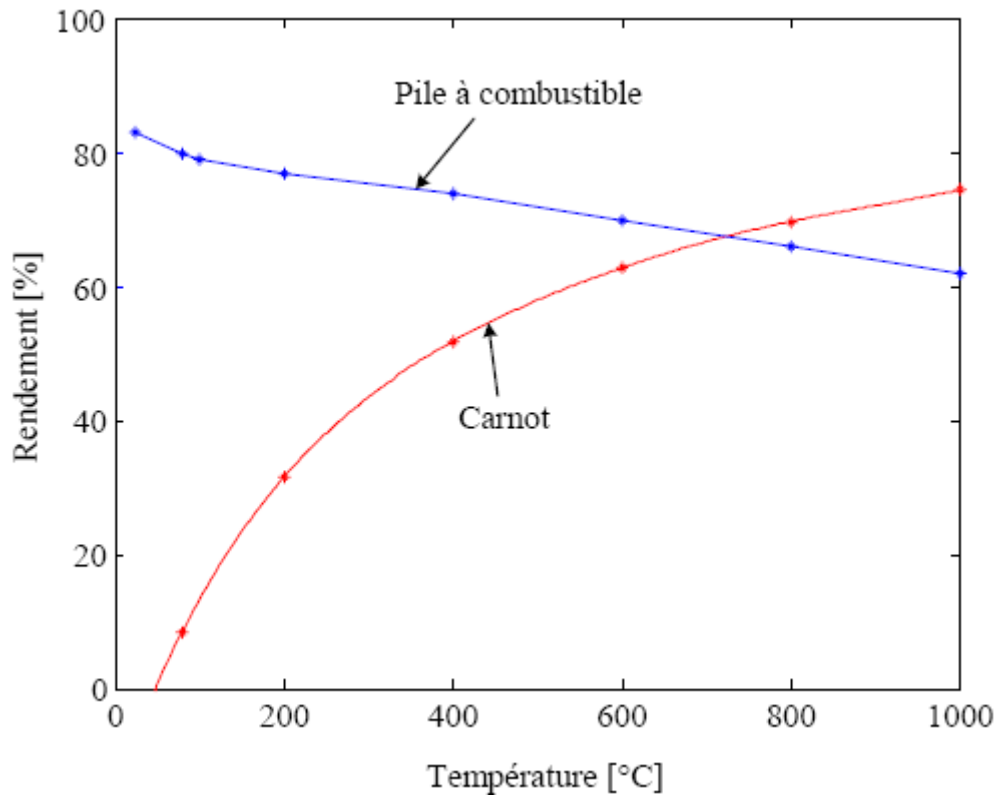
La figure 2.4 représente la variation de ce rendement en fonction de la température.



**Figure II.4:** Rendement thermodynamique en fonction de la température

Cette figure montre que le rendement diminue quand la température augmente, où sa valeur est 83% à 25°C, et 79.6% à 80°C.

Généralement pour montrer les avantages d'une pile à combustible du côté rendement, une comparaison est souvent fait avec le moteur thermique, comme le montre la figure suivante.



**Figure II.5** : Comparaison des rendements d'une pile à combustible et d'un moteur thermique [Lachichi-05]

D'après cette caractéristique, on voit qu'à faibles températures, le rendement de la pile est élevé par rapport à celui d'un moteur thermique, et il diminue avec l'augmentation de la température ; par contre à des températures élevées le rendement du moteur thermique s'améliore et prend des valeurs supérieures à celui de la pile. Notons que le rendement du moteur thermique est défini à partir du cycle de Carnot.

- **Rendement voltaïque ( $r_v$ )**

C'est le rapport entre la tension réelle aux bornes de la cellule ( $V_{cell}$ ) lors du fonctionnement en charge et la tension idéale ( $E$ ).

$$r_v = V_{cell}/E \quad (\text{II.27.b})$$

- **Rendement faradique ( $r_F$ )**

Ce rendement permet de rendre compte du fait que le nombre d'électrons obtenu par moles de combustible ou de comburant consommées n'est pas toujours égal aux valeurs théoriques. Par exemple, il peut s'agir de quelques fuites de  $H_2$  à travers la membrane qui ne participera pas à la réaction électrochimique. Ce rendement est souvent considéré égal à 1 [Font-05].

Le rendement global est donc :

$$r = r_{th} r_v r_F \quad (\text{II.27.c})$$

#### II.4 Modèle semi-empirique

D'après ce qu'on a vu dans le modèle précédant, on a rencontré plusieurs paramètres (densité de courant d'échange, coefficient de transfert de charge...) où leurs valeurs doivent se déterminer par identification de résultats expérimentaux. Pour cela, il existe un modèle semi-empirique généralisé proposé par (AMPHLETT.95) qui décrit la caractéristique courant-tension à partir des relations algébriques simples basées sur des résultats expérimentaux.

Les limites par diffusion et le transport de matière dans les canaux ne sont pas pris en compte [Sad-06].

##### II.4.1- Performances idéales d'une cellule PEM

L'application numérique est donnée par (AMPHLETT, 1995) dans le cas d'une production d'eau liquide pour une PEMFC [Rap-01] :

$$E(P, T) = 1.229 - 8,5 \cdot 10^{-4}(T - T_0) + 4,3085 \cdot 10^{-5} \cdot T(\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2}) \quad (\text{II.28})$$

Remarquant que cette dernière équation est déjà écrite précédemment par l'équation (II.18)

où  $\frac{R}{2F} = \frac{8,314}{2 \cdot 96488} = 4,3083 \cdot 10^{-5}$ , avec une différence de 0.001 entre 1.229 et 1.228.

## II.4.2- Performance réels d'une cellule PEM

### II.4.2.1- Pertes d'activation

L'expression des chutes d'activation est donnée par [Lachaize-04] :

$$\eta_{act} = 0,9514 - 3,12 \cdot 10^{-3} \cdot T - 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + 1,87 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot \ln(j \cdot 5 \cdot 10^{-3}) \quad (\text{II.29})$$

$T$  : La température en [K],  $j$ : la densité de courant en  $[A/m^2]$ ,  $C_{O_2}$ : la concentration de l'oxygène dans la zone physique de la réaction en  $[mol/cm^3]$  son expression est donnée par la loi de **Henry** par :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{498}{T}\right)} \quad (\text{II.30})$$

### II.4.2.2- Pertes ohmiques

Les pertes par résistance ohmique sur le transfert des électrons et des protons sont déterminées comme suivant : [Rap-01] [Sad-06]

$$\eta_{ohm} = I_{FC} (0,01605 - 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 8 \cdot 10^{-5} \cdot I_{FC}) \quad (\text{II.31})$$

L'expression de la tension en charge est donc :

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohm} \quad (\text{II.32})$$

A partir ces deux modèles présentés précédemment, on remarque que :

1. Le modèle empirique tient en compte tous les phénomènes de polarisation, mais pour qu'il soit utilisable, il faut connaître en minimum les paramètres qui définissent les pertes d'activation. Concernant la résistance, il suffit de négliger les différentes résistances (électronique et contact) devant la résistance de la membrane et on suppose une hydratation constante ( $\lambda = \text{cts}$ ). Concernant les pertes de concentration on donne une valeur pour la densité de courant maximal ( $i_L$ ).

2. Le modèle semi-empirique est un modèle à équations simples à utiliser, où il nécessite seulement la connaissance des conditions de fonctionnement (température, pression ...) qui sont fixées par l'utilisateur et le constructeur selon le besoin.

Le problème de ce modèle est d'une part qu'il ne donne pas des informations sur la membrane (épaisseur, niveau d'hydratation) ; d'autre part qu'il ne tient pas en compte des chutes de concentration.

Comme il n'y a pas un modèle qui règle tout, on va essayer de combiner ces deux modèles afin d'obtenir un modèle qui représente toute la caractéristique courant-tension.

### ***II.5- Le modèle adopté***

Le modèle que nous avons adopté est comme suit :

- L'expression de la tension idéale  $E$  est donnée par l'équation (II.28)
- L'expression de la chute d'activation est donnée par l'équation (II.29)
- La résistance tenue en compte est celle de la membrane, où son expression est donnée par l'expression (II.24.a).
- La chute de concentration est donnée par l'équation (II.22)

L'ensemble de ces équations peuvent être regroupées pour tracer la caractéristique densité de courant-tension d'une cellule, c'est pour ça qu'on a évité de prendre l'équation (II.31) qu'elle nécessite la connaissance de la surface 'S', où elle s'oppose avec le procédé qu'on va le suivre pour déterminer le dimensionnement de notre pile.

### ***II.6- Hypothèses et paramètres de simulation***

Afin de tracer cette caractéristique, nous sommes besoin de poser des hypothèses et donner les paramètres qui seront valables dans tout le reste de ce travail :

- Les gaz utilisés sont l'hydrogène pur et l'air, ce dernier contient 21% d'oxygène.
- L'humidification est réalisée pour les deux gaz.
- Les pressions aux entrées de l'anode et la cathode sont égales et connues et égale à 2bar.
- Les pertes de charge sont négligeables (pression à l'entrée de l'électrode et à la sortie sont égales).

- Le taux d'hydratation ( $\lambda$ ) et la température (T) sont supposés constants et connues leurs valeurs sont respectivement (14 et 80°C).
- La densité de courant maximale est de l'ordre de  $1A/cm^2$ .
- L'épaisseur de la membrane est de l'ordre de 50 $\mu$ m.

### II.6.1- Calcul des pressions partielles et simulation

Coté cathode :

Les gaz dans la cathode sont la vapeur d'eau saturante et l'air, où on peut écrire :

$$P_f = P_{sat} + P_{air} \quad (\text{II.33})$$

L'expression de la pression de la vapeur d'eau saturante  $P_{sat}$  est donnée par la relation d'**Antoine** en fonction de la température [Rap-01] :

$$P_{sat} = \exp\left(23,1961 - \frac{3816,44}{T-46,13}\right) \quad (\text{II.34})$$

Cette dernière relation donne la pression en [Pa] donc il faut la convertir en Atmosphère.

Donc l'expression de la pression partielle de l'oxygène est :

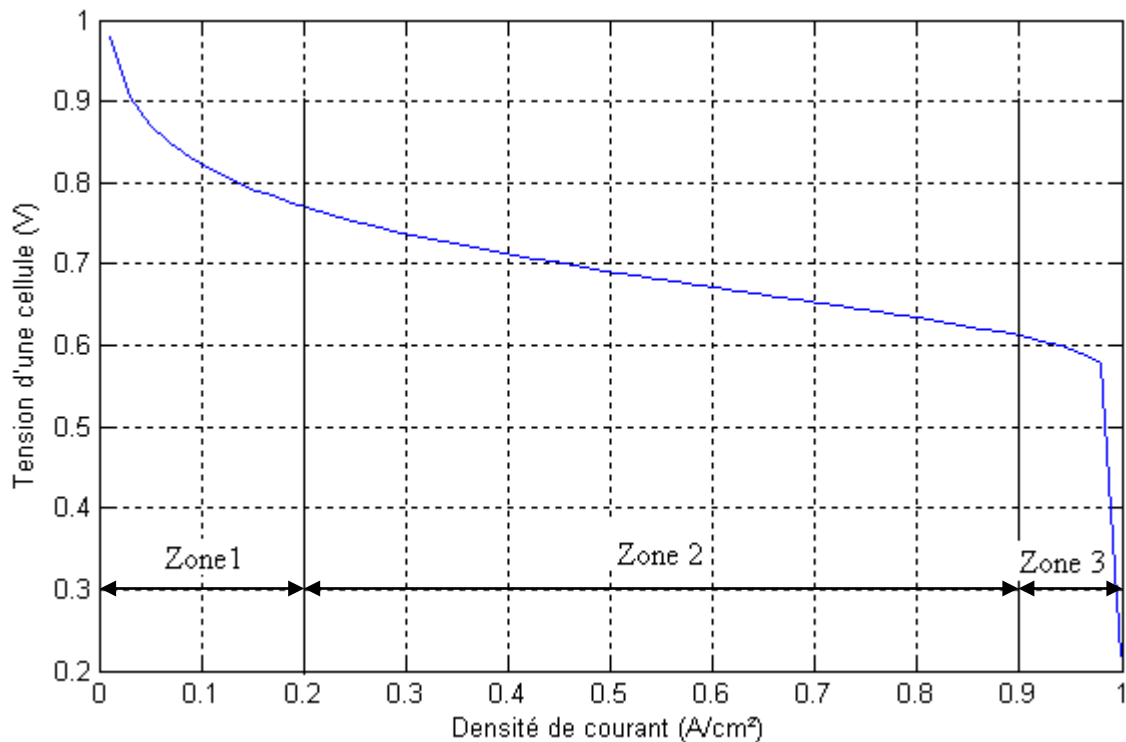
$$P_{O_2} = 0,21(P_f - P_{sat}) \quad (\text{II.35})$$

Coté anode :

Les gaz dans l'anode sont l'hydrogène et la vapeur d'eau saturante, de la même manière précédente on peut écrire l'expression de la pression partielle de l'hydrogène comme suite :

$$P_{H_2} = P_f - P_{sat} \quad (\text{II.36})$$

Après calcul des pressions partielles, on peut donc tracer la courbe qui décrit la variation de la tension aux bornes d'une cellule en fonction de la densité du courant, comme la montre la figure suivante.



**Figure II.6** : Caractéristique densité de courant-tension d'une cellule PEM.

D'après cette caractéristique, la première remarque intéressante c'est la valeur de la tension aux bornes de la cellule quand la densité de courant est presque nulle, cette valeur est de l'ordre de 1 volt, où la valeur théorique de 1.18 Volt (à 80°C) n'est plus apparue, on peut expliquer ça par la présence de la chute d'activation qu'elle prend des valeurs importantes pour des densités de courants faibles. On peut voir en plus que l'influence de la chute d'activation apparait fortement dans la zone 1.

Concernant la zone 2, c'est une zone linéaire et elle est présente sur un large intervalle de densité de courant. Certains auteurs expliquent ça par l'effet de la résistance seule, mais en réalité, l'élimination de la résistance dans le bloque de simulation a donné une allure presque confondue à celle donnée par la figure II.4. On peut dire donc que toutes les pertes participent dans cette zone, mais c'est l'effet de la résistance qui prédomine. Cette zone est le lieu de choix du point de fonctionnement de la pile, car elle est linéaire et existe sur une grande plage de variation de densité de courant.

Pour la zone 3, elle est caractérisée par des densités de courant fortes, et conduit la tension de prendre une valeur nulle. Cette zone traduit l'influence de la chute de concentration.

## II.8- Choix du point de fonctionnement

Le choix du point de fonctionnement de la cellule, consiste à déterminer la paire densité de courant-tension à partir la caractéristique montrée dans la figure II.6, et exactement dans la zone 2.

A partir du ce point de fonctionnement on va déterminer :

1. le nombre de cellule qu'on doit les associer en série pour obtenir la tension voulue aux bornes de la pile.
2. la surface de la cellule.

Connaissant la charge, si le choix est fait de sorte que la tension soit élevée, donc une densité de courant faible, il conduit à un nombre de cellule réduit et une surface forte ; par contre si la densité de courant est élevée, donc une tension faible, ça nécessite d'augmenter le nombre des cellules et réduire ses surfaces, à noter qu'il ne faut pas dépasser les limites technologiques actuelles.

Les limites technologiques actuelles semblent être : [Font-05]

- nombre de cellule  $N_{cell} \leq 100$  dans le cas de plaques bipolaires en graphite. Le nombre est a priori beaucoup plus important dans le cas de plaques bipolaires métalliques.
- $S \leq 800 \text{ cm}^2$

Dans notre travail, on a choisit le point de 0.71V et 0.41 A/cm<sup>2</sup>.

## II.9- Dimensionnement de la pile à utiliser

Déterminer le dimensionnement de la pile, veut dire déterminer le nombre et la surface des cellules.

Connaissant que nous avons besoin d'une puissance maximale de l'ordre de 5600 W.

### II.9.1- Nombre de cellules

On suppose que les plaques bipolaires sont en graphite, et on veut que la pile délivre en charge une tension la plus grande possible, donc on prend le nombre maximum des cellules, où  $N_{cell} = 100$ , donc la tension aux bornes de la pile en pleine charge est :

$$V_{pil} = 100 * 0,71 = 71 \text{ V}$$

**II.9.2- Surface active de la cellule**

On peut calculer la puissance maximale délivrée par la pile comme suivant :

$$P_{pil-max} = V_{pil} I_{pil-max} \quad (\text{II.37})$$

Où  $I_{pil-max}$  est le courant maximal délivré par la pile, son densité en fonction de la surface de la cellule est donnée par :

$$i = I_{pil-max} / S \quad (\text{II.38})$$

Une application numérique sur (II.37) donne :

$$I_{pil-max} = \frac{P_{pil-max}}{V_{pil}} = \frac{5600}{71} = 78,87 \text{ A}$$

A partir l'équation (II.38) on trouve :

$$S = I_{pil-max} / i = 78,87 / 0,41 = 192,36 \text{ cm}^2$$

**II. 10- La puissance maximale nette délivrée par la pile**

En réalité, une pile à combustible ne peut pas fonctionner seule, et elle est entourée par des auxiliaires comme :

- L'humidificateur qui assure l'évaporation d'eau utilisé pour humidifier les gaz.
- Le système de refroidissement, qui maintient la température de la pile constante.
- Le compresseur d'air qui assure l'alimentation de la pile par l'air.

Où l'ensemble (pile+auxiliaires) sont souvent appelées **système pile à combustible**.

Ces auxiliaires ont besoin de l'énergie électrique pour fonctionner, où la pile est la source, et comme des informations sur la puissance consommée par ces auxiliaires qui conviennent notre pile ne sont pas disponibles, on suppose qu'elle représente 10% de la puissance délivrée par la pile. La puissance nette maximale délivrée par la pile est :

$$P_{net-max} = P_{pil-max} - P_{aux-max} = 5600(1 - 0,1) = 5040W$$

La valeur du courant qui correspond est :

$$I_L = 5040/71 = 70.98 \text{ A}$$

Où :  $P_{aux-max}$  : la puissance maximale consommée par les auxiliaires ;

et  $I_L$  : est le courant maximum qui va partir vers la charge.

### **II.11- Rendement de la pile**

Considérant que toutes les cellules constituant notre pile ont le même comportement, et à l'aide des conditions de fonctionnements on aura :

Une application numérique sur la relation (II.28) a donné :  $E = 1.18 \text{ Volt}$ .

On a trouvé précédemment que le rendement thermodynamique à  $80^\circ\text{C}$  est égal à 79.6%.

Le rendement Faradique est supposé égal à 1.

Donc le rendement global de la pile est :  $r_{pil} = 0.796 \frac{0.71}{1.18} 100 \approx 48\%$ .

### **II.12- Conclusion**

Dans ce chapitre on a vu qu'il existe plusieurs façons pour modéliser une pile à combustible, mais le choix d'un modèle repose sur les phénomènes à étudier, donc l'aptitude de ce modèle à réaliser la fonction que nous voulons lui faire remplir.

A propos notre travail, une modélisation à l'échelle macroscopique est tenue où on a distingué deux modèles qui ont le même but qui est le tracé de la caractéristique courant-tension en fonction des conditions de fonctionnement.

Après une étude thermodynamique, on a trouvé que la tension à vide aux bornes d'une cellule élémentaire est due essentiellement de la tension standard (à pression constante), et que l'influence de la pression de fonctionnement et la composition des gaz d'alimentation ont un faible effet.

Il existe plusieurs phénomènes qui engendrent la chute de tension lors du fonctionnement en charge. Après détermination de ces phénomènes, on a tracé la caractéristique densité de courant-tension. A partir cette caractéristique, on a choisit un point de fonctionnement, puis on a dimensionné la pile de sorte qu'elle assure l'alimentation de notre charge par la

puissance voulue. Dans le cas où nous avons besoin d'une grande puissance, et l'utilisation d'une seule pile n'est pas possible à cause des limites technologiques, il est possible d'associer plusieurs piles en parallèles.

L'utilisation d'une pile à combustible pour alimenter une charge alternative nécessite le passage DC/DC pour augmenter la tension, puis le passage DC/AC pour obtenir une source alternative, qui sera le but du chapitre IV.

# Modélisation d'une pile SOFC

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, un autre type des piles à combustible sera modélisé, qui est le type SOFC.

En reposant sur le travail fait dans le chapitre précédent, une étude thermodynamique sera faite rapidement afin de déterminer les performances idéales de la pile. Ensuite on passera à l'identification des différentes chutes tenues en compte dans ce modèle. Afin de visualiser le comportement de la pile dans le régime transitoire, une simulation sera faite à l'aide des paramètres tenus dans plusieurs travaux.

## III.2 Modélisation d'un 'stack' SOFC

### III.2.1 Performances idéals

D'après le tableau I.1, la réaction globale dans une pile SOFC utilisant comme combustible le H<sub>2</sub> et comme comburant l'oxygène est comme suit :



Ce type des piles a la plus haute température de fonctionnement qu'elle peut atteindre 1050°C, donc l'eau produite dans ce cas est à l'état gazeux.

Le calcul de la tension à vide (circuit ouvert) de la pile SOFC peut être effectué en suivant la même méthode utilisée dans le chapitre précédent. Pour cela, des équations seront considérées connues préalablement et leurs démonstrations ne seront pas revues.

L'application de la loi de **Nernst** sur l'équation (III.1) donne l'expression de la tension idéale en fonction des conditions de fonctionnement qui est comme suit :

$$E = E^\circ + (RT/2F) \ln(P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{0.5} / P_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (\text{III.2})$$

Avec:

$E^\circ$ : la tension standard (pression standard et température variable) ;

R : la constante des gaz parfaits (8.314 J/mol/K) ;

T : la température de fonctionnement en Kelvin ;

$P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  et  $P_{H_2O}$  : les pressions partielles de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau respectivement en [atm].

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

Ces paramètres sont donnés dans le tableau suivant :

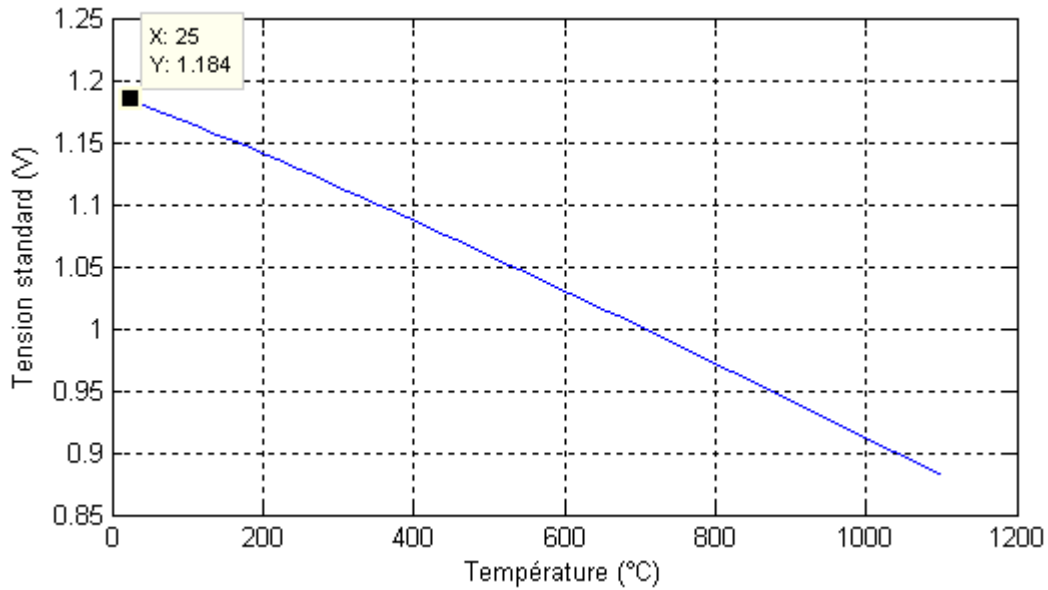
	$H^\circ$ (298.15) [J/mol]	$S^\circ$ (298.15) [J/mol/K]
$H_2Og$	-241.8	188.7

**Tableau III.1** : Entropie et enthalpie aux conditions standard de la vapeur d'eau [Chim.G].

A noter que les paramètres concernant l'hydrogène et l'oxygène ne seront pas changés, et leurs valeurs sont les mêmes données dans le tableau II.2.

Les valeurs données par le tableau III.1 seront utilisées pour calculer l'entropie et l'enthalpie standard de la vapeur d'eau en fonction de la température.

L'application numérique sur les relations (II.15), (II.16), (II.13.a), (II.13.b), (II.13) et (II.8) permet le tracé de la tension standard en fonction de la température. L'allure obtenue est donnée par la figure suivante.



**Figure III.1** : Tension standard en fonction de la température (cas vapeur).

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

$$E^{\circ} = 1.184 - 2,83 \cdot 10^{-4}(T - 298,15) \quad (\text{III.3})$$

Avec T la température exprimée en Kelvin.

Pour une température de 1000°C, la valeur de  $E^{\circ}$  est 0.91V.

Donc l'équation (III.2) devienne :

$$E = 1.184 - 2,83 \cdot 10^{-4} + (RT/2F) \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5} / P_{H_2O}) \quad (\text{III.4})$$

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

### **Calcul des pressions partielles**

La méthode suivie pour calculer les pressions partielles des différents constituants qui se trouvent à l'intérieur de la pile SOFC n'est pas semblable à celle suivie dans le modèle du PEMFC. Dans ce cas ; le calcul des pressions est en fonction des débits molaires des gaz (entrants, sortants et consommés) de chaque compartiment anodique et cathodique.

Prenons le cas d'hydrogène, qui est en réalité stocké dans une bouteille sous pression, et pour qu'il sera utilisé pour alimenter une pile à combustible, une vanne placée entre le réservoir de stockage et la coté anode de la pile est nécessaire pour bien contrôler le débit d'hydrogène qui

entre dans la pile. La pression aussi dans le compartiment anodique doit être contrôlée, pour cela une autre vanne est placée à la sortie de l'anode, comme le montre la figure III.2.

L'ensemble des débits molaires qu'on peut les définir pour l'hydrogène sont :

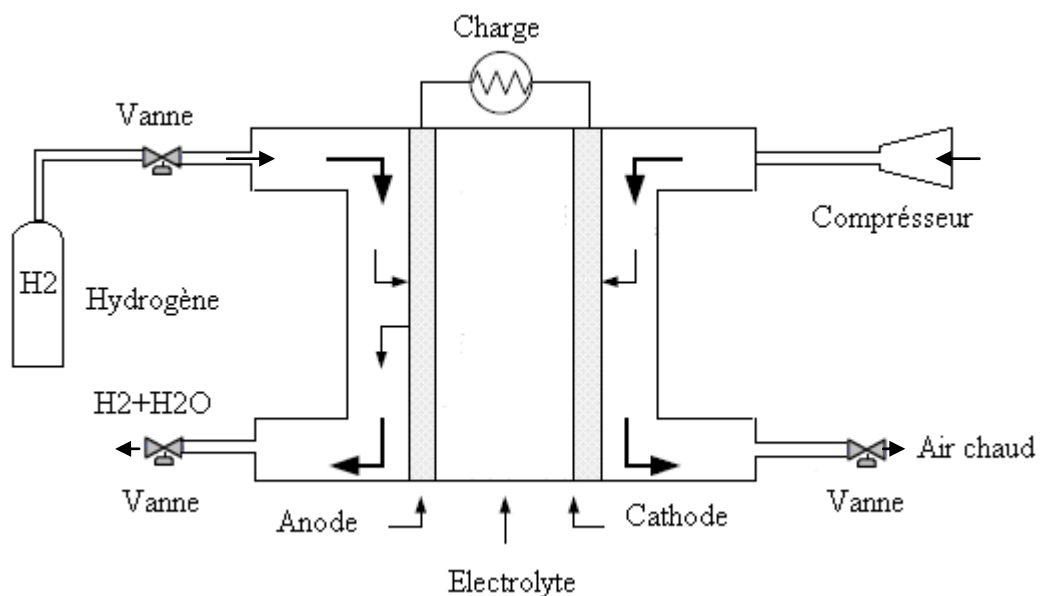
- Le débit qui entre dans le compartiment anodique défini par  $q_{H_2}^{in}$  ;
- Le débit consommé se qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et l'électricité défini par  $q_{H_2}^r$  ;
- Le débit qui sort du compartiment sans participé dans la réaction défini par  $q_{H_2}^{out}$  .

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

$$P_{H_2}V_{an} = n_{H_2}RT \quad (III.5)$$

Avec :

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



**Figure III.2 :** Schéma d'un système pile à combustible SOFC.

Les paramètres  $V_{an}$ ,  $R$  et  $T$  sont considérés constants. La dérivé de l'équation (III.5) donne :

$$\frac{d}{dt}(P_{H2}) = \frac{RT}{V_{an}} q_{H2} \quad (III.6)$$

Tel que :  $q_{H2}$  est le débit molaire de l'hydrogène et qui est la dérivé de  $n_{H2}$  exprimé en [kmol/s].

Avec :

$$q_{H2} = q_{H2}^{in} - q_{H2}^{out} - q_{H2}^r \quad (III.7)$$

Ainsi :

$$\frac{d}{dt}(p_{H2}) = RT/V_{an} (q_{H2}^{in} - q_{H2}^{out} - q_{H2}^r) \quad (III.8)$$

D'après [Wang-06], l'expression du débit molaire consommé est donnée en fonction du courant circulant dans la pile selon la loi de Faraday comme suit:

$$q_{H2}^r = N_{cel}/(2F)I_{fc}^r = 2K_r I_{fc}^r \quad (III.9)$$

Tel que :

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

On doit exprimer le débit molaire d'hydrogène qui sort de l'anode  $q_{H2}^{out}$  en fonction de sa pression à l'intérieur d'électrode  $P_{H2}$ . Pour cela on prend le cas général d'un orifice étouffé, alimenté avec une mixture de gaz ayant la masse molaire moyenne  $M$  [MOGOS-05].

A température constante, l'orifice présente la caractéristique suivante [J.PAD-00]:

$$W/P_u = K' \sqrt{M} \quad (III.10)$$

Avec :

- $W$  est le débit massique sortant du canal [kg/s] ;
- $K'$  est la constante de la vanne qui dépend en principal de la surface d'orifice [ $\sqrt{\text{kmol} \cdot \text{kg}/(\text{atm} \cdot \text{s})}$ ] ;
- $P_u$  est la pression à l'intérieur du canal [atm],

- $M$  est la masse molaire [kg/kmol].

La dépendance du débit massique ( $W$ ) avec celui molaire ( $q$ ) est comme suit :

$$W = qM \quad (\text{III.11})$$

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

$$q_{H_2}^{out} / P_{H_2} = K_{an} / \sqrt{M_{H_2}} = K_{H_2} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

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

En substituant (III.9) et (III.12) dans (III.8) on obtient :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = RT/V_{an} (q_{H_2}^{in} - K_{H_2}P_{H_2} - 2K_r I_{fc}^r) \quad (\text{III.13})$$

Après simplification du (III.13) et application de la transformé de Laplace on trouve :

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{\left(1 + \frac{V_{an}}{RTK_{H_2}} s\right)} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}^r) \quad (\text{III.14})$$

On posant :  $\tau_{H_2} = V_{an}/(RTK_{H_2})$  l'équation (III.14) devient :

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{(1 + \tau_{H_2} s)} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}^r) \quad (\text{III.15})$$

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

Pour l'oxygène :

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{(1 + \tau_{O_2} s)} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{fc}^r) \quad (\text{III.16})$$

Pour la vapeur d'eau :

$$P_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{(1 + \tau_{H_2O} s)} 2K_r I_{fc}^r \quad (\text{III.17})$$

**Notes :**

- L'expression du débit molaire d'oxygène consommée est donnée par :

$$q_{O_2}^r = N_{cel} I_{fc}^r / 4F \quad (III.18)$$

On voit que la quantité d'oxygène consommée représente la moitié de celle de l'hydrogène. On peut expliquer ça par le fait que pour former une molécule d'eau, on a besoin de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène, comme le montre l'équation (III.1).

- Dans l'équation (III.17), on ne trouve pas l'expression du débit molaire d'eau entrant ( $q_{H_2O}^{in}$ ), car l'eau est produite à l'intérieur de la pile.

**III.2.2 Performances réelles**

Les différentes chutes qui apparaissent au niveau de la pile SOFC lors du fonctionnement en charge sont les mêmes définies pour une pile PEMFC qui sont :

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

D'après les références [MOGOS-05], [J.PAD-00] et [F.J-M.V\_05], la seule source de pertes considérée est de type ohmique. Les pertes d'activation et les pertes de concentration de l'oxygène et de l'hydrogène sont négligeables.

L'expression des chutes ohmique est :

$$V_{ohm} = r I_{fc}^r \quad (III.19)$$

Avec :  $r$  représente la résistance totale de la pile.

**III.2.3 Expression de la tension en charge de la pile**

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

$$V_{pil} = N_{cel} \left( 1.184 - 2,83 \cdot 10^{-4} (T - 298,15) + (RT/2F) \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right) - r I_{fc}^r \quad (III.20)$$

**III.3 Système de commande d'une pile à combustible type SOFC**

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

Plusieurs contraintes doivent être appliquées entre ces trois grandeurs de manière à assurer un fonctionnement correct en transitoire et optimale en régime permanent [MOGOS-05].

### III.3.1 Rapport entre les débits des réactants

Le rapport entre les débits des réactants ayant le but de déterminer le débit molaire d'oxygène convenable avec le débit d'hydrogène fourni à la pile, en agissant sur la vitesse de rotation du compresseur d'air. Ce rapport est défini par l'expression suivante :

$$r_{H-O} = q_{H_2}^{in} / q_{O_2}^{in} \quad (III.21)$$

D'après [MOGOS-05], 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.

### III.3.2 Taux d'utilisation du combustible

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

$$U = q_{H_2}^r / q_{H_2}^{in} \quad (III.22)$$

Si on règle la valeur de (U) à une valeur optimale ( $U_{opt}$ ), et à l'aide de l'équation (III.9), on peut définir la grandeur de référence du débit d'hydrogène fourni à la pile en fonction du courant comme suivant :

$$q_{H_2}^{ref} = 2K_r I_{fc}^r / U_{opt} \quad (III.23)$$

Le débit d'oxygène de référence peut être aussi déterminé à partir de (III.21) comme suit :

$$q_{O_2}^{ref} = q_{H_2}^{ref} / r_{H-O} \quad (III.24)$$

Il est possible de mesurer le courant à la sortie de la pile, sa valeur va déterminer le débit de référence du combustible et comburant, et par l'intermédiaire d'un processeur de combustible, le débit d'hydrogène effectivement injecté dans la pile sera contrôlé. La même chose pour le comburant, où le réglage de son débit est fait par un compresseur.

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  $\tau_f$  [MOGOS-05].

$$q_{H_2}^{in}/q_{H_2}^{ref} = 1/(1 + \tau_f s) \quad (III.25)$$

$$q_{O_2}^{in}/q_{O_2}^{ref} = 1/(1 + \tau_f s) \quad (III.26)$$

### III.3.3 Limitation du courant

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

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

Donc :

$$U_{min} q_{H_2}^{in}/2K_r \leq I_{fc}^r \leq U_{max} q_{H_2}^{in}/2K_r \quad (III.27)$$

### III.3.4 Consigne du courant

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

$$I_{fc}^{ref} = P_{ref}/V_{pil} \quad (III.28)$$

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  $\tau_e$  [F.J, M.V-05] [Y. Zhu-02]:

$$I_{fc}^r = I_{fc}^{ref}/(1 + \tau_e \cdot s) \quad (III.29)$$

Si on suppose que la dynamique de réglage du courant est quasi infinie, l'équation (III.27) s'écrit :

$$U_{min} q_{H_2}^{in}/2K_r \leq I_{fc}^{ref} \leq U_{max} q_{H_2}^{in}/2K_r \quad (III.30)$$

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

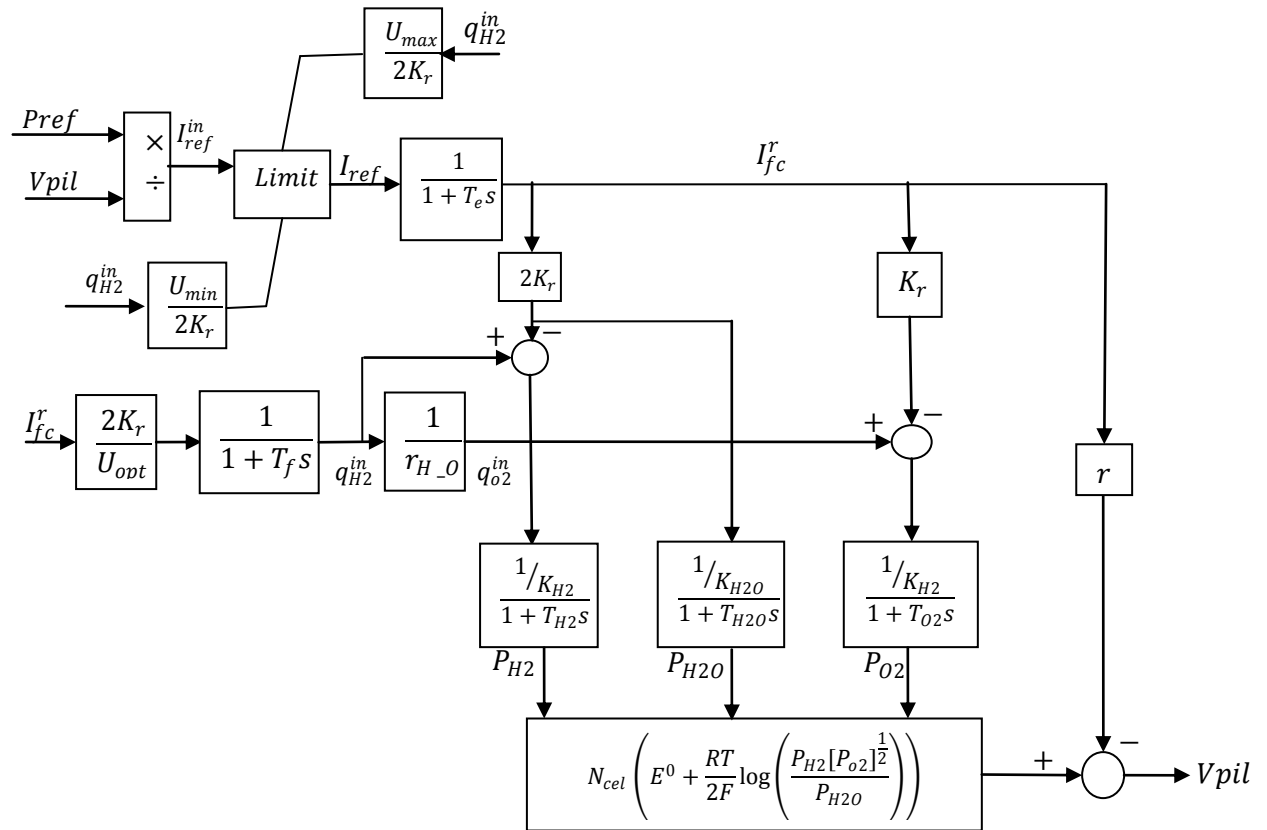


Figure III.3 : Schémas bloc du modèle d'une pile SOFC.

### III. 4 Paramètres de simulation

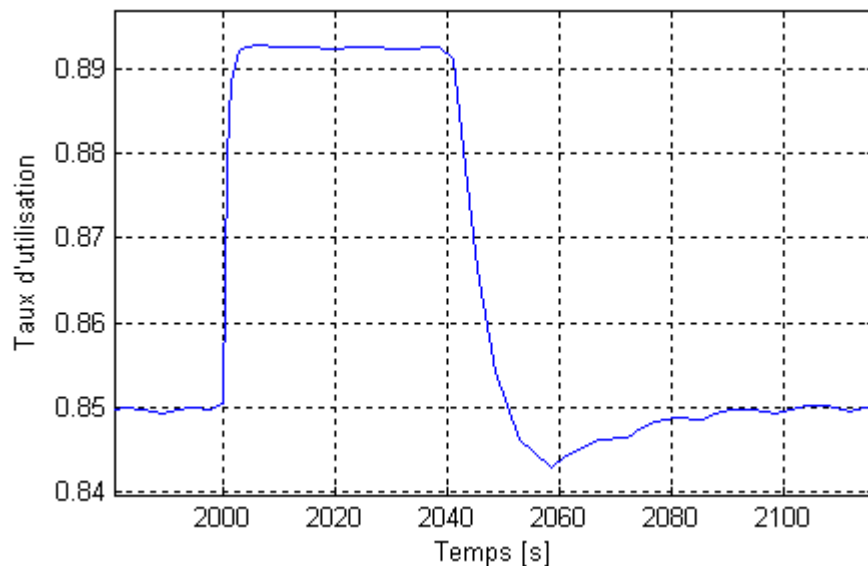
D'après les références [Y. Zhu-02], [J. PAD-00] et [A. Hahn-04], les paramètres de simulation sont donnés pour un système de production décentralisé à base de pile à combustible à oxyde solide (SOFC) avec une puissance nominale de 100kW. Ces paramètres sont donnés dans le tableau suivant:

paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Puissance nominale	100 kW	$K_{O_2}$	$2.52 \cdot 10^{-3}$
T	1273 [K]	$\tau_{O_2}$	2.91
$N_{cel}$	384	$K_{H_2O}$	$2.81 \cdot 10^{-4}$
$K_r$	$0.996 \cdot 10^{-6}$	$\tau_{H_2O}$	78.3
$U_{max}$	0.9	$r$	0.126
$U_{opt}$	0.85	$\tau_e$	0.8 s
$U_{min}$	0.8	$\tau_f$	5 s
$K_{H_2}$	$8.34 \cdot 10^{-4}$	$r_{H-O}$	1.145
$\tau_{H_2}$	26.1		

**Tableau III.2 :** Paramètres de simulation.

La simulation est faite pour voir la réponse du système en fonction de la variation de la puissance de référence demandée. Cette dernière a initialement une valeur de 70 kW et à l'instant  $t=2000s$ , on la change brusquement à une valeur de 100 kW.

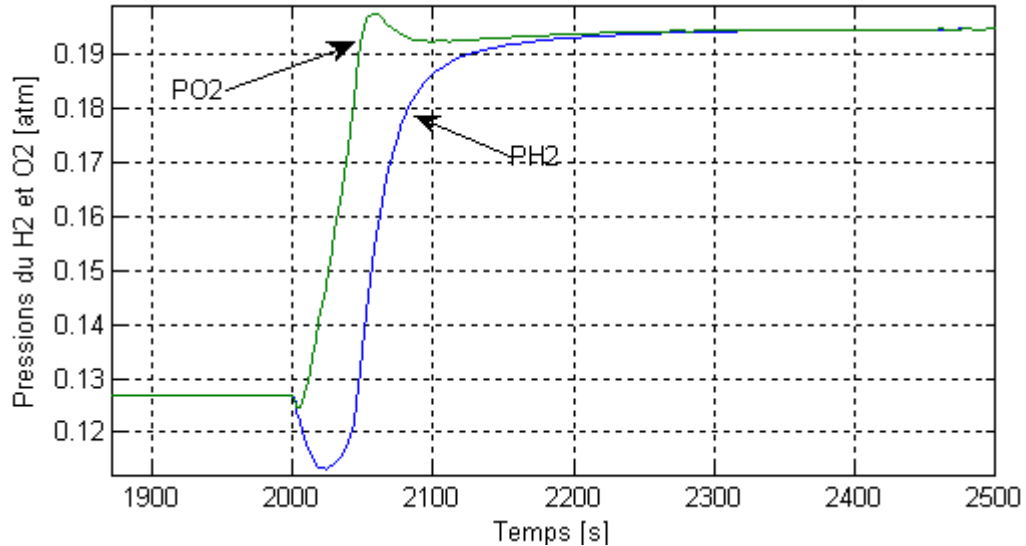
### III.5 Simulation et interprétation des résultats



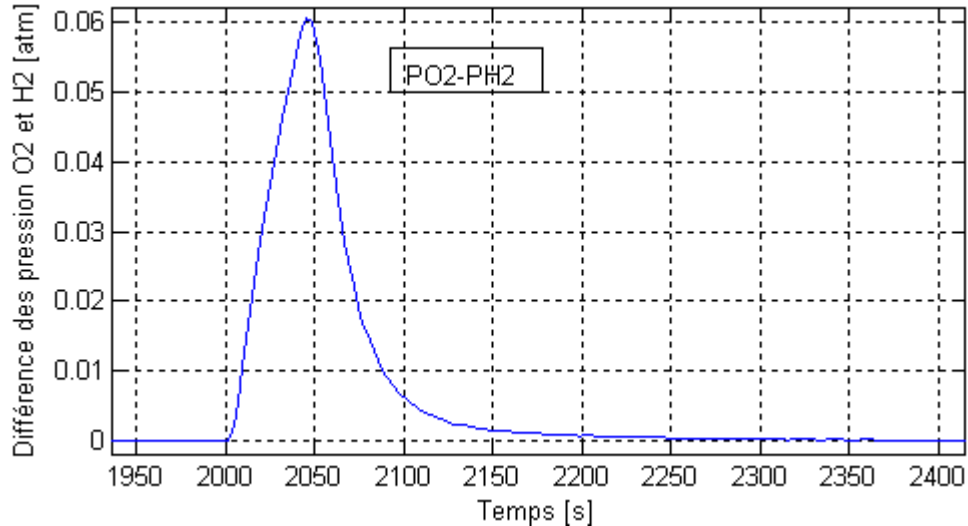
**Figure III.4 :** Taux d'utilisation du combustible.

Cette figure montre la variation du taux d'utilisation du combustible pendant le changement de la puissance demandée. On remarque que sa valeur est égale au taux d'utilisation optimal quand la puissance délivrée est de 70 kW. Le basculement de la consigne de la puissance de

70 à 100 kW a obligé le système de consommer le maximum du combustible pour satisfaire le besoin de la charge. Où une durée de 4 à 5 s était suffisante pour que le taux d'utilisation atteigne sa valeur maximale. Cette dernière était gardée durant 35 s, puis elle a diminuée à la valeur optimale après presque 25 s.



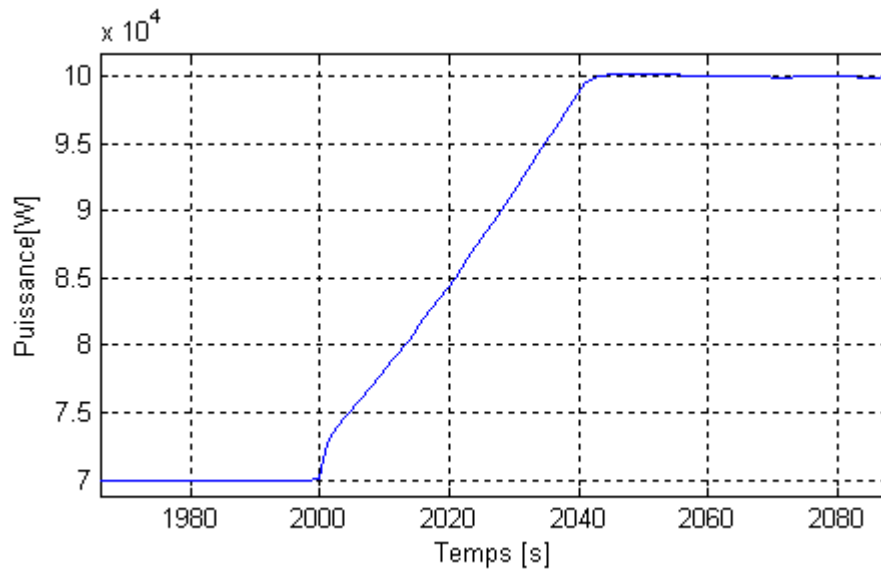
**Figure III.5 :** Pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène.



**Figure III.6 :** Différence entre pression d'oxygène et d'hydrogène.

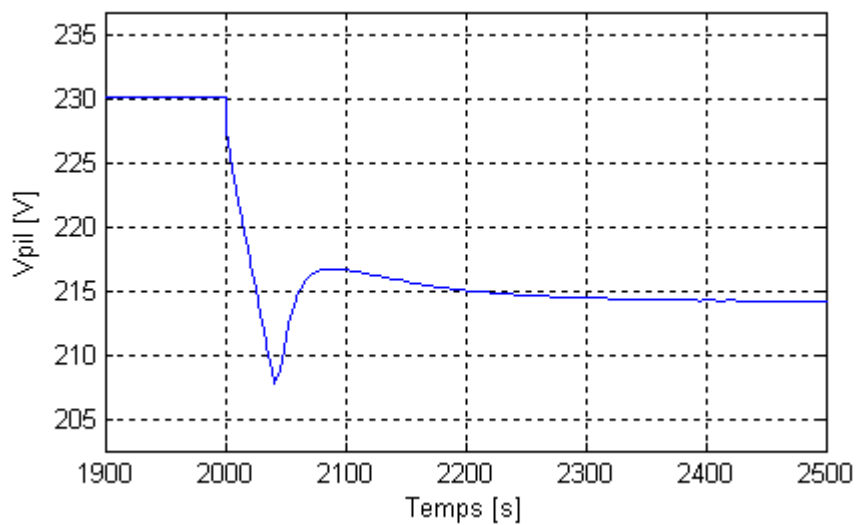
La figure III.5 montre le changement des pressions d'oxygène et d'hydrogène pendant le régime transitoire, où on remarque que l'oxygène est fourni en excès, ça permet la réaction plus complète avec l'hydrogène. Ce dernier est limité par le taux d'utilisation.

D'après la figure III.6, la différence entre pressions a accédé une valeur maximale de 6 kPa qu'elle est inférieure à 8 kPa.

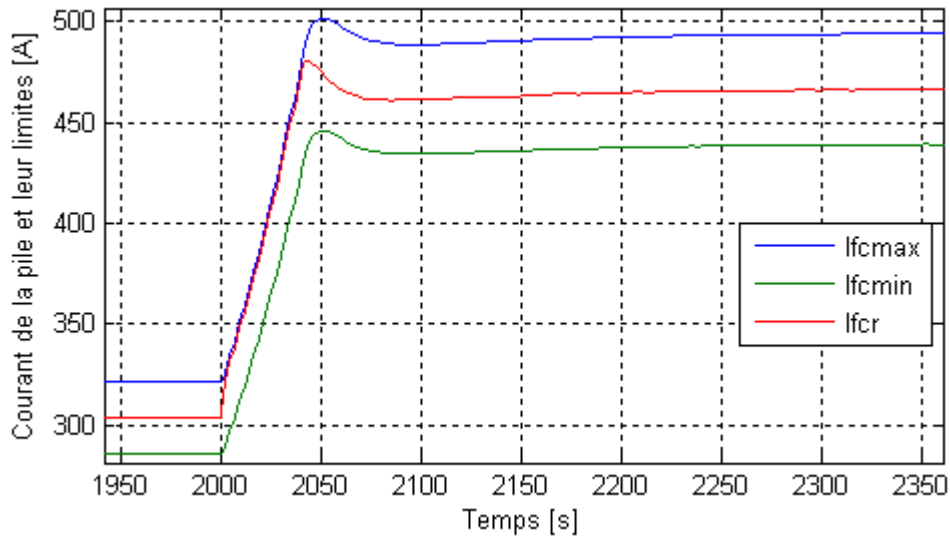


**Figure III.7 :** Puissance délivrée par la pile.

Cette figure montre la puissance effectivement délivrée par la pile vers la charge, où on remarque qu'elle augmente rapidement pendant 0.8 s après le changement de la consigne de la puissance, cette durée représente le temps de réponse électrique. Ensuite elle augmente lentement à cause de la lenteur de la réponse chimique. La pile a réussi de délivrer la puissance demandée après 43 s.



**Figure III.8 :** Tension aux bornes du stack.



**Figure III.9 :** Courant délivré par la pile et ses limites.

D'après ces deux dernières figures, on peut remarquer la dépendance de la tension aux bornes de la pile, avec le courant qui la traverse. Où l'augmentation de ce dernier a engendré la chute de la tension.

D'après la figure III.9, on voit clairement l'effet du limiteur de courant, qui a empêché le courant de prendre des valeurs destructives pendant le régime transitoire.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation d'une pile SOFC, et on a visualisé les différentes réponses des paramètres influents sur son fonctionnement. On a trouvé que le système réagit correctement pendant la variation de la puissance de consigne demandée par la charge avec un temps de réponse relativement lent. Dans les applications qui nécessitent un temps de réponse plus rapide le 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.

# *Application du PEM dans une chaîne d'entraînement pour moteur asynchrone*

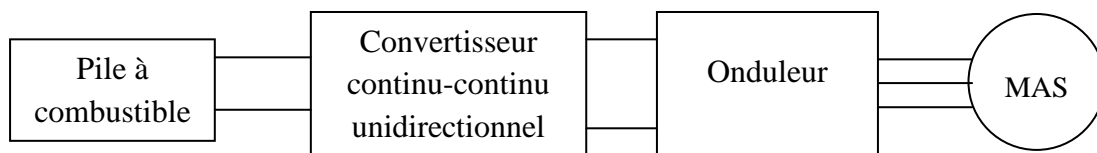
## *IV.1 Introduction*

Dans les systèmes électromécaniques ayant comme source d'énergie les piles à combustible, on a souvent la tendance de les équiper avec des convertisseurs électroniques, comme les hacheurs et les onduleurs. Les hacheurs utilisés sont généralement de type survolteur (boost) dont le rôle est d'amplifier la tension délivrée par la pile qui est souvent très faible. Les onduleurs sont utilisés pour réaliser la conversion DC/AC en cas des charges à courant alternatif.

Dans ce chapitre on va étudier le comportement d'une pile à combustible de type PEM dans un système d'entraînement d'un moteur asynchrone.

## *IV.2 Architecture d'un système électromécanique à pile à combustible*

Plusieurs montages peuvent être imaginés pour construire un système électromécanique à pile à combustible. Ces montages se différencient selon : la tension délivrée par la pile basse ou élevée, la charge à entraîner continue ou alternative, et on peut aussi ajouter l'existence ou non de l'élément de stockage d'énergie. Dans la figure suivante, on présente le montage général d'un système électromécanique à pile à combustible où le système de stockage n'est pas présenté.



*Figure IV.1* : Structure d'un système électromécanique à pile à combustible.

L'utilisation du convertisseur continu-continu dépend de la tension délivrée par la pile, si cette dernière est élevée on peut faire l'économie de ce convertisseur. Concernant le convertisseur continu – alternatif, il ne sera pas utilisé dans le cas où la charge est continue.

La structure présentée par la figure IV.1 sera adoptée dans ce chapitre. La source d'énergie est une pile à combustible de type PEM. La modélisation de l'ensemble des deux convertisseurs avec la charge alternative (moteur asynchrone) est une étape nécessaire pour analyser le fonctionnement de ce système.

Donc, ce chapitre sera décomposé en deux parties, l'une est réservée pour la modélisation de la cascade et l'autre pour la simulation.

### IV.3 Etude d'un hacheur élévateur de tension

#### IV.3.1 Structure idéale

La structure idéale d'un hacheur élévateur est donnée par le schéma suivant :

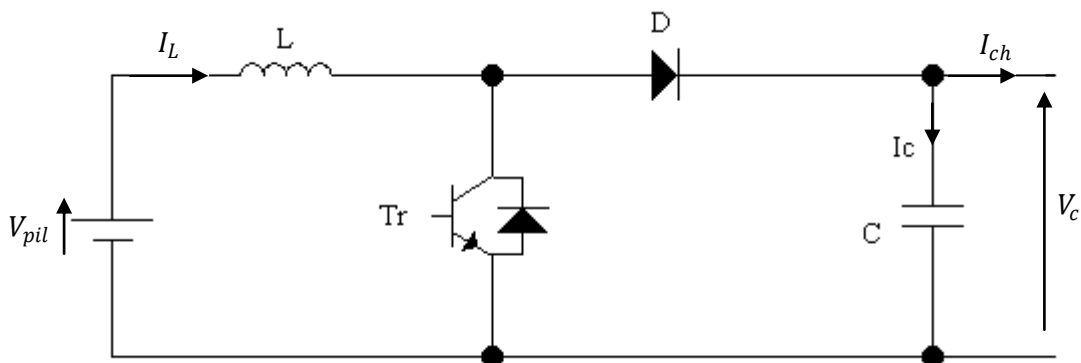


Figure IV.2 : Schéma d'un hacheur élévateur.

Avec  $T_r$  est un transistor commandé à l'ouverture et la fermeture ;  $D$  est une diode ;  $V_{pil}$  est la tension délivrée par la pile ;  $L$  est une inductance de lissage qui limite l'ondulation du courant ( $I_L$ ) dans le convertisseur ;  $C$  est une capacitance de filtrage qui limite l'ondulation de la tension à la sortie du convertisseur ( $V_c$ ).

#### IV.3.2 Modélisation du hacheur

Il existe différents niveaux de modélisation électrique des convertisseurs, niveaux que l'on peut classer par ordre décroissant de complexité comme suit : le modèle instantané, le modèle moyen et le modèle moyen linéarisé [Thou-05].

Le modèle instantané consiste à résoudre les différentes équations différentielles qui donnent les tensions et courants instantanés dans les différentes branches du circuit électrique.

Le modèle moyen est issu du modèle instantané, il étudie le comportement du circuit électrique dans une période de découpage ( $T_d$ ), où les variables sont en valeurs moyennes.

Le modèle moyen linéarisé est obtenu à partir du modèle moyen, pour lequel les variables sont décomposés en un terme constant associé au point de fonctionnement considéré, et un terme de variation.

Dans la partie suivante on s'intéresse par les deux premiers modèles.

#### **IV.3.2.1 Modélisation en valeurs instantanées**

Le convertisseur présenté par la figure IV.2 est caractérisé par deux séquences de fonctionnements qui dépendent de l'état logique du transistor ( $T_r$ ), soit ouvert ou fermé. Le système d'équation différentielle relevé pour chaque séquence est le suivant :

Pour  $T_r$  passant :

$$\begin{cases} V_{pil} = L \frac{di_L}{dt} \\ 0 = C \frac{dv_c}{dt} + i_{ch} \end{cases} \quad (IV.1)$$

Pour  $T_r$  bloqué :

$$\begin{cases} V_{pil} = L \frac{di_L}{dt} + v_c \\ i_L = C \frac{dv_c}{dt} + i_{ch} \end{cases} \quad (IV.2)$$

En posant  $u=0$  lorsque le transistor est ouvert et  $u=1$  lorsque le transistor est fermé, les systèmes d'équations (IV.1) et (IV.2) peuvent être représentés par un seul système d'équations comme suit :

$$\begin{cases} V_{pil} = L \frac{di_L}{dt} + (1 - u)v_c \\ (1 - u)i_L = C \frac{dv_c}{dt} + i_{ch} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Avec :

- $u$  : Signal de commande du transistor ;
- $i_{ch}$  : Courant de charge ;
- $i_L$  : Courant traversant l'inductance ;
- $v_c$  : Tension de sortie de l'hacheur.

Ce modèle est utilisé directement pour réaliser la simulation du hacheur.

### IV.3.2.2 Modélisation moyenne

Dans le modèle moyen, les variables définies précédemment  $v_c$ ,  $i_L$ ,  $i_{ch}$  et  $u$  seront remplacés par leurs valeurs moyennes sur une période de découpage ( $T_d$ ) qui sont  $V_c$ ,  $I_L$ ,  $I_{ch}$  et  $\alpha$  respectivement, et le système d'équations qui décrit ce modèle sera :

$$\begin{cases} V_{pil} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_c \\ (1 - \alpha)I_L = C \frac{dV_c}{dt} + I_{ch} \end{cases} \quad (IV.4)$$

Avec :  $\alpha$  est le rapport cyclique (temps de conduction du transistor rapporté au période de découpage).

### IV.3.3 Dimensionnement du hacheur

Le dimensionnement consiste à calculer la valeur de l'inductance  $L$  qui limite l'ondulation du courant qui la traverse à une valeur admissible, et aussi de déterminer la valeur de la capacitance  $C$  qui permet de limiter l'ondulation de la tension à la sortie du hacheur à sa valeur désirée.

#### IV.3.3.1 Calcul de l'inductance

L'ondulation du courant est représentée sur une période de découpage par la figure suivante :

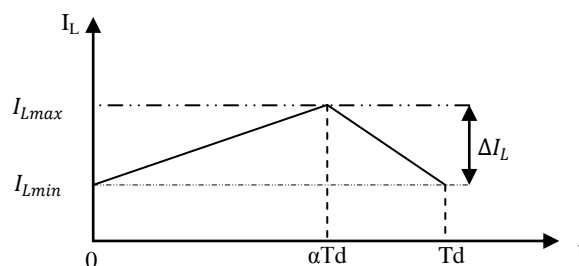


Figure IV.3 : Forme d'ondulation du courant dans l'inductance.

Pour  $t \in [0, \alpha T_d]$ , l'expression du courant dans l'inductance est comme suit :

$$I_L(t) = \frac{V_{pil}}{L} t + I_{Lmin} \quad (IV.5)$$

A  $t = \alpha T_d$  :

$$I_L(\alpha T_d) = \frac{V_{pil}}{L} \alpha T_d + I_{Lmin} = I_{Lmax} \quad (IV.6)$$

Pour  $t \in [\alpha T_d, T_d]$ , l'expression du courant dans l'inductance est comme suit :

$$I_L(t) = \frac{V_{pil} - V_c}{L} (t - \alpha T_d) + I_{Lmax} \quad (IV.7)$$

A  $t = T_d$  :

$$I_L(T_d) = \frac{V_{pil} - V_c}{L} (1 - \alpha) T_d + I_{Lmax} = I_{Lmin} \quad (IV.8)$$

L'expression de l'ondulation du courant est définie comme suit :

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (IV.9)$$

D'après (IV.6) :

$$\Delta I_L = \frac{V_{pil}}{L} \alpha T_d \quad (IV.10)$$

Et d'après (IV.8) :

$$\Delta I_L = -\frac{V_{pil} - V_c}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (IV.11)$$

En faisant l'égalité des équations (IV.10) et (IV.11) on obtient :

$$V_{pil} = V_c (1 - \alpha) \quad (IV.12)$$

En posant  $f_d = 1/T_d$  et en substituant (IV.12) dans (IV.10) on obtient :

$$\Delta I_L = \frac{V_c}{L f_d} \alpha (1 - \alpha) \quad (IV.13)$$

La valeur de  $\alpha$  pour laquelle l'ondulation prend une valeur maximale se calcule comme suit :

$$\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = \frac{(-2\alpha+1)}{L f_d} V_c = 0 \quad (IV.14)$$

Ce qui conduit à une valeur de  $\alpha = 0.5$ .

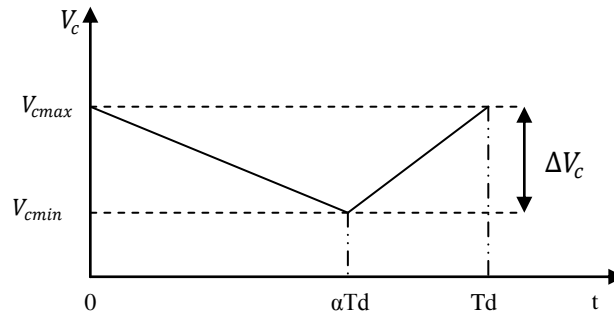
Donc l'expression qui donne la valeur minimale de l'inductance  $L$  est comme suit :

$$L_{min} = \frac{V_c}{4 \Delta I_{Lmax} f_d} \quad (IV.15)$$

### IV.3.3.2 Calcul de la capacité

Le calcul de la capacité du filtrage se fait en suivant les mêmes étapes effectuées pour l'inductance.

La figure suivante montre l'ondulation de la tension à la sortie de l'hacheur.



**Figure IV.4 :** Forme d'ondulation de tension de sortie de l'hacheur.

Pour  $t \in [0, \alpha T_d]$ , on a :

$$V_c(t) = -\frac{I_{ch}}{C}t + V_{cmax} \quad (IV.16)$$

A  $t = \alpha T_d$  :

$$V_c(\alpha T_d) = -\frac{I_{ch}}{C}\alpha T_d + V_{cmax} = V_{cmin} \quad (IV.17)$$

Pour  $t \in [\alpha T_d, T_d]$ , on a :

$$V_c(t) = \frac{I_L - I_{ch}}{C}(t - \alpha T_d) + V_{cmin} \quad (IV.18)$$

A  $t = T_d$  :

$$V_c(T_d) = \frac{I_L - I_{ch}}{C}(1 - \alpha)T_d + V_{cmin} = V_{cmax} \quad (IV.19)$$

Et on a :

$$\Delta V_c = V_{cmax} - V_{cmin} \quad (IV.20)$$

D'après (IV.17) et (IV.19) :

$$\Delta V_c = \frac{I_{ch}}{C} \alpha T_d = \frac{I_L - I_{ch}}{C} (1 - \alpha) T_d \quad (\text{IV.21})$$

Après développement de l'équation (IV.21) on trouve :

$$I_{ch} = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{IV.22})$$

En substituant (IV.22) dans (IV.21) et en posant  $f_d = 1/T_d$  on trouve :

$$\Delta V_c = \frac{I_L}{f_d C} \alpha (1 - \alpha) \quad (\text{IV.23})$$

Pour  $\alpha = 0.5$  l'ondulation est maximale, et la valeur minimale de la capacité se calcule comme suit :

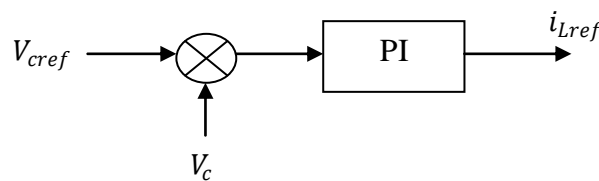
$$C_{min} = \frac{I_L}{4 f_d \Delta V_{cmax}} \quad (\text{IV.24})$$

#### IV.3.4 Commande du hacheur

L'hacheur sera piloté via le signal de grille ( $u$ ) du transistor ( $T_r$ ), selon le principe de la modulation de largeur d'impulsion (MLI). La commande se fait par une régulation cascade tension-courant.

##### IV.3.4.1 Boucle de la tension

La boucle de tension doit maintenir la tension à la sortie du hacheur à sa valeur de référence  $V_{cref}$  malgré les demandes de puissance par la charge et malgré les variations de tension de la pile à combustible. Le régulateur adopté est de type PI (Proportionnelle-Intégrateur) qui délivre une référence de courant ( $i_{Lref}$ ).

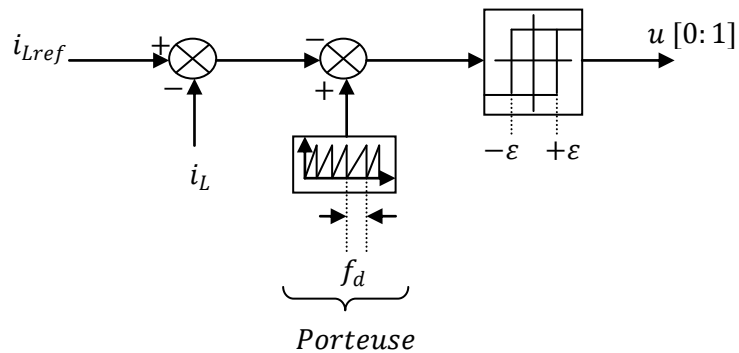


**Figure IV.5 :** Asservissement de la tension.

**IV.3.4.2 Boucle de courant**

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produit entre la commande 'u' et les variables  $v_c$  et  $i_L$  [Lachaize-04]. Pour le contrôle du courant on utilise un régulateur de type hystérésis. La fréquence fixe est obtenue par l'adjonction d'un signal porteur triangulaire sur la référence de courant. Il s'agit de l'hystérésis modulée [Lachichi-05].

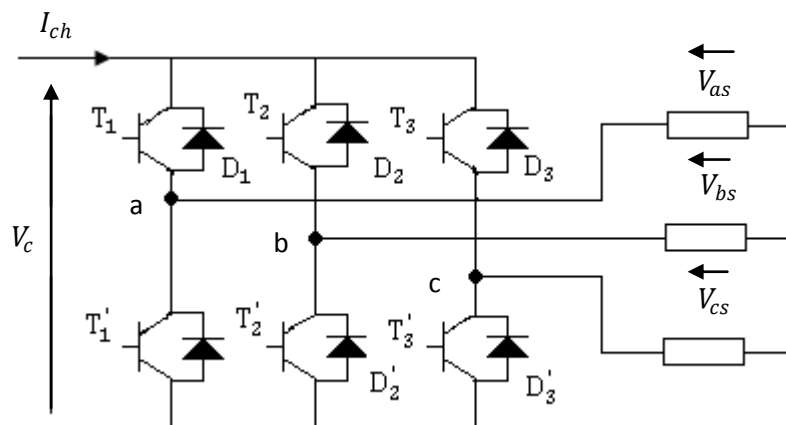
La structure de ce correcteur est comme suit :



**Figure IV.6 :** Control du courant par régulateur hystérésis modulée.

**IV.4 Etude d'un onduleur de tension**

L'onduleur à étudier est un onduleur de tension, son montage est représenté dans la figure suivante :



**Figure IV.7 :** Schéma d'un onduleur de tension.

**IV.4.1 Modélisation de l'onduleur**

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique  $F_i$  ( $i=1, 2, 3$ ).

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé, } T_i' \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert, } T_i' \text{ est fermé} \end{cases}$$

Les tensions entre lignes à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_c(F_1 - F_2) \quad (\text{IV.25})$$

$$U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_c(F_2 - F_3) \quad (\text{IV.26})$$

$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_c(F_3 - F_1) \quad (\text{IV.27})$$

$U_{ab}, U_{bc}$  et  $U_{ca}$  : Les trois tensions composées de l'onduleur

On admet que les tensions  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$  et  $V_{cs}$  forment un système de tensions triphasé équilibré il vient :

$$V_{as} = \frac{V_c}{3}(2F_1 - F_3 - F_2) \quad (\text{IV.28})$$

$$V_{bs} = \frac{V_c}{3}(2F_2 - F_1 - F_3) \quad (\text{IV.29})$$

$$V_{cs} = \frac{V_c}{3}(2F_3 - F_1 - F_2) \quad (\text{IV.30})$$

$V_{as}, V_{bs}$  et  $V_{cs}$  Les trois tensions simples de l'onduleur

Sous forme matriciel

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.31})$$

L'expression du courant à l'entrée de l'onduleur est :

$$i_{ch} = F_1 i_{as} + F_2 i_{bs} + F_3 i_{cs} \quad (\text{IV.32})$$

#### **IV.4.2 Commande de l'onduleur**

Il existe plusieurs méthodes pour commander les interrupteurs de l'onduleur, nous allons étudier dans notre cas la stratégie de commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

#### **IV.4.3 Stratégie de commande (MLI)**

Le principe de la commande MLI consiste à comparer entre deux ondes :

- Onde de modulation (porteuse) :  $U_p$  de forme triangulaire de fréquence très élevée ( $F_p$ ).
- Onde de référence: Une onde de forme sinusoïdale de fréquence voulue  $F_r$ .

La commande MLI est caractérisée par deux paramètres:

- L'indice de modulation  $m$  :

$$m = \frac{F_p}{F_r} \quad (\text{IV.33})$$

- Coefficient de réglage  $r$  :

$$r = \frac{U_{rmax}}{U_{pmax}} \quad (\text{IV.34})$$

#### **IV.4.4 Algorithme de commande**

Les signaux de commande des transistors sont générés par l'algorithme suivant :

$$\text{If } U_{ri} > U_p \text{ Then } F_i = 1 \text{ Else } F_i = 0 \text{ End } i=1, 2, 3. \quad (\text{IV.35})$$

Tel que, les signaux de référence sont données par :

$$U_{ri} = U_{rmax} \sin\left(2\pi F_r t - \frac{2\pi}{3}(i-1)\right); i=1, 2, 3. \quad (\text{IV.36})$$

Et l'équation de la porteuse est comme suit:

$$U_p = \frac{2}{\pi} \text{asin}(\sin(2\pi F_p t)) \quad (\text{IV.37})$$

#### **IV.5 Modélisation de la machine asynchrone**

Pour modéliser la machine asynchrone il faut tenir compte de quelques hypothèses simplificatrices.

##### **IV.5.1 Hypothèses simplificatrices**

En vue simplifier la modélisation de la machine asynchrone, on va admettre les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La parfaite symétrie de la machine;
- L'absence de saturation et des pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et le courant de Foucault sont négligeables) ;
- La répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer supposé constant, des champs magnétiques de chaque bobinage ;

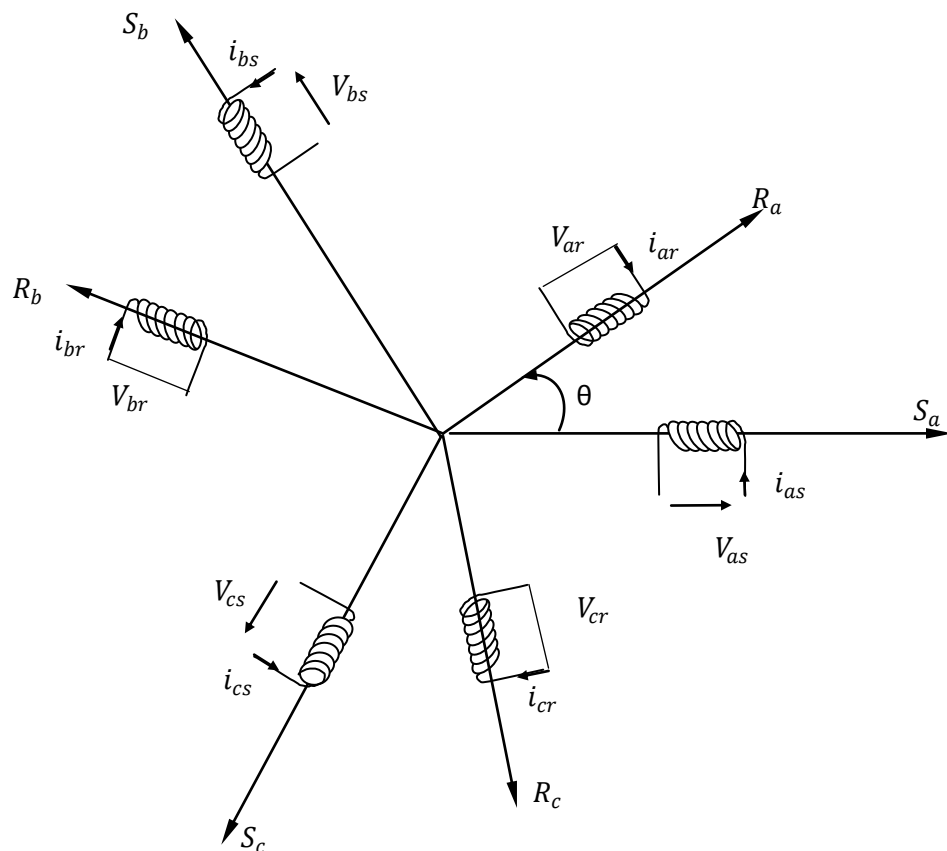
- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température du fonctionnement et on néglige également l'effet de peau ;
- L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétrique
- La cage est assimilée à un bobinage triphasé en court-circuit.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additivité des flux;
- La constance des inductances propres;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

#### IV.5.2 Modèle triphasé de la machine

Le modèle de la machine asynchrone triphasée est illustré par le schéma de la figure IV.8, les enroulements statoriques sont représentés par un système d'axe  $S_{(a,b,c)}$ , et les trois enroulements rotoriques par  $R_{(a,b,c)}$ , avec  $\theta$  désigne l'angle entre l'axe d'une phase statorique et une phase rotorique.



**Figure IV.8 :** Représentation des enroulements de la machine asynchrone dans l'espace électrique.

### IV.5.3 Mise en équations du modèle

Pour une machine équilibrée, le comportement de la machine est entièrement définie par les trois types d'équations suivants :

- Les équations électriques ;
- Les équations magnétiques ;
- Les équations mécaniques.

#### IV.5.3.1 Equations électriques

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV.38})$$

Sous forme matriciel :

$$\begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.39})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} \\ V_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} \\ V_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV.40})$$

Sous forme matriciel :

$$\begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.41})$$

Avec :

- $V_{(a,b,c)s}$  : Les tensions des trois phases statoriques ;
- $V_{(a,b,c)r}$  : Les tensions des trois phases rotoriques ;
- $i_{(a;b;c)s}$  : Les courants des trois phases statoriques ;

- $i_{(a,b,c)r}$  : Les courants des trois phases rotoriques ;
- $\phi_{(a,b,c)s}$  : Les flux des enroulements statoriques ;
- $\phi_{(a,b;c)r}$  : Les flux des enroulements rotoriques ;
- $r_s$  : Résistance statorique ;
- $r_r$  : Résistance rotorique.

#### IV.5.3.2 Equations magnétiques

La matrice des inductances  $[L_{(\theta)}]$  établit la relation entre les flux et les courants, elle comporte 36 coefficients non nuls dont la moitié dépend du temps, par l'intermédiaire de  $\theta$  (position du rotor).

Les flux sont donnés par l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \\ \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.42})$$

Ou :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \\ M_3 = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \end{cases} \quad (\text{IV.43})$$

$$\begin{pmatrix} [\phi_{(a,b,c)s}] \\ [\phi_{(a,b;c)r}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [i_{(a,b,c)s}] \\ [i_{(a,b;c)r}] \end{pmatrix} \quad (\text{IV.44})$$

Avec :

$$L_s = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{IV.44.a})$$

$$L_r = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{IV.44.b})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.44.c})$$

- $[L_s]$  : La matrice des inductances statoriques.
- $[L_r]$  : La matrice des inductances rotoriques.
- $[M_{sr}]$  : La matrice des inductances mutuelles stator-rotor qui dépend de la position du rotor.
- $[M_{rs}]$  : La matrice des inductances mutuelles rotor-stator qui dépend de la position du rotor.

#### IV.5.3.3 Equation mécanique

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{IV.45})$$

Avec :

- $\Omega$  est la vitesse de rotation de l'arbre du moteur ;
- $C_{em}$  est le couple électromagnétique ;
- $C_r$  est le couple résistant ;
- $j$  moment d'inertie de l'arbre moteur ;
- $f$  est le coefficient de frottement ;
- $P$  nombre de pair de pole.

Le couple électromagnétique est donné par l'expression qui suit :

$$C_{em} = P(i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}) \frac{d}{d\theta} \left( [M_{sr}] \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} \right) \quad (\text{IV.46})$$

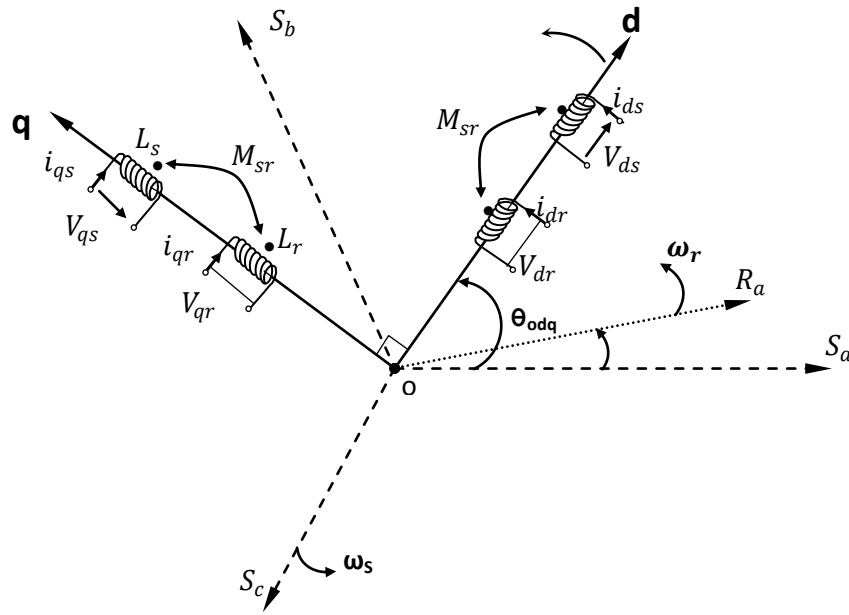
Les équations précédentes sont difficiles à résoudre à cause de :

- L'ordre des équations élevées ;
- Les matrices d'inductances mutuelles sont en fonction du temps.

Pour réduire l'ordre du système et rendre les équations indépendantes du temps on introduit la transformation de Park.

#### IV.5.4 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé  $(a, b, c)$  en un système biphasé équivalent  $(d, q)$ , qui sert à simplifier la complexité du système triphasé, comme il est montré dans la figure suivante :



**Figure IV.9 :** Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

La transformation est définie comme suit :

$$[d, q] = A(\theta)[a, b, c] \quad (\text{IV.47})$$

$$[a, b, c] = A^{-1}(\theta)[d, q] \quad (\text{IV.48})$$

Avec :

$$A(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.49})$$

La matrice inverse de Park est:

$$A^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.50})$$

#### IV.5.5 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations. Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, raison pour laquelle ce référentiel est utilisé en commande.

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{IV.51})$$

$$\omega_r = \omega_s - \omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{IV.52})$$

Les équations électriques et magnétiques s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.53})$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.54})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{IV.55})$$

Après arrangement des équations il vient :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{-1}{(T_s \sigma)} i_{ds} + \left( \omega_r + \frac{\omega}{\sigma} \right) i_{qs} + \frac{M}{L_s L_r \sigma} i_{dr} + \frac{M}{L_s \sigma} \omega i_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = - \left( \omega_r + \frac{1}{\sigma} \omega \right) i_{ds} - \frac{1}{T_s \sigma} i_{qs} - \frac{M}{L_s \sigma} \omega i_{dr} + \frac{M}{L_s T_r \sigma} i_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{M}{(T_s L_r \sigma)} i_{ds} - \frac{M}{L_r \sigma} \omega i_{qs} - \frac{1}{T_r \sigma} i_{dr} + \left( \omega_r - \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \omega \right) i_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{ds} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{M}{(L_r \sigma)} \omega i_{ds} + \frac{M}{L_r T_s \sigma} i_{qs} + \left( -\omega_r + \frac{M^2}{L_s L_r \sigma} \omega \right) i_{dr} - \frac{1}{T_r \sigma} i_{qr} - \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qs} \end{cases} \quad (\text{IV.56})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - M^2 / (L_s L_r) \quad (\text{IV.56.a})$$

$$T_s = L_s / R_s \quad (\text{IV.56.b})$$

$$T_r = L_r / R_r \quad (\text{IV.56.c})$$

$\sigma$  est le coefficient de dispersion ;

$T_s$  est le constante de temps statorique ;

$T_r$  est le constante de temps rotorique.

L'équation mécanique est la suivante :

$$\frac{j}{p} \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - \frac{f}{p} \omega \quad (\text{IV.57})$$

L'expression adoptée pour le couple électromagnétique est :

$$C_{em} = PM[i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}] \quad (\text{IV.58})$$

#### IV.6 Résultats de simulation

L'ensemble des simulations sont réalisées en adoptant les paramètres suivants :

Pour l'hacheur :

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
$f_d$	2000 Hz	$\Delta I_{Lmax}$	6.25 A
$V_{cref}$	600 V	$\Delta V_{cmax}$	4.4 V
$I_{Lmax}$	70.98 A	$C$	$2 \cdot 10^{-3} F$
$L$	$12 \cdot 10^{-3} H$		

Pour le régulateur PI :

Paramètres	$K_p$	$K_i$	Période d'échantillonnage
Valeur	1.1	30	$10^{-5}$

Pour l'onduleur :

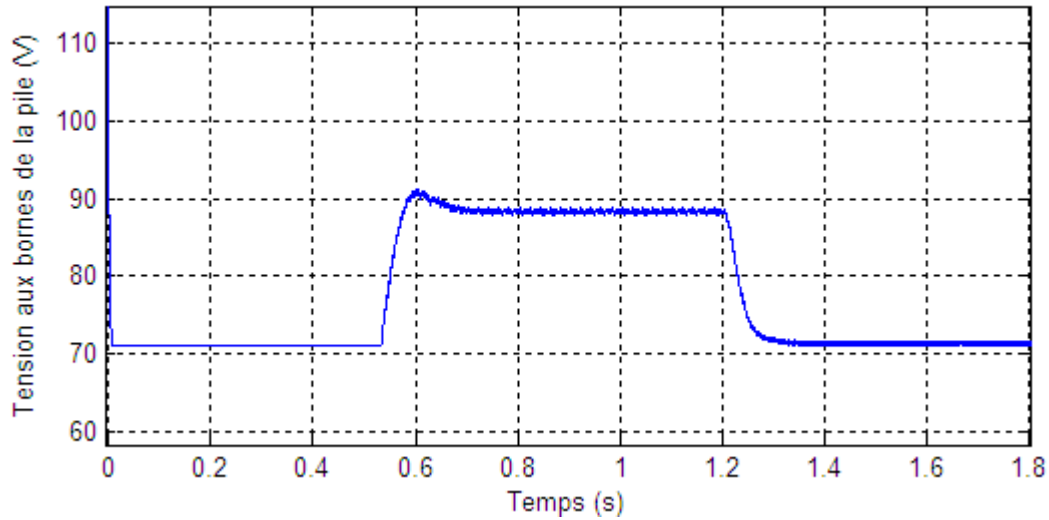
Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
$r$	0.8	$m$	21

Pour la machine :

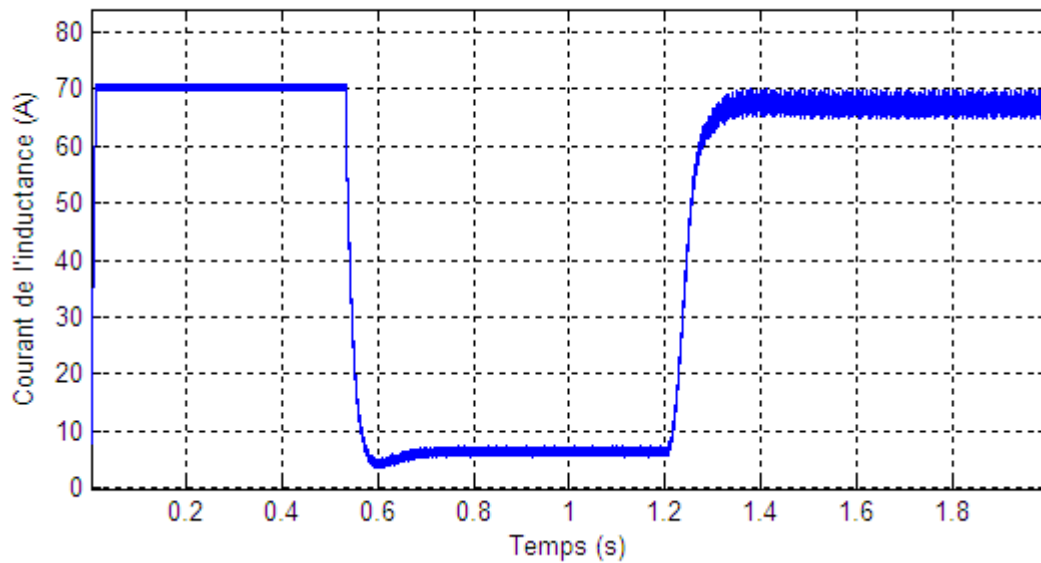
Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
$V_n$	220/380 V	$I_n$	15/8 A
Puissance	4 kW	$L_r$	0.156 H
Paire de pôle	2	$R_r$	1.8 $\Omega$
$L_s$	0.158 H	M	0.15 H
$R_s$	1.2 $\Omega$	j	0.07 kg.m <sup>2</sup>
$f$	0.00114 SI	$C_{rn}$	25 N.m
$\cos\varphi$	0.8	$\Omega_n$	1440 tr /min

Le moteur asynchrone est chargé à l'instant  $t = 1.2s$  par un couple résistant de 25 N.m et la tension de sortie du hacheur initiale est fixée à 600V.

*a. Performances de la pile*



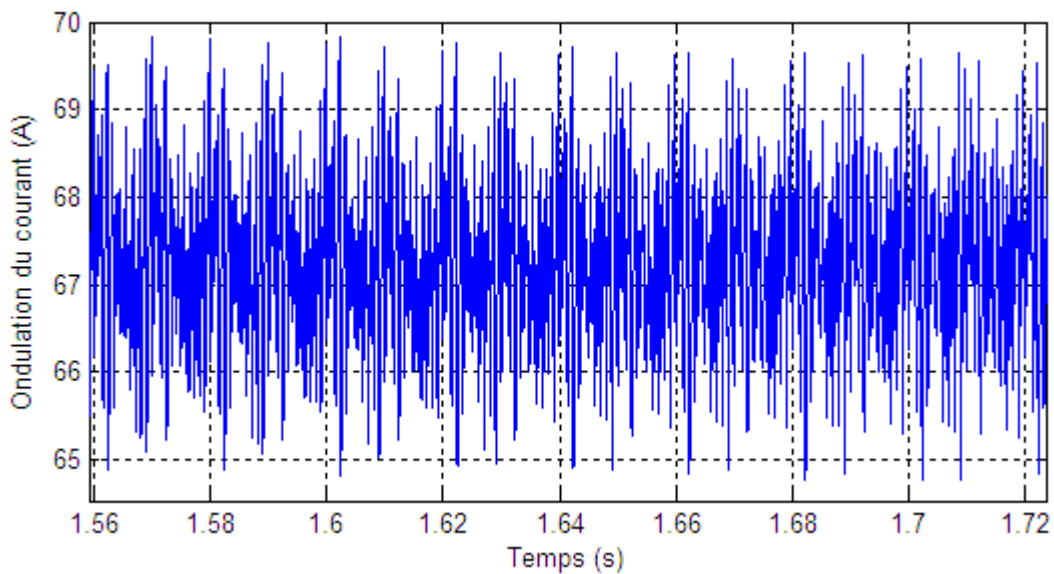
*Figure IV.10 : Tension aux bornes de la pile.*



*Figure IV.11 : Courant circulant dans l'inductance.*

Ces deux dernières courbes présentent la variation de la tension aux bornes de la pile et du courant circulant dans l'inductance en fonction du temps, où l'allure de la tension dépend directement de celle du courant. La discussion de la courbe du courant peut être effectuée sur trois intervalles de temps comme suit:

- De zéro à 0.6 second, cet intervalle caractérise le régime transitoire. On voit que le courant atteint rapidement sa valeur de limite maximale à raison du son forte appelle par le moteur lors du démarrage.
- De 0.6 à 1.2 seconds, cet intervalle caractérise le régime permanent lors du fonctionnement à vide où la demande du courant est faible.
- A l'instant  $t=1.2$  second, le moteur commence à entrainer sa charge nominale. On remarque que le courant augmente rapidement jusqu'à une valeur d'environ 67.5A inférieur à sa limite admissible.



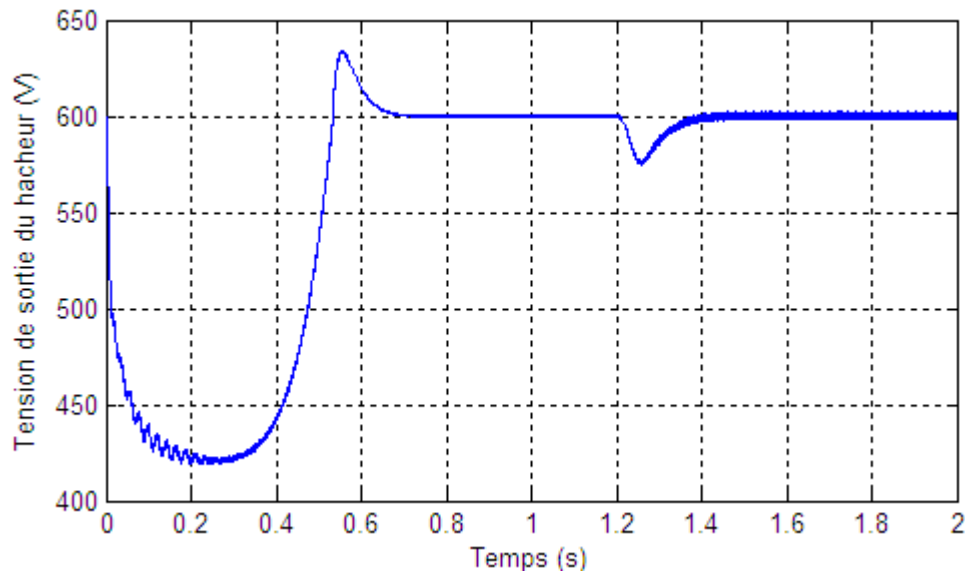
**Figure IV.12 :** *Forme d'ondulation du courant circulant dans l'inductance.*

La figure (IV.12) montre l'ondulation du courant circulant dans l'inductance. On remarque que sa valeur maximale ne dépasse pas 5A, ce qui est conforme à l'ondulation désirée de 6.25A utilisée pour dimensionner l'inductance de lissage du hacheur.

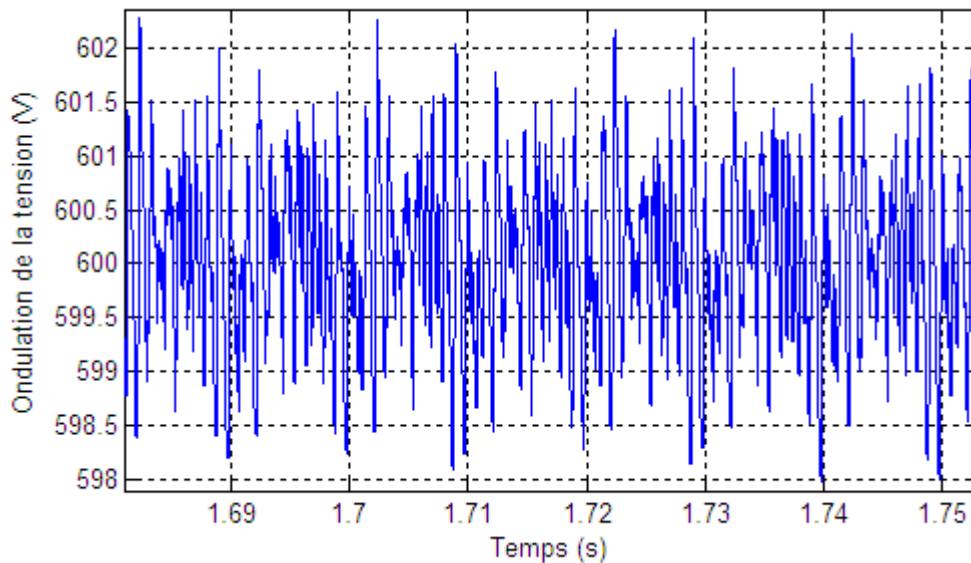
### ***b. Performances du hacheur***

L'allure de la tension de sortie du hacheur est présentée par la figure (IV.13). Elle a initialement une valeur de 600V suivant la considération que la capacité est initialement chargée. Cette valeur n'est pas maintenue durant le régime transitoire, où on remarque qu'elle diminue jusqu'à 420V puis elle augmente et marque un dépassement d'environ 35V avant qu'elle se stabilise à la valeur de référence (600V). La chute de la tension peut être expliquée par le fait que lors du démarrage du moteur il demande un courant fort qui peut atteindre plusieurs fois le courant nominal, et à raison que le courant délivré par la pile est limité, la capacité doit se décharger pour satisfaire le besoin du moteur.

A l'instant  $t=1.2s$ , le moteur est chargé, et la tension aux bornes de la capacité baisse puis elle reprend à nouveau sa valeur de référence. Dans cette phase il apparait clairement l'efficacité du régulateur de la tension de sortie du hacheur.

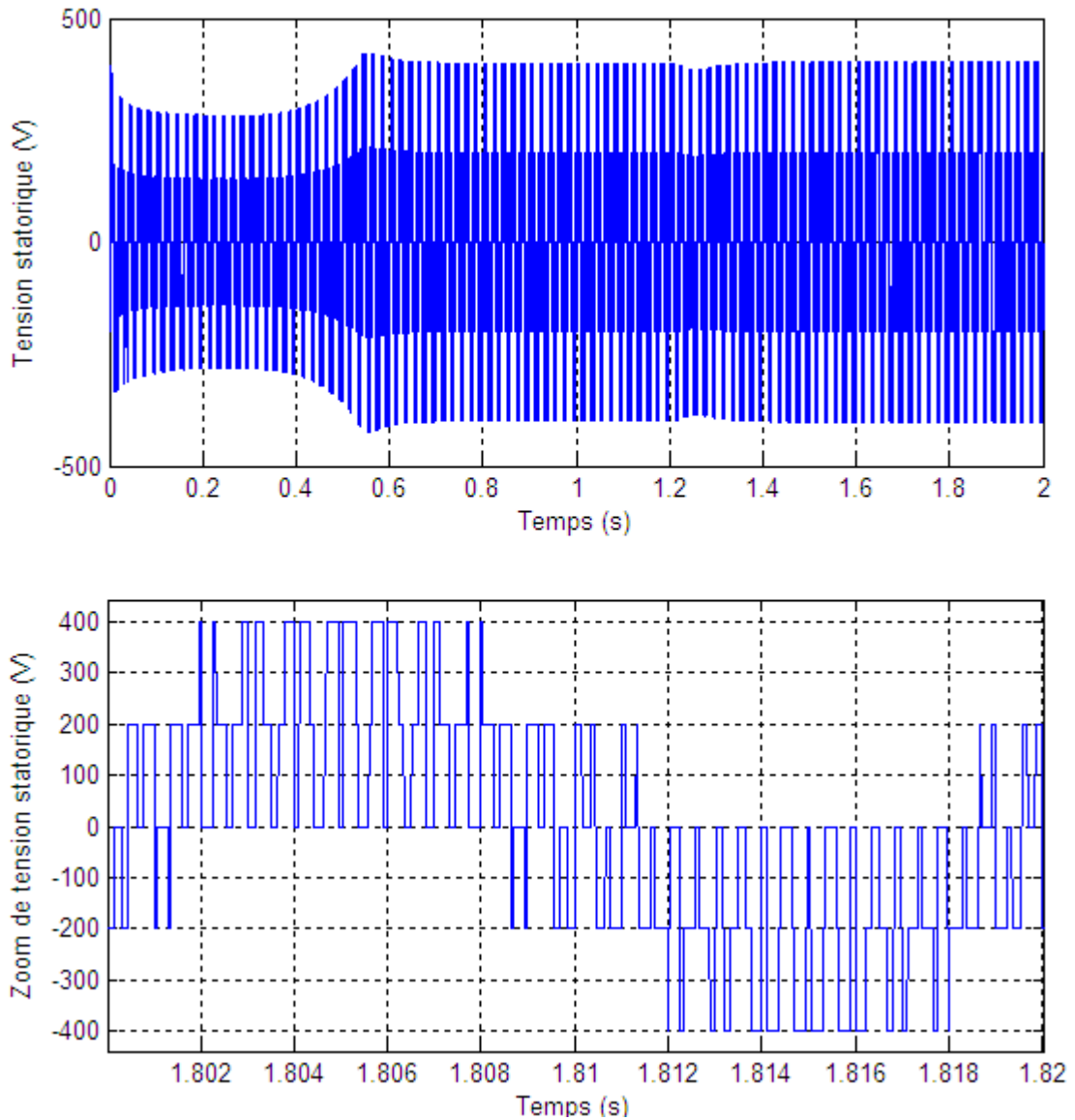


**Figure IV.13 :** Tension de sortie du hacheur.



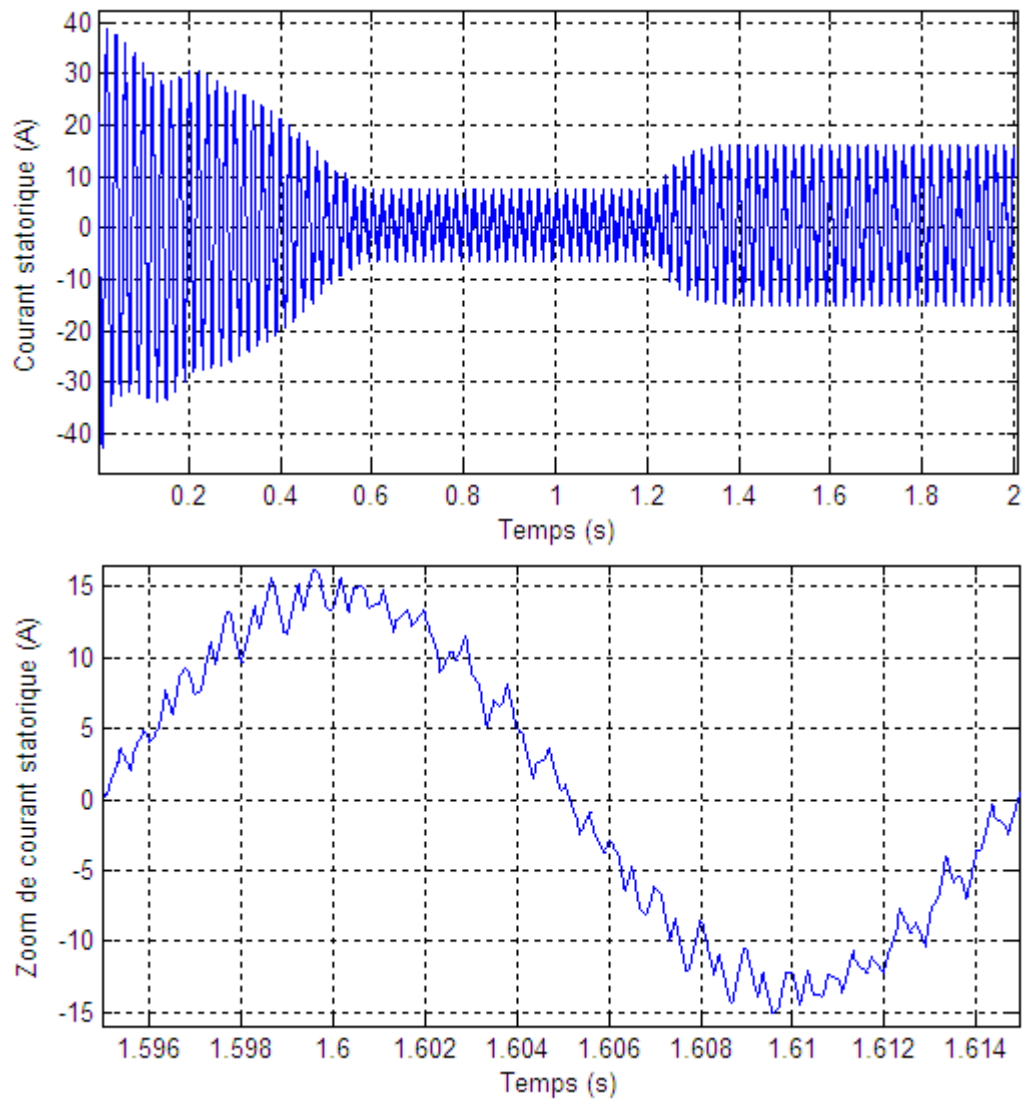
**Figure IV.14 :** Forme d'ondulation de la tension de sortie du hacheur.

La figure(IV.14) montre l'ondulation de la tension aux bornes de la capacité du hacheur. Nous pouvons vérifier ici que l'ondulation maximale est d'environ 4V, ce qui est bien conforme à l'ondulation maximale imposée (4.4V) lors du dimensionnement de la capacité.

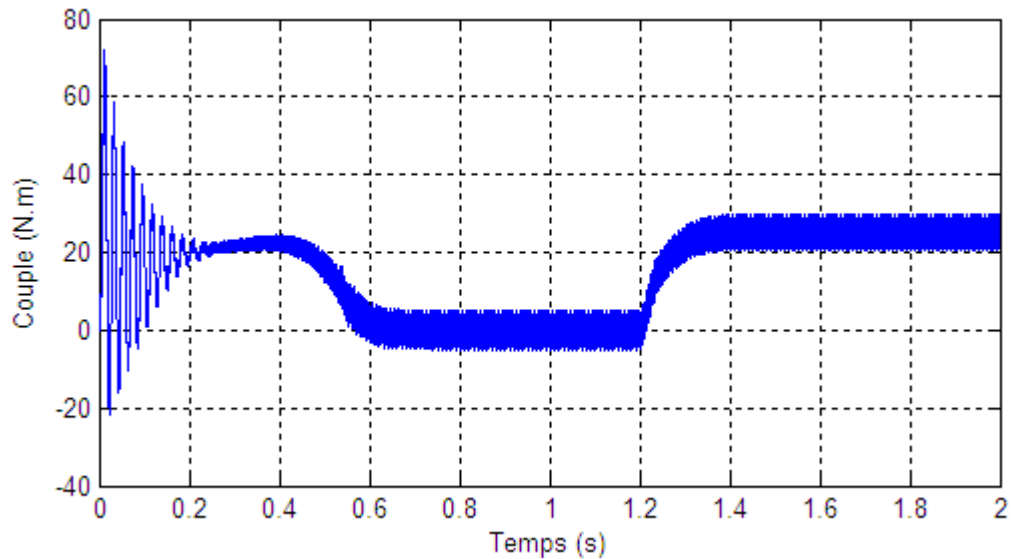
*c. Performances de l'onduleur*

*Figure IV.15 : Tension délivrée par l'onduleur.*

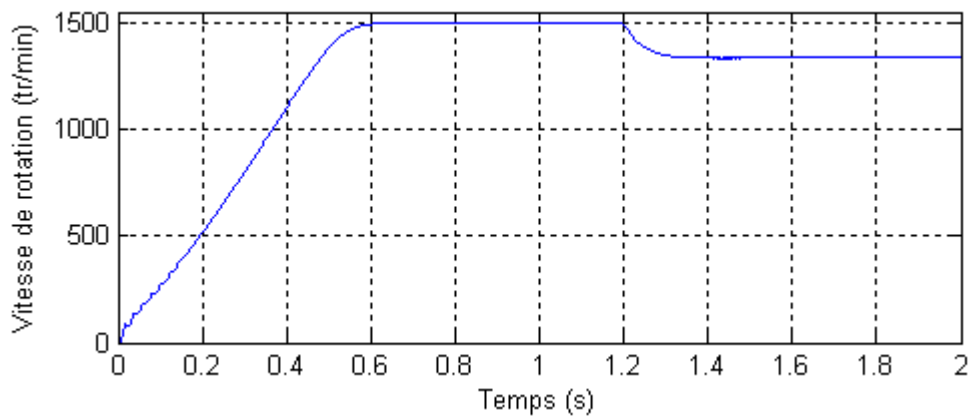
D'après la figure (IV.15), on remarque que la tension délivrée par l'onduleur dépend directement par celle délivrée par l'hacheur. Où la diminution de cette dernière engendre la diminution de l'amplitude de la tension appliquée au moteur asynchrone.

*d. Performances de la machine*

*Figure IV.16 : Courant circulant dans le premier enroulement statorique.*



**Figure IV.17 :** Couple électromagnétique de la machine.

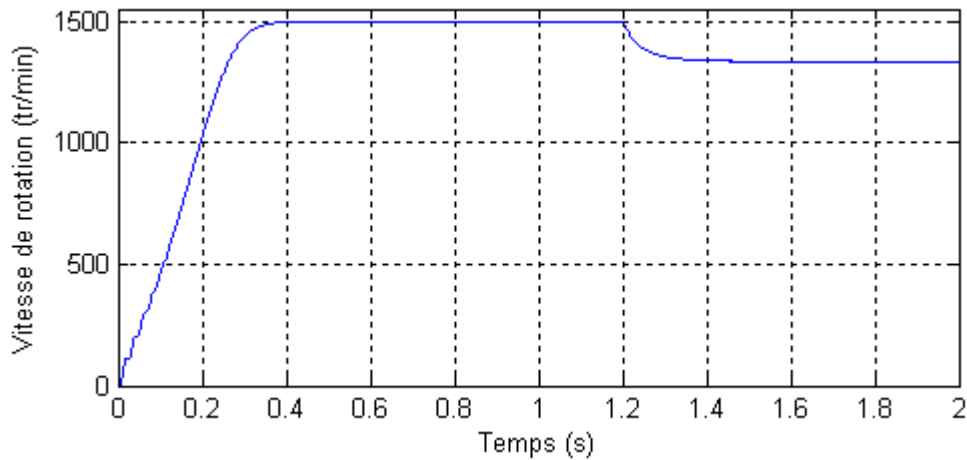


**Figure IV.18 :** Vitesse de rotation du rotor de la machine.

Ces dernières trois courbes caractérisent le comportement de la machine asynchrone durant les différentes phases de la simulation. D'après l'allure du courant, on peut voir que sa valeur est importante lors du démarrage, et qu'il diminue progressivement durant 0.6 second avant qu'il prend une valeur relativement faible nécessaire pour le régime permanent à vide. Lors de l'entraînement d'une charge nominale, le couple électromagnétique augmente et par conséquent le courant statorique.

Concernant la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, on constate qu'elle augmente linéairement pour accéder à la vitesse de synchronisme 1500 tr/min après un temps de 0.6 second. Cette vitesse est maintenue à vide jusqu'à l'application de la charge, où elle diminue et prend une valeur de 1334 tr/min.

Pour montrer l'influence de la tension délivrée par l'hacheur sur le temps de réponse de la machine on fait imposer à l'onduleur une tension d'entrée constante égale à 600V. On obtient la réponse de la figure (IV.19).



**Figure IV.19 :** Vitesse de rotation du moteur (cas d'un onduleur alimenté par une source continue de 600V).

Cette figure montre que le temps de réponse est diminué à 0.4 second.

Et comme nous avons le constaté précédemment, la chute de la tension délivrée par l'hacheur est due principalement par la limitation du courant délivré par la pile. L'utilisation d'un système de stockage d'énergie électrique est souhaitée pour satisfaire le fort courant de démarrage demandé par le moteur.

#### **IV.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié un système électrique à pile à combustible type PEM afin de montrer son aptitude de jouer le rôle d'une source d'énergie dans un système d'entraînement pour moteur asynchrone.

Les résultats de simulation ont montrées que les stratégies de commande des convertisseurs statiques présentées dans ce travail ont permet de satisfaire les besoins énergétiques du moteur, et que le dimensionnement du hacheur adopté pour limiter les ondulations de courant et de tension est effectué avec succès.

## *CONCLUSION GENERALE*

L'objectif de notre travail était l'élaboration de modèles pour piles à combustible. Cette étape est exploitée pour simuler une chaîne d'entraînement d'un moteur asynchrone dont la pile à combustible joue le rôle d'une source d'énergie isolée.

Dans ce travail, nous avons commencé par donner une description générale de la pile à combustible. Nous avons présenté son historique, sa structure de base, leurs types, son principe de fonctionnement et leurs différents domaines d'application. Parmi les différents types existants, nous avons intéressé à deux familles de cette technologie, il s'agit des piles à membrane conductrice protonique (PEMFC) et des piles à oxyde solide (SOFC). Ensuite, nous avons mentionné quelques procédés de production et de stockage de l'hydrogène.

Dans le deuxième chapitre, nous avons élaboré un modèle pour la pile à combustible type PEM. Plusieurs modèles existent dans la littérature, un choix selon les phénomènes à étudier est indispensable. Nous avons commencé par une étude théorique basée sur les lois de la thermodynamique dans le but de déterminer l'expression donnant la tension à vide aux bornes d'une cellule d'une pile PEM en fonction des conditions de fonctionnement qui influent sur sa valeur. Nous avons vu aussi qu'ils existent plusieurs phénomènes qui engendrent la chute de tension de la pile, et que le tracé de la caractéristique densité de courant-tension nous permet de déterminer le dimensionnement de la pile qui varie en fonction de la puissance voulue.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation de la pile à combustible à oxyde solide. Nous avons vu le comportement de la pile lors du régime transitoire quand la puissance demandée variée de 70 à 100 kW. Nous avons trouvé que le temps de réponse du système est lent et que dans certaines applications, l'utilisation d'un système de stockage d'énergie électrique comme les super-condensateurs et les batteries est nécessaire.

Dans le dernier chapitre, nous avons utilisé une pile à combustible de type PEM comme source d'énergie pour entrainer un moteur asynchrone triphasé. Bien sur, nous avons intercalé des convertisseurs statiques entre eux. L'un des deux convertisseurs utilisé était un hacheur élévateur de tension, utilisé pour amplifier la tension délivrée par la pile. L'autre convertisseur était un onduleur utilisé comme une source alternative.

Comme perspectives pour les travaux futures on peut citer les points suivants :

- Associer la pile à combustible de type SOFC avec le réseau électrique ;
- Etudier un système de stockage d'énergie électrique à base des super-condensateurs et l'utiliser dans un système d'entraînement électrique incluant la pile PEMFC.
- Commande en vitesse de la machine asynchrone alimentée par une cascade à base d'une pile à combustible.

- [Lachaize-04] Jérôme LACHAIZE, " Etude des stratégies et des structures de commande pur le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction ", thèse de doctorat INPT, septembre 2004.
- [Sad-06] Idris SADLI, "Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM utilisation en électronique de puissance ", thèse de doctorat INPL, décembre 2006.
- [Lachichi-05] Amel LACHICHI, " Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant – Application aux convertisseurs pour pile à combustible ", thèse doctorat Franche-Comté, novembre 2005.
- [Thou-05] Phatiphat THOUNTHONG, " Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des super- condensateurs", thèse doctorat INPL, décembre 2005.
- [Friede-03] Wolfgang FRIEDE, " Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM ", thèse doctorat INPL, aout 2003.
- [Gond-06] Cecil GONDRAND, " Analyse des transferts d'eau dans les micro-piles à combustible ", thèse doctorat INPT, novembre 2006.
- [Font-05] Guillaume FONTES, "Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques", thèse doctorat INPT, septembre 2005.
- [NOP-04] Matti NOPONEN, " Current distribution measurements and modeling of mass transfer in polymer electrolyte fuel cells", PHD-Helsinki University, mars 2004.
- [GAT-04] " Piles à Combustible et leur Gestion (PACoGES)", RAPPORT FINAL du Groupe d'Analyse Thématique, Université de Poitiers, Juillet 2002 à Juin 2004.
- [FcFAp-01] By L. Carrette, K. A. Friedrich and U. Stimming, "Fuel cells-Fundamentals and applications", FUEL CELLS Vol.1, N°1, 2001, pp. 5-39.
- [D.Lar-05] Diego LARRAIN, "Solid oxide fuel cell stack simulation and optimization, including experimental validation and transient behavior", thèse doctorat EPFL, 2005.

- 
- [Chim.G] John W.Hill, Ralph H.Petrucci, Martin Dion et Martin Lamoureux, ‘‘Chimie Générale ‘’, Livre. pp : A22 Annex C.
- [MOGOS-05] Emanuel Florin MOGOS, ‘‘Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le control des sources’’, thèse doctorat de l’Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Lille, juillet 2005.
- [Wang-06] Caisheng Wang, ‘‘ Modeling and control of hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell distributed generation systems ‘’, thèse doctorat de MONTANA STATE UNIVERSITY, juillet 2006
- [J.PAD-00] J. Padullés, G. W. Ault, J.R. McDonald, ‘‘An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation’’, Journal of Power Sources, Vol.86, 2000, pp. 495-500.
- [F.J, M.V-05] 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.
- [Rap-01] Olivier MORISOT, ‘‘EASYPAC Evaluation et analyse technico-économique des systèmes pile à combustible’’, Rapport final du Laboratoire de ELYO Cylergie, aout 2001.
- [Y. Zhu-02] 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.
- [A.Hahn-04] Adam Hahn, ‘‘Modeling and control of solid oxide fuel cell-gas turbine power plant systems’’, thèse master université de Pittsburgh, avril 2004.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE  
**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

**Proposé et dirigé par : Monsieur BARKATI Said**

**Présenté par :**

- **Fahed MEKHALFIA**
- **Laid LAMRI**

**Thème :**

**MODELISATION DES PILES A COMBUSTIBLE**

**Application à l'entraînement du moteur asynchrone**

**Résumé :**

Face aux enjeux énergétiques et environnementaux, l'hydrogène suscite beaucoup d'espoir, et la pile à combustible est un transformateur par excellence de l'énergie chimique en énergie électrique.

Dans ce travail, nous commençons par donner une vue générale sur les piles à combustible. Par la suite deux types de ces piles seront modélisés, il s'agit des PEMFC et SOFC. Enfin une application à base des PEMFC dans un système d'entraînement d'un moteur asynchrone est développée.

**Mots clés :**

**Piles à combustible, PEMFC, SOFC, Hacheur survolteur, Onduleur MLI, Moteur asynchrone.**