

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Électrotechnique

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

INTÉGRATION, CONTRÔLE ET COMMANDE D'UN SYSTÈME DE PILE À COMBUSTION INTER CHANGÉ AVEC UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Présenté par :

- ZIANI Zakia
- TOUMI Siham

Soutenu le : 01/07/2020 devant le Jury :

<i>M. TAIBI Brahim</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. BRAHIMI Mohamed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mme Rekkal Kahina</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Nos premiers remerciements iront tout d'abord à notre promoteur Docteur : BRAHIMI MOHAMMED d'avoir accepté d'encadrer ce travail, de nous avoir orientées et soutenues, pour sa collaboration effective et ses conseils judicieux et pour toute la rigueur qu'il a apportée.

Nous tenons ensuite à remercier tous ceux et toutes celles qui nous ont apporté. L'aide de près et de loin.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Que Monsieur le Président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Nous serons également très heureuses de toute remarque et suggestion qu'ils voudront

Bien nous soumettre.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- Ma chère mère.
- Mon cher père.
- Mes frères et sœurs.
- Toute la famille(ZIANI)

-Et à tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin durant toutes mes années universitaires.

-Pour finir, je dédie ce mémoire à tous ceux qui m'aiment et à tous Mes amis et amies que j'ai connus pendant ma période d'étude



Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les

sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie,

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous,

A nos sœurs

Nous apprécions beaucoup l'affection que vous nous apportez chaque jour. A cette occasion, nous vous manifestons notre meilleur sentiment en vous dédiant le fruit de notre travail.

A nos amis

Nos dédicaces s'adressent également à tous nos amis(e), à tous ceux qui nous

connaissent, et à tous les étudiants de notre promotion.

A tous qui m'aiment et qui j'aime

Résumé

La pile à combustible transforme l'énergie chimique en énergie électrique grâce à un empilement de différentes couches lamellaires. Des phénomènes présents aux multi interfaces spécialement au niveau de la couche catalytique agissent de manière plus ou moins directe sur les performances et la durée de vie de la pile. Nous avons défini les différents types de PAC Dans le cadre de notre travaille, La pile à combustible SOFC convertit l'énergie chimique d'une réaction d'oxydoréduction en énergie électrique pour intégré au réseau et production simultanée d'eau et de chaleur.

Bien que la pile à combustible présente des capacités à même de provoquer une évolution dans le domaine énergétique, il reste néanmoins de nombreux problèmes à résoudre avant d'envisager son développement et sa commercialisation à grande échelle.

Mots-clés : Pile à combustible –oxyde solide- « Modélisation, Batterie

The fuel cell converts chemical energy into electrical energy through a stacking of different lamellar layers. Phenomena present at multi interfaces especially at the level of the catalytic layer act more or less directly on battery performance and life. We have defined the different types of PAC As part of our work, The SOFC fuel cell converts the chemical energy of an oxidation reaction duction into electrical energy for integrated into the grid and simultaneous production of water and heat.

Although the fuel cell has the capacity to cause developments in the energy field, however, many problems remain to be solved before considering its development and commercialization on a large scale.

Key words: Fuel cell – solid oxide – “Modeling, Battery

وتحول خلية الوقود الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية من خلال تكديس طبقات مختلفة . فالظواهر الموجودة في الواجهات البينية المتعددة ، خاصة على مستوى الطبقة الحفارة ، تعمل بشكل مباشرة إلى حد ما على أداء البطاريات وعمرها. وكجزء من عملنا ، تقوم خلية وقود SOFC بتحويل الطاقة الكيميائية لتحويل تفاعل الأكسدة إلى طاقة كهربائية لإدماجها في الشبكة والإنتاج المتزامن للمياه والحرارة.

وعلى الرغم من أن خلية الوقود لديها القدرة على إحداث تطورات في مجال الطاقة ، إلا أنه لا يزال يتعين حل العديد من المشاكل قبل النظر في تطويرها وتسويقها على نطاق واسع.

الكلمات الرئيسية: خلية الوقود - أكسيد صلب - "النمذجة ، البطارية

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in small circular curls.

Liste des Figures et des Tableaux

Liste des figures

N°	Titre	page
I-1	Expérience de Sir W.Grove en 1839	5
I-2	Différents types des piles à combustible	6
I-3	pile combustible type PEMFC	8
I-4	Schéma de principe d'une pile à combustible SOFC	10
II-1	<i>Représentation schématique du fonctionnement d'une SOFC</i>	15
II-2	Technologie tubulaire [CLUBPAC]	16
II-3	Technologie plane classique [CLUBPAC]	17
II-4	Technologie plane monolithique [CLUBPAC]	17
II-5	Technologie Sulzer [MAU04]	18
II-6	Schéma global de la modélisation de la SOFC	19
II-7	Diagramme schématique d'une pile SOFC.	21
II-8	Transfert thermique à l'entreeur d'une cellule tubulaire	25
III-1	Schéma bloque de pile à combustible de type SOFC	28
III-2	Pile SOFC	29
III-3	Courbe pression de l'hydrogène	30
III-4	Courbe pression de l'eau	30
III-5	Courbe pression de l'oxygène	31
III-6	Alterne de tension de la pile	31
III-7	Alterne de courant de la pile	32
III-8	série de contrôleurs côté réseau	32
III-9	Coubre de la puissance active et réactive	33
III-10	Coubre de la puissance active et réactive du bus infini	33
III-11	caractéristique tensions-FC	34
III-12	Caractéristique tensions-IB	34
III-13	les onduleurs en série connectés au réseau	35
III-14	Caractéristique V_{abc} -FC-Temps	35
III-15	Tension triphasées de bus infinie	36
III-16	Courbe de courants triphasés de buse infinie	36
III-17	Schéma bloc de la PLL	37
III-18	Transformateur de courant	38
III-19	Transformateurs de type primaire à barre	39

Liste Des Tableaux

N°	Titre	page
I-1	Différents types de la pile à combustible.	10
II-1	Principaux avantages et inconvénients des différents types de support.	18
III-1	Fiche technique de la pile	29

Liste Des Abréviations Et Symboles

Abréviations :

AFC	Alkaline Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membranes Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell

Symboles :

T	Température de fonctionnement de la pile en [K]
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]
ΔH°	Variation de l'enthalpie à pression standard
P_{O_2}	Vapeur d'oxygène
P_{H_2O}	Vapeur d'eau
O_2	Hydrogène
H_2	Oxygène
H_2O	Eau
E	Tension idéale dite aussi tension réversible ($i=0$)

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top. The corners are rounded with scroll-like flourishes.

Sommaire

SOMMAIRE**Remercîments****Dédicaces****Résumé****Liste des figures****Liste des tableaux****Liste des symboles****Liste des abréviations****Introduction générale..... 1****CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES PILES A COMBUSTIBLE**

I-1-Introduction :..... 4

I-2-Historique des piles à combustible 4

I-3-Différents types des piles à combustible 5

I-3-1-La pile Alcaline AFC5..... 6

I-3-2-La pile à combustible à méthanol direct (DMFC) 7

I-3-3-La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) 7

I-3-4- La pile à acide phosphorique (PAFC) 8

I-3-5-La pile à carbonate fondus (MCFC) 8

I-3-6-La pile à oxyde solide(SOFC) 9

I-4-Domains d'applications des piles à combustible 11

I-4-1-Applications stationnaires.....11

I-4-2-Applications transports.....11

I-4-3-Applications portables 11

I-5- Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible11

I-5-1 Les avantages.....12

I-5-2 Les inconvénients12

I-7- Conclusion.....12

Chapitre II : MODELISATION DE LA PILE (SOFC)

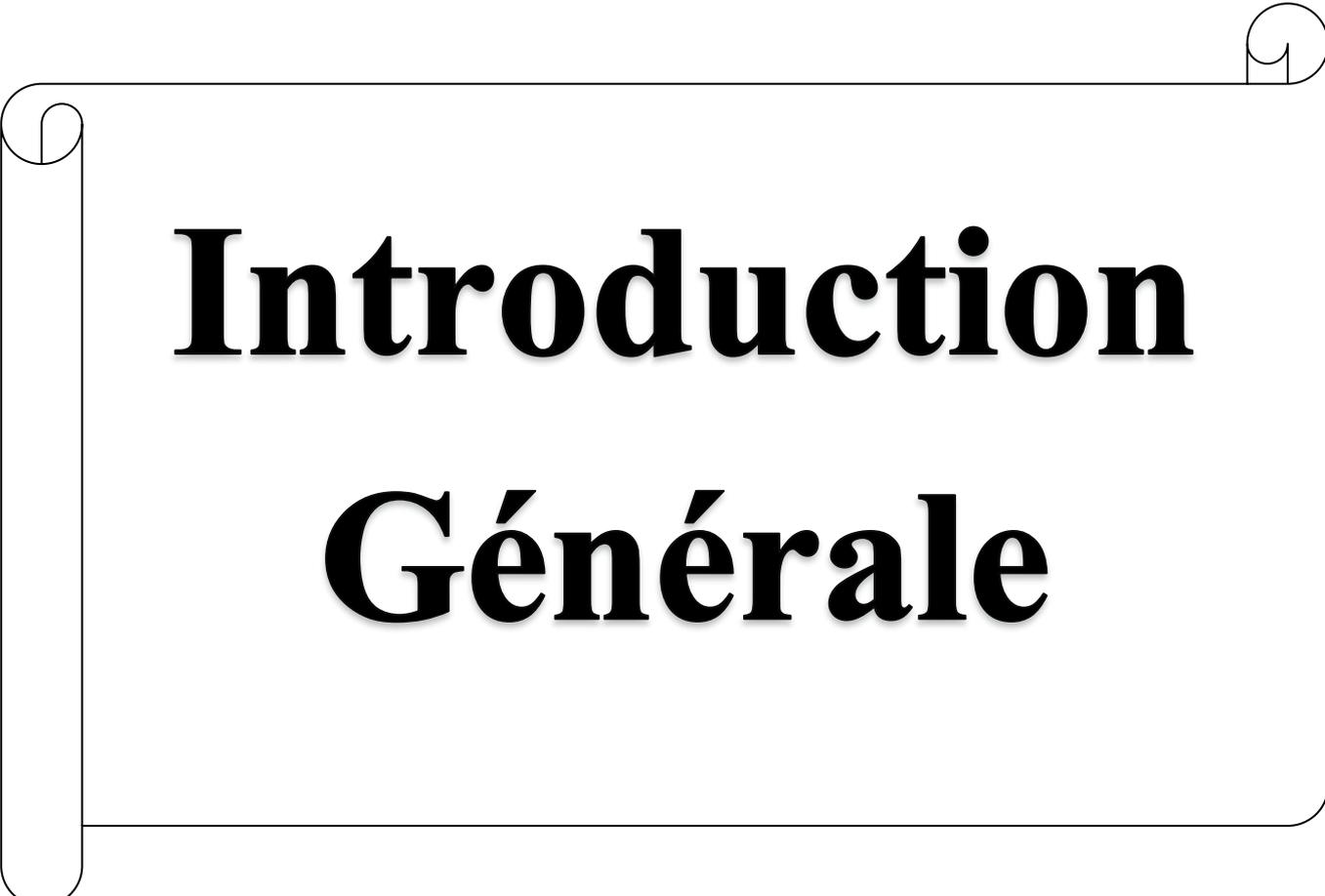
II-1-Introduction14

II-2-Principe de fonctionnement 14

II-3-Les grandes technologies de la SOFC..... 16

II-3-1-Technologie tubulaire..... 16

II-3-2-Technologie plane classique.....	17
II-3-3-Technologie plane monolithique.....	17
II-3-4-Technologie Sulzer Hexis.....	18
II-4-Application à la modélisation de la SOFC	19
II-5- Modèles des piles SOFC	20
II-5-1-Modèle chimique de la SOFC.....	20
II-5-2Modèle thermique	23
II-5-3-Modèle électrique	24
II-6- Conclusion.....	25
Chapitre III: Résultats et discussion	
III-1- Introduction.....	27
III-2- Formulation du problème	27
III-3- Résultats de simulation.....	28
III-3-1-Partie Pile à combustible.....	28
III-3-2-Description de la pile.....	28
III-4-MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).....	36
III-5 - Présentation d'un PLL.....	37
III-6-Convertisseur DC/AC.....	37
III-7- Transformateur de courant	38
III-8-Conclusion.....	39
Conclusion générale.....	41
Références Bibliographiques	42

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and small circular motifs at the corners.

Introduction

Générale

Introduction générale

L'intérêt de trouver une alternative à l'utilisation des énergies fossiles n'est pas démontré aujourd'hui. Parmi les solutions envisagées, le vecteur hydrogène utilisé dans un convertisseur énergétique, la pile à combustible, est perçue comme l'une des solutions les plus propres.

L'énergie électrochimique issue de la réaction par laquelle l'hydrogène et l'oxygène se combinent pour former l'eau peut être convertie en énergie électrique et en chaleur par la pile à combustible. Cette réaction peut se produire dans un domaine de température très large (80-1000°C)

La pile possédant le plus fort rendement est celle dans la température de fonctionnement est la plus élevée, la pile SOFC (Solid Oxide Fuel).

Cell, conçue pour fonctionner à 1000 °c son atout majeur et sa capacité à Co- générer de l'électricité et de la chaleur, le rendement total pouvant atteindre 85 %.

Les piles à combustible apparaissent comme l'un des moyens de production d'énergie pour le futur, en parallèle des énergies renouvelables, parce qu'elles ne produisent pas de polluants lorsqu'elles sont alimentées par de l'hydrogène pur. Les recherches sont essentiellement concentrées sur le développement de nouveaux matériaux et, pour une moindre part, sur des études de modélisation et développement de systèmes SOFC complet. Les piles SOFC travaillent à haute température, de l'ordre de 600 à 1000°C. Ces hautes températures peuvent, dans une certaine mesure, être avantageuses car la chaleur dégagée peut être mise à profit pour d'autres systèmes thermiques. Cependant, les contraintes résultantes sur le choix des matériaux (aspects mécaniques, chimiques, etc...) ont limité les développements technologiques et entraînent des coûts élevés. Aussi, l'enjeu majeur des recherches actuelles dans le domaine des SOFC est de diminuer la température de fonctionnement tout en conservant des propriétés optimales. D'où, le but de notre travail est de localiser la valeur maximale de la température en chaque élément de la pile. Pour un développement efficace de ce système électrochimique, une étude thermique tend à mieux comprendre les phénomènes à l'intérieur de la pile et prévoir le comportement sous l'effet des paramètres de fonctionnement, structurels et géométrique. Un grand nombre de paramètres physiques doivent être contrôlés comme les conductivités thermique et électrique, dimension des électrodes et électrolyte.

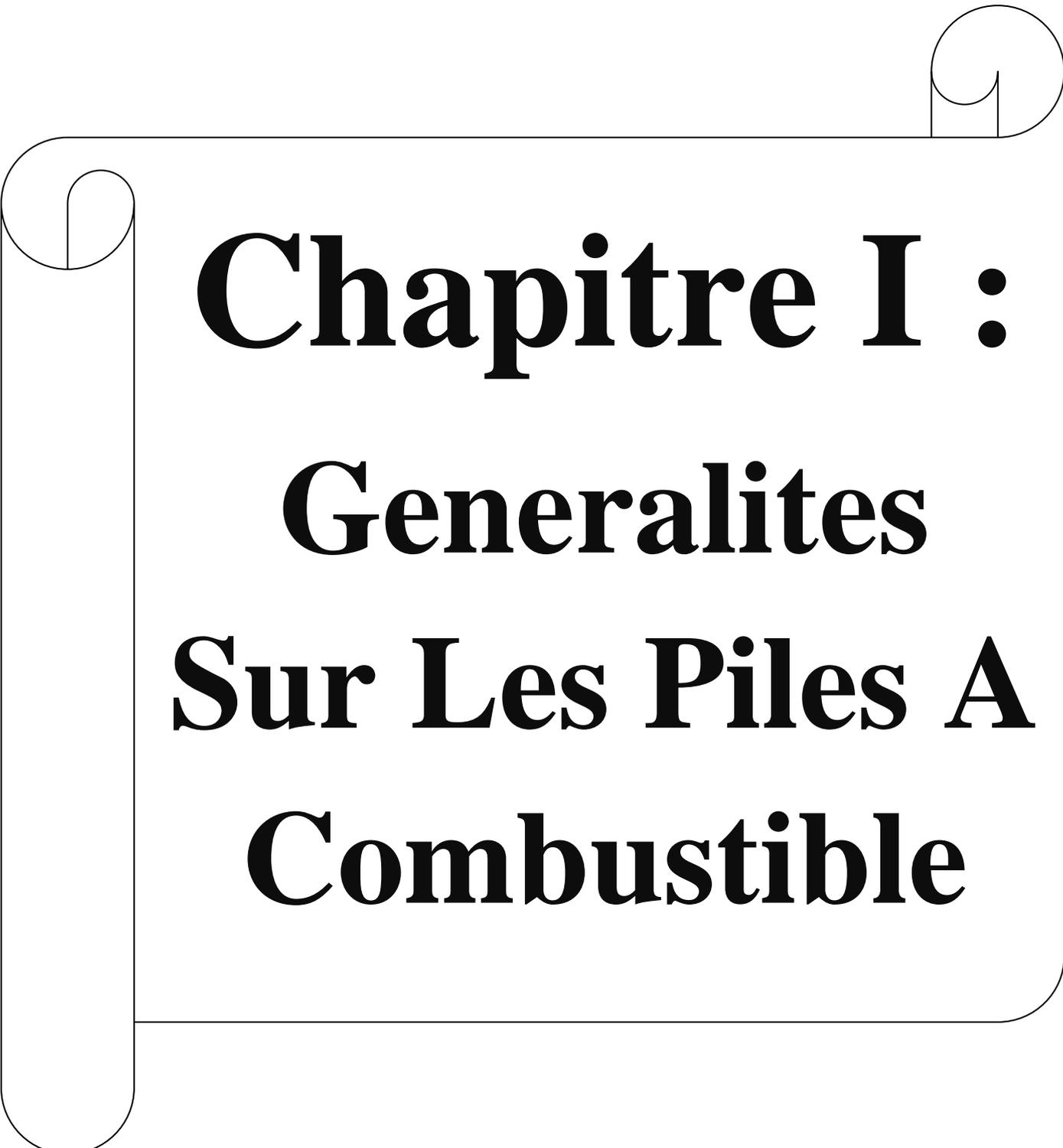
L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'effet de transfert thermique d'une cellule de piles à combustible à oxyde solide.

Notre mémoire, est organisé sous forme de trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre, présente les généralités des piles à combustible dans le quelle nous rappelons l'historiques des piles, les différents types des piles à combustible, les avantages et les inconvénients

Le deuxième chapitre sera consacré sur la modalisation de piles à combustible, en fait des rappelle sur le principe de fonctionnement, les grandes techniques de la SOFC application à la modélisation de la SOFC, modèles des piles SOFC

La troisième chapitre me regroupe les résultats de la simulation du la batterie SOFC pile à combustible.

A decorative border resembling a scroll or ribbon, with loops at the top-left and top-right corners, and a long vertical loop on the left side.

Chapitre I :

Generalites

Sur Les Piles A

Combustible

I -1-Introduction

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique : elle permet la conversion directe en énergie électrique et en chaleur de l'énergie libre de la réaction, qui est l'inverse de la réaction d'électrolyse de l'eau. Entre le combustible (généralement hydrogène) et le comburant (oxygène de l'air), se produit la réaction électrochimique.

la pile à combustible est composée de deux électrodes et d'un électrolyte. Toutefois, bien que les piles à combustibles aient un comportement et des caractéristiques semblables à celles d'une batterie, les deux systèmes diffèrent sur de nombreux points.

La batterie est stocké maximum utilisable est déterminée par la quantité de réactant chimique stocké dans la batterie elle-même. La batterie cesse de produire de l'électricité lorsque tout le réactant chimique est consommé, la batterie est alors déchargée. Dans une batterie secondaire, les réactants sont renouvelés par recharge, cela implique de remettre de l'énergie provenant d'une source externe dans la batterie. D'un autre côté, contrairement à ce qui se passe pour les batteries, dans une pile à combustible les électrodes ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l'intérieur de la pile. Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe et, aussi longtemps qu'ils sont fournis à la pile, l'électricité continue de circuler. [1]

I -2-Historique des piles à combustible

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839 fut présentée par William GROVE. une cellule hydrogène-oxygène (figure I-1) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte acide (acide sulfurique) autrefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation n'étant alors pas une nécessité. Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une « redécouverte » vers la fin du 20e siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre. Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits.. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Dès 1855 des nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène. Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateurs, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement “ industriel ”.

Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d’un premier générateur électrique de 1kW

La pile à combustible a trouvé un regain d’intérêt au début des années 60, lorsque la NASA (Nation Aeronautique and Space Administration) chercha une solution énergétique plus satisfaisante que les batteries, l’énergie solaire et l’énergie nucléaire. Cette recherche a mené la technologie de pile à combustible à un développement de la première membrane échangeuse de protons. [2] [3]

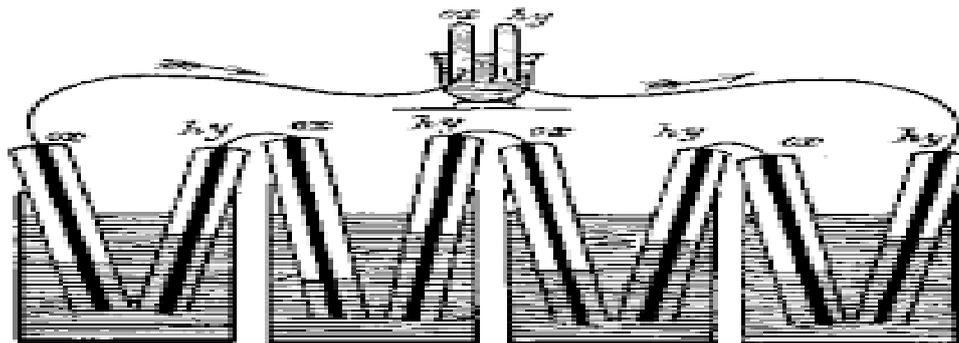


Figure I-1 : Expérience de Sir W. Grove en 1839[24]

I-3-Différents types des piles à combustible

Chaque type de piles à combustible est caractérisé par l'électrolyte adopté. Si l'on excepte les piles «AFC» (à la potasse), quatre catégories sont actuellement envisagées pour les *applications bâtiments*, applications désignées par leur sigle anglophone, le type de pile soit identifié par la nature de son électrolyte, Polymeric Electrolyte Membrane (PEMFC), Alcaline (AFC), Phosphoric Acide (PAFC), Molten Carbonate (MCFC) et Solide Oxyde Fuel Cell (SOFC). Enfin, ces piles opèrent à différentes températures et sous différents gaz les unes des autres. [4]

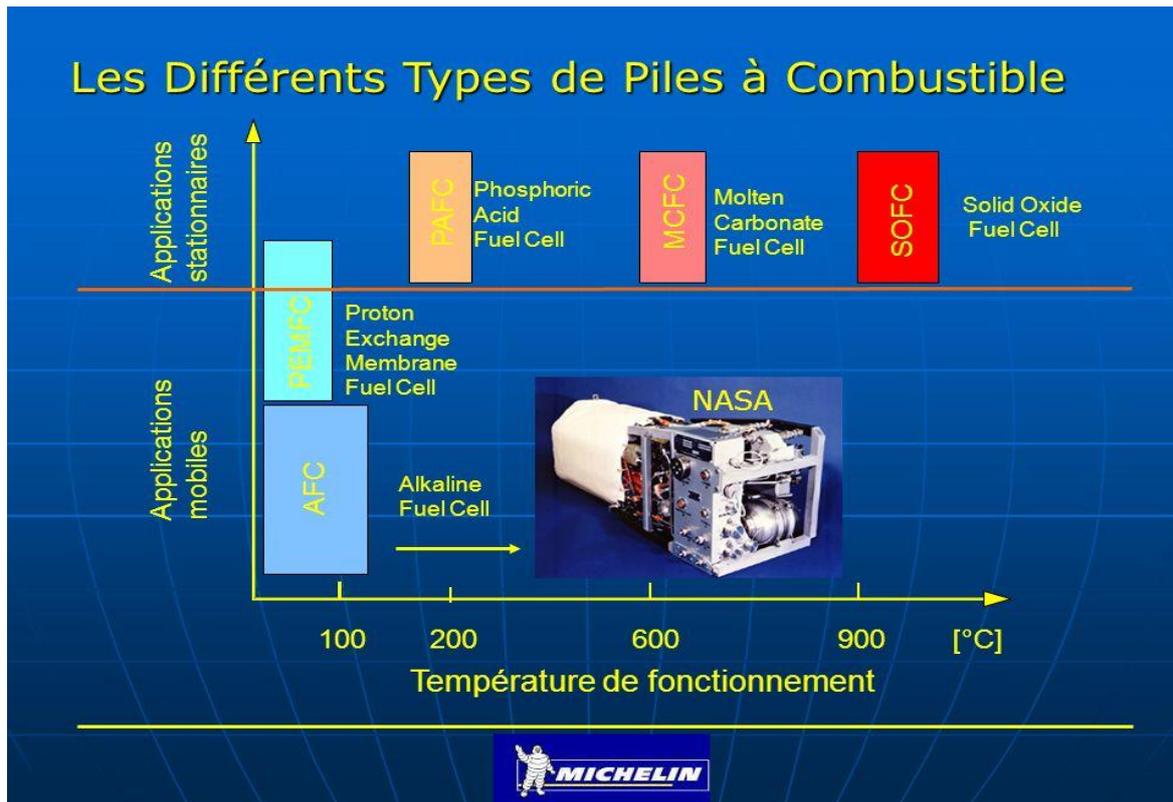
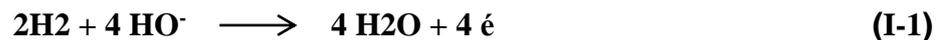


Figure I-2 : Différents types des piles à combustible [25]

I-3-1-La pile Alcaline AFC

Les piles alcalines (AFC –Alcaline Fuel Cell-), fonctionnent avec un électrolyte alcalin dans un domaine de température compris entre 120 à 150°C

A l'anode, on a



Et à la cathode, on a



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (OH⁻). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, En effet, lors de l'utilisation d'air ou d'hydrogène réformé, le dioxyde de carbone contenu dans ces derniers réagit avec l'électrolyte KOH et forme du carbonate de potassium, ce qui réduit la mobilité des ions. Cette pile a l'avantage d'utiliser une grande variété de catalyseurs et présente le meilleur rendement de toutes les piles à combustible

I-3-2-La pile à combustible à méthanol direct (DMFC)

(DMFC –Direct Méthanol Fuel Cell), bénéficie des progrès récents de la conception de cellules dans lesquelles la membrane séparatrice joue également le rôle d'électrolyte solide et des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C.

A l'anode:



Et à la cathode on a :

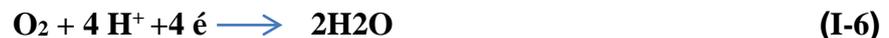
**I-3-3-La pile à combustible à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)**

Les piles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) fonctionnent autour de 150 °C à 220 °C. Le rendement global pouvant atteindre plus de 30%.elle font partie des convertisseurs d'énergie chimique en énergie électrique au même titre qu'un groupe électrogène thermique. La combinaison d'une môle d'hydrogène avec une demi-môle d'oxygène permet la production d'eau, d'électricité et de chaleur. Les réactions suivantes se produisent:

A l'anode, on a :



Et à la cathode, on a :



L'ion qui traverse l'électrolyte, membrane solide constituée par un polymère organique, est ici (H^+). Enfin, il se forme de l'eau au niveau de la cathode. Cette eau, qui peut traverser la membrane, est évacuée par les canaux (principalement canal cathodique). La figure 1-6 détaille le fonctionnement de la PEMFC. De nombreux centres de recherche sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins couteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites de métaux à base de carbone

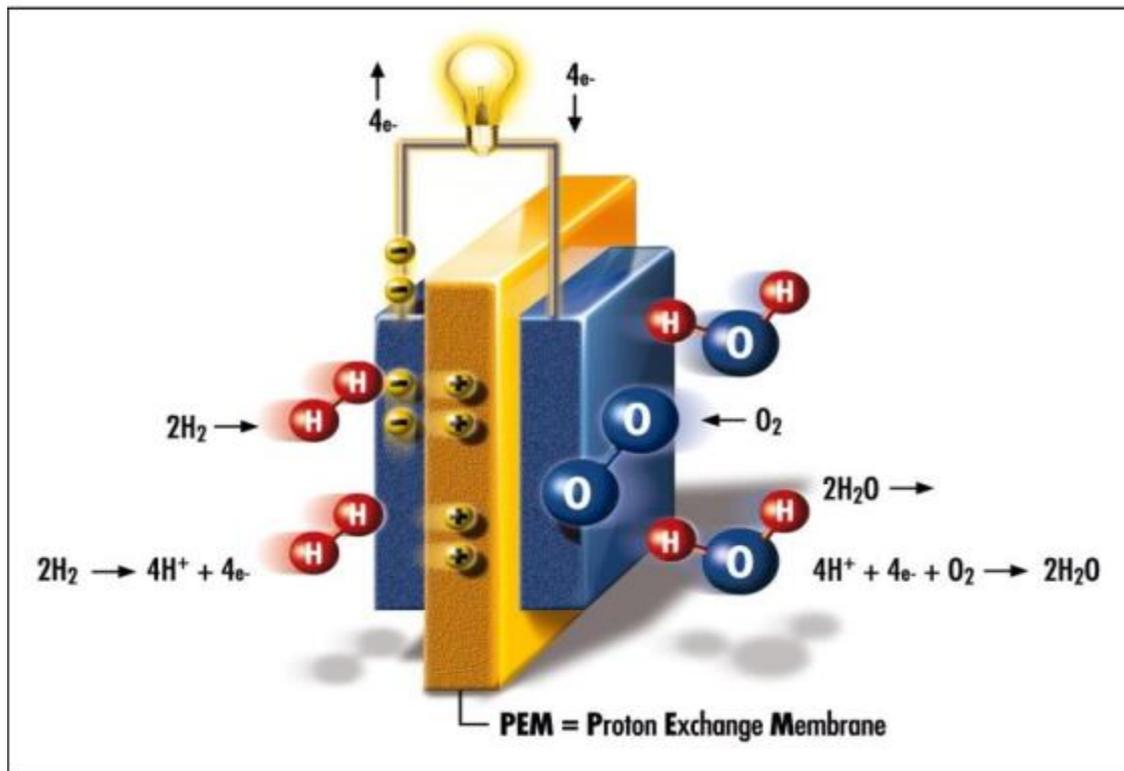


Figure I-3 : pile combustible type PEMFC [26]

I-3-4- La pile à acide phosphorique (PAFC)

(PAFC –Phosphoric Acid Fuel Cell-) dont l'électrolyte est sous forme gélifiée peuvent fonctionner entre 150°C et 220°C . Au début du développement des PAFC, on a utilisé l'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile. Mais avec les progrès faits dans les matériaux utilisés pour la construction des piles, la concentration en acide est maintenant de 100%. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone.

A l'anode:



Et à la cathode :

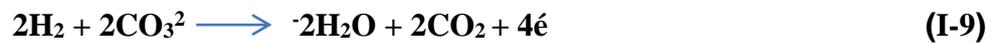


I-3-5-La pile à carbonate fondu (MCFC)

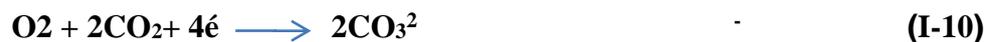
Les piles à combustible à carbonate fondu (MCFC -Molten Carbonate Fuel Cell-) ont pour électrolyte des carbonates de lithium et de potassium fondus ce qui correspond à des températures de fonctionnement supérieures à 600°C . Elles démontrent les plus grandes

efficacités parmi tous les types de piles à combustible (y compris celles à oxyde solide, à membrane d'échange de protons et à acide phosphorique), et ne sont pas sujettes aux problèmes de matériaux à haute température qui affectent la technologie des piles à combustible à oxyde solide. [6]

A l'anode, on a la réaction suivante :



Au niveau de la cathode :



I-3-6-La pile à oxyde solide(SOFC)

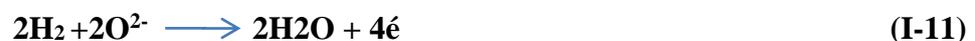
La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à haute température qui est de l'ordre de 600°C à 1000°C. Pour cela, c'est une pile généralement exploitée en cogénération et destinée à la production d'électricité décentralisée pour des gammes de puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW. L'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés, en se passant de catalyseur à base de métaux nobles, est la conséquence du fonctionnement à hautes températures.

Les piles 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, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons.

Les réactions mises en jeu sont les suivantes : [5]

A l'anode :



A la cathode:



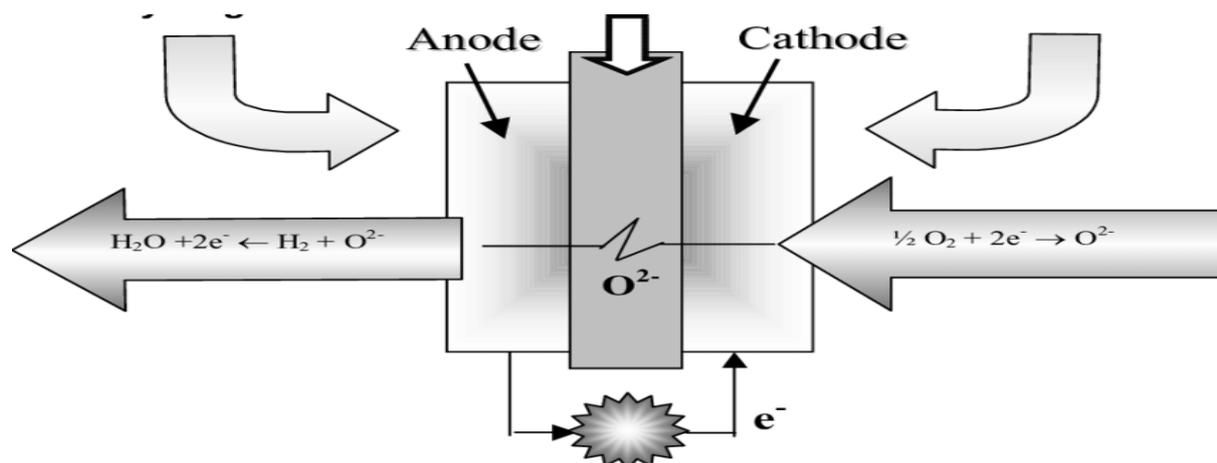


Figure I.4: Schéma de principe d'une pile à combustible SOFC.[27]

Tableau I.1 Comparaison des Différents Types de piles à combustible [9]

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ions dans l'électrolyte	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Température de fonctionnement (en °C)	120°C à 150°C	150 °C à 220 °C	80°C	150°C et 220°C	Supérieures à 600 °C	600°C à 1000°C
Combustible	H_2	H_2 (pur ou reformé)	Méthanol	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)
Oxydants	O_2 pur	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobile, maritime, applications portables, cogénération	Applications portables	Cogénération	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, automobile, maritime

I-4-Domains d'applications des piles à combustible

La PAC peut être utilisée dans quasiment toutes les applications où de l'énergie électrique

Nous distinguons principalement trois familles d'applications :

- D'applications es applications stationnaires.
- les applications transport.
- les applications portables.

I-4-1-Applications stationnaires

Dans ce domaine, Le marché mondial potentiel des piles à combustibles, pour la seule application stationnaire est estimé à 45 milliards d'euros à l'horizon de 2030. la production collective où la puissance varie de 200kW à quelque MW et la production domestique, où la puissance varie de 2 à 7kW. Plusieurs projets de démonstration existent déjà dans ce domaine. La plus grande centrale électrique de démonstration au niveau mondial produire le courant électrique et l'eau chaude. Cette centrale de démonstration fonctionne en continue. Le rendement énergétique atteint 90 %.

I-4-2-Applications transports

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible depuis le début des années 90 , ce domaine conditionne que la pile à utiliser soit prête à l'utilisation dans un temps le plus court possible, à une durée de vie importante et a une densité de puissance volumique et massique acceptable Cette pile basse particulièrement les piles combustibles.

I-4-3-Applications portables

Cette application est concerne le téléphone mobile et l'ordinateur portable (en moyenne 10W). En effet, ces domaines connaissent une forte croissance. Chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'un accumulateur actuel pour le même encombrement Les piles les plus utilisées dans ce domaine sont de type DMFC [7] [8]

I-5- Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré, SOFC ou MCFC par exemple, mais aussi du type d'application visée : portable, stationnaire ou transport. Toutefois, des avantages et inconvénients récurrents à ces systèmes de conversion énergétique peuvent être cités

I-5-1 Les avantages

- les piles à combustible ont un rendement de conversion énergétique important par rapport à un moteur à combustion (30-35%) par exemple.
- De faibles émissions sonores
- la conversion de cette chaleur de combustion en énergie mécanique
- Diverses températures de fonctionnement (PEMFC)
- les piles à combustible sont très peu ou pas polluantes (selon le combustible utilisé)

I-5-2 Les inconvénients

- les matériaux utilisés sont onéreux..
- problème le coût.
- Le poids et le volume.
- La durée de vie.
- La gestion thermique du module.[10]

I-7- Conclusion

La pile à combustible offre a un faible coût de découverte d'un système énergétique qui entre le domaine des énergies renouvelables. Ce chapitre est consacré à quelques généralités sur les piles à combustible. Nous avons commencé par introduction .En deuxième lieu nous avons donné une partie

historique des différents types de pile à combustible, ensuite nous avons présenté puis classé ce dernier.

selon leur température de fonctionnement et la nature de leur électrolyte et les domaine applications PAC .Dans le chapitre suivant on va modéliser la pile à oxyde solide SOFC à fin d'obtenir la tension à la sortie de la pile.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in rounded, scroll-like shapes.

Chapitre II :

Modélisation De

La Pile (SOFC)

II-1-Introduction

La modélisation qui va être exposée dans cette partie vise essentiellement à décrire la réponse en tension d'une pile à combustible ou d'un électrolyseur à une excitation en courant. Le but de ce chapitre est de présenter le modèle adopté pour rendre compte des phénomènes physiques au sein de la pile. En première partie, on va par le sur: les principes de fonctionnement de PAC et la grande technologie SOFC, les modélisations chimique et thermique de la pile à combustible, leur analogie formelle avec le domaine électrique, ensuite, on va présenter les avantages et inconvénients de SOFC et ces applications.

La modélisation électrique traduit les phénomènes électrochimiques de chaque pile. Le modèle électrique de la SOFC est basé sur la tension réversible de Nernst et les différentes chutes de tension.

La modélisation des piles à combustible prend une part très importante dans leur développement, car elle facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de piles à combustible, qui ont généralement chacun leurs propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés.[11]

II-2- Principe de fonctionnement

La pile à combustible à oxyde solide est un générateur électrochimique permettant la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, et fonctionnant à haute température, entre 800 et 1000 °C. Cette température est nécessaire à l'activation énergétique des processus de transport de charge et catalytique requis pour que les matériaux utilisés atteignent les valeurs souhaitées. La pile combustible est constituée d'un assemblage de mono cellules montées en série et/ou en parallèle en utilisant des plaques bipolaires, suivant la puissance envisagée du système final. Cet assemblage est appelé « stack ». La figure II.1 représente le schéma d'une mono cellule de SOFC, elle est formée de trois composants céramiques: deux électrodes, une cathode et une anode, séparées par un électrolyte. La conversion de l'énergie des réactions chimiques en énergie électrique se fait de façon continue par la circulation ininterrompue d'un gaz combustible (hydrogène pur ou réformé) dans le compartiment anodique et d'un gaz comburant (oxygène de l'air) dans le compartiment cathodique. L'étanchéité entre ces deux compartiments s'est assurée par l'électrolyte solide. Celui-ci doit être un bon conducteur par les ions oxygène et doit être également isolant électronique. Les

ions oxygène sont formés par réduction de l'oxygène de l'air côté cathodique (équation II.2). Puis ils traversent l'électrolyte solide via les lacunes d'oxygène dans le réseau cristalline rejoignent l'anode où l'hydrogène est oxydé (équation II.3) pour former de l'eau avec libération d'électrons. Ces derniers sont collectés à l'anode et alimentent un circuit électrique extérieur et participent ensuite à la réduction de l'oxygène de l'air à la cathode.

En conclusion, la réaction globale engendre la production d'énergie électrique et thermique ainsi que la formation de vapeur d'eau, à partir de l'oxygène de l'air et d'hydrogène gazeux (équation II.1)[12]

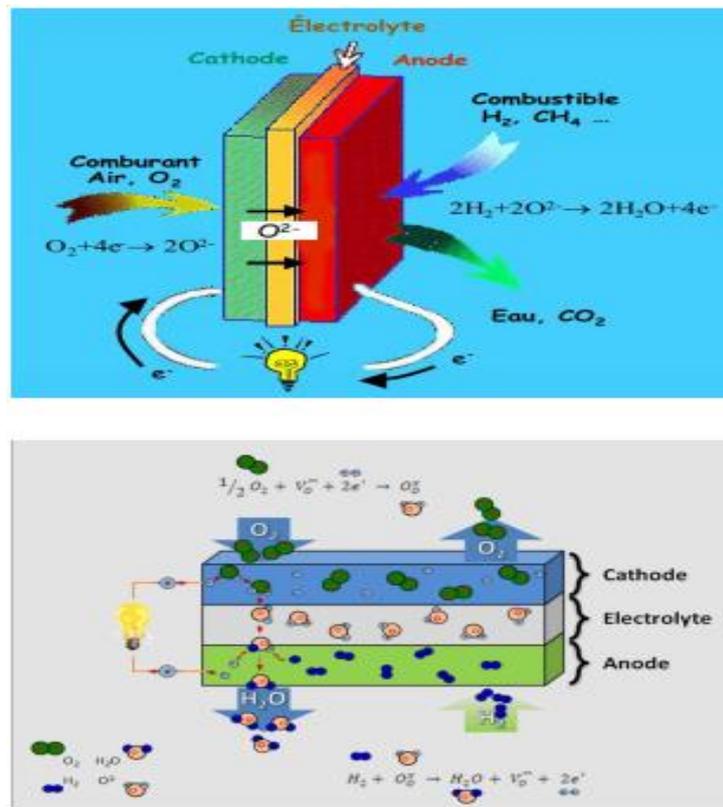


Figure II.1 : Représentation schématique du fonctionnement d'une SOFC[12]

II-3-Les grandes technologies de la SOFC

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

II-3-1-Technologie tubulaire

Dans cette technologie, qui a été essentiellement développée essentiellement par le groupe Westinghouse Electric Corp. et Mitsubishi Heavy Industries. Un cylindre en céramique poreuse (environ 50% de porosité) fermé à une extrémité, de diamètre 15 à 20 mm et de longueur pouvant atteindre 1,5m sert de support et est recouvert extérieurement de couches successives (Manganite de Lanthane dopé au Strontium lest recouvert extérieurement de couches successives faisant office de cathode (avec son catalyseur),d'électrolyte puis d'anode (avec son catalyseur) et enfin, d'un dépôt (souvent obtenu par projection plasma) servant d'inter connecteur (cf. Fig. 4). L'intérieur du tube support sert à la distribution d'air, tandis que le combustible est amené par l'extérieur. Ce concept a été testé sur 100 000 heures ce qui prouve sa fiabilité. La dégradation de performances est voisine de 0,2%/1000 heures pour une alimentation en air. Dans cette technologie, la montée en température est voisine de 200°C/heure, ce qui nécessite un délai de 5 heures avant que la pile fonctionne.et le rendement de cette technologie atteint 60% (pile couplée à une turbine à gaz) et la puissance est de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts.

Les inconvénients majeurs de cette technologie cylindrique sont la faible puissance spécifique et le coût élevé de fabrication. Un des avantages de la technologie tubulaire est la bonne étanchéité ce qui permet de réduire les contraintes mécaniques issues des contrain est hormiques et améliorer ainsi la fiabilité.

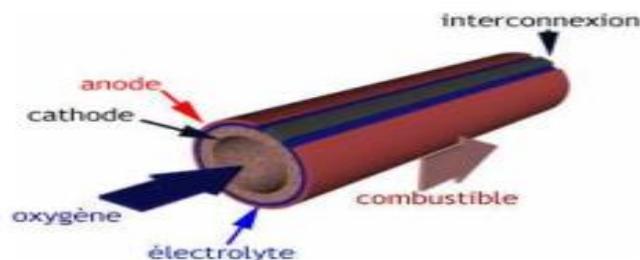


Figure II.2 : Technologie tubulaire [CLUBPAC][28]

II-3-2-Technologie plane classique

La technologie est plus récente et plus compacte comparée à la précédente. Elle présente une meilleure puissance par unité de volume. Tous ses composants étant actifs (contrairement à la technologie tubulaire où certains composants, comme les supports de tube, ne sont pas actifs), elle permet d'obtenir des blocs plus compacts conduisant aux améliorations suivantes : abaissement de la masse, de l'encombrement, des pertes thermiques et donc montée plus rapide en température. La difficulté de cette technologie réside dans la mise au point de plaques d'interconnexion assurant à la fois une bonne conduction électrique, une bonne tenue à la corrosion et une bonne étanchéité. La figure 1.5 montre la structure de cette technologie :

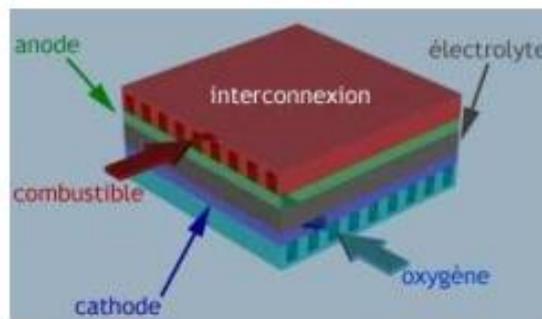


Figure II.3:Technologie plane classique [28]

II-3-3-Technologie plane monolithique

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

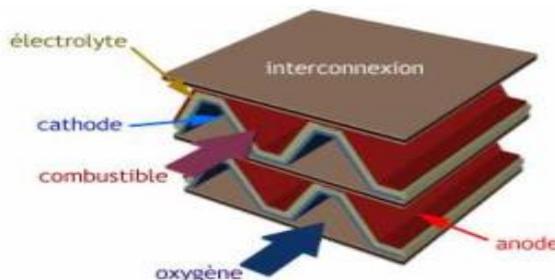


Figure II.4:Technologie plane monolithique [28]

II-3-4-Technologie Sulzer Hexis

C'est une technologie développée par Sulzer. Elle est à la fois plane et circulaire. La société Sulzer a présenté en 2001 une chaudière à gaz pour maison individuelle, qui délivre une puissance de 1kW (électrique) et 3kW (thermique) [13]

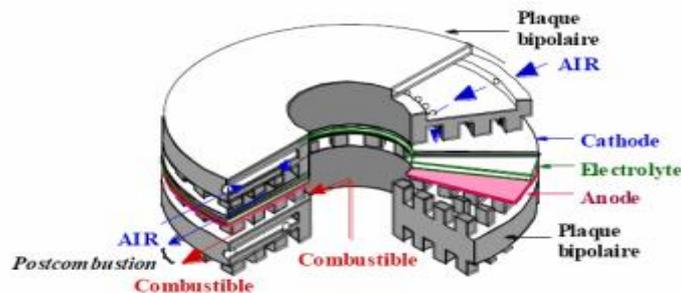


Figure II.5:Technologie Sulzer [MAU04][28]

Tableau II-1 : Principaux avantages et inconvénients des différents types de support. [14]

Support	Avantages	Inconvénients
Electrolyte	Support structural robuste (dense) Meilleur comportement mécanique comparativement à l'anode (ré-oxydation) et cathode (réduction)	Très forte résistance due à la faible conductivité ionique de l'électrolyte (fortes épaisseurs) Nécessite hautes températures d'opération
Anode	Anode fortement conductrice Faibles températures d'utilisation (électrolytes fins)	Ré-oxydation potentielle de l'anode Limitation de transport de masse (fortes épaisseurs)

Cathode	Pas d'oxydation mais réduction potentielle de la cathode Faibles températures d'utilisation (électrolytes fins)	Plus faible conductivité Limitation de transport de masse (fortes épaisseurs)
---------	--	--

II-4-Application à la modélisation de la SOFC

Les piles à oxyde solide (SOFC) sont très prometteuses dans les applications qui demandent une énergie constante variant peu avec le temps. Leur très haute température ne permet ni de démarrage rapide ni des changements brusques de charge. Le matériau de l'électrode est un matériau céramique conducteur d'ions O_2 , La haute température permet à la fois un fonctionnement avec des catalyseurs non nobles et avec du monoxyde de carbone (CO) comme combustible. Il est basé sur l'équation de Nernst et le calcul des différentes surtensions. Basé sur une analogie électrique chimique, le modèle chimique sert à calculer les débits de gaz dans l'anode et la cathode et les pressions partielles des gaz au niveau des électrodes en rendant compte des pertes de charges dans les couches de diffusion. Le modèle thermique s'appuie sur une analogie électrique. Les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement sont pris en compte. En raison de dynamiques très différentes, la modélisation se fait en deux étapes, la première étape est la modélisation thermique dont la dynamique est lente. La figure II-6 explique la modalisation de SOFC [15]

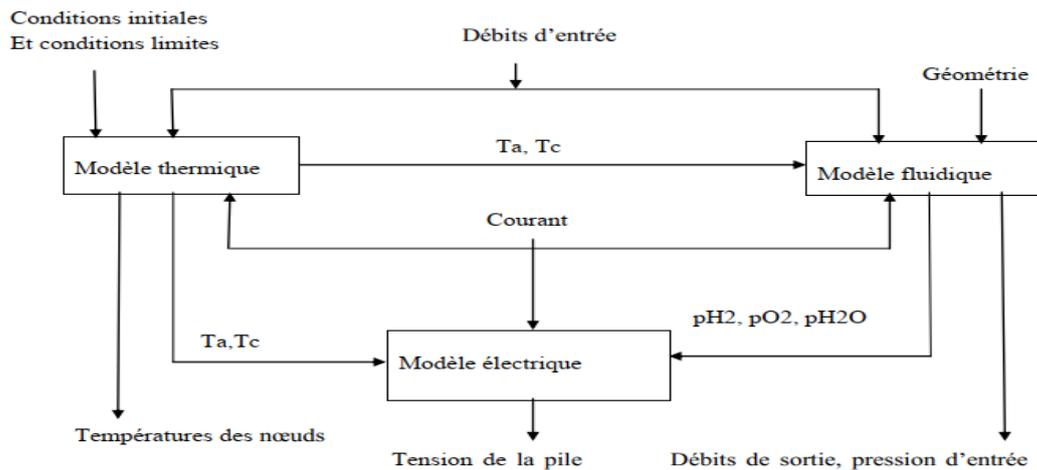


Figure II-6: Schéma global de la modélisation de la SOFC [29]

II-5- Modèles des piles SOFC

II-5-1-Modèle chimique de la SOFC

$$p_{H_2}^{canal} = \frac{P_{H_2}^{en} + P_{H_2}^S}{2} \quad (\text{II-16})$$

$$p_{H_2O}^{canal} = \frac{P_{H_2O}^{en} + P_{H_2O}^S}{2} \quad (\text{II-17})$$

$$p_{O_2}^{canal} = \frac{P_{O_2}^{en} + P_{O_2}^S}{2} \quad (\text{II-18})$$

$P_{H_2}^{canal}$: La pression partielle de l'hydrogène qui correspond au canal d'anode.

$P_{H_2O}^{canal}$: La pression partielle de l'eau se trouvant au canal d'anode.

$P_{O_2}^{canal}$: La pression partielle de l'oxygène correspondant au canal de la cathode.

$P_{H_2}^{en}$: La pression d'entrée de l'hydrogène.

$P_{H_2}^S$: La pression de sortie de l'hydrogène.

$P_{H_2O}^{en}$: La pression d'entrée de l'eau.

$P_{H_2O}^S$: La pression de sortie de l'eau.

$P_{O_2}^{en}$: La pression d'entrée d'oxygène.

$P_{O_2}^S$: La pression de sortie d'oxygène.

Les pressions partielles effectives de H_2 et O_2 aux emplacements réels de la réaction seront plus faibles que celles dans les canaux d'écoulement de gaz dus à la diffusion massique. En revanche, la pression de la vapeur partielle aux emplacements de la réaction est plus grande que celle dans le canal d'écoulement d'anode. Dans le but de calculer la tension de sortie de la pile, les pressions partielles effectives de H_2 , de H_2O et de O_2 aux emplacements des réactions doivent être déterminés. Dans un mélange de gaz se composant de l'espèce de N, la diffusion du composant i par les électrodes poreuses peut être décrite par la formule de Maxwell.

$$\nabla_{X_i} = \frac{RT}{P} \sum_{j=1}^N \frac{X_i N_j - X_j N_i}{D_{i,j}} \quad (\text{II-19})$$

Ou:

X_i (X_j) = fraction molaire des espèces i (j).

D_{ij} = diffusivité binaire efficace de la paire de i - j (m^2/s).

N_i (N_j) = flux superficiel du gaz d'espèce.

R = constante des gaz parfaits : $8.3143J / (mol.K)$.

T = température du gaz.

P = pression globale du mélange du gaz (Pa)

La figure II-7 suivante représenter le modèle chimique de pile SOFC

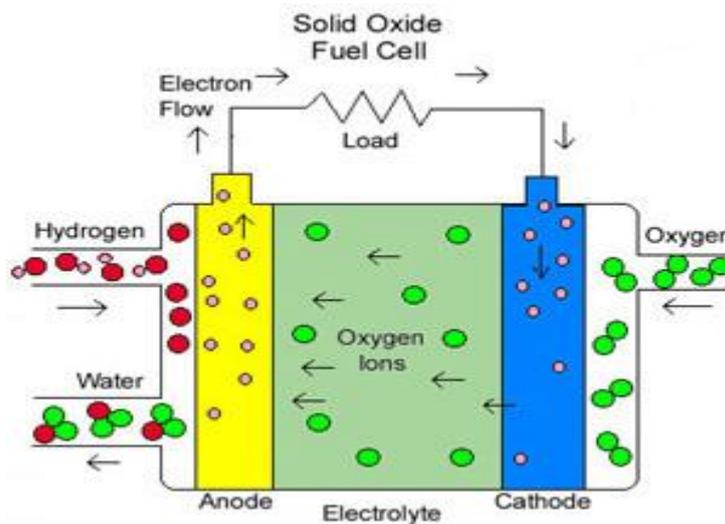


Figure II-7 : Diagramme schématique d'une pile SOFC .[30]

$$\frac{dx_{H_2}}{dx} = \frac{RT}{P_a^{canal}} \left(\frac{x_{H_2} \cdot N_{H_2O} - x_{H_2O} \cdot N_{H_2}}{D_{H_2, H_2O}} \right) \quad (\text{II-20})$$

Le flux molaire de et de peut être déterminé par la loi de Faraday.

$$N_{H_2} = -N_{H_2O} = \frac{i_{den}}{2F} \quad (\text{II-21})$$

Ou:

i_{den} : La densité du courant [A m²].

F: Constante de Faraday (96487C mol)

On note : $X_{H_2} + X_{H_2O} = 1$, alors l'équation ci-dessus s'écrira comme suit :

$$\frac{dp_{H_2}}{dx} = - \frac{RT}{D_{H_2, H_2O}} \frac{i_{den}}{2F} \quad (\text{II-22})$$

Ou même façon, nous pouvons obtenir l'équation unidimensionnelle de diffusion de Stefan Maxwell pour l'eau H₂O

$$\frac{dp_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{D_{H_2, H_2O}} \frac{i_{den}}{2F} \quad (\text{II-23})$$

En intégrant les équations précédentes par rapport à x on aura

$$P_{H_2}^* = P_{H_2O}^{canal} - \frac{RTI_a}{2FD_{H_2, H_2O}} \cdot i_{den} \quad (\text{II-24})$$

$$P_{H_2O}^* = P_{H_2O}^{canal} + \frac{RTI_a}{2FD_{H_2, H_2O}} \cdot i_{den} \quad (\text{II-25})$$

Appliquant le même procédé comme ci-dessus, l'équation l'unidimensionnelle de diffusion de Stefan-Maxwell pour O₂ peut être exprimée comme suit :

$$\frac{dx_{O_2}}{dx} = \frac{RT}{P_c^{canal}} \left(\frac{x_{O_2} \cdot N_{N_2} - x_{N_2} \cdot N_{O_2}}{D_{O_2, N_2}} \right) \quad (\text{II-26})$$

Puisque l'azote ne participe pas à la réaction chimique, le flux net molaire d'azote normal sur la surface de la cathode peut être égal à zéro :

$$N_{N_2} = 0 \quad (\text{II-27})$$

Le flux molaire de O₂ est déterminé par la loi de Faraday

$$N_{O_2} = \frac{i_{den}}{4F} \quad (\text{II-28})$$

L'équation (11) peut s'écrire comme suit :

$$\frac{dx_{O_2}}{dx} = \frac{RTi_{den}}{AFP_c^{canal}D_{O_2,N_2}}(P_{O_2} - 1) \quad (\text{II-29})$$

Dans l'anode, la pression partielle efficace de l'oxygène à l'emplacement de la réaction peut être trouvée comme suit :

$$P_{O_2}^* = P_c^{canal} - (P_c^{canal} - P_{O_2}^{canal}) \exp\left(\frac{RTi_{der}l_c}{4FP_c^{canal}D_{O_2,N_2}}\right) \quad (\text{II-30})$$

II-5-2-Modèle électrique

La réaction globale dans la pile SOFC est :



Où l'indice (g) signifie que : H₂O est sous forme gazeuse

L'équation de Nernst : sert à calculer la tension réversible E_{cell}

Elle est appliquée pour déterminer la tension aux bornes de la pile :

Pour une cellule de la pile :

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{4F} \ln \left[\frac{(P_{H_2}^{canal})^2 \cdot P_{O_2}^{canal}}{(P_{H_2O}^{canal})^2} \right] = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2}^{canal} \cdot \sqrt{P_{O_2}^{canal}}}{P_{H_2O}^{canal}} \right] \quad (\text{II-31})$$

Pour N_0 cellules:

$$E_{cell} = N_0 \left(E_{,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2}^{canal} \cdot \sqrt{P_{O_2}^{canal}}}{P_{H_2O}^{canal}} \right] \right) \quad (\text{II-32})$$

Avec :

$$E_{0,cell} = E_{0,cell}^0 - K_E(T - 298) \quad (\text{II-33})$$

E_{cell}: Potentiel réversible de chaque cellule.

E_{0, cell}: Le potentiel de référence qui est une fonction de la température.

E⁰_{0cell} : Potentiel de référence standard à l'état standard.

Cependant quand la pile est sous la charge, sa tension de sortie est inférieure à E_{cell} cela est dû à la perte par activation, à la chute de tension ohmique due à la résistance et aux pertes par concentration.[17]

La tension de sortie peut aussi s'écrire comme suit :

$$V_s = N_{cell}V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (\text{II-34})$$

II-5-3-Modèle thermique

Les phénomènes thermiques sont très importants dans les piles à combustible. En effet, la température est un paramètre déterminant des réactions chimiques : plus la température est grande plus la cinétique des réactions est grande.

Eduardo Hernandez-Pacheco a exposé un modèle électrochimique thermique pour simuler la performance de la pile

Jason Le Masters, a développé un code informatique en différences finies, pour l'analyse des contraintes thermiques durant le fonctionnement de la pile

Jinliang Yuan, *et* procèdent à une analyse numérique du flux de gaz et du transfert thermique dans le canal anodique. Ils montrent que parmi les divers paramètres, la configuration

du canal et les propriétés de la couche anodique poreuse ont des effets significatifs tant sur le flux du gaz que sur le transfert thermique

Le profil de coupe et le transfert thermique à l'intérieur d'un SOFC tubulaire est représenté dans la figure II-8. La chaleur produite au niveau des couches actives se décompose en un flux de chaleur traversant les électrodes et un autre traversant la membrane par les phénomènes de conduction et de transport de matière. [16]

La chaleur produite par la réaction chimique à l'intérieur de la cellule de carburant peut être écrite comme suit :

$$\dot{q}_{prod} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} \quad (\text{II-35})$$

La puissance disponible libérée due à la réaction chimique est calculée par :

$$\dot{q}_{chem} = \dot{n}_{H_2, consommé} \cdot \Delta H \quad (\text{II-36})$$

Où : ΔH est le changement d'enthalpie de la réaction chimique à l'intérieur de la cellule de carburant

$\dot{n}_{H_2, consommé}$ Le débit d'hydrogène consommé [17]

La vraie puissance électrique de sortie est :

$$\dot{q}_{elec} = V_{out} \cdot i \quad (\text{II-37})$$

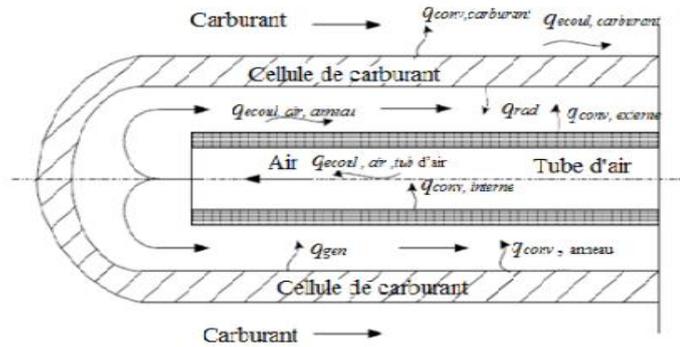


Figure II-8: Transfert thermique à l'intérieur d'une cellule tubulaire [17]

II-6- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques types de compresseurs ramenant le modèle le plus utilisé dans les applications (P à C) qui sont de type centrifuge car ils permettent de modéliser facilement le débit d'air à la sortie du compresseur, aussi nous avons présenté le modèle chimique électrique et thermique. Dans le troisième chapitre, nous montrons les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK de PAC type SOFC.

Chapitre III :

Résultats et

discussion



III.1. Introduction

La performance d'une pile SOFC et les champs de températures calculés résultent d'un modèle de calcul appliqué dans un plan perpendiculaire au sens de l'écoulement des gaz dans les canaux d'une cellule standard (NiYSZ), (YSZ), (LSM) SOFC_P à anode supportée (AS) ou à électrolyte supportée (ES). L'analyse du champ de température est faite en fonction de l'effet de différents type de sources de chaleur: Il s'agit de la source de chaleur due aux surtensions électriques; ohmiques, activation et concentration et celle due à la réaction chimique. Exprimée en fonction de l'enthalpie ou de l'entropie, une étude comparative nous a permis de faire un choix d'expression pour la source de chaleur due à la formation de l'eau dans le reste des cas de calcul. Sachant que les températures d'air ou d'hydrogène (T_{H2}/T_{air}) sont différentes et de valeur très élevées, de l'ordre de 873-1173K, notre étude englobe trois cas. En premier lieu, la SOFC fonctionne aux mêmes valeurs de ($T_{H2} = T_{air}$). Dans un second cas, elle fonctionne à ($T_{H2} > T_{air}$). Le dernier cas montre l'effet de l'inversement des valeurs de T_{gaz} ($T_{H2} < T_{air}$) sur le champ de température et sur la performance de la pile.[18]

III.2. Formulation du problème

Le thème étudié dans le présent mémoire sert à faire modélisation la pile SOFC pour faire ressortir une tension DC qui a injecté dans un onduleur MLI dans le but de transformer cette tension en régime alternative et alimenter une charge (consommateur) d'où on injecte le surplus dans un réseau basse tension . Le contrôle de l'onduleur et fait via la méthode de transformation de Park basée sur via boucle à verrouillage de phase (PLL) et de l'hystérésis. Le transformateur utilisé dans ce montage est de type élévateur 200/400 de couplage étoile – étoile

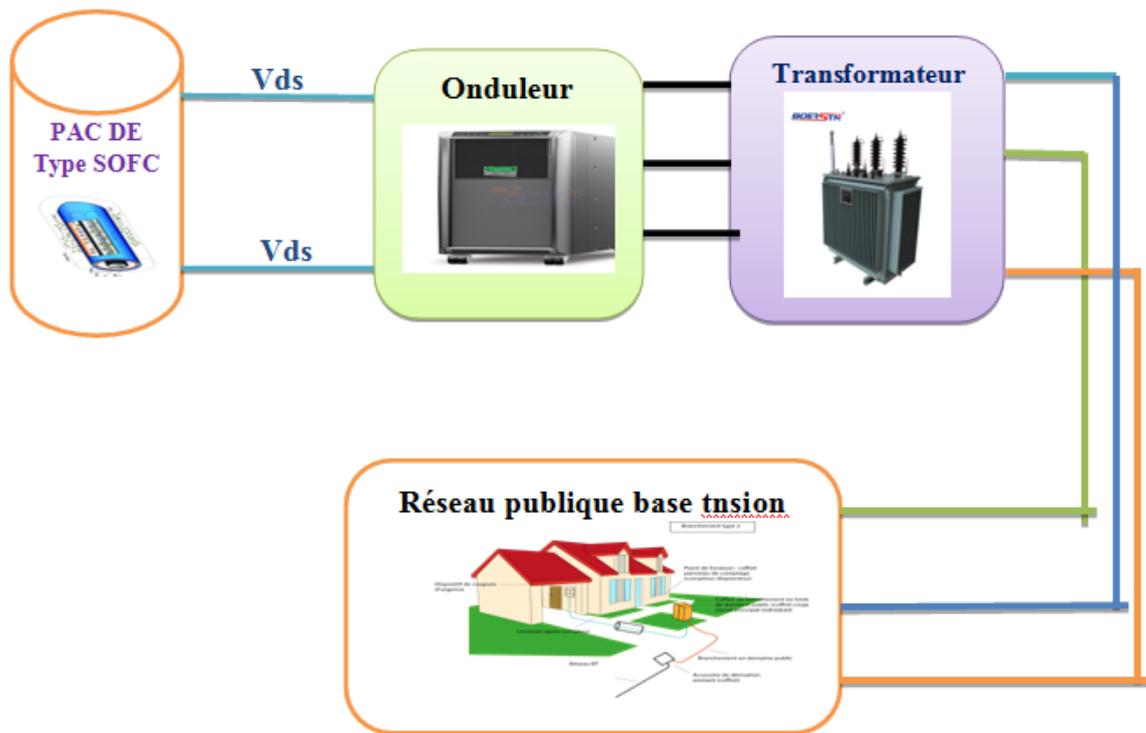


Figure III-1:Schéma Bloc de pile combustible de type SOFC

III-3-Résultats de simulation

III-3-1:Partie Pile à combustible

La pile à combustible de type à oxyde solide qui sert à transformer le combustible en énergie électrique de type contiens grâce à des réactions électrochimiques cette transformation reste propre et écologique et produit l'eau et électricité.

Citée dans cette partie, nous avons en terminé les simulations de notre pile de fiche technique dans le tableau ci-dessous a pour objet d'études les deux volets de la pile, le volet différentes des pressions et le volet électrique des tensions et des courants continuent.

III-3-2-Description de la pile

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composantes mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). C'est ce qui la différencie des batteries, accumulateurs et autres piles, où se trouve stockée sous forme

chimique une quantité limitée d'énergie électrique et qui doivent soit être rechargés lorsque c'est possible (batterie de véhicule), soit être remplacés (piles pour poste de radio).[19]

Tableau III-1:Fiche technique de la pile

Paramètres	Significations	Unités
R	Constante des gaz parfaits	J/mole.K
T	Température du gaz.	K
F	Constante de Faraday	C/mole
i_{den}	La densité du courant	A m ²
M	La Masse	Kg
H	Coefficient de transfert de chaleur	W/ (m ² .K)
A	La surface	m ²
M _i	Débit de mole de l'espèce i	mol/s
Σ	Constante de Boltzmann	W. m ⁻² k ⁻⁴
R	La résistance électrique	Ω

La serie de blocs pour le système de pile SOFC est illustrée sur la figure. bloc Simulink Stack SOFC est également composé du calcul de la tension Nernst, du débit de carburant de la pression (p_{H2} p_{H2O} et p_{O2})partielle et de la chute de tension.

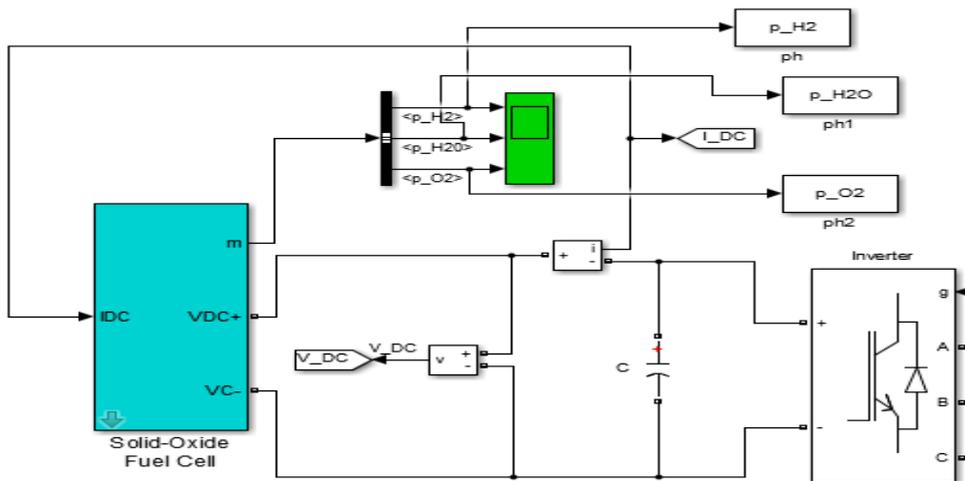


Figure III-2: Pile SOFC

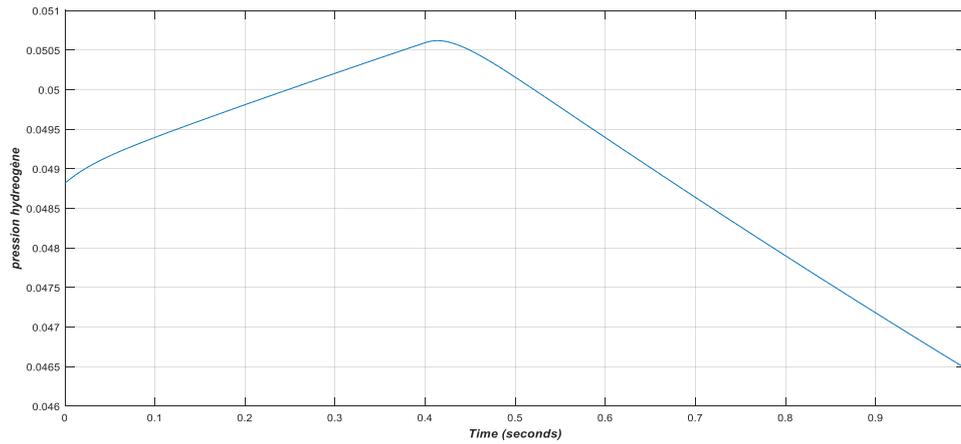


Figure III-3 : Courbe pression de l'hydrogène

La figure III-3 montre la caractéristique de l'hydrogène de la pile combustible, on remarque une augmentation de la quantité d'hydrogène jusqu'à atteindre la valeur 0.05 pendant 0.41s puis la caractéristique diminue jusqu'à 0.99s

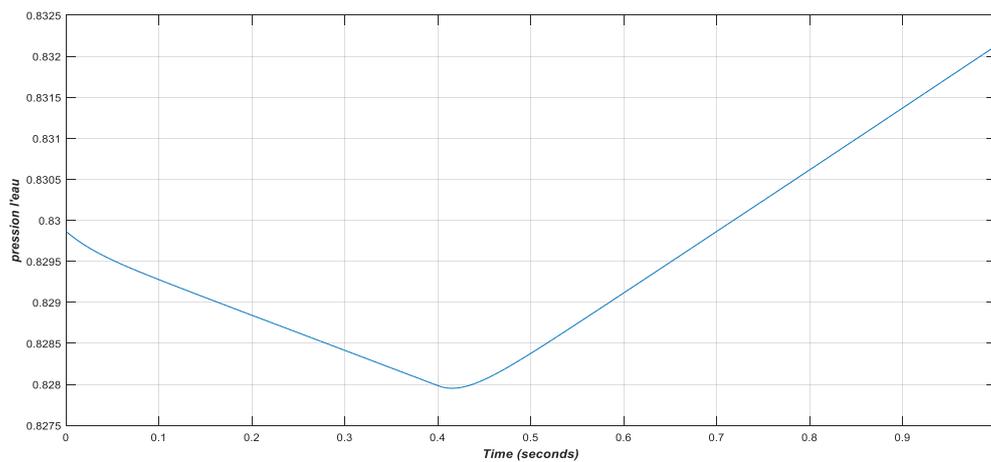


Figure III-4 : Courbe pression de l'eau

La figure III-4 illustre la variation de la quantité de H₂O jusqu'à 0.82 pa au bout de 0.41s puis elle augmente jusqu'à 0.83 pa

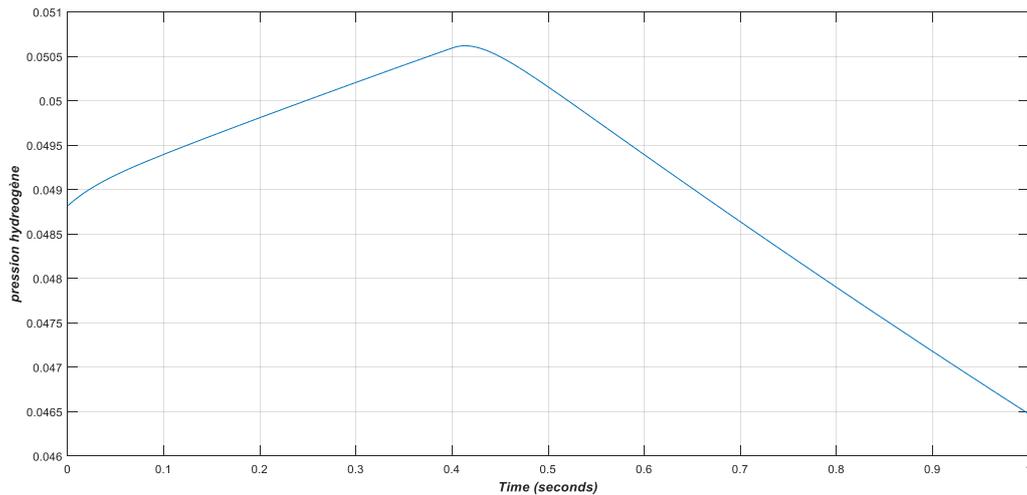


Figure III-5: Courbe pression de l'oxygène

La figure III-5 montre la caractéristique de l'oxygène présente un pic de [0.05 Pa] puis il sous 0.41s puis diminuer jusqu'à à [0.04 Pa]

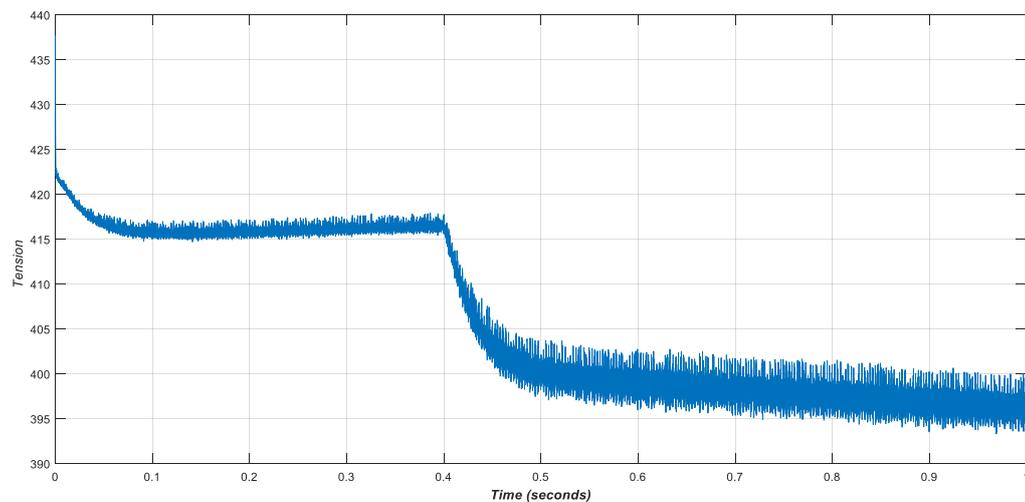


Figure III-6 : Alterne de tension de la pile

La figure III-6 montre la tension VDC de la pile combustible, on remarque une diminution de la tension jusqu'à atteindre la valeur 420V pendant 0.4s puis la caractéristique augmenter jusqu'à 0.99s

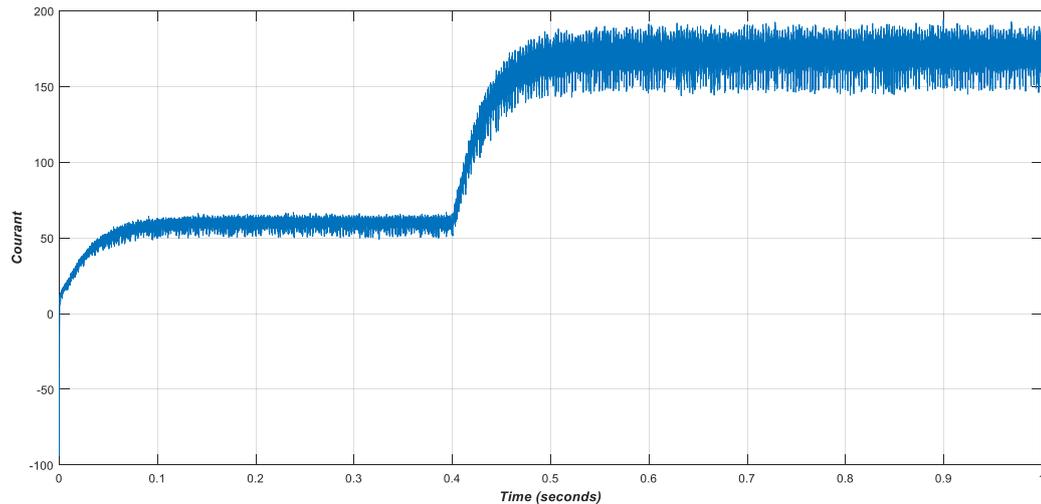


Figure III-7:Alterne de courant de la pile

La figure III-7 montre l'intensité de courant IDC de la pile combustible, on remarque une Augmentation de la tension jusqu'à atteindre la valeur 50A pendant 0.4s puis elle commence augmentera valeur 180A au temps 0.99s

La série de contrôleurs côté réseau se compose de plusieurs blocs qui sont la transformation PLL, l'hystérésis PWM et le contrôle de la puissance active. L'image de la série de contrôleurs côté réseau est illustrée à (la figure III-8)

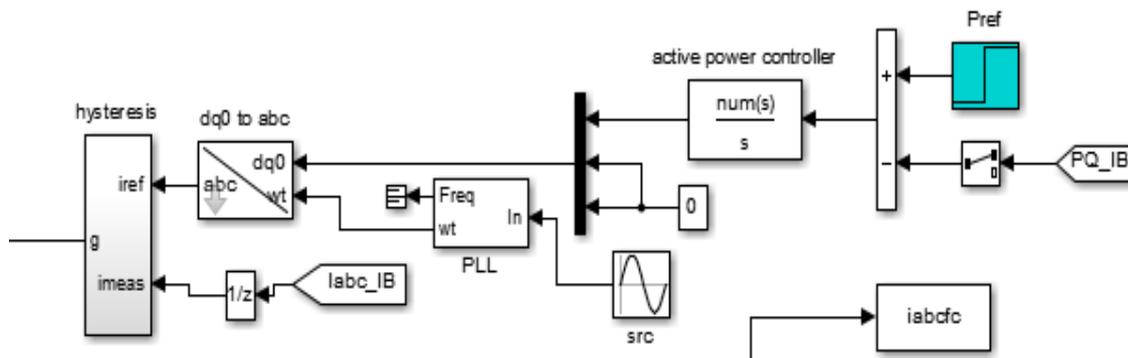


Figure III-8: série de contrôleurs côté réseau

L'onduleur est alimenté en tension à partir de la source de tension et l'onduleur libère la tension et le courant alternatif qui fleurissent au filtre L et au réseau

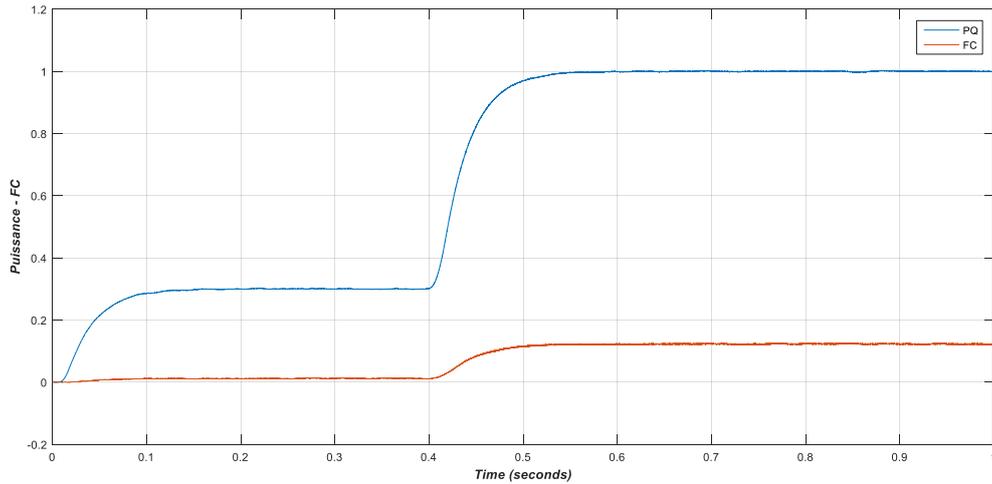


Figure III-9: Coubre de la puissance active et réactive

La figure III-9 représente les changements de PQ-FC en termes de temps, car on observe une augmentation de la courbe PQ jusqu'à la valeur 0.3 au temps 0.4s et en parallèle la courbe FC et stable au valeur 0 à temps 0.4s, puis les deux courbe PQ et FC commence à augmenter et stabilisé au temps 0.99s

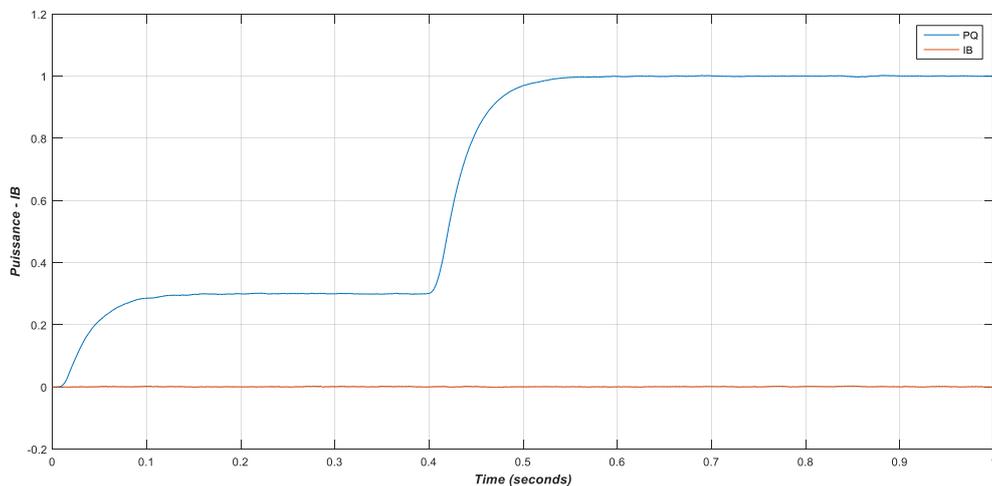


Figure III-10 : Coubre de la puissance active et réactive du bus infini

La figure III-10 représente les changements de PQ-IB en termes de temps, car on observe une augmentation de la courbe PQ jusqu'à la valeur 0.3 au temps 0.4s et en parallèle la courbe FC et stable au valeur 0, puis les deux courbe PQ commence à augmenter et stabilisé jusqu'à la valeur 1 au temps 0.99s

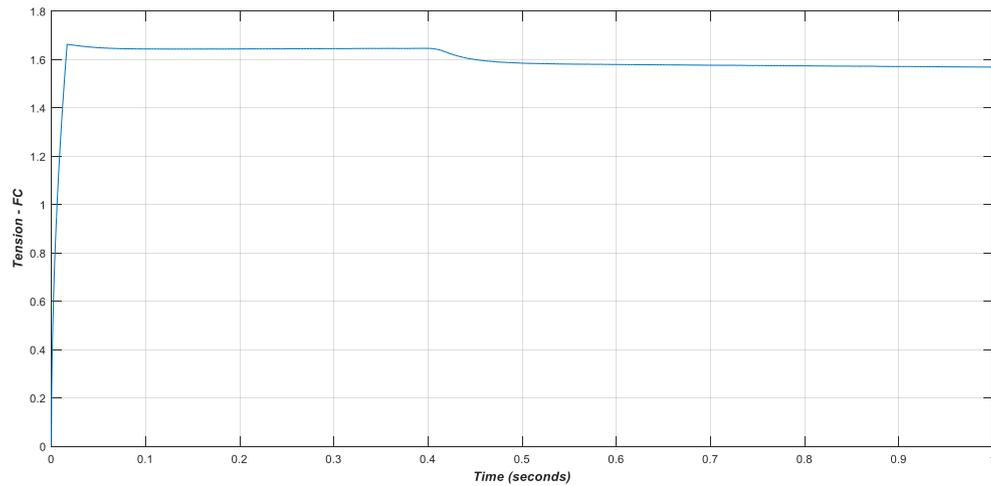


Figure III-11 : caractéristique tensions-FC

La figure III-11 montre la caractéristique de V_t -FC de la pile combustible, on remarque une augmentation de V_t -FC jusqu'à atteindre la valeur 1.6 pendant 0.4s puis la caractéristique diminue jusqu'à 0.99s

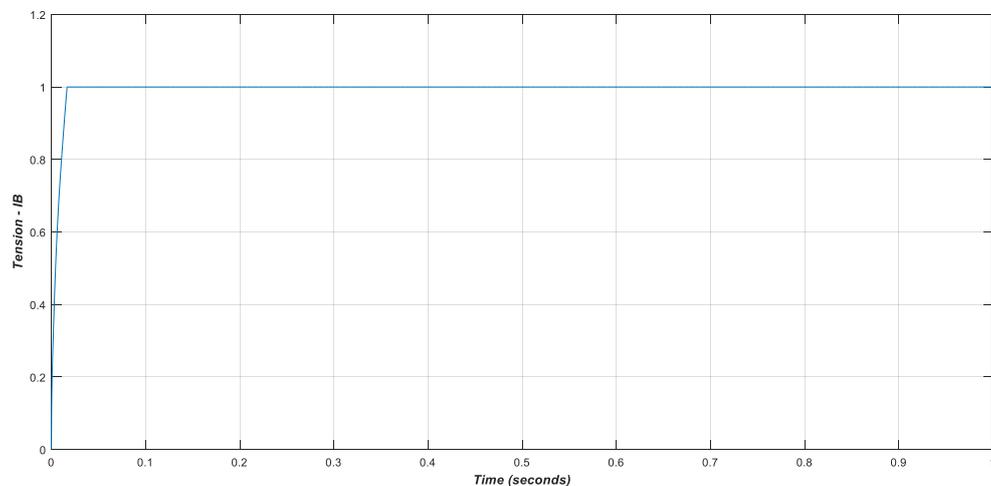


Figure III-12 : Caractéristique tensions-IB

La figure III-12 montre la caractéristique V_t -IB de la pile combustible, on remarque une augmentation de V_t -IB jusqu'à atteindre la valeur 1 pendant 0.01s puis la caractéristique stabilisé jusqu'à 0.99s au valeur 1

La série d'onduleurs est utilisée pour convertir la tension continue de la tension alternative. La tension d'entrée de l'onduleur obtenue à partir d'une série de SOFC. Tandis que l'onduleur de sortie provient d'une tension et d'un courant alternatif triphasés connectés à un transformateur triphasé avec système YY. Le transformateur sur la série de ce système est utilisé pour la protection. Ce système a besoin d'un filtre LCL de 0,001 mH connecté à la grille qui a une tension de 440 volts

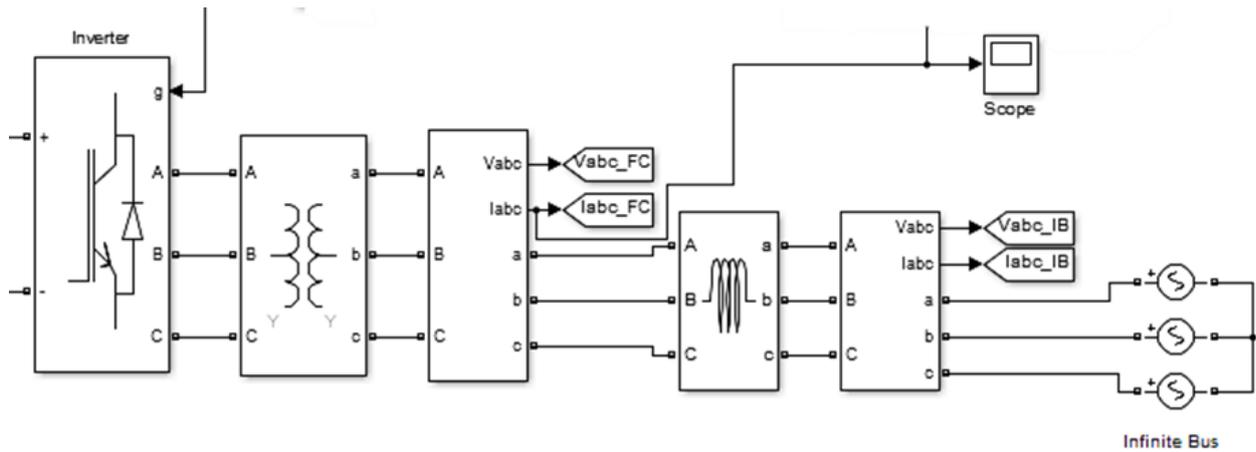


Figure III-13: Les onduleurs en série connectés au réseau

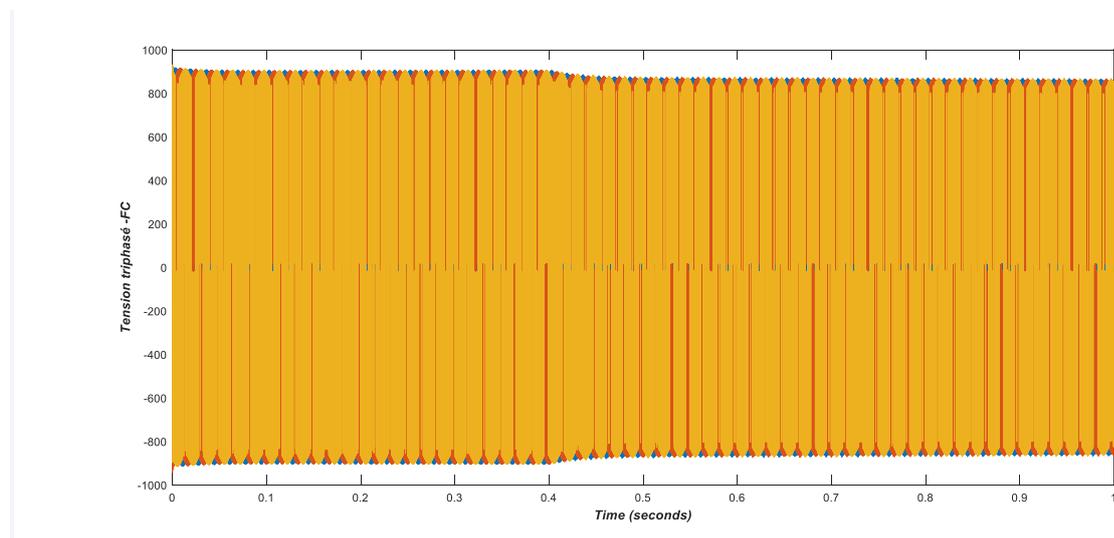


Figure III-14 : Caractéristique V_{abc-FC} -Temps

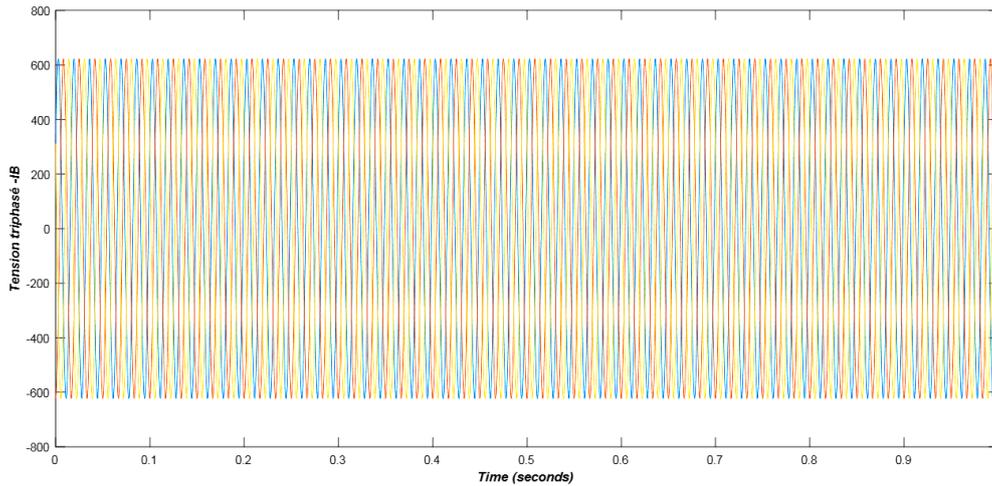


Figure III-15:Tension triphasées de bus infinie

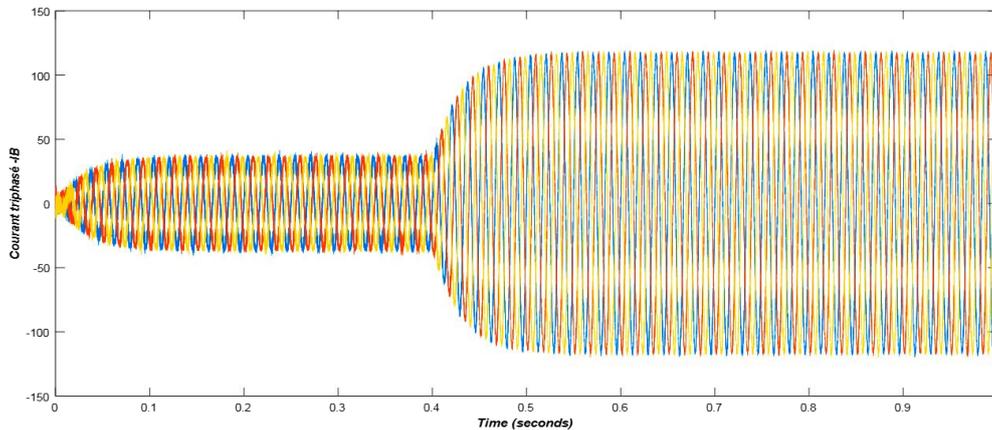


Figure III-16:Courbe de courants triphasés de buse infinie

III-4-MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée de basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse de haute fréquence de forme triangulaire. les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois référence sinusoïdales de $2/3$ à la même fréquence f .comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, donc elle comporte des harmoniques, ce qui engendre des pertes supplémentaires. La commande MLI sert à remédie ces problèmes et elle a les avantages suivants :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Elimination de certaines harmoniques de tension [20]

III-5 - Présentation d'un PLL

La PLL représentée par la *figure III-17* est composée :

- ❖ D'un Comparateur Phase-Fréquence (CPF) trois états qui délivre des signaux de commande à la pompe de charge en accord avec la différence de phase des signaux présents en entrée,
- ❖ D'un circuit pompe de charge, qui convertit les signaux logiques du CPF en signal de commande en courant,
- ❖ D'un filtre convertisseur/correcteur passe-bas,
- ❖ D'un oscillateur commandé en tension (VCO ou Voltage Controlled Oscillator),
- ❖ D'un diviseur de fréquence dans la chaîne de retour [21]

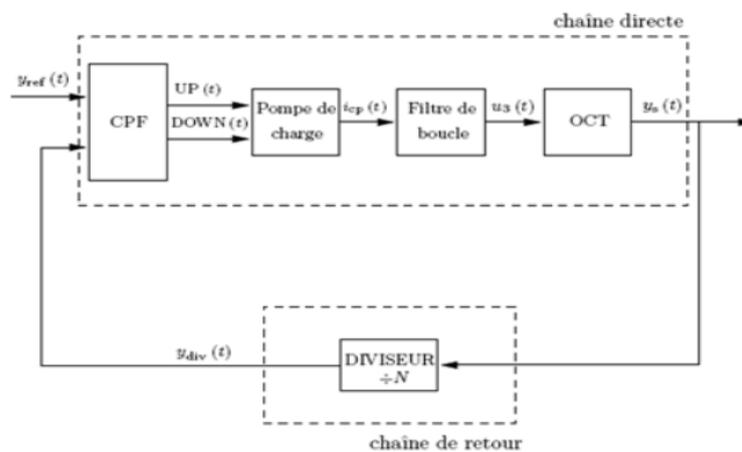
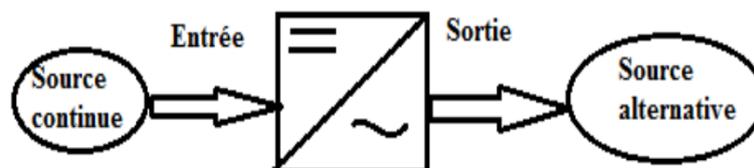


Figure III-17 : Schéma bloc de la PLL [21]

III-6-Convertisseur DC/AC

Un onduleur est un convertisseur à commutation qui permet de transformer un signal continu en un signal alternatif. Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande



On trouve une large gamme d'applications pour ce type de convertisseurs : les alimentations de secours (UPS), la centrale téléphonique et les actionneurs des moteurs à courant alternatif à fréquence variable. [22]

III-7- Transformateur de courant

Cet appareil comporte deux circuits, un primaire et un secondaire, et un circuit magnétique. Il délivre un signal secondaire de même nature que la grandeur primaire à mesurer ; c'est une source de courant. Bien qu'il ne soit pas linéaire et que sa plage d'utilisation soit limitée par les phénomènes de saturation magnétique, c'est aujourd'hui le type d'appareil le plus employé en THT. Un TC peut comporter plusieurs secondaires, chacun d'eux étant dédié à une fonction précise, mesure ou protection.

- Secondaire « mesure » : Sa plage de précision est étroite. Elle est généralement limitée à des courants inférieurs au courant primaire assigné.

- Secondaire « protection » : Dans ce cas la plage de précision est très large. Elle atteint très souvent une à vingt fois le courant primaire assigné.

La conception d'un tel secondaire est très différente selon le mode de fonctionnement, régime permanent ou transitoire, auquel il est destiné.



Figure III-18: Transformateur de courant [31]

Il existe deux types de transformateurs de courant :

- Les transformateurs de type primaire bobiné ; utilisés pour les courants de faible intensité.

- Les transformateurs de type primaire à barre ; utilisés pour les courants supérieurs à 100 A,

Le primaire ne comporte qu'un tour (fig.III-19) le câble ou la barre conduisant le courant passe dans la fenêtre d'un circuit magnétique toroïdal, sur le tore l'enroulement secondaire est bobiné très soigneusement. [23]

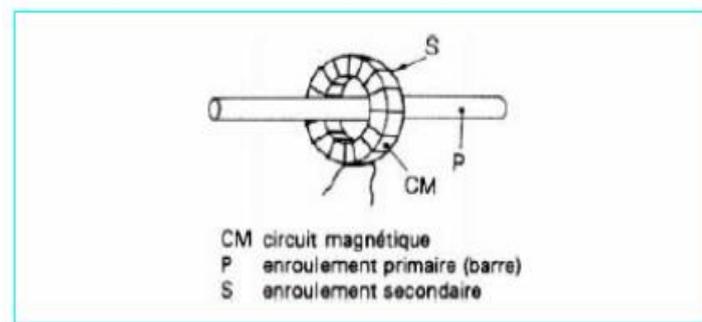


Figure III-19: Transformateurs de type primaire à barre [23]

III-8- Conclusion

La simulation effectuée dans ce chapitre a permis de fournir Au début du développement des PAFC, des informations concernant l'influence du courant sur la tension de sortie de la pile. D'après la courbe de polarisation, nous avons constaté que l'évolution de la tension peut être divisée en trois zones : une chute de tension rapide pour les faibles valeurs du courants, c'est la zone des pertes par activation, ensuite une zone de décroissance linéaire qui correspond à la zone de la chute ohmique, et enfin, une chute rapide de la tension au niveau de la valeur limite de courant (180 A), c'est la zone des pertes par concentration.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a slight shadow effect.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le développement des nouvelles énergies est un défi majeur, suite aux changements climatiques dus à la pollution d'une part, et d'une autre part, l'épuisement des énergies fossiles. Les technologies de l'hydrogène et en particulier les piles à combustible (PAC) à basse températures prévalent de nombreux avantages pour être les sources d'énergie de demain.

Dans le cadre de notre travail, un outil de modélisation a été mis en œuvre pour les piles SOFC grâce à l'analogie entre les domaines électrique, thermique et chimique, cette manière de procéder constitue un outil simple, évolutif et efficace. Grâce à cette modélisation, une simulation a été effectuée à température 600°C à 1000°C constante dans le but d'obtenir les différentes caractéristiques et l'influence des paramètres étudiés (courant, tension) sur les performances de la pile à combustible SOFC.

Les résultats montrant l'effet des différentes sources de chaleur sur des piles SOFC à anode et à électrolyte supportée. L'effet des températures des gaz de même ou de valeurs différentes est discuté

L'étude porte principalement sur ce dernier type de source de chaleur. La bibliographie s'y rapportant révèle diverses expressions qui à leur tour influencent le champ de température et la densité de puissance. Également une investigation bibliographique est portée sur l'équation d'énergie.

Bien que plusieurs voies de recherche sur les piles à combustible n'en soient qu'à un stade préliminaire, il est nécessaire de conduire des études de sûreté dès les premières phases de conception.

Références Bibliographiques

- [1] SAIGHI SLIMANE, «Etude numérique de l'effet des phénomènes de transfert de chaleur de masse et de charge sur la performance d'une pile à combustible de type (SOFC) planaire». Mémoire, Université de Batna, 2006/2007
- [2] YOUCEFI ABDELHAK, TELEMÇANI BELKACEM, « Modélisation d'une pile à combustible de type PEM » Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2016 /2017
- [3] AZZI HALIM, « Etude et modélisation d'une pile à combustible », Mémoire de Magister Université A.MIRA-BEJAIA 2015/2016.
- [4] David ROTUREAU, «Développement de piles à combustible de SOFC, conventionnelles et mono-chambres, en technologie lanlaire par sérigraphie. »Thèse de Doctorat Université, 1^{er} juin 2005.
- [5] BELLAKHDAR MOHAMMED CHERIF ,«Etude de l'association pile PEMFC /super-condensateur »Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2013.
- [6] CHAIMA ABDELLAOUI, Synthèse de spinelle $Zn(1-x)Cu_xCo_2O_4$ par la méthode sol-gel pour un matériau cathode dans les piles à combustible» Mémoire de Magister, Université 2018 – 2019.
- [7] HAMID MOUNIR, Caractérisation, modélisation thermo fluide et électrochimique, Simulation numérique et étude des performances des nouvelles piles à combustible types IP-SOFC (Integrated-Planar Solid Oxide Fuel Cell)»,Thèse de Doctorat Faculté Des Sciences RABAT ,2010
- [8] FAHED MEKHALFIA Laid LAMRI,«Modélisation des piles à combustible application à l'entraînement du moteur asynchrone »Mémoire, Université de M'SILA , 2007/2008
- [9] HAMLAOUIROUMAÏSSA, GUEDOUARI SALEM, Modélisation d'un compresseur alimentant d'une pile à combustible type PEMFC, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra 2019/2020.
- [10] Mathilde RIEU 'Préparation par voie sol-gel et caractérisation d'une cellule complète SOFC sur support métallique poreux» Thèse de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE ,5 novembre 2009

Références Bibliographiques

- [11] ARAB LYDIA, CHEBBI ZAHRA, «Etude et simulation d'une pile à combustible de Type PEM», Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira 2016
- [12] INEZARENE SMAIL, «Modélisation d'Une Cellule de Piles à Combustible à Oxyde Solide (Simulation Numérique du Transfert Thermique) »2014/2015.
- [13] M. CHNANI, «Modélisation Macroscopique de piles PEFC et SOFC pour l'étude de leur couplage»,Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard et de l'Université de Franche- Comté, 2008.
- [14] Jérémie FONDARD, «Elaboration et test d'une pile à combustible IT-SOFC à support Métallique poreux par l'intermédiaire de techniques de dépôt en voie sèche : projection Thermique et pulvérisation cathodique magnétron». Thèse de docteur de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en Sciences pour l'Ingénieur
- [15] MEDDOUR NEDJMA,' «Simulation Numérique du transfert thermique Incluant le mode de rayonnement dans une pile à combustible a oxyde solide» ,Mémoire MAGISTERE , Université Kasdi Merbah Ouargla , 2010
- [16] M^{lle}. ABDENEBI HAFSIA, «Étude numérique bidimensionnelle des champs thermique dans une pile à combustible du type SOFC planaire». Mémoire, Université de BATNA, 2009
- [17] BENYAHIA N, «Modélisation et simulation d'une pile à combustible (SOFC)». Mémoire, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou2011-2012
- [18] M^{lle}. ABDENEBI HAFSIA, «Étude numérique bidimensionnelle des champs thermiques dans une pile à combustible du type SOFC planaire». Mémoire, Université de BATNA, 2009
- [19] ZHIMING ZHANG, Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible». Thèse de docteur de l'Université de d'evry-val d'Essonne, 2010.
- [20] AHMANE ANISSA, «Etude et Réalisation d'une Carte de Commande d'un Onduleur Monophasé PWM».Mémoire, Université Labri Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi –Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique Filière Électrotechnique, 2015/2016
- [21] RATIARISON David, «Synthétiseur de Fréquence PLL».Mémoire, Université d'Antananarivo, 2007/2008

Références Bibliographiques

- [22] AHMANE ANISSA, «Etude et Réalisation d'une Carte de Commande d'un Onduleur Monophasé PWM». *Mémoire*, Université Labri Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi –Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique Filière Électrotechnique», 2015/2016
- [23] Melle N. BOUBRIT et Mr S. BOUCIF, «Etude & Dimensionnement du Poste de Transformation 400/220 KV de Sidi-Ali-Boussidi». *Mémoire*, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2007/2008
- [24] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1839_William_Grove_Fuel_Cell.jpg
- [25] <https://slideplayer.fr/slide/1146226/>
- [26] <https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/pile-a-combustible/>
- [27] https://www.researchgate.net/figure/2-Schema-de-principe-dune-pile-a-combustible-SOFC_fig1_328661055
- [28] Mr BENMESSAOUD MOHAMMED TARIK, «système d'énergie hybride PV-SOFC Étude de cas de réalisation stationnaire à l'usto» Thèse , Université des Sciences et de la technologie - Mohamed Boudiaf- oran 2012
- [29] <https://www.semanticscholar.org/paper/Mod%C3%A9lisation-macroscopique-de-piles-PEFC-et-SOFC-de-Chnani/4c653af9cbaf7d4aaaf22b7b1656e1eb44128279>
- [30] https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonctionnement-dune-cellule-SOFC-chmltech-2005_fig1_278617498
- [31] https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_courant