

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Projet de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Filière : Electrotechnique

Intitulé :

**Calcul et dimensionnement
d'une source d'énergie renouvelable
pile à combustible**

Présenté par :

**IKHLEF NOUREDDINE
MOULAI WALID**

Devant le jury :

**Président
Examineur
Encadreur**

A. Miloudi
M.Sekour
M.Mankour

Promotion 2019-2020

REMERCIEMENT

Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur « Dr. Mankour Mohamed », pour ses aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.

Nous remercions les membres du "jury", d'avoir accepté et d'examiner notre travail.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à notre formation. Et nous exprimons notre reconnaissance à tous les travailleurs de la faculté de technologie avec qui nous avons pu bénéficier de leurs aides.

Nous tenons à remercier nos familles. « IKHLAF ET MOULAI »

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidées de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion E.L.T.



DEDICACE

Dédicace

Ikhlef noureddine

Je dédie ce travail

À Ma mère et mon père

Et ma Cousin

À Toute ma famille

En particulier mon petit frère

Mon voisin bin cheikhi cheikh

À Tous mes amis et mes camarades

Serraoui houcine et alaa areb et abed mhamed

makhlouf okkacha

Dédicace

Moulai Walid

**Je dédie ce travail
À Ma mère et mon père
Et ma Coursan
À Toute ma famille
Et Amina**



I. Introduction générale

Chapitre I : Energies renouvelables

I Introduction	4
I.1- L'énergie renouvelable	4
I.2 Types de l'énergie renouvelable	5
I.2.1 Energie hydraulique	5
I.2.2 Energie solaire	6
I.2.2.1Energie solaire photovoltaïque	7
I.2.2.2 Energie solaire thermique	7
I.2.3 Energie géothermie	8
I.2.4 Energie de la biomasse	9
I.2.5 Généralités sur un système éolien.....	10
I.2.5.1 Définition de l'énergie éolienne:	11
I.2.5.2 Les différents types d'éoliennes	11
I.2.5.2.1 Les éoliennes à axe horizontal.....	11
1- les éoliennes à rotation lente "multiples"	12
2-. Aérogénérateurs	12
I.2.5.2.2Les éoliennes à axe vertical	12
I.3 Les piles à combustible.....	13
I.3.1 Les différents types de piles à combustible	14
I.4. L'énergie marine	14
I.4.1 L'énergie des marées	14
I.4.2 Énergie des courants marins	14
Conclusion	15

Chapitre II : Piles à Combustibles

II- Introduction	17
II.1 – Généralités sur la pile à combustible.....	19
II.2 Les type de PAC	20
II.2.1 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC).....	21
II.2.2 Pile à méthanol direct (DMFC)	22
II.2.3 Pile à acide phosphorique (PAFC)	23
II.2.4 Pile alcaline (AFC)	23
II.2.5 Pile à carbonate fondu (MCFC)	24
II.2.6 Pile à oxyde solide (SOFC).....	25
II.3 Choix technologique de la pile à combustible. (Solid Oxide Fuel Cell): SOFC.....	26
II.3.1 Composants de la pile SOFC	27
II.3.1.2 L'électrolyte	28
II.3.1.3 Mode de fonctionnement d'une pile SOFC	28
II.3.1.4 Trois types de structure	29
II.3.1.4.1 La structure plane.....	30
II.3.1.4.2 La structure monolithique	31
II.3.1.4.3 La structure monolithique	31
II.3.1.5 Utilisation des SOFC	31
II.3.1.6. Les Avantages et inconvénient des SOFC	32
II.3.1.6.1. Les avantages de la pile SOFC	32
II.3.1.6.2. Problème et inconvénient des SOFC	33
II.3.2 Applications	33
II.3.2.1 Les applications portables	33
II.3.2.2 Les applications stationnaires	34
II.3.2.3 Les applications de transport	35

II.4 Les études Présidentes :	35
II.5 Conclusion :	38
Chapitre III : Résultats et interprétations	
III. Dimensionnement du stack pile à combustible	40
III.1 Détermination du nombre de cellules	40
III.1.2 Détermination de la surface des cellules	42
III.3 Introduction	45
III.3.1 Modèle d'Aguiar	45
III.3.2 Modèle d'A.C. Burt	47
III.3.3 Tableau récapitulatif	48
III.3.4 Résultats de la simulation	49
III.3.5 Caractéristique tension-courant de la pile	50
III.3.5.1 La puissance	50
III.3.5.2 Rendement électrique	51
III.4. Conclusion	53
Conclusion générale	55

Liste des figures

Figure I.1 : les énergies renouvelables dans la production mondiale	5
Figure I.2 l'énergie hydraulique au niveau des barrages	6
Figure I.3 L'énergie solaire photovoltaïque	7
Figure I.4 L'énergie solaire thermique la transformation du rayonnement.....	8
Figure 1.5 : Chauffage d'une maison par énergie géothermique	8
Figure I.6 L'énergie géothermique	9
Figure I.7 L'énergie de la biomasse	9
Figure I.8 : Une éolienne à 3 pâles.....	10
Figure I.9 : l'énergie éolienne.....	11
Figure I.10 : l'énergie éolienne à rotation rapide	12
Figure I.11 l'axe de rotation est vertical	13
Figure 1.12 : Hydroliennes implantées dans les profondeurs des mers	15
Figure II-1 : Expérience de Sir W.Grove en 1839	18
Figure II.1.2 : Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide	19
Figure II.1.3 : Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique	20
Figure II.4 Schéma d'une pile SOFC.....	27
Figure II.5 Fonctionnement d'une pile SOFC (basique)	29
Figure II.6 Structure d'une pile SOFC tubulaire.....	30
Figure II.7 Structure d'une pile SOFC PLANE	31
Figure III-1: Caractéristique Tension/Courant (tension par cellule)	41
Figure III-2 : Caractéristique Puissance/Courant (puissance par cellule)	41
Figure III-3 géométrie d'une cellule de la pile SOFC avec logiciel Comsol.....	43

Figure III-4: Fraction Molaire Oxygène avec logiciel Comsol.....	43
Figure III-5: Fraction Molaire hydrogène avec logiciel Comsol	44
Figure III-6: Puissance de la pile SOFC avec logiciel Comsol.....	44
Figure III-7: fraction molaire de la l'air	49
Figure III-8: fraction molaire de la d'eau	49
Figure III-9: fraction molaire hydrogène.....	50
Figure III-10: fraction molaire oxygène	50
Figure III-11: Densité de puissance	51
Figure III-12: Rendement électrique de la cellule.	51
Figure III-13: Pert Activation	52
Figure III-14: Pertes ohmique.	52
Figure III-15: Pertes de concentration	53

Introduction général

L'énergie fait partie des besoins humains essentiels, au même titre que l'eau et la nourriture, une ressource indispensable à la vie. La rendre accessible à tous sans dégrader notre environnement, tel est le défi à relever. La demande en énergie va encore considérablement augmenter dans les années à venir fait de la croissance démographique et de l'élévation progressive du niveau de vie, en particulier dans les pays en voie de développement. Les besoins devraient ainsi doubler d'ici à 2050. Pour les satisfaire, les sources d'énergie seront plus complémentaires que concurrentes, chaque source énergétique a ses avantages et ses inconvénients, et qu'il n'existe pas d'énergie parfaite permettant de satisfaire à tous nos besoins. Toutes les options énergétiques doivent ainsi être maintenues ouvertes pour apporter les réponses les plus appropriées, aussi bien d'un point de vue environnemental que d'un point de vue économique.

Aujourd'hui, et plus que jamais, c'est nécessairement les énergies renouvelables, estimées non pas en terme de quantité, ni même en terme de stock, mais de flux énergétiques largement supérieurs au niveau actuel de consommation énergétique de l'humanité, qui peuvent constituer des énergies de substitution tout à fait réalistes de part leur faible impact sur l'environnement. Seul l'utilisation et la promotion des énergies renouvelables peuvent faire avancer l'Homme vers de nouveaux horizons biens meilleurs et sains qui ne compromettent pas son existence présente et future.

Un aspect caractérisant les changements en cours dans le panorama énergétique mondial est la diffusion de systèmes de génération par énergie renouvelable de petite et moyenne puissance, dispersés sur le territoire, soit en configuration connectée au réseau, soit en configuration isolée ; on parle ainsi de "génération distribuée" ou "dispersée" dans le premier cas et de "génération isolée" dans le deuxième. La nécessité d'obtenir une meilleure fiabilité, les développements technologiques en filières comme celle des super-condensateurs ou celle de l'hydrogène ont conduit à des solutions plus complexes: des systèmes associant différentes sources et différents éléments de stockage.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre on va donner quelques définitions concernant les énergies renouvelables où on va parler brièvement des différents types de ces derniers.

- Dans le second chapitre, on commence par un bref historique des piles à combustible, suivi d'une explication de leur principe de base et de leurs différents domaines. Notre choix est une pile à combustible SOFC parmi d'autres ,en décrivant d'abord son principe et en donnant quelques avantages et inconvénients liés à son utilisation ainsi que des applications spécifiques et des études présidentielles axées sur la recherche.

Le troisième chapitre est consacré à une présentation générale du contexte de l'étude de dimensionnement et de modélisation électrochimique de la pile à combustible. Il décrit le fonctionnement des systèmes SOFC et la nature des composants avec notamment les caractéristiques requises pour les matériaux de cœur de pile, les caractérisations électrochimiques réalisées pour chacun des composants de la cellule, La modélisation électrique de la SOFC est basée sur les calculs de la tension théorique de Nernst et des différentes surtensions (ohmiques, concentration et activation).

Une conclusion générale, à la fin de ce manuscrit, vient récapituler les résultats et constatations trouvées.

Introduction

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium. Ces gisements, ces stocks, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique, sont évidemment en quantité limitée : ils sont *épuisables*.

Par opposition, les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des végétaux, les marées, la chaleur de la terre sont *renouvelables*. Toutes ces énergies renouvelables n'ont d'ailleurs en définitive que deux sources : le *soleil* (puisque celui-ci est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées, de la croissance des végétaux) et la *terre* (qui dégage de la chaleur).

Par extension, on assimile souvent l'énergie tirée des déchets à une énergie renouvelable : on peut en effet considérer que l'activité humaine ou animale est perpétuelle, et donc source de déchets sans cesse *renouvelés*. Souvent on englobe sous le nom de *biomasse* l'énergie d'origine végétale, encore appelée « houille verte » (bois et biocarburants), et les déchets humains, végétaux ou animaux.

I.1- L'énergie renouvelable

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité.

Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", 20% du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7%) et par l'énergie nucléaire (17,1%) figure(I.1).

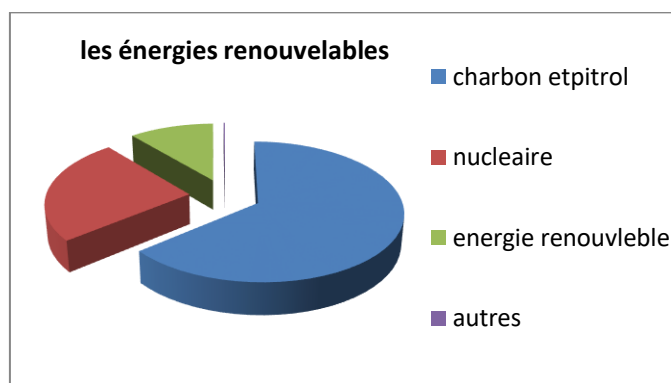


Figure I.1 : les énergies renouvelables dans la production mondiale

Qu'un électron sur cinq soit " propre ", cela n'est déjà pas si mal. Mais ce chiffre encourageant masque une grande disparité entre les sources d'énergies renouvelables. À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5% de l'électricité issue des énergies électriques. Les utilisations de la biomasse produisent 5,5% du courant mondial " vert ", la géothermie 1,5%, l'éolien 0,5% et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05%. Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre.

I.2 Types de l'énergie renouvelable

Il y a plusieurs énergies qui rentrent dans cette catégorie, elles sont classées comme suit :

I.2.1 Energie hydraulique

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique

est utilisé au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité. Le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit injectée dans le réseau de distribution. La puissance disponible dépend de deux facteurs la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.



Figure I.2 l'énergie hydraulique au niveau des barrages

I.2.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil, bien que cette dernière distante de plus de (150) millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injecté dans le réseau.

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés. On peut distinguer trois types d'énergie solaire : le solaire photovoltaïque, le solaire passif et le solaire thermique.

I.2.2.1Energie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand père du découvreur de la radioactivité) en 1839, dont le principe est simple : La lumière du soleil (les photons) est transformée directement en électricité (les électrons) par des cellules photovoltaïque. Ces cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque.

Plusieurs modules sont regroupés en panneaux pour former un parc ou une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre-ville, permettant d'économiser d'autant les besoins de fourniture par le réseau des bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la Fourniture d'électricité dans les sites isolés, électrification rurale et pompage de l'eau (50%), télécommunications et signalisation (40%), applications domestiques (10%),



Figure I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

I.2.2.2 Energie solaire thermique

A la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de

différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau solaire, cuisinières et sécheurs solaires,



Figure I.4 L'énergie solaire thermique la transformation du rayonnement

I.2.3 Energie géothermie

L'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol. Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. La température des roches augmente en moyenne de (1°C) tous les (30m) de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100m. A la surface de la terre, cette énergie est en moyenne (10000) fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil.

L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée.

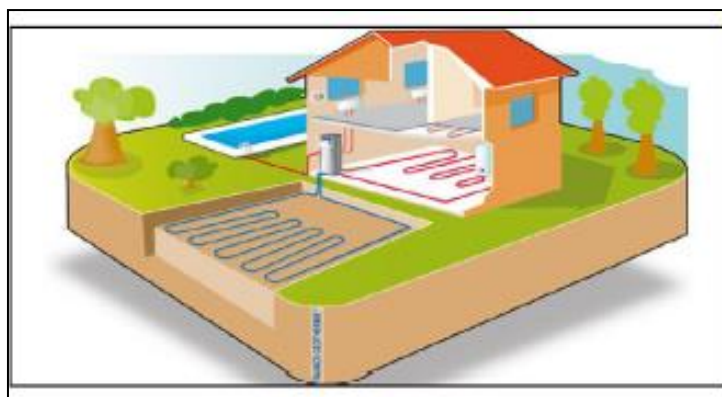


Figure 1.5 : Chauffage d'une maison par énergie géothermique.



Figure I.6 L'énergie géothermique

I.2.4 Energie de la biomasse

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire, c'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tel le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante ; comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre.



Figure I.7 L'énergie de la biomasse

I.2.5 Généralités sur un système éolien

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne, au début, elle a été utilisée pour faire avancer les bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à grande échelle avec le grand éolien, l'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique, en outre, l'énergie éolienne est, une énergie propre, renouvelable qui peut pallier aux problèmes environnementaux. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Elle peut être utilisée de deux manières ; directe ou indirecte.

a : Direct

L'énergie mécanique est conservée ainsi on utilise le vent pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail).

b : Indirect

Pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, une éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.



Figure I.8 : Une éolienne à 3 pâles.

I.2.5.1 Définition de l'énergie éolienne:

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et rentrent dans la catégorie des énergies renouvelables.

La représentation dans la figure suivante donne un modèle de petit réseau caractérisant la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique. [2]

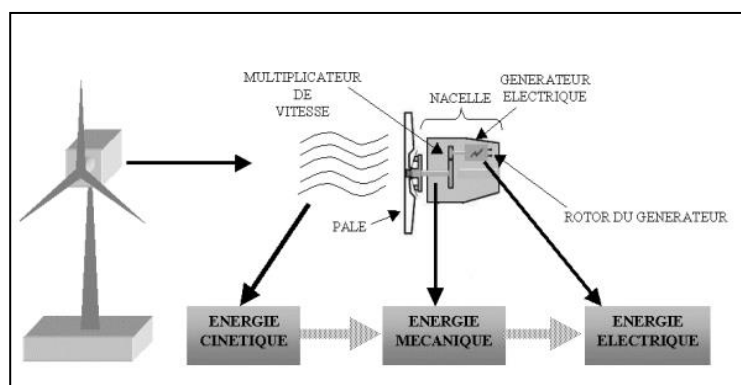


Figure I.9 : l'énergie éolienne

I.2.5.2 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [6]

I.2.5.2.1 Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement qui est supérieur à celui de toutes les autres machines.

Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau. Elles ont un rendement élevé

- . Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.
- Sur la base du nombre de pâles que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

1. les éoliennes à rotation lente "multiples"

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau

2. Aérogénérateurs

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant « d'aérogénérateurs ». Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ». [3]

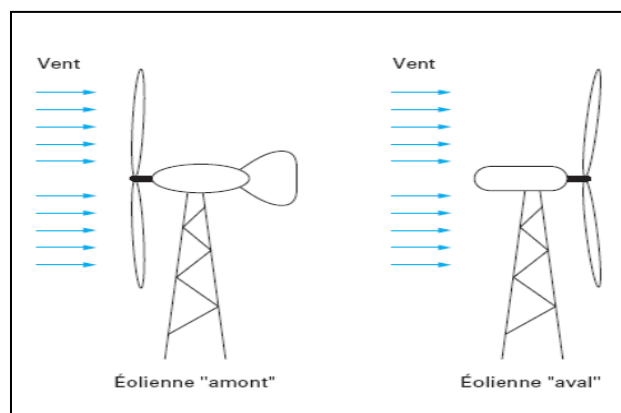


Figure I.10 : l'énergie éolienne à rotation rapide

1.2.5.2 Les éoliennes à axe vertical [6]

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s

L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



Figure I.11 l'axe de rotation est vertical

I.3 Les piles à combustible

Parmi les technologies envisagées à l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse.[8] Ce convertisseur d'énergie à la fois propre et efficace, permet de transformer l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique fortement pressenti pour le futur par de grands spécialistes mondiaux au vu de son énergie massique, estimée 3 fois plus importante que l'essence, en une énergie électrique qu'il est possible de valoriser. L'utilisation de cette génération permet d'atteindre des rendements très intéressants jusqu'à 80 dans certains cas.

I.3.1 Les différents types de piles à combustible

La pile à combustible à membrane (proton Exchange membrane fuel cell) PEMFC ;

La pile à combustible à carbonate fondu (molten carbonate fuel cell) MCFC ;

La pile à acide phosphorique (phosphoric acid fuel cell) PAFC ;

La pile alcaline (alkaline fuel cell) AFC ;

La pile à méthanol direct (direct méthanol fuel cell) DMFC ;

I.4. L'énergie marine

L'énergie marine est une source d'énergie renouvelable qui dépend des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elle permet de fabriquer de l'électricité, essentiellement grâce aux mouvements de ces eaux. On distingue :

I.4.1 L'énergie des marées

La force du flux et du reflux de la marée est utilisée pour produire de l'électricité en temps réel, dans une usine marémotrice. Son fonctionnement est un peu identique à celui d'une centrale hydroélectrique de basse chute : En montant et en descendant, la marée fait tourner des turbines. Les turbines font à leur tour fonctionner un alternateur, qui produit un courant électrique [06] .

I.4.2 Énergie des courants marins

Leur énergie est captée pour produire de l'électricité grâce à des hydroliennes, comme les éoliennes le font avec la force des vents. Leur fonctionnement est aussi

simple que celui d'une éolienne : La force des courants marins actionne les pales d'une ou plusieurs hélices. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transmise à un alternateur. L'alternateur produit de l'énergie électrique, acheminée par des câbles sous-marins jusqu'au rivage [07].

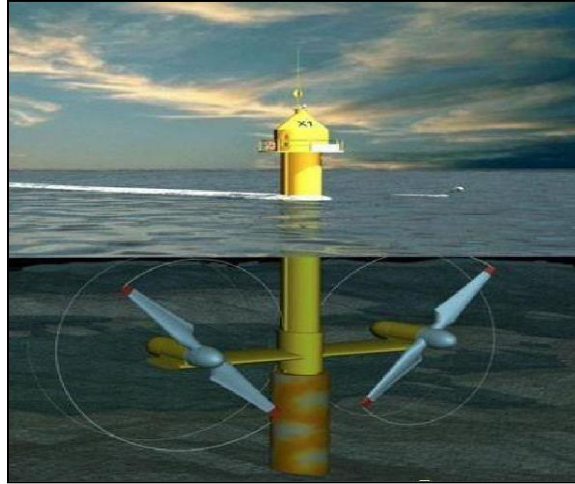


Figure 1.12 : Hydroliennes implantées dans les profondeurs des mers

Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. A partir de ce qui précède, dans les chapitres suivants, nous identifions une des techniques les plus importantes dans la production de l'électricité qui est l'énergie des Piles à combustibles, qui est maintenant considéré comme une des technologies les plus importantes dans la production de l'électricité.

II- Introduction

Le développement des nouvelles énergies est un défi majeur du 21^{ème} siècle pour, d'une part, faire face au réchauffement climatique et d'autre part, avoir des alternatives aux énergies fossiles.

La croissante consommation mondiale en énergie primaire ainsi que la raréfaction prévue à moyen terme des combustibles fossiles et leur impact non négligeable sur l'environnement, font de l'hydrogène l'un des vecteurs énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles. La production mondiale d'énergie repose aujourd'hui essentiellement sur les combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel. L'augmentation de la population mondiale ajoutée au développement économique laisse prévoir le doublement des besoins énergétiques au niveau mondial. Tant dit que les réserves s'épuisent, nous devons trouver une alternative aux combustibles fossiles, ce qui a poussé les scientifiques à chercher de nouvelles sources de production d'énergie électrique qu'on appelle aujourd'hui les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont de nos jours aux cœurs de l'actualité et considérées comme une solution pour favoriser l'indépendance énergétique et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Une nouvelle source possible et renouvelable qui apparaît comme une technologie prometteuse : est la pile à combustible. Elle est efficace en terme de rendement et elle produit de l'énergie sans rejet polluant ni nuisance sonore. La pile à combustible est un système électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'une réaction d'oxydoréduction en énergie électrique avec production simultanée d'eau et de chaleur, donc la pile à combustible est un convertisseur d'énergie performant en terme de rendement, qui transforme l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en énergie électrique d'une part et en chaleur d'autre part .

L'effet physico-chimique à l'origine des piles à combustible a été découvert en 1838 par le professeur Christian Friedrich Schoenbein qui a observé un courant électrique dû à la combinaison d'hydrogène et d'oxygène. La première pile à combustible fut présentée par William GROVE en 1839 sous l'expérience suivante : une cellule hydrogène-oxygène (figure I-1) constituée d'électrodes de platine et d'un électrolyte acide (acide sulfurique) [09].

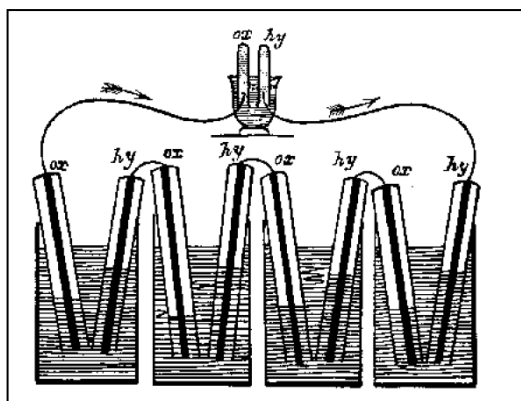


Figure II-1 : Expérience de Sir W.Grove en 1839

Après quelques améliorations apportées à cette expérience, celle-ci tombe presque dans l'oubli au profit des machines thermiques, des accumulateurs et des piles électriques en vogue à cette période là. Cinquante ans plus tard, en 1889, Ludwig Mond et Charles Langer apportent des perfectionnements notamment avec l'introduction de catalyseurs (platine) ou d'électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre et en amiante. Ils baptisent cette technologie pile à combustible.

Wilhelm Ostwald dit en 1884 « la pile à combustible est une invention plus importante pour l'humanité que la machine à vapeur et enverra bientôt le générateur Siemens dans les musées ». Malheureusement, à cause de la grande quantité de pétrole disponible et de l'invention du moteur à combustible, les piles à combustible furent délaissées jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. Les piles à combustible réapparurent alors dans le programme spatial américain Apollo.

Les acteurs du domaine énergétique français ne restent pas à l'écart des travaux de l'époque mais pour des raisons de faisabilité technique ou pour des raisons stratégiques (choix d'autres filières de production d'électricité) les programmes sont progressivement arrêtés.

Ce n'est que dans les années 1990 que les recherches reprennent, notamment dans le domaine automobile. En 1999 les recherches vont être encouragées (et financées) grâce à la création d'un réseau national de recherche technologique « pile à combustible » elles sont poursuivies à l'heure actuelle par l'intermédiaire de projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ou d'autres organismes publics comme L'ADEM [09].

II.1 – Généralités sur la pile à combustible :

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. Le combustible utilisé dans la plupart des piles à combustible est l'hydrogène. Le méthanol peut aussi être utilisé directement dans certaines piles à combustible [10].

Dans les piles à hydrogène, la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, est réalisée par une réaction chimique de type redox. L'hydrogène se combine avec l'oxygène pour former de l'eau selon la relation globale suivante :



Le principe de base de la technologie de la pile à combustible repose sur la séparation de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène de celle de réduction de l'oxygène. Pour cela, la cellule de base d'une pile à combustible est constituée de deux électrodes (anode, cathode) séparées par un électrolyte. Selon le type d'électrolyte acide ou basique (alcalin), la réaction chimique conduisant à la production d'électricité et de chaleur diffère.

Dans un électrolyte acide, ce sont les ions positifs (protons) qui se déplacent de l'anode à la cathode (figure 1.2). L'eau est produite à la cathode. Par contre, dans un électrolyte basique (alcalin), ce sont les ions négatifs qui se déplacent de la cathode à l'anode (figure 1.3). L'eau est produite à l'anode, mais de l'eau est aussi nécessaire à la cathode pour créer les ions.

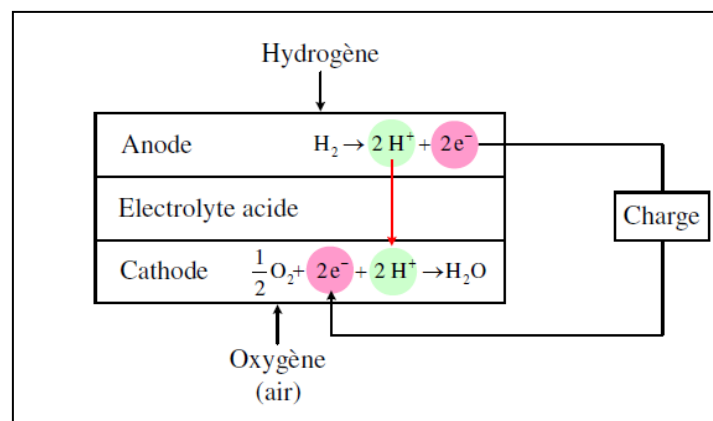


Figure II.1.2 : Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte acide [10].

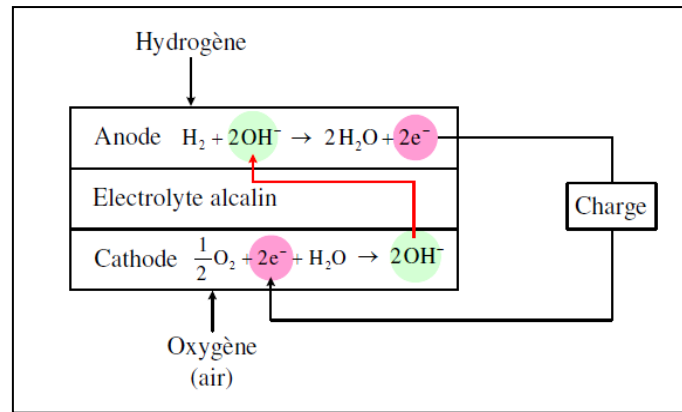


Figure II.1.3 : Réactions de base dans une pile à combustible à électrolyte basique [10].

II.2 Les type de PAC

La classification des piles à combustible se fait généralement selon la nature de l'électrolyte car celui-ci détermine, d'une part, la température à laquelle la pile fonctionne et, d'autre part, le type d'ion assurant la conduction ionique. La classification repose essentiellement sur :

- La nature de la membrane : liquide ou solide
- La température de fonctionnement de la pile : basse ($60 \pm C$ - $250 \pm C$) ou Haute ($600 \pm C$ - $1000 \pm C$)

Il existe 6 types de piles à combustible qui se différencient entre elles par leur température

De fonctionnement et par l'électrolyte donnant son nom à la pile :

- 1- la pile à combustible à membrane échangeuse de proton (polymer electrolyte membrane fuel cell : PMEFC)-
- 2 – la pile à combustible à méthanol direct (direct methanol fuel cell : DMFC)
- 3 – la pile à combustible à acide phosphorique (phosphoric acid fuel cell : PAFC)
- 4- – la pile à combustible alcaline ou alkaline fuel cell (AFC))
- 5- – la pile à combustible à oxyde solide (solid oxide fuel cell : SOFC)
- 6- – la pile à combustible à carbonates fondus (molten carbonate fuel cell : MCFC[11].

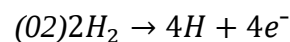
	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Membrane échangeuse de protons	Membrane échangeuse de protons	Acide phosphorique	Solution KOH	Mélange de Li_2CO_3 et KCO_3	$\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$
Type de charge transférée	H^+	H^+	H^+	HO^-	Co^{2-}	O^{2-}
Température de fonctionnement (en °C)	60-120	60-120	160-220	<100	600-800	600-1000
Combustible	H_2	Méthanol	H_2 produit à partir d'hydrocarbures	H_2	H_2	H_2 et CO produit à partir d'hydrocarbures
Puissance	10 kW	5 kW	250 kW	100 kW	100 kW	10 kW
Applications actuelles	Statiques, transport, spatial	Statiques, transport	Statiques bateau, trains	Statiques, transport, spatial	Statiques, bateau	Statiques
Etat	Développement	Recherche	Marché	Marché	recherche	recherche
Oxydant	Air	Air	Air	O_2	Air	Air

Tableau I.1. Caractéristiques actuelles des différents types de piles à combustibles [11],

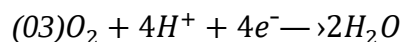
II.2.1 Pile à membrane à électrolyte polymère (PEMFC)

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fut ensuite vite remplacé par des AFCs, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de type Nafion (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C , de façon à maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

A l'anode, on a :



Et à la cathode, on a :



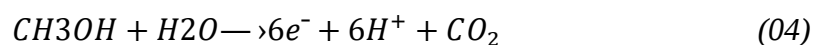
L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des Protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. 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 coûteux.

Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de Composites de métaux à base de carbone. [12] [13].

II.2.2 Pile à méthanol direct (DMFC)

La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est Alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 80°C :

A l'anode:



Et à la cathode on a :



Dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels du à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela à pour effet une baisse des performances de la pile. [14] [15].

II.2.3 Pile à acide phosphorique (PAFC)

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC, avec une puissance fournie comprise entre 5 et 20 MW, ont été installées dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFCs sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système.

Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans températures variant de 150 à 220°C.

À l'anode:



Et à la cathode :



Comme dans le cas des PEMFCS, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat côtelé dans lequel l'électrolyte peut être stocké. [16].

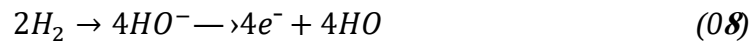
II.2.4 Pile alcaline (AFC)

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

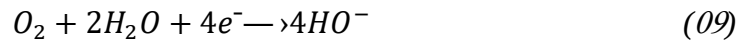
Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se trouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trente dernières années.

Fonctionnant à des températures variant de 60° à 90°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes :

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

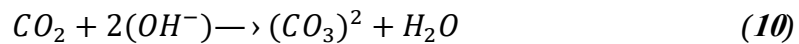


Et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :



Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (OH^-). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques [7].

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

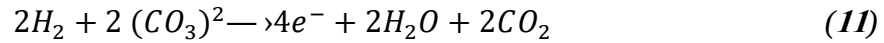


Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage en reliant plusieurs piles en série. [16]

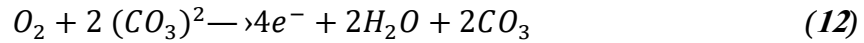
II.2.5 Pile à carbonate fondu (MCFC)

Le développement des piles à combustible à carbonate fondu a débuté dans le milieu du vingtième siècle. Les systèmes à base de piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voir supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus les MCFC peuvent utiliser une large gamme de carburant, et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO_2 comme c'est le cas des piles à basses températures.

A l'anode, on a la réaction suivante :



Au niveau de la cathode :

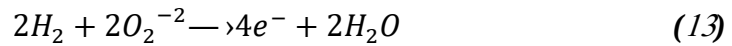


L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO₂). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel du côté de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée. [17].

II.2.6 Pile à oxyde solide (SOFC)

Le principe de fonctionnement des SOFCs est basé sur le mécanisme suivant. L'oxygène est dissocié à la cathode en 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. [18] [19] Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode:



A la cathode:



II.3 Choix technologique de la pile à combustible. (Solid Oxide Fuel Cell) : SOFC

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

Pour ces raisons, la technologie se prête particulièrement bien à la production

D'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1KW à quelques dizaines de MW). Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale.

- La mise au point de ce type de pile, de par sa haute température de fonctionnement et la résolution des problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux est assez complexe.
- Une des particularités de la SOFC et son électrolyte solide, habituellement du Zirconium (Zr^{2+}) dopé d'une mole de 8 à 10% d'yttrium (Y^{3+}), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O^{2-}). Les SOFCs peuvent être de conceptions planes, monolithique et tubulaires, et utiliser de l'acier inoxydable, de l'acier austénitique, des matériaux céramiques selon les températures de fonctionnement et l'électrolyte désiré.

Enfin elle est de technologie «tout solide » et donc peut à la fois prétendre à des durées de vie supérieures aux piles à électrolyte liquide (pas de pièces mobiles au sein du convertisseur) ainsi qu'une industrialisation plus aisée : ceci permet d'envisager un coup prospectif compatible avec le marché visé, d'autant qu'elle offre une compacité sensiblement supérieure à celle des autres filières [20].

Les piles à combustibles à oxydes solides (ou SOFC) sont prévues essentiellement pour les applications stationnaires avec une puissance de sortie allant de 1 kW à 2 MW. Elles fonctionnent à très hautes températures, typiquement entre 450 °C et 1 000 °C. Dans ces piles, les ions oxygène sont déplacés au travers d'un oxyde solide pris comme électrolyte à haute température afin de réagir avec l'hydrogène du côté anode.. Les SOFC ont été utilisés avec du méthane, du propane, du butane, du gaz de fermentation, de la biomasse gazéifiée et des vapeurs de peinture. Cependant, les composés soufrés présents dans le combustible doivent être éliminés avant de pénétrer dans la pile, ce qui peut être aisément fait grâce à un lit de charbon actif ou un absorbant à base de zinc.

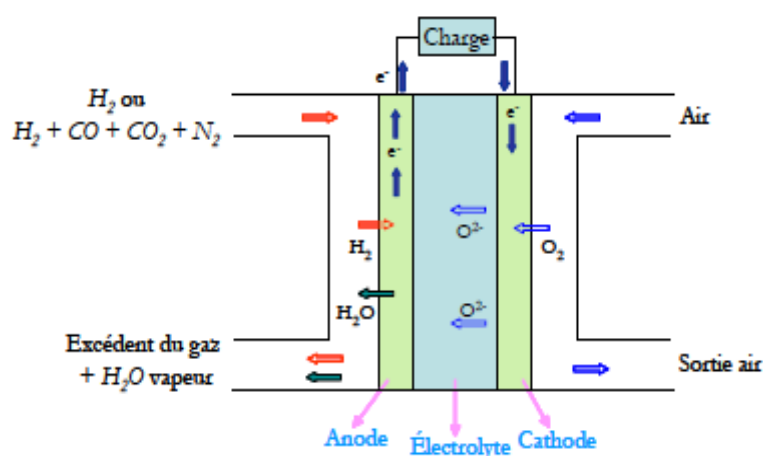


Figure II.4 Schéma d'une pile SOFC

II.3.1 Composants de la pile SOFC

Une SOFC est constituée de quatre couches, trois d'entre elles étant des céramiques (d'où leur nom). Une pile unique constituée de ces quatre couches superposées possède une épaisseur typique de quelques millimètres. Des centaines de ces piles sont alors superposées en série pour former ce que le grand public appelle "pile à combustible à oxyde solide". Les céramiques utilisées dans les SOFC ne deviennent actives électriquement et ironiquement que lorsqu'elles atteignent une très haute température, et, par conséquent, les empilements doivent atteindre des températures de l'ordre de 600 à 1 200 °C [21]

De manière générale, les matériaux utilisés doivent être stables chimiquement à la fois dans des atmosphères réductrices ou oxydantes, mais aussi entre eux. De plus, vu le niveau de température, il est nécessaire que les composants aient des coefficients de dilatation identiques.

II.3.1.2 L'électrolyte

Les SOFC ont un électrolyte solide: celui ci doit être un bon conducteur ionique pour les ions O^{2-} (qui diffusent à travers l'électrolyte), d'où le choix d'une température de fonctionnement élevée: entre 800 et 1000°C imposée par l'électrolyte. Il doit aussi ne pas conduire les électrons et avoir une bonne résistance mécanique et chimique. On a donc choisi pour l'électrolyte des céramiques, le plus souvent, il s'agit de zircone stabilisée à l'yttrium de formule $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$. En effet, pour améliorer les propriétés de conductivité ionique et mécaniques des zircons ZrO_2 , on les dope avec des ions Y^{3+} , voire Ca^{3+} , Sc^{3+} , Ln^{3+} créant ainsi des lacunes électroniques et permettant la mobilité des ions oxygène.

Le problème des zircons est la baisse de leur conductivité avec le temps. On cherche donc à développer de nouveaux matériaux: on peut ainsi trouver des composés avec Ce à la place de Zr et Sc , Ca ou Ln à la place de Y , des gallates de lanthanide.

On espère pouvoir baisser la température de fonctionnement grâce à ces nouveaux matériaux. En fait, les recherches sont faites pour développer une SOFC fonctionnant à une température plus basse: 700°C, ce qui permettrait de diminuer les contraintes sur les matériaux. [21]

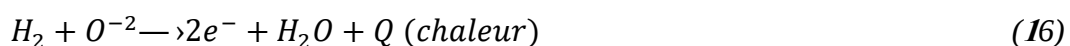
II.3.1.3 Mode de fonctionnement d'une pile SOFC :

Dans le cœur d'une pile à électrolyte basique comme les SOFC, ces réactions deviennent :

à la cathode : réduction catalytique de l'oxygène :



à l'anode : oxydation catalytique de l'hydrogène qui capture les ions O^{2-} qui ont traversé l'électrolyte pour donner de la chaleur et de l'eau :



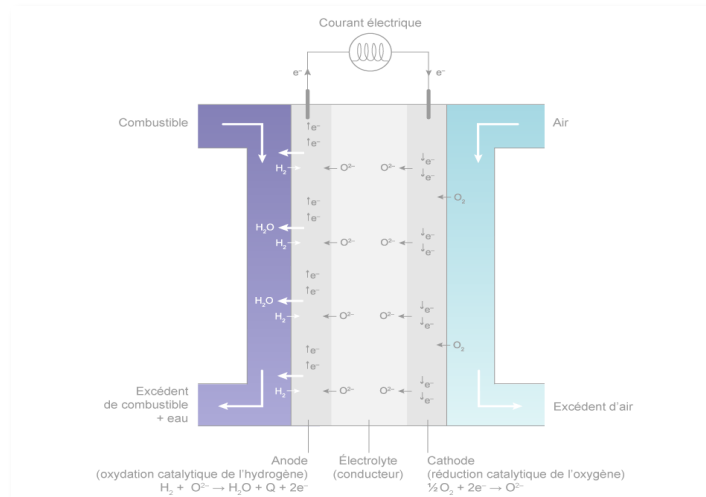


Figure II.5 Fonctionnement d'une pile SOFC (basique)

Dans ce cas, les électrons sont libérés sur l'anode puis, bloqués par l'électrolyte, passent par le circuit extérieur de la pile et fournissent de l'énergie électrique (force électromotrice) avant de se recombiner sur la cathode avec l'oxygène.

Le rôle du catalyseur dans l'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de la réduction de l'oxygène à la cathode est essentiel dans le rendement de la pile. On utilise encore aujourd'hui principalement le platine, qui est déposé en couches minces sur la surface des deux électrodes, mais en plus grande quantité sur la cathode, la réaction de réduction y étant plus difficile à catalyser. Or le platine est un métal rare, très coûteux, qui pèse lourdement sur la compétitivité des piles à combustible actuelles.

II.3.1.4. Trois types de structure : [21]

Il existe trois types de structure de cellule élémentaire pour les piles SOFC :

- Tubulaire
- Plane
- Monolithique

Ces trois technologies offrent des performances différentes. La technologie tubulaire est dans l'immédiat la plus simple à concevoir. Les deux autres technologies se mettent difficilement en place avec des problèmes d'étanchéité dus à la dilatation des matériaux dans les hautes températures.

Configuration	Différence de potentiel (V)	Densité de puissance (W/cm ²)	Rendement (%)
Tubulaire	0.65	0.261	50
Plane	0.8	0.318	61
Monolithique	0.84	0.335	65

Tableau III.1. Performances potentielles de cellules fonctionnant à 1000°C.

Sources : Techniques de l'ingénieur.

III.1.4.1. La structure tubulaire

La technologie cylindrique développée par Westinghouse tube sert de support à la cathode (au centre), l'électrolyte, et l'anode (à l'extérieur) qui l'entourent sous forme de couches concentriques. La cathode est fabriquée par extrusion, anode et électrolyte et interconnexion sont déposés par CVD. L'air passe à l'intérieur du tube support (en zircone poreuse) tandis que le combustible passe à l'extérieur de la structure: une part est oxydée et l'autre est mélangé avec l'air sortant et sert à réchauffer comburant et combustible. Les tubes sont placés en parallèle et connectés par des plaques de nickel et ont une longueur de 1,5 m pour un diamètre de 22 mm. [21]

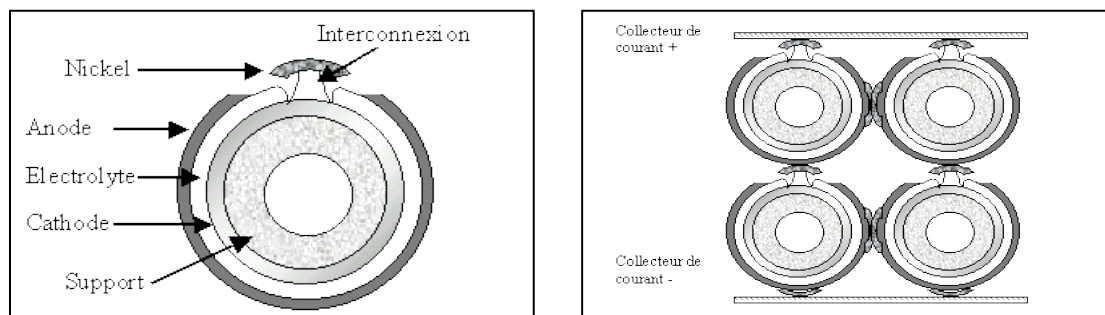


Figure II.6 Structure d'une pile SOFC tubulaire

II.3.1.4.1 La structure plane

Développée par des entreprises telles que Siemens: on aboutit à une structure plus compacte et beaucoup plus simple. La cellule élémentaire est constituée par les électrodes entourant l'électrolyte, chacune étant reliée aux autres par des plaques

bipolaires et séparée des autres par des joints d'étanchéité. Le problème essentiel de ce type de structure vient de l'étanchéité des cellules.

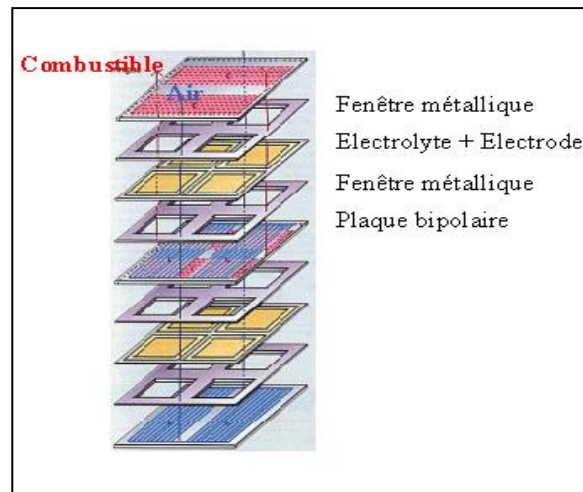


Figure II.7 Structure d'une pile SOFC PLANE

III.1.4.3 La structure monolithique

Est plus récente et développée par Argonne National Laboratory. L'anode et la cathode sont sous forme de couches plissées, séparés par des joints d'étanchéité et l'électrolyte. Le flux du comburant et du combustible peut être parallèles ou croisés. Par rapport à la configuration tubulaire, de plus hautes densités de puissance sont possibles. [21]

II.3.1.5 Utilisation des SOFC

Dans le cas des applications stationnaires, on distingue:

- Les applications domestiques (chaleur et électricité, quelques KW),
- la production de chaleur et d'électricité par cogénération,
- la production centralisée d'électricité avec couplage avec une turbine à gaz ou à vapeur.

Grâce à leur température élevée, les SOFC peuvent atteindre de hauts rendements électriques. Bien qu'en théorie, le rendement soit moins bon à haute température, il est possible de récupérer la chaleur produite soit pour l'utiliser pour de la cogénération, soit pour augmenter le rendement électrique par couplage avec une turbine à gaz: certains auteurs donnent alors des rendements de plus de 70%.

L'autre application stationnaire des SOFC est dans les petites applications domestiques de quelques kW, dans ce cas la chaleur produite peut être réutilisée pour les besoins en eau chaude ou le chauffage de l'habitation. Par rapport aux PEMFC qui sont leurs concurrentes directes dans ce domaine, les SOFC ont l'avantage de pouvoir utiliser directement de multiples carburants: du gaz naturel au charbon gazéifié en passant par la biomasse. Sulzer Hexis - l'une des entreprises les plus impliquées avec des SOFC conçues pour ce type d'application - vise un marché allant des habitations individuelles aux petits immeubles. [21]

II.3.1.6.1 Les Avantages et inconvénient des SOFC

- **Les avantages de la pile SOFC**

Les principaux avantages motivant l'utilisation de la pile SOFC lors de la conversion énergétique des carburants primaires sont, d'un point de vue environnemental, la baisse de la consommation de carburants (efficacité supérieure) et la réduction des rejets polluants. On peut aussi s'attendre à ce que la pollution sonore des systèmes SOFC soit bien inférieure à celle des systèmes concurrents, Ellen crée une énergie très propre, et développe des puissances supérieures aux autres types de pile à combustible. La désulfuration et le pré reformage permettent à la pile SOFC d'être connectée au gaz de ville. Cela évite le problème de distribution de l'hydrogène posé par les autres piles.

De par le choix d'électrodes catalytique, des pressions et des hautes températures, les cinétiques de réaction sont très rapides. Cela permet à la pile de débiter de fortes puissances. La chaleur et les fumées dégagées par la pile sont recyclées dans la cogénération pour l'un, et dans une turbine à gaz pour l'autre. C'est ce recyclage global qui donne à la pile ses hauts rendements et ses faibles rejets de polluants.

Son développement commercial devrait se concrétiser dans les prochaines années puisque les matériaux utilisés sont bien meilleur marché que ceux des autres modèles de pile.

- **Inconvénient des SOFC**

Les SOFC fonctionnent à des températures élevées $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; avec le temps, les composantes de la cellule se fragilisent et les propriétés électrochimiques se réduisent

brusquement. Cet inconvénient peut être réduit par l'abaissement de la température, Cependant, la diminution de la température provoque une chute importante des performances de la cellule en augmentant les résistances inter faciales.

Cependant le cout de fabrication des SOFC est relativement élevé et leur performance ainsi que leur durée de vie ne sont pas optimisées. [21]

II.3.2 Applications

Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples, ils sont généralement classés en trois grandes familles d'application: portables, stationnaires et transport [01].

II.3.2.1 Les applications portables

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW, 50 mW en veille et quelques watts en conversation) et l'ordinateur portable (qui consomme en moyenne 10 W). Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur batterie, même la plus performante comme la batterie lithium-ion. Cette dernière atteint aujourd'hui une énergie spécifique de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse généralement quelques jours d'autonomie à un téléphone portable et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux alors que la batterie électrochimique est proche de ses limites. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des «portables»: 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions en 2005; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions en 2005. La solution qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux États-Unis, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

II.3.2.2 Les applications stationnaires

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

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

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

Le marché mondial potentiel des piles à combustible, pour le seul stationnaire, est estimé à près de 60 milliards de dollars à l'horizon 2030. Quant au coût objectif, il se situe autour de 1300 \$/kWh installé pour le système complet. Il correspond au niveau actuel de développement de cette technologie ce qui explique les délais proches (à partir de 2002) généralement annoncés par les divers constructeurs (essentiellement américains jusqu'à maintenant) déjà engagés sur ce marché. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible [22].

II.3.2.3 Les applications de transport

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

véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement (donc les coûts admissibles) ne seront pas du tous les mêmes [22].

II.4 Les études Présidentes

Les résultats observés, en les comparants aux résultats d'autres auteurs ayant fait des études similaires ou proches. Tout sujet a déjà été abordé par d'autres dont on ne doit pas méconnaître la méthodologie ou les résultats.

1. **Jason Le Masters [23]**, a développé un code informatique en différence finie, capable d'exécuter des calculs de conception préliminaires pour l'analyse des contraintes thermiques qui peuvent avoir lieu dans les piles à combustible à oxyde solide. Ce modèle analyse la fabrication, le démarrage (start-up) et opère dans les conditions de fonctionnement en état stationnaire. Ce code a été minutieusement modelé pour inclure des changements significatifs (la structure), des nouvelles sources de chaleur (électrochimiques), des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides (air température élevée et hydrogène). des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides (air température élevée et hydrogène). Ce code était comparé au code commercial avec FLUENT.
2. **Eduardo Hernandez-Pacheco [24]**, a développé un modèle électrochimique thermique pour simuler la performance d'une pile à combustible à oxyde solide sous des conditions de fonctionnement différentes et des facteurs géométriques. La température, le courant, la distribution du gaz et le carburant utilisé ont été calculés avec le modèle dans différentes régions. Les résultats de modélisation ont montré de bons résultats pour des réductions de gradients de température à l'intérieur de la pile.
3. **Srividya Valluru [25]**, son travail caractérise les contraintes thermiques surgissant pendant le fonctionnement des piles à combustible à oxyde solide planaire. Ce facteur est important pour l'efficacité de ce genre de pile. Les contraintes thermiques sont calculées à partir des champs température en utilisant le code ANSYS. Une approche d'analyse de contrainte

thermique couplée est mise en œuvre pour un modèle en deux et trois dimensions.

4. **V.T. Srikar et al. [26]**, se sont intéressés aux piles SOFC miniaturisées, ils considèrent une configuration planaire avec électrolyte supporté et en utilisant un modèle analytique simple. L'analyse de perte d'énergie en raison de la conduction de chaleur met en évidence l'importance efficace de l'isolement thermique. Cette analyse avec des considérations géométriques, permet l'identification d'une structure qui réduit simultanément au minimum les pertes thermiques et assure une bonne stabilité suffisante. Le développement d'arrangements pour l'isolement thermique de micro dispositifs de pile à combustible est donc un secteur important de recherche.
5. **Jinliang Yuan et al. [27]**, analysent numériquement le flux du gaz et le transfert thermique dans un le canal anodique d'une pile SOFC dans le cas tridimensionnel. Ils montrent que parmi des 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.
6. **Masayuki Suzuki et al. [28]**, évoquent une série de simulation numérique pour voir l'influence des transferts couplés (chaleur et masse) avec des réactions électrochimiques dans une pile de type SOFC planaire. Les résultats montrent que les pertes de tension sont principalement dus à la résistance interne dans l'inter connecteur et la surtension d'activation des électrodes. La différence de température dans la pile devient plus grande lorsque la longueur de la cellule augmente. En se basant sur les résultats, ils proposent une conception améliorée de pile, qui utilise un matériau de résistance électrique basse et haute conductivité thermique. La tension calculée de la pile nouvellement conçue est environ 7 à 10 % plus haute que celle de la pile conventionnelle, de plus, la température maximale est réduite de 10 à 40 K.
7. **David L. et al. [29]**, ont étudié le transfert radiatif dans les électrodes et l'électrolyte, aussi bien que le transfert radiatif entre le carburant et les canaux véhiculant le flux d'oxygène. Les auteurs montrent que le mode de transfert radiatif est prépondérant et étudient les pertes de chaleur par conduction. Ces modes doivent être pris en considération durant la conception de la pile et ont

une importance critique pour la gestion efficace thermique de la pile à haute température. Ils ont discuté la quantité et les effets radiatifs dans les matériaux constituant ce type de pile (SOFC).

8. **Y. Inui et al. [30]**, se penchent sur le problème de la durée de vie de la céramique utilisée dans les piles SOFC et élucident que les très hautes températures provoquent des contraintes thermiques dans la céramique. La distribution de température dans la pile, devrait être gardée aussi constante que possible durant l'opération de charge. En considérant ce fait, les auteurs optimisent numériquement les paramètres d'exploitation comme la température de gaz d'admission.
9. **P.F. van den Oostkamp [31]**, cite que l'état actuel de l'art du développement des piles à combustible repose sur la connaissance des phénomènes des transferts thermiques. Aussi, tant dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) que les piles à combustible à oxyde solide lui-même, le transfert thermique est une question critique. L'auteur montrera les implications du transfert thermique de pile à combustible à son architecture totale.
10. **K.J. Daun et al. [32]**, montrent qu'à cause de leurs hautes températures d'exploitation, le transfert thermique radiatif peut jouer un rôle important dans l'électrode et les couches d'électrolyte de piles à combustible à oxyde solide. ils présentent une caractérisation détaillée des propriétés radiatives et thermo physiques des matériaux composites, qui sont utilisés pour définir un modèle 2D simple incorporant les caractéristiques de transfert thermique de l'électrode et les couches d'électrolyte de la pile SOFC type planaire. Par la suite, l'importance de radiation thermique est évaluée en comparant le champ de température obtenu utilisant un modèle de conduction avec celui obtenu en utilisant un modèle couplés conduction/radiation. Contrairement à une certaine littérature publiée, ces résultats montrent que le transfert thermique de radiation a un effet négligeable sur le champ de température dans ces composants et ne doit pas être adapté dans les modèles thermiques complets de SOFC planaire

II.5 Conclusion

Actuellement les matériaux utilisés sont assez variés, mais il reste toujours une partie Pour l'innovation dans ce domaine. Toutes les recherches dans cet axe sont orientées afin de trouver des matériaux ou des solutions technologiques originales pour produire de l'électricité avec des systèmes moins onéreux à fabriquer.

Ce chapitre nous a permis d'introduire la notion des piles à combustible, le principe de fonctionnement et les différentes technologies de piles combustibles existantes actuellement.

Introduction

Nous présentons dans ce chapitre le dimensionnement de la pile à combustible et ensuite la modélisation des équations électrochimiques d'une PAC de type SOFC. Ce modèle nous permettra de retrouver la caractéristique électrique $V(I)$ de la pile.

D'autre part, il nous permettra d'effectuer une étude paramétrique afin de voir l'influence des différents paramètres de fonctionnement (Température, pression,...) sur la caractéristique électrique. Une simulation sous MATLAB/SIMULINK sera effectuée.

III. Dimensionnement du stack pile à combustible

Le du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de piles à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir [33]

III.1 Détermination du nombre de cellules

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante :

$$P_{pile} = N_{celle} \cdot E_{celle} \cdot J \cdot S_{pile} \quad (17)$$

Paramètre :

P_{pile} = Puissance électrique brute du stack (W)

N_{celle} = Nombre de cellules de l'empilement

E_{celle} = Tension par cellule (V)

J = Densité de courant (A/m^2)

S_{pile} = Surface active des cellules (m^2)

E_{cell} et j sont liées par la caractéristique tension/courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée. Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires.

Il est intéressant d'avoir la tension $U_{stack} = N_{cell} \cdot E_{cell}$ la plus élevée et donc le courant $I_{pac} = j \cdot S_{pac}$ le plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule.

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

- D'augmenter le nombre de cellules jusqu'à la limite technologique actuelle.

- D'augmenter la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. Ce choix va en outre dans le sens d'un bon rendement de pile [33].

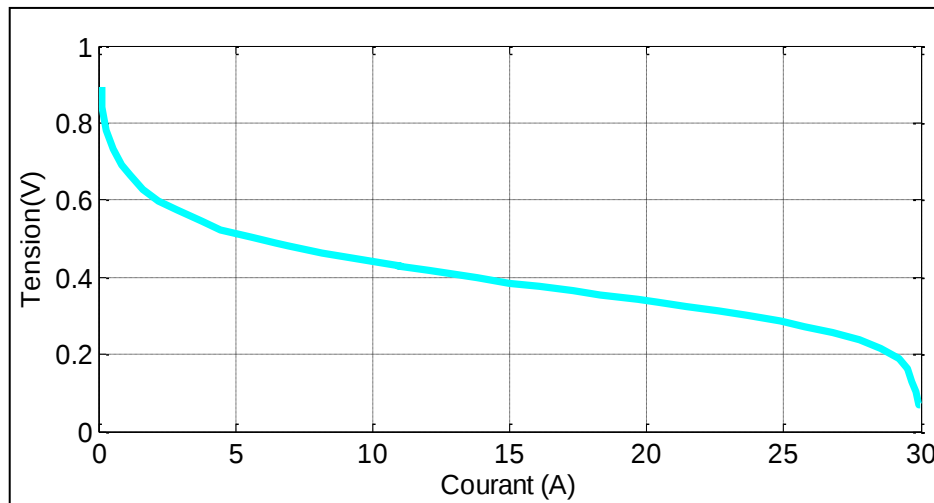


Figure III-1: Caractéristique Tension/Courant (tension par cellule)

Comme le montre la (Figure III-1), il est intéressant d'avoir des densités de puissance élevées (pour réduire l'encombrement et le coût/kW de la pile). Cela passe par une faible surface de cellule, donc des densités de courant élevées. Cette contrainte s'oppose à l'objectif d'avoir une tension par cellule élevée. Une trop forte densité de courant conduit de plus, à un rendement faible et donc à une puissance thermique à évacuer élevée, ce qui posera des problèmes pour le système. Une limite raisonnable pour la densité de courant est de 0.6 A/cm^2 ce qui correspond à une tension de $E_{ch} = 0.64 \text{ V}$ (Figure III-2), mais il s'agit d'une valeur arbitraire qu'il faudrait valider par une étude technico-économique [33].

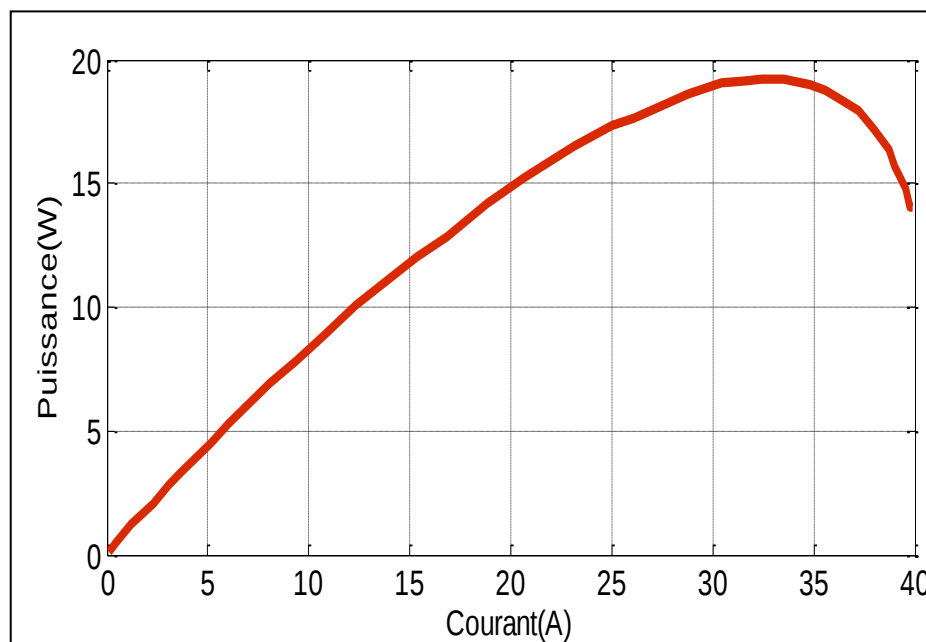


Figure III-2 : Caractéristique Puissance/Courant (puissance par cellule)

La pile à combustible est connectée à un convertisseur statique de type « boost » qui doit générer une tension de bus de 750V. Comme le gain de ce convertisseur est limité à deux pour des raisons de rendement, il faut que la tension de pile soit au minimum de 375V. Ce qui donne un nombre de cellules de :

$$N_{\text{celle}} = \frac{U_{\text{stack-ch}}}{E_{\text{ch}}} = \frac{V_{\text{bus}}/2}{E_{\text{ch}}} = \frac{375}{0.64} = 586 \quad (18)$$

Paramètre

V_{bus} : Tension du bus continue soit 750V

$U_{\text{stack-ch}}$: Tension du stack en pleine charge soit $U_{\text{stack-ch}} = V_{\text{bus}}/2$

E_{ch} : Tension de la cellule en pleine charge soit $E_{\text{ch}} = 0.64\text{V}$

III.1.2 Détermination de la surface des cellules

Il est maintenant possible de déterminer les autres paramètres de l'empilement :

$$I_{\text{pac}} = \frac{P_{\text{pile-max}}}{U_{\text{stack-ch}}} = 1147\text{A} \quad S_{\text{pile}} = \frac{I_{\text{pac-max}}}{j} = 1956\text{cm}^2 \quad (19)$$

Paramètre :

$P_{\text{utile_max}}$: Puissance utile maximale soit 400kW.

$I_{\text{pac-max}}$: Courant maximal correspondant à $P_{\text{utile_max}}$

Pour tenir compte de la consommation des auxiliaires (10% P_{utile}), il convient de surdimensionner la pile, pour arriver à une puissance brute de $P_{\text{pile-max}} = 440\text{ kW}$.

$$P_{\text{pile-max}} = (1 + 0.1)P_{\text{utile_max}} \quad (20)$$

Cette surface élevée de cellule peut être obtenue par la mise en parallèle (d'un point de vue électrique et hydraulique) de plusieurs stack ce qui permet d'avoir des surfaces de cellules plus faibles et de tenir compte des limites technologiques. Il est envisageable aussi de décomposer l'assemblage série des cellules en plusieurs stack comportant un nombre de cellule plus faible. Ces stack seraient placés en série électriquement, mais en parallèle d'un point de vue hydraulique [33].

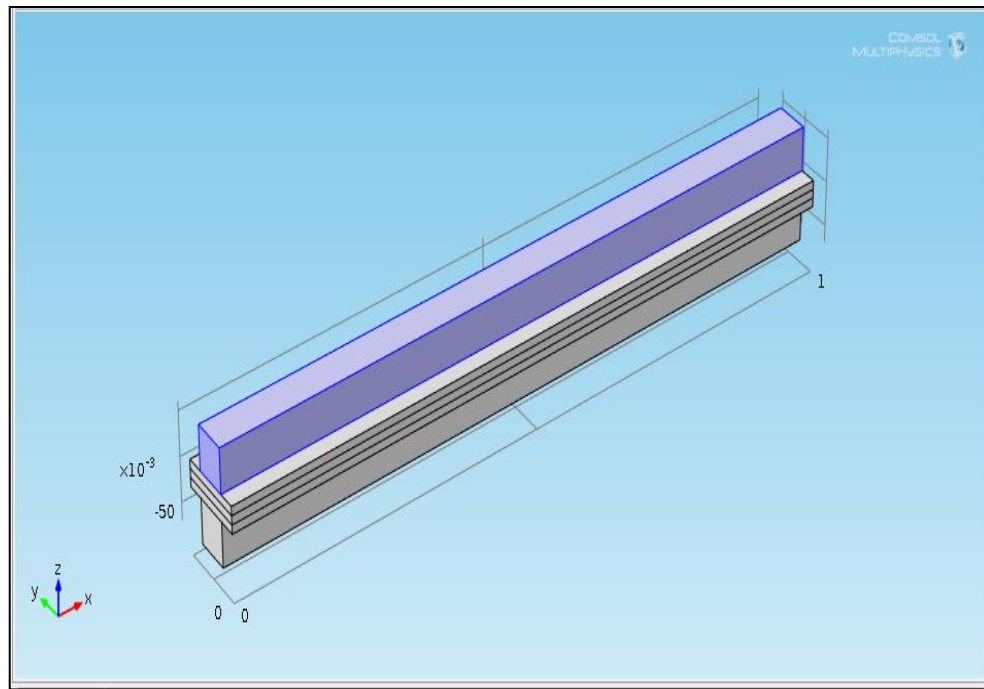


Figure III-3 géométrie d'une cellule de la pile SOFC avec logiciel Comsol

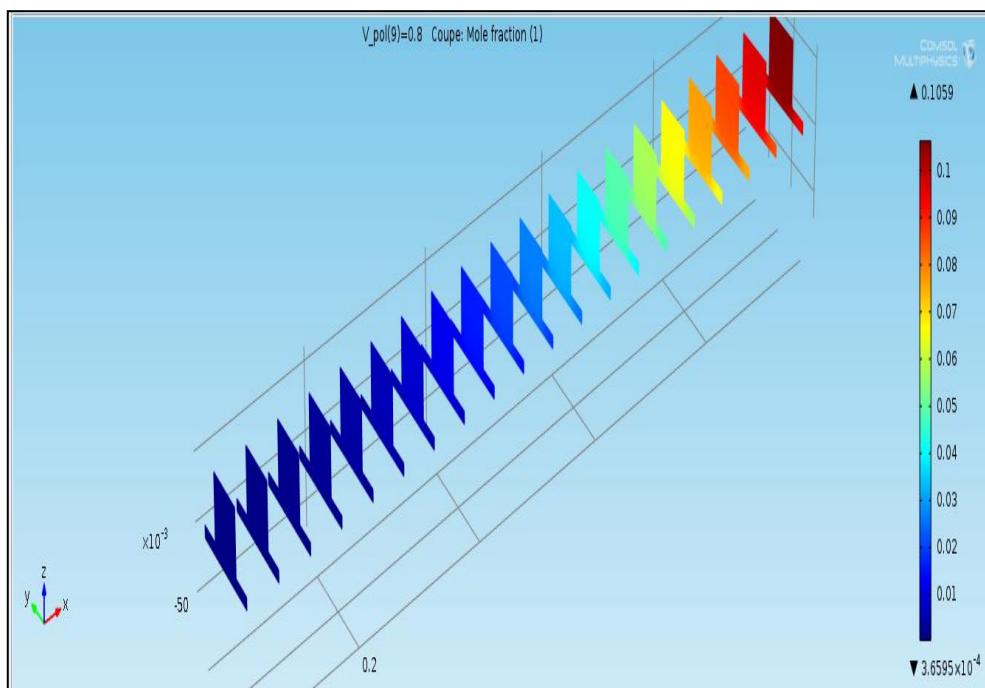


Figure III-4: Fraction Molaire Oxygène avec logiciel Comsol

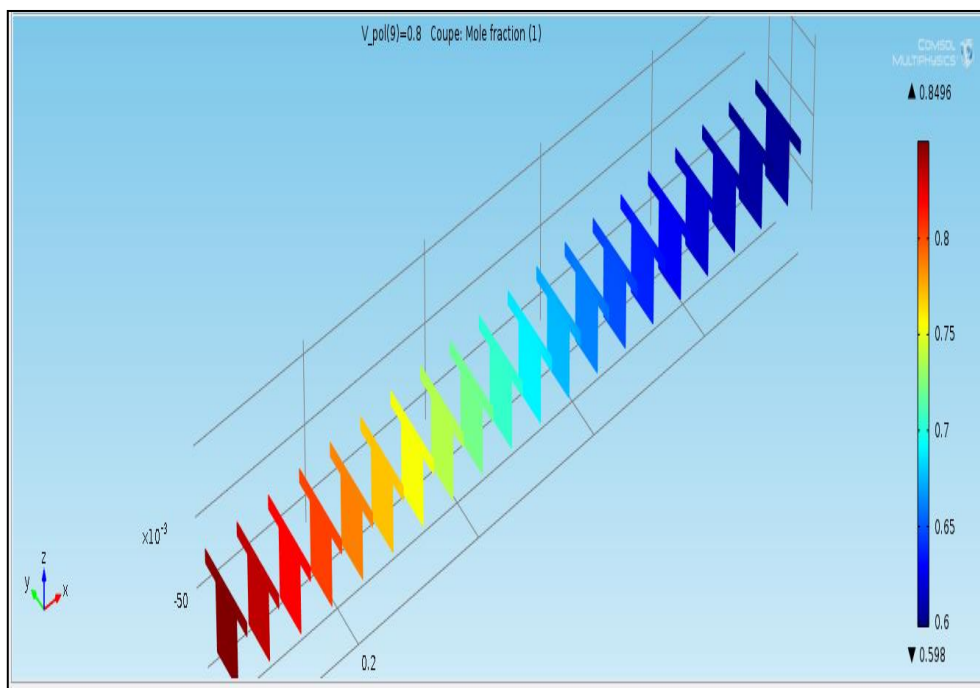


Figure III-5: Fraction Molaire hydrogène avec logiciel Comsol

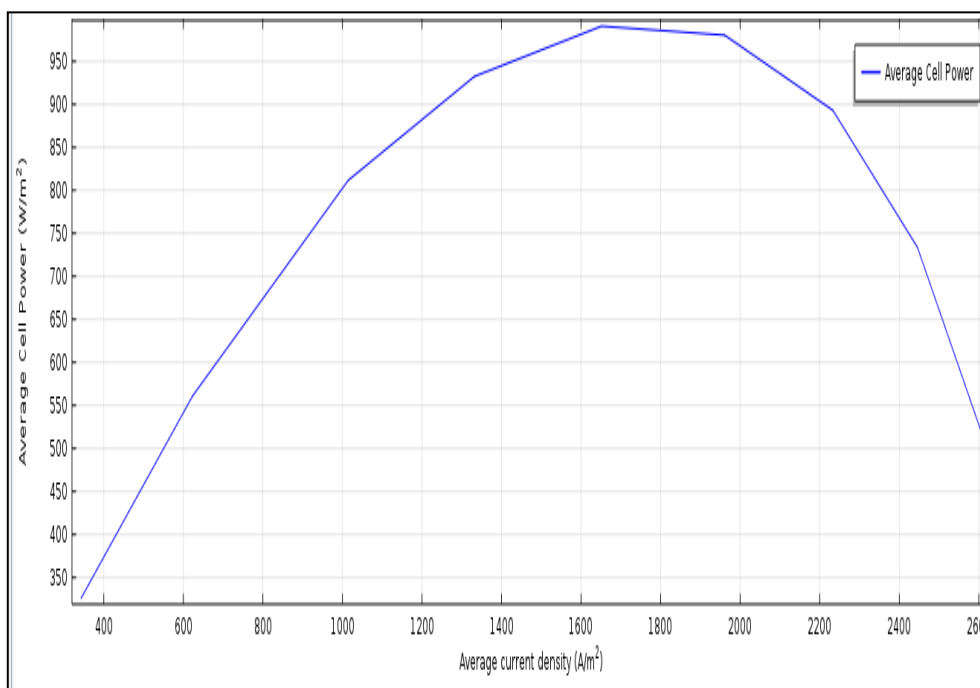


Figure III-6: Puissance de la pile SOFC avec logiciel Comsol

III.3 Introduction

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.

III.3.1 Modèle d'Aguiar [34]

La tension de Nernst est donnée en fonction des pressions partielles des trois espèces et de la température.

$$E_{nernst} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{(H_2O)}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (21)$$

L'expression du potentiel de la cellule prend la forme:

$$U_{cell} = E_{nernstl} - n_{ohm} - n_{conc,an} - n_{conc,catl} - n_{act,an} - n_{act,cat} \quad (22)$$

Les pertes ohmiques η_{ohm} sont dues aux résistances électriques des trois parties solides de la cellule. Cette chute de tension est importante et augmente linéairement avec la densité de courant i . Suivant la loi d'Ohm, les pertes ohmiques sont exprimées comme suit:

$$n_{ohm} = i \cdot R_{(ohm)} \quad (23)$$

La résistance interne d'une cellule est calculée par:

$$R_{ohm} = \frac{e_{an}}{\sigma_{an}} + \frac{e_{ele}}{\sigma_{ele}} + \frac{e_{cat}}{\sigma_{cat}} \quad (24)$$

Tels que e_{an} , e_{cat} , e_{ele} , σ_{an} , σ_{cat} , σ_{ele} sont respectivement les épaisseurs et les conductivités électriques/ionique des électrodes et de l'électrolyte.

Les surtensions de concentration sont causées par la diffusion de gaz dans les électrodes poreuses. Ces pertes sont en fonction des pressions partielles des gaz produites et les gaz réactant au niveau des canaux et au niveau des interfaces électrodes/électrolyte. Les pertes de concentration au niveau de l'anode et la cathode prennent les formes suivantes:

$$n_{conc,an} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2O,TPB} \cdot P_{H_2,f}}{P_{H_2O,f} \cdot P_{H_2,TPB}} \quad (25)$$

$$n_{conc,catl} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2,a}}{p_{O_2,TPB}} \right) \quad (26)$$

Pour calculer les pertes de concentration, la relation entre les pressions partielles des trois espèces H_2O , H_2 , O_2 à l'interface (point de contact triple) et la densité de courant est nécessaire. Les pressions partielles des trois espèces au niveau des interfaces

électrolyte/électrodes sont en fonction des pressions partielles de ces espèces au niveau des canaux, elles sont exprimées comme suit:

$$P_{H2,TBP} = P_{H2,f} - \frac{RTe_{an}}{2FD_{eff,an}} I \quad (27)$$

$$P_{H2,TBP} = P_{H2o,f} + \frac{RTe_{an}}{2FD_{eff,an}} I \quad (28)$$

$$P_{H2,TBP} = P + (P - P_{O2,a}) \cdot \exp\left(\frac{RTe_{act}}{4FD_{eff,cat,P}} i\right) \quad (29)$$

Avec $D_{eff,cat}$ représente le coefficient de diffusion moyen de l'hydrogène et de la vapeur d'eau dans l'anode et $D_{eff,an}$ représente le coefficient de diffusion moyen de l'oxygène dans la cathode.

Les pertes d'activations sont causées par la cinétique des réactions dans les électrodes. C'est aux températures plus élevées que ce type de pertes est plus faible. Leurs expressions sont données par des équations non linéaires (**équation de Butler-Volmer**) :

$$\eta_{act,an} = \frac{RT}{anF} \ln\left(\frac{P_{H2,f}}{P_{H2,TBP}} \cdot \frac{i}{i_{0,an}}\right) \quad (30)$$

$$\eta_{act,an} = \frac{RT}{anF} \ln\left(\frac{P_{O2,a}}{P_{O2,TBP}} \cdot \frac{i}{i_{0,act}}\right) \quad (31)$$

Avec α le coefficient de transfert (généralement $\alpha = 0.5$), n le nombre des électrons transférés et i_0 densité de courant d'échange dans les électrodes qui est exprimée par:

$$i_{0,an} = \frac{RT}{nF} k_{an} \exp\left(\frac{-E_{an}}{RT}\right) \quad (32)$$

$$i_{0,act} = \frac{RT}{nF} k_{act} \exp\left(\frac{-E_{act}}{RT}\right) \quad (33)$$

Paramètre	Désignation	Unité
σ_{ele}	$3.34 \cdot 10^4 \exp\left(\frac{-10300}{T}\right)$	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
σ_{an}	80.E3	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
σ_{cat}	8.3E3	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
$D_{eff,an}$	3.66 E-5	m^2/s
$D_{eff,cat}$	1.37 E-5	m^2/s
k_{an}	1.37 E-5	$\Omega^{-1} \cdot m^{-2}$
k_{cat}	2.35 E11	$\Omega^{-1} \cdot m^{-2}$

E_{an}	140	KJ/mole
k_{cat}	137	KJ/mole
P	1	bar

Tableau III.1: Expressions et paramètres [34]**III.3.2 Modèle de A.C. Burt [35]**

Ce modèle électrochimique est basé sur la considération de la réaction globale dans une pile à combustible:



Le potentiel de Nernst est donné par l'expression suivante:

$$E_{nersat} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{(H_2)X(O_2)}{X(H_2O)}\right) + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p}{p^0}\right) \quad (35)$$

Où P et P^0 sont respectivement la pression et la pression de référence. Le potentiel réversible à des conditions standard est relié à l'énergie de Gibbs standard.

$$E_0 = \frac{\Delta G^0}{nF} \quad (36)$$

Le potentiel de la cellule est calculé en fonction du potentiel de Nernst et les différentes pertes (pertes ohmiques, pertes d'activation et celles de concentration).

$$U_{cell} = E_{nersnt} - n_{ohml} - n_{concl} - n_{act} \quad (37)$$

Ces pertes sont liées à la densité de courant. La surtension d'activation est définie par une relation empirique

$$n_{act} = \frac{RT}{n_a F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (38)$$

$$n_{ohml} = iR_{act} + iR_{ohm} \quad (39)$$

$$n_{concl} = -\frac{RT}{na F} \ln\left(1 - \frac{i}{i(L)}\right) \quad (40)$$

Représentée par les différentes formes des équations de Tafel :

$$n_{act} = \frac{RT}{n_a F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (41)$$

Les pertes ohmiques et celle de concentration sont exprimées comme suit :

$$n_{ohml} = iR_{act} = i R_{ohm} \quad (42)$$

$$n_{concl} = -\frac{RT}{naF} \ln \left(1 - \frac{i}{i(L)} \right) \quad (41)$$

Où le i_0 représente la densité de courant d'échange ($i_0 = 5.5E3A/m^2$), i_L la densité de courant limite ($4.E4.A/m^2$) et α le coefficient de transfert ($\alpha=0.5$), la résistance totale de la cellule.

III.3.3 Tableau récapitulatif [35] :

	Potentiel de Nernst	Perte Ohmique
Modèle d'Aguiar	$E_{nernst} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{(H_2O)}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right)$	$n_{ohm} = i \cdot R_{(ohm)}$
Modèle de C.A. Burt	$E_{nersat} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{(H_2)X(O_2)}{X(H_2O)} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)$	$n_{ohml} = iR_{act} + i R_{ohm}$

Perte d'activation	Perte de concentration	Perte d'activation anodique	Perte de concentration anodique
/	/	$\eta_{act,an} = \frac{RT}{anF} \ln \left(\frac{P_{H_2,f}}{P_{H_2,TPB}} \cdot \frac{i}{i_{0,an}} \right)$	$n_{conc,an} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2O,TPB} \cdot P_{H_2,f}}{P_{H_2O,f} \cdot P_{H_2,TPB}}$
$n_{act} = \frac{RT}{naF} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right)$	$n_{concl} = -\frac{RT}{naF} \ln \left(1 - \frac{i}{i(L)} \right)$	/	/

Perte activation cathodique	Perte de concentration cathodique
$\eta_{act,an} = \frac{RT}{anF} \ln \left(\frac{P_{O_2,a}}{P_{O_2,TPB}} \cdot \frac{i}{i_{0,act}} \right)$	$n_{conc,catl} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2,a}}{p_{O_2,TPB}} \right)$
/	/

Nous nous intéressons dans ce chapitre au procédé de simulation effectué sur le système de la pile SOFC en utilisant MATLAB /SIMULINK. Le but de cette simulation est d'estimer la nécessité de la production d'une tension correspondant à une charge donnée et l'évolution de la puissance et des différentes pressions en fonction de la densité du courant.

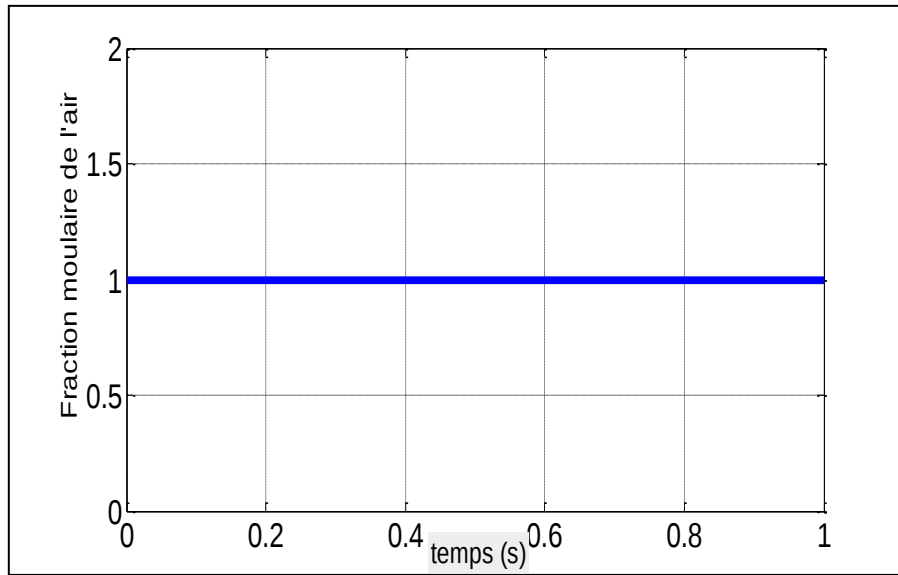
III.3.4 Résultats de la simulation :

Figure III-7: *fraction molaire de la l'air*

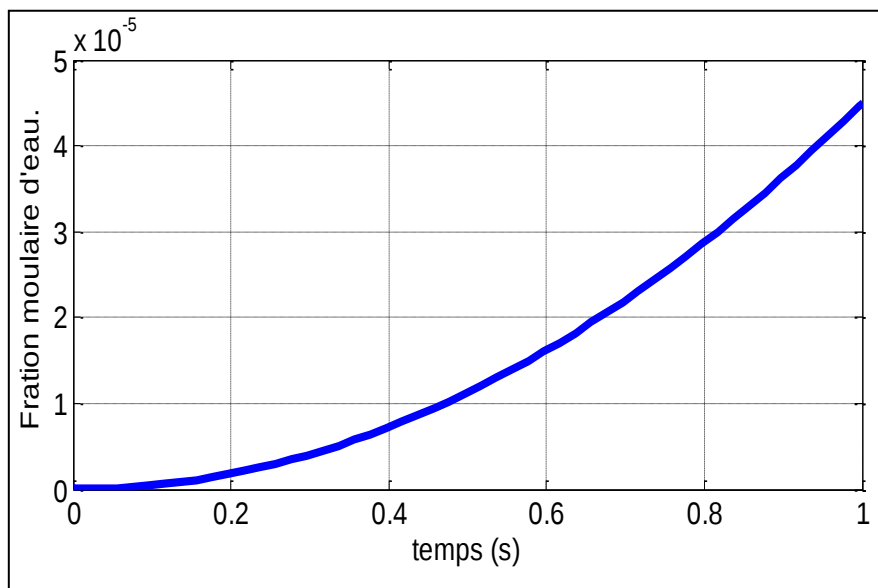


Figure III-8: *fraction molaire de la d'eau (H₂O)*

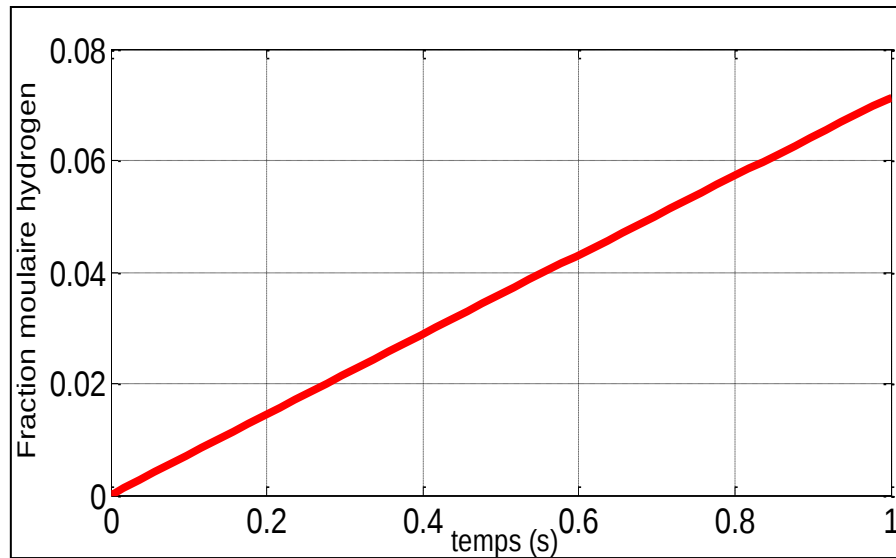


Figure III-9: fraction molaire hydrogène

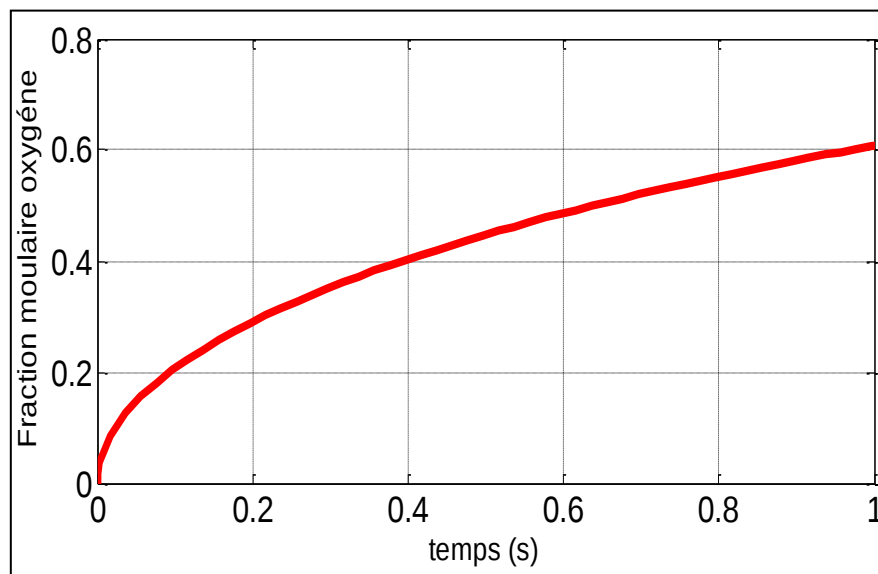


Figure III-10: fraction molaire oxygène

III.3.5 Caractéristique tension-courant de la pile

III.3.5.1 La puissance

Figure (III-11) représente la courbe de la densité de puissance en fonction de la densité de courant. Elle est presque parabolique, elle croît puis atteint un maximum. Ce comportement est dû à l'effet des polarisations qui sont directement relié à la densité de courant.

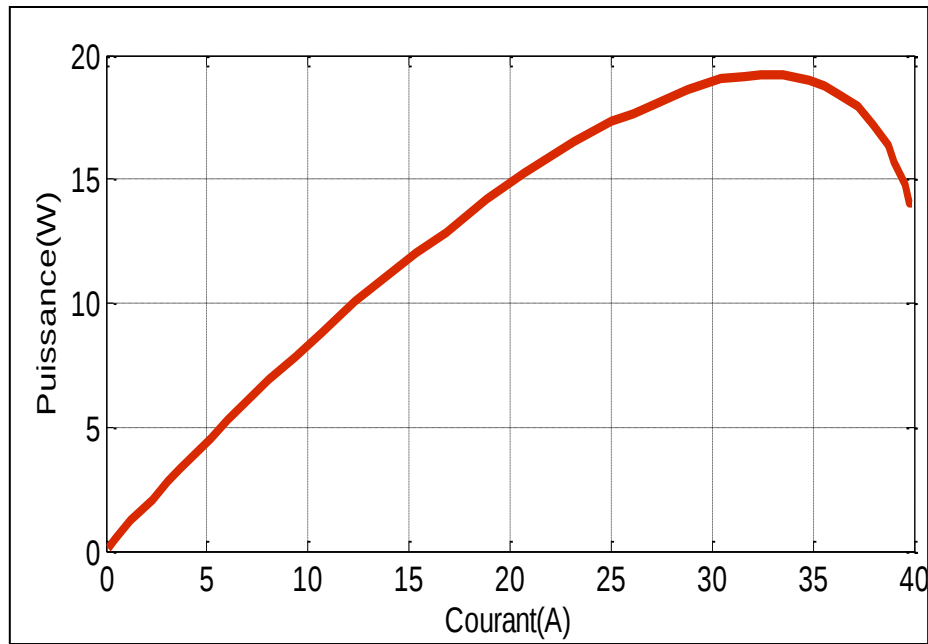


Figure III-11: Densité de puissance

III.3.5.2 Rendement électrique :

Figure (III-12) montre la variation du rendement électrique en fonction de la densité de courant. Nous remarquons que le rendement électrique à circuit ouvert égal 0,825, puis il diminué jusqu'au 0.15, donc ce rendement est directement proportionnel à la charge.

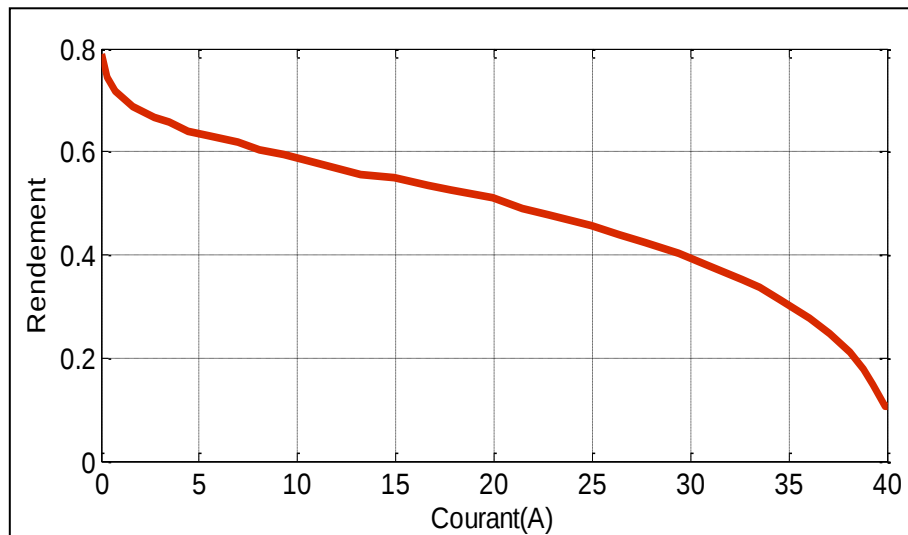


Figure III-12: Rendement électrique de la cellule.

Pour la partie linéaire de la courbe, ce sont les pertes liées aux résistances électroniques et ioniques internes Figure (III-14) qui diminuent la tension entre électrodes. Enfin, pour les

hautes densités de courant, c'est la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes qui devient le facteur limitant. Ce phénomène est du aux pertes de concentration Figure (III-15)

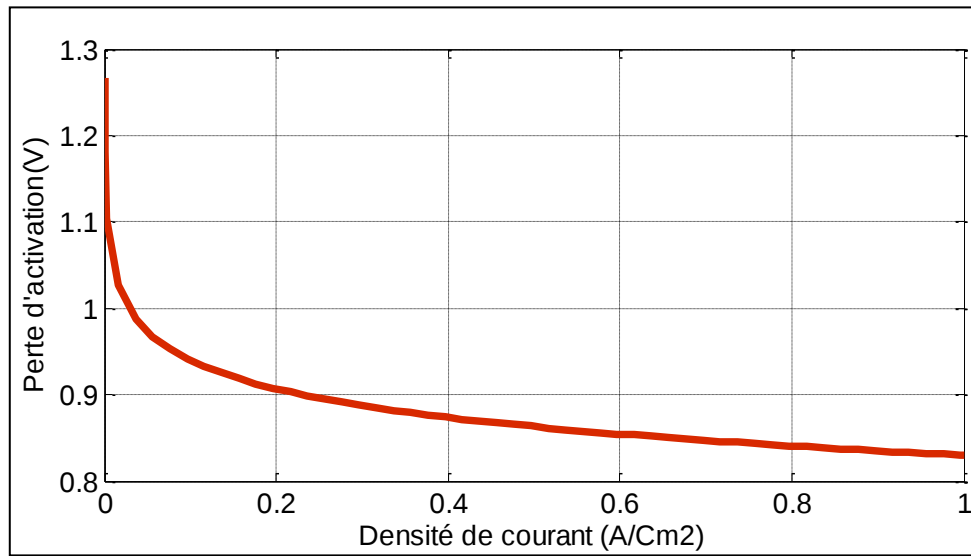


Figure III-13: Pert Activation

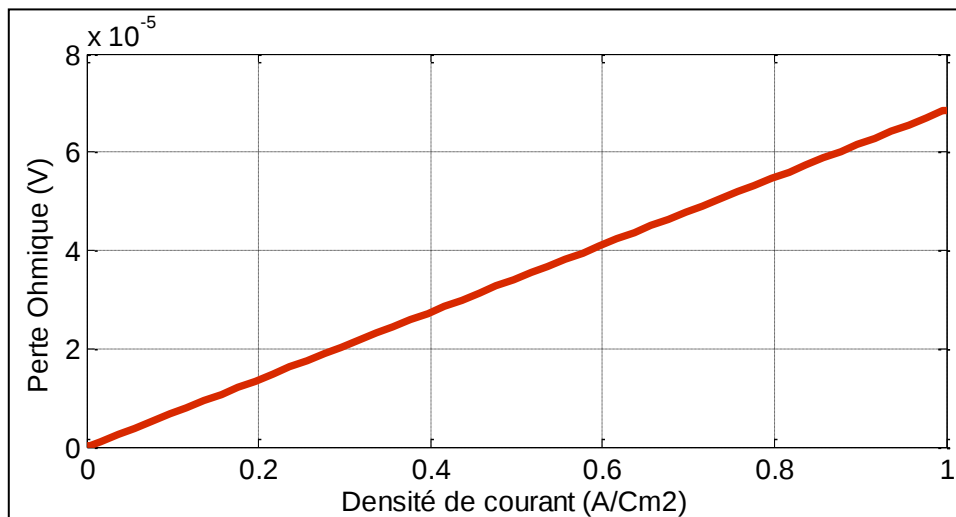


Figure III-14: Pertes ohmique.

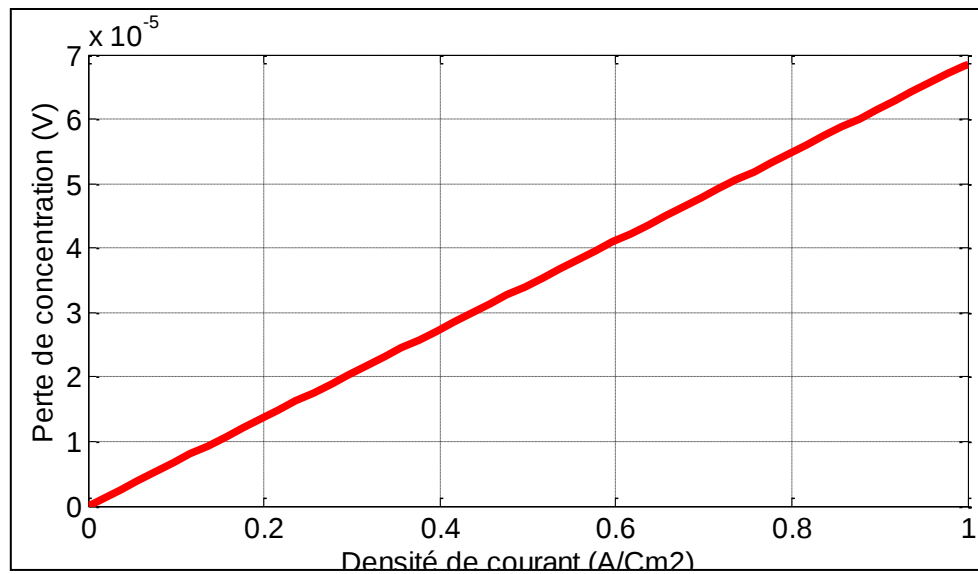


Figure III-15: Pertes de concentration

III.4. Conclusion :

La modélisation et la simulation en régime statique nous ont permis de trouver des caractéristiques de la pile SOFC conformes à celle trouvée dans la littérature.

L'étude en fonction des différents paramètres de fonctionnement montre aussi que l'influence de ces paramètres rejoint sur la dynamique de la pile à combustible.

Conclusion générale

La pile à combustible est un générateur électrique qui s'appuie sur une réaction électrochimique. C'est aussi un système multi-physique que l'on peut décomposer en trois niveaux : le stack, la cellule et les layers. Chaque niveau de décomposition est un empilement du niveau suivant. On a choisi de travailler au niveau de la cellule.

L'analyse de l'outil élaboré dans l'environnement Matlab/Simulink, du système développé a permis d'évaluer le rendement du système par la détermination des différentes énergies produites ou consommées au niveau chacun des composants. La génération d'énergie par des sources d'énergie renouvelables combinant l'énergie de la pile à combustible via l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais l'intermittence de leur production nécessite de trouver des moyens de stockage efficaces et respectant l'environnement. Un système électrolyseur / pile à combustible permet de stocker de l'électricité par l'intermédiaire d'un stockage sous forme de gaz.

Une part importante de ces études est consacrée à la modélisation des phénomènes de transferts physico-chimiques intervenant dans les cœurs des piles à combustible afin d'améliorer la conception et les performances électriques de ces dernières.

Dans cette approche, nous avons opté pour un découplage électrique des phénomènes. C'est notamment le cas des phénomènes de diffusion qui se retrouvent découplés des phénomènes d'activation d'un point de vue statique. En revanche, un certain niveau découplage est rétabli d'un point de vue dynamique.

Dans le premier chapitre on a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par un état de l'art sur les systèmes renouvelables de génération d'énergie électrique ainsi que les différents éléments qui les construisent.

Ce deuxième chapitre nous a permis d'introduire la notion de pile à combustible, le principe de fonctionnement et les différentes technologies de piles combustibles existantes actuellement.

Il est en effet nécessaire de bien avoir à l'esprit ces notions afin de comprendre le mécanisme de transfert de chaleur et l'électrochimie du modèle.

Enfin le dernier chapitre était consacré au dimensionnement de la pile SOFC et la modélisation du modèle électrochimie de la pile à combustible.

Une telle simulation facilite aussi la compréhension fine des phénomènes de transferts, la recherche des paramètres de sensibilité prépondérants, la prévision et l'amélioration des performances électriques.

Pour une meilleure compréhension des phénomènes ayant lieu dans une pile SOFC, des équations mathématiques ont été développées par un outil numérique choisi par l'environnement Matlab /Simulink.

D'après les analyses des résultats obtenus, il est apparu que le modèle développé pour la pile peut être un outil de conception futur très puissant (milieu poreux, réactions électrochimiques, présence des termes sources....).

Les solutions du modèle ont éclairci beaucoup de phénomènes dans les composants de la pile : les canaux, les électrodes, l'électrolyte et ont permis des analyses plus détaillées de chacun.

Perspective :

- 1) L'application des systèmes hybrides.
- 2) L'application des systèmes de régulation et l'électronique de puissance pour connecter aux Réseaux.
- 3) Intégration des nouveaux Matériaux.
- 4) Validation expérimental du modèle SOFC.
- 5) Calcule en temps réel des caractéristiques électrique de cette modèle.

Bibliographies

- [1]. Burton T. Sharpe D. Jenkins N. Bossanyi E. Hassan G. "Wind energy Handbook», *England*, 2001.
- [2]. Ocean Power Delivery Limited. <http://www.oceanpd.com/>.
- [3]. Archimedes Wave swing AWS II. <http://www.waveswing.com/>.
- [4]. Satie. Les Projets de Recherche. http://www.satie.ens-cachan.fr/php/projdeta.php?id_proj=48.
- [5]. Ecole Centrale de Nantes. <http://www.ec-nantes.fr/>.
- [6]. Wagner H.J. Mathur J. "Introduction to Wind Energy System", Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [7]. Poitiers F. "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau " thèse de Doctorat, école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [8]. Désiré. G, *Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations*, édition Eyrolles, 1982.
- [9]. G. M, A Pilenga, M. Honselaar, T Malkow, G Tsotridis, A Janssen, B Rietveld, I Vinke and Jari Kiviaho. *Testing the voltage and power as function of current density. Polarization curve for a SOFC single cell. Test Module TM SOFC M01*. Technical Reports. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy. Netherlands 30 April, 2010.
- [10]. O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine ", *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1983, 15, pp. 77-96.
- [11]. A .LACHICHI. 'Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant: Application aux convertisseurs pour pile à combustible'. Thèse de Doctorat (2005). Université de Franche Comte.
- [12]. H. Oman, « *Fuel cells for personal electricity* ». *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 15, n° 9, September 2000, pp.43-45.
- [13]. P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, 'piles à combustible'. *Technique de l'Ingénieur*, D 3 340-1/28.
- [14]. K. Rajashekara, 'Propulsion system strategies for fuel cell vehicles'. SAE Technical paper series.
- [15]. E. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, F. Ponci, N. Barry, 'A fuel cell based domestic uninterruptible power supply'. *Applied Power Electronics Conference, APEC'02*, 2002, vol. 1, pp. 605-613.
- [16]. *Fuel Cell Handbook* EG&G Technical Services, Inc., 6ème Edition, Novembre 2002.
- [17]. A moins de 1000 €/kW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. *REE* n° 2, février 2002, pp. 8-9.
- [18]. G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjaer, F. Blaabjerg, 'A new green power inverter for fuel cell'. *Power Electronics Specialists Conference, PESC'02*, 2002, vol. 2, pp. 727-733.
- [19]. K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring, 'the power conditioning system for fuel cell'. *Power Electronics Specialists Conference, PESC'01*, 2001, vol. 4, pp.

2197-2202.

- [20]. 'Les piles basses températures SOFC', CLEFS CEA N°44 - hiver 2000-2001.
- [21]. Pascal. B. 'Synthèse par pulvérisation cathodique et caractérisation d'électrolytes solides en couches minces pour piles à combustible à oxydes solides (SOFC) fonctionnant à température intermédiaire'. Thèse de doctorat (2005). Ecole des Mines de Nancy.
- [22]. Jason M. "Thermal stress analysis of lca-based solid oxide fuel cells". Thesis Georgia Institute of Technology. (2004).
- [23]. E. Hernandez-Pacheco. "Electro-thermal model for a solid oxide fuel cell". PhD, Grand Forks, North Dakota. (2004).
- [24]. S. Valluru. "Steady State Thermal Stress Analyses Of TwoDimensional And Three-Dimensional Solid Oxide Fuel Cells". Master of Science West Virginia University. (2005).
- [25]. V.T. Srikar, Kevin T. Turner, Tze Yung Andrew Ie, S. "Mark Spearing. Structural design considerations for micro machined solid-oxide fuel cells". Journal of Power Sources (2004).
- [26]. J. Yuan, Masoud Rokni, Bengt Sunden. "Three-dimensional computational analysis of gas and heat transport phenomena in ducts relevant for anode-supported solid oxide fuel cells ". International Journal of Heat and Mass Transfer (2003).
- [27]. Masayuki. S, Koji Fukagata, Naoki Shikazono and Nobuhide Kasagi. "Numerical Analysis of Temperature and Potential Distributions in Planar-Type SOFC". Thermal and Fluids Engineering Conference (2005). Jeju- Korea.
- [28]. David L. Damm, Andrei G. Fedorov. "Radiation heat transfer in SOFC materials and components". Journal of Power Sources (2005).
- [29]. Y. Inui, N. Ito, T. Nakajima, A. Urata. "Analytical investigation on cell temperature control method of planar solid oxide fuel cell Energy Conversion and Management". (2006).
- [30]. P.F. van den Oosterkamp. "Critical issues in heat transfer for fuel cell systems Energy Conversion and Management". (2006).
- [31]. K.J. Daun, S.B. Beale, F. Liu, G.J. "Smallwood Radiation heat transfer in planar SOFC electrolytes". Journal of Power Sources (2005).
- [32]. P. Schott Document interne CEA/ALSTOM 'Dimensionnement d'un système pile à combustible PEMFC 400 kW pour une application transport' NT DTEN N°2002/90 – 2002
- [33]. P. Aguiar, C.S. Adjiman, N.P. Brandon. 'Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance.' Journal of Power Sources, London, UK. (2004).
- [34]. A.C. Burt, I.B. Celik, R.S. Gemmen, A.V. Smirnov. 'A numerical study of cell-to-cell variations in a SOFC stack'. Journal of Power Sources (2003). West Virginia University, Morgantown, WV, USA.