

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



MEMOIRE

Présenté à

L'université De Batna

En vue de l'Obtention du Diplôme de



MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Maitrise des énergies et énergies renouvelables

Présenté par :

DAHMANI AISSA

Ingénieur d'état en électrotechnique

Laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB)

Thème

COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE

L'ASSOCIATION CONVERTISSEUR STATIQUE- SOFC

Soutenue le / / 2010, devant le jury:

Mr Chikhi Khaled	M.C	U. Batna	Président
Mr Ben Moussa .H	Prof	U. Batna	Rapporteur
Mr Abdessemed. R	Prof	U. Batna	Co-Rapporteur
Mr BenAkcha A/H	M.C	U. Biskra	Examineur
Mr Ben Daas M.L	M.C	U. Batna	Examineur
Mme Zitouni. B	M.C	U. Batna	Examineur

Remerciements

Voici venu le moment où je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et assisté tout au long de ce travail.

En premier lieu je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes promoteurs Mr: BEN MOUSSA H. et Mr: ABDESSEMED R, tous les deux professeurs à l'université de Batna, pour la confiance qu'ils m'ont prodiguée. Leurs idées, leurs encouragements m'ont été d'une aide précieuse pour mener à bien ce travail.

Je remercie sincèrement :

Mr CHIKHI K, chef de département électrotechnique, maître de conférences à l'université de Batna. pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant mon jury.

Mme ZITOUNI B. maître de conférences à l'université de Batna, Mr BEN AKCHA A/HAMID maître de conférence à l'université de Biskra et Mr BEN DAAS M.L. maître de conférence à l'université de Batna pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter de participer à ce jury.

Je remercie aussi Mr MAYOUF M. et Mr KHETECH L. pour leur encouragement ainsi que tous mes amis de la promo.

Je ne saurai terminer sans remercier également toutes les personnes qui m'ont aidé et témoigné de leur soutien durant la réalisation de ce travail, je pense notamment à : KADI B, BEN AISSA A, RABHI B, SAKRI D, BAKHTI A, MOKRANI L; et MOUSSAI S.

Enfin, je ne peux conclure cet espace sans penser à ma famille, mes proches et mes amis qui m'ont soutenu et encouragé. Je pense en particulier à mes parents, et à mes frères et sœurs.

<u>Introduction Générale</u>	1
<u>Chapitre I : Introduction aux piles à combustibles</u>	5
I.1. Introduction aux piles à combustibles	6
I.1.1. Historique.	6
I.1.2. Principe de fonctionnement	7
I.1.3. Oxydation de l'hydrogène	7
I.1.4. Réduction de l'oxygène	8
I.1.5. Description générale de la PAC	8
a. Les électrodes	9
b. L'électrolyte ou membrane	9
c. Plaques bipolaires	10
I.1.6. Différentes technologies des piles à combustible.....	10
I.1.6.1. Principales piles à combustible.....	11
a. La pile alcaline	11
b. La pile à acide phosphorique	12
c. La pile à membrane électrolyte polymérique	13
d. Les piles à méthanol direct DMFC	14
e. La pile à carbonate fondu	14
f. Les SOFC.....	15
I.1.7. Applications	16
a. Applications stationnaires	16
b. Applications pour le transport	17
c. Applications portables	17
I.2. Technologie des piles SOFC	19
I.2.1. Introduction.....	19
I.2.2. L'électrolyte solide.....	19
I.2.3. Structure de l'électrolyte.....	20
I.2.4. Principe de la diffusion.....	22
I.2.4.1. La cathode	23
I.2.4.2. L'anode.....	24
I.2.4.3. Plaques bipolaires	25
I.2.5. Technologies des SOFC.....	26
I.2.5.1. La technologie tubulaire	26
I.2.5.2. Technologie plane	27
I.2.5.3. Technologie monolithique	28
I.2.6. Avantages et inconvénients	28
I.3. Performance des piles SOFC	30
I.3.1. Introduction	30
a. L'énergie mécanique.....	30
b. L'énergie chimique	30
c. L'énergie électrique	30
d. L'énergie thermique	30
I.3.2. Principes de la thermodynamique.....	30
I.3.3. Thermodynamique de la pile à combustible	31
I.3.3.1. Energie et tension des PAC	31
I.3.3.2. Rendements des PAC.....	33
I.3.3.3. Tension réversible (tension à vide)	35
I.3.3.4. Le bilan de tension.....	37
I.3.3.5. Phénomène d'activation	37
I.3.3.6. Chutes de tension Ohmique.....	40

I.3.3.7. Surtension de diffusion.....	40
<u>Chapitre II : Modélisation et commande des onduleurs dédiés aux réseaux électriques</u>	44
II.1. Introduction.....	45
II.2. Modélisation et simulation des onduleurs	45
II.2.1. Représentation de la structure des onduleurs.....	45
II.3. Topologie des alimentations sans interruption(ASI).....	47
II.3.1. La disponibilité de la source principale.....	47
II.3.2. Du mode de commutation	48
II.3.3. ASI type double conversion " double conversion ".....	49
II.4. Technique de commande.....	50
II.5. Commande des onduleurs dédiés aux nouvelles sources de production.....	52
a. Cas où la puissance active et l'amplitude de la tension sont les variables de commande.....	55
b. Cas où la fréquence et la tension sont les paramètres de commande.....	56
<u>Chapitre III Modélisation & Simulation du système</u>	59
III.1. Introduction	60
III.2. Modèle dynamique de la pile	60
III.3. Expression des pressions partielles.....	61
III.4. Calcul de la température.....	63
III.5. Expression de la tension de NERNST.....	65
III.6. Considérations générales pour un fonctionnement optimal	65
III.6.1. Rapport entre les débits des réactants.....	65
III.6.2. Rapport entre le débit hydrogène et le courant de la pile	66
III.6.3. Contraintes de sécurité.....	67
III.6.4. Topologies des convertisseurs statiques	67
a. Configuration Série :	68
b. Distribution En Continu :	69
c. Configuration En Cascade A Multi Niveau :	70
III.7. Schéma de contrôle des onduleurs raccordés aux réseaux.....	70
III.7.1. Contrôle PQ.....	71
III.8. Implémentation et résultats de la simulation.....	73
III.8.1. Réponse à une charge fixe de 60Kw.....	73
III.8.2. Réponse à une charge variable :	76
<u>Conclusion général</u>	80
<u>REFERENCES</u>	83

Introduction générale.

Introduction Générale

L'énergie, dont l'électricité est la forme la plus domestiquée, est par définition la capacité d'effectuer un travail. Elle est obtenue soit à partir de sources primaires non renouvelables telles que le pétrole, le gaz, le charbon ou l'uranium, ou à partir de sources renouvelables telles que l'hydraulique, l'éolien, le solaire. . . etc. Sa maîtrise a été l'un des facteurs clés qui ont conduit au développement et au progrès de l'humanité. Un développement dû à un recours accru aux ressources d'énergie épuisables, très polluantes de nature.

La production de l'électricité à partir des sources dites conventionnelles est assurée par la conversion de ces sources en chaleur, puis en travail. Cette double transformation fait que le rendement du processus soit, selon le cycle de Carnot*, limité par la température de la source chaude. L'énergie utile obtenue à partir de la source primaire est donc faible.

A ce là s'ajoute le changement climatique irréversible et inquiétant, caractérisé par un taux de pollution croissant et un rejet massif des gaz à effet de serre** résultant de la combustion des hydrocarbures [1].

La demande croissante sur l'énergie, qui est passée de 911 MTEP *** en 1900 à 9647 MTEP en 1997 [2], accompagnée par un accroissement démographique mondial, qui lui est passé de 1767 millions à 5847 million durant la même période, associé à la réduction inéluctable et inévitable des réserves fossiles ne fait qu'aggraver une situation déjà fragilisée par le produit de la consommation des 40 dernières années et qui équivaut à tous ce que a été consommé depuis le fond des âges [3].

(*) Le rendement de Carnot est définie par : $\eta = 1 - \frac{T_{sf}}{T_{sc}}$ où T_{sf} et T_{sc} sont respectivement les températures des sources froide et chaude.

(**) Effet de serre : phénomène de réchauffement de l'atmosphère climatique induit par des gaz (notamment le dioxyde de carbone) qui la rendent opaque au rayonnement infrarouge émis par la terre. (Le petit Larousse).

(***) MTEP million de tonnes pétrole équivalent.

1 tep = 7.5 baril de pétrole ; 1 baril = 159 litres \approx 1.550 KWh

1 KWh = 3.600 KJ = 862 Kcal : est l'énergie que peut fournir un sportif pendant une journée.

Tous ces problèmes ont contraint les chercheurs à réfléchir sur une nouvelle vision qui tient en compte surtout la protection de l'environnement des risques qu'il encourt d'une part, et le droit des générations futures aux réserves actuelles d'autre part. Cette prise de conscience a incité les chercheurs à opter pour d'autres alternatives. Une nouvelle tendance dès lors s'est imposée.

Les énergies renouvelables qui, si elles ont les avantages d'être gratuites et renouvelables d'une part, elles renforcent et favorisent l'émergence des industries locales d'autres parts [4]. Elles participent bien à la mise en exergue du triptyque "Energie-Economie-Environnement". Bien qu'elles aient ces avantages, leur contribution ne représente que 11 % de la production mondiale.

Parmi ces énergies on peut citer : le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique, et enfin les piles à hydrogène ou à combustibles (PAC).

Ce dernier type est d'une importance particulière, elles peuvent être utilisées dans plusieurs applications : dans le transport, la production décentralisée... etc.

L'hydrogène s'impose donc comme un nouvel vecteur énergétique qui a les vertus de l'électricité et des énergies fossiles sans en avoir leurs inconvénients. Jules Verne, un des plus grands visionnaires, écrivait, déjà en 1874 : " Je pense que l'hydrogène et l'oxygène seront les sources inépuisables qui fourniront chaleur et lumière pour l'humanité " [5].

Le principe de fonctionnement des PAC repose sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau. Elles utilisent de l'hydrogène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur .La tension aux bornes de la pile étant continue, nécessite le recours aux convertisseurs statiques afin de l'adapter à l'utilisation.

Le progrès enregistré dans l'électronique de puissance a facilité énormément l'intégration de ces sources d'énergie et a encouragé la recherche pour leur amélioration. Un progrès dû essentiellement au développement des composants à semi-conducteurs entièrement commandables puissants, robustes et rapides. [6]

Dans ce mémoire le plan de travail repose essentiellement sur trois axes principaux :

Le premier chapitre, réparti en trois parties, se veut une introduction progressive dans un domaine non encore bien exploré par notre communauté d'électrotechniciens. Ainsi sa première partie est consacrée à la découverte du principe de fonctionnement, aux différents types de piles et aux avantages et inconvénients de ces piles.

La seconde partie sera consacrée aux piles SOFC. Leurs constitutions, ainsi que leurs technologies seront vues en détail.

Enfin les performances des SOFC et les effets des différents facteurs, tels que la pression et la température, sur leur bon fonctionnement seront traitées dans la dernière partie.

Les piles à combustible étant des sources de tension continue par excellence leur utilisation n'est possible que si elles sont associées à des convertisseurs statiques qui permettent l'adaptation de cette tension à l'utilisation.

L'adaptation de la tension continue des PAC à l'utilisation nécessite le recours aux convertisseurs statiques. Le deuxième chapitre traitera en plus de cette question les différents modes des alimentations sans interruption. On passera en revue les principes des convertisseurs statiques utilisés ; leur modélisation et leur commande.

Le temps de réponse des piles SOFC est généralement très long. Afin de voir le comportement dynamique de l'ensemble une approche théorique qui tiendra compte du comportement dynamique des onduleurs reliés aux réseaux électriques sera introduite au chapitre deux.

Au dernier chapitre la modélisation et simulation de l'ensemble pile et convertisseur pour une charge fixe et pour une autre charge variable dans l'environnement MATLAB/SIMULINK détaillée du système adopté sera faite.

Chapitre I

1. Introduction aux piles à combustibles.

2. Technologie des piles SOFC.

3. Performance des piles SOFC.

I.1. Introduction aux piles à combustibles.

I.1.1. Historique.

L'invention de la pile à combustible (PAC) remonte au XIX^{ième} siècle. C'est un juriste anglais, amateur de la physique, Sir : W. GROVE (1811-1896) qui a décrit en 1839 son principe de fonctionnement [7]. Elle fonctionnait à l'hydrogène et l'oxygène à basse température, en milieu acide sulfurique dilué et en contact avec des électrodes en platine. Cependant c'est C. F. SHOENBEIN, professeur à l'université de Bâle, qui en 1838 travaillant sur l'électrolyse; dont le principe fût découvert en 1809 par Sir HUMPHREY DAVY qui obtint de l'oxygène et de l'hydrogène à partir de l'eau distillée dans des appareils en argent [8]; observa par inadvertance le principe de la (PAC) [8].

En 1889, L.MOND (1839-1909) et C. LANGER [8] apportèrent des améliorations notamment avec l'introduction de catalyseurs "platine" où l'électrolyte pouvait être contenu dans des matrices poreuses en plâtres ou en amiante.

A la fin du XIX^{ième} siècle, en 1895 la première PAC fût construite par W.W. JACQUES. (1855-1932). Ses performances étaient remarquables (100mA/cm² à 1V), elle était déjà envisageable, à cette époque, pour l'usage domestique ou pour les véhicules électriques.

Le progrès enregistré à l'époque dans le domaine des machines thermiques, a entravé un développement tant souhaité.

En 1921, E. BAUER (1873-1944) mettait en évidence l'importance de la cinétique. Il mit au point une cellule fonctionnant à 1000° C, avec une anode de carbone, de l'oxyde de fer comme cathode et des carbonates alcalins comme électrolyte.

Les piles à combustibles ne devinrent crédibles qu'en 1930 grâce aux travaux de l'ingénieur anglais FRANCIS T. BACON (1904-1992) [8]. En effet, se sont les premiers travaux de Bacon sur une PAC hydrogène/oxygène en milieu KOH aqueux, qui conduisirent à la réalisation en 1953 d'un premier prototype d'une puissance notable (1 A/cm² à 0.8 V).

A poids égal, les PAC ont l'avantage de produire plus d'énergie que les batteries conventionnelles. D'ailleurs, c'est cet avantage qui a permis leur utilisation dans les programmes spatiaux depuis les années 1960. Les piles servaient de générateurs électriques pour les véhicules spatiaux habités GEMINI en 1963 et APOLLO en 1968 [9]. Les PAC assuraient en plus de la production de l'énergie de l'eau pour les astronautes.

La nécessité d'être indépendant sur le plan énergétique suite au choc pétrolier de 1973 accélérât d'une façon remarquable les recherches et développements (R&D) dans le domaine des énergies renouvelables y compris celui des piles à combustibles. Ainsi en 1977 une

installation de 1 Mw était mise en place, suivie par une autre de 4.5 Mw en 1983 à Manhattan à New York.

Malgré ce progrès les travaux ralentissaient de nouveau, car les piles restaient encore coûteuses, et leur durée de vie était faible. Le prix bas des ressources énergétiques conventionnelles favorisait davantage cette tendance.

L'aggravation des problèmes environnementaux liés à la pollution et à l'effet de serre, les progrès technologiques réalisés sur les membranes, les catalyseurs, le reformage ont ressuscité l'intérêt industriel et le potentiel commercial que présentent les piles à combustible.

I.1.2. Principe de fonctionnement

Le PAC est un générateur électrique qui convertit l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique [10]. Son principe de base repose sur celui de l'électrolyse inverse de l'eau [8; 11]. La réaction d'oxydoréduction fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité de la chaleur et de l'eau :

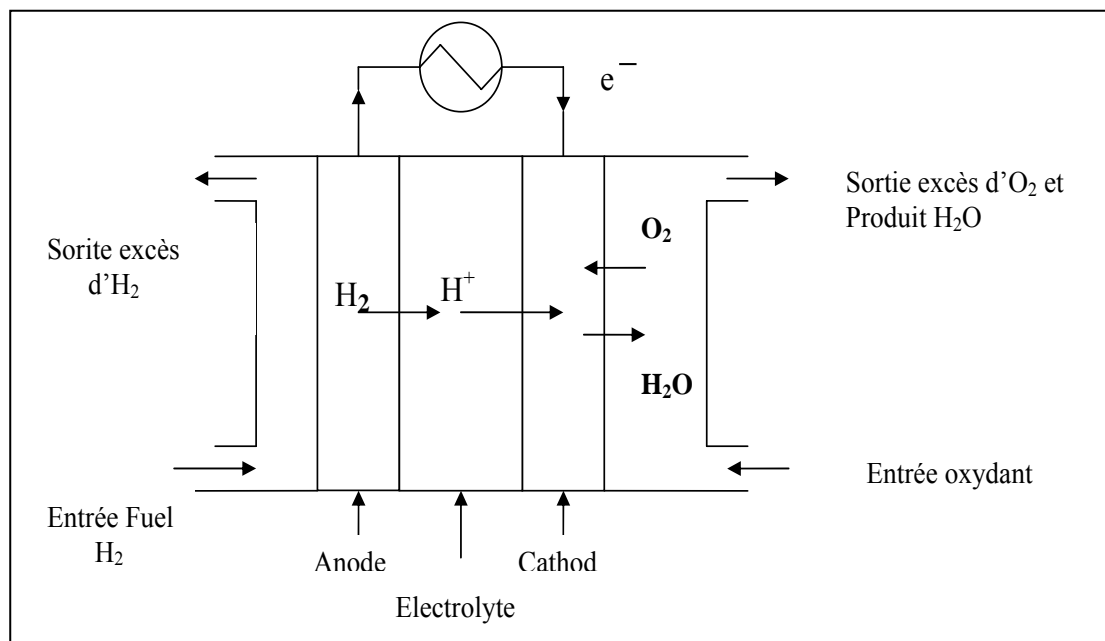
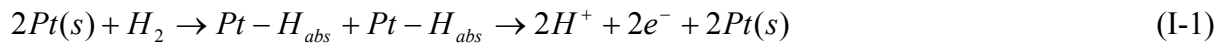


Fig.I-1 : Principe de fonctionnement simplifié des PAC.

I.1.3. Oxydation de l'hydrogène : [12]

Cette réaction se produit facilement en présence d'un catalyseur tel que le platine. Le processus implique l'absorption du gaz sur la surface de catalyse suivi par la dissociation des molécules d'hydrogène comme suit :



Où

$Pt(s)$: Site libre.

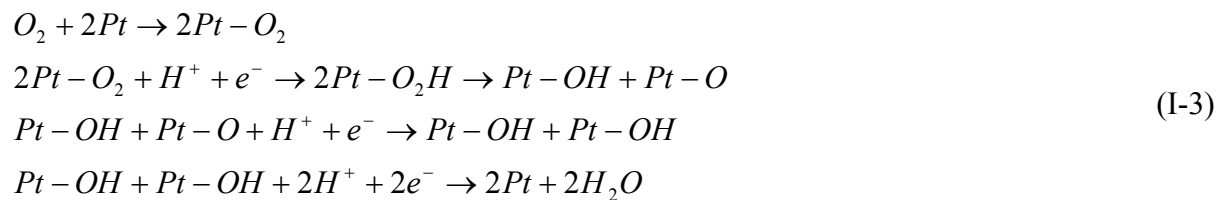
$Pt - H_{abs}$: un atome d'hydrogène absorbé sur le site active

La réaction globale à l'anode est :



I.1.4. Réduction de l'oxygène

La réduction de l'oxygène est une réaction très lente dont les conséquences de sa lenteur sont très importantes dans le bilan des tensions. Le processus est similaire à celui de l'oxydation :



La réaction à la cathode



La réaction globale :



La réaction (I-5) correspond à celle de la combustion de l'hydrogène, l'énergie est libérée sous forme de chaleur et partiellement sous forme d'électricité.

Afin de récupérer les électrons les deux demi réactions sont séparées par un électrolyte qui permet le passage des ions et empêche celui des électrons, qui eux doivent emprunter un chemin extérieur ; celui de la charge à alimenter [13].

I.1.5. Description générale de la PAC

Généralement une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules élémentaires appelé " Stack". Chaque cellule élémentaire, est formée de deux électrodes et un électrolyte pris en sandwich [4; 5]. Ces éléments sont reliés entre eux par des interconnecteurs : les plaques bipolaires [5].

a. Les électrodes

Les électrodes sont le lieu des réactions d'oxydoréduction. C'est la zone dite active ou zone de catalyse. C'est là que se produit la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique ; une zone où coexistent trois phases distinctes entre le gaz fourni et les particules du catalyseur d'une part, et le conducteur ionique de l'autre part. Le catalyseur, un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, est généralement du platine ; en effet, seul ce métal noble possède l'activité électrocatalytique suffisante vis-à-vis de la réduction d'oxygène et de l'oxydation de l'hydrogène, et peut de plus résister à la corrosion. Les électrodes doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- ✓ Etre poreuses afin de permettre la diffusion des gaz pour approvisionner en réactifs les zones actives.
- ✓ Pouvoir supporter le catalyseur, généralement du carbone platiné, finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- ✓ Permettre le déplacement des espèces protoniques depuis les sites catalytiques d'oxydation vers le site où l'oxygène est réduit.
- ✓ Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques.
- ✓ Présenter un caractère hydrophobe pour permettre l'évacuation de l'eau.

Toutes ces exigences font de la fabrication des électrodes un processus complexe.

b. L'électrolyte ou membrane

L'électrolyte joue un rôle primordial dans les piles à combustible. Son rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode vers l'autre d'une part, et d'autre part la séparation physique des deux compartiments anodique et cathodique. Ce sont ses propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène et donc les performances des piles. La conductivité d'une membrane dépend essentiellement de sa température et du taux d'hydratation.

L'hydratation doit être rigoureusement contrôlée, car un excès cause un noyage de la membrane et réduit par la suite les performances des PAC, à l'inverse l'assèchement quant à lui provoque la rupture de la membrane d'où un contact direct entre les réactifs : l'oxygène et l'hydrogène dont résulte une réaction chimique très exothermique.

Une température élevée peut nécessiter un refroidissement de l'ensemble et réduit ainsi le rendement des PAC par l'utilisation des auxiliaires à cet effet. Pour les piles à haute

température l'effet est pratiquement intéressant dans la mesure où un système de cogénération est envisageable dans ce cas.

L'électrolyte est pris en sandwich entre les deux électrodes, il permet le passage des charges par deux effets physiques l'électro-osmose et la diffusion. Il doit posséder les propriétés suivantes :

- ✓ être de bonne conduction ionique.
- ✓ être un bon isolant électrique.
- ✓ être imperméable à l'oxygène et à l'hydrogène gazeux.
- ✓ avoir une bonne tenue mécanique face aux contraintes thermiques, d'hydratation et de différence de pression entre l'hydrogène de l'anode et l'oxygène de la cathode.

c. Plaques bipolaires

Les cellules individuelles sont électriquement connectées entre elles par des plaques bipolaires. Ces plaques servent également à emmener les gaz, à l'évacuation de l'eau formée et de la chaleur et enfin au maintien mécanique de l'ensemble des stacks [5].

Les matériaux de ces plaques doivent posséder un niveau de conductivité suffisant, une imperméabilité aux gaz et une bonne inertie chimique vis à vis des fluides présents dans le cœur de la pile.

I.1.6. Différentes technologies des piles à combustible

Les PAC sont classées le plus souvent selon le type d'électrolyte utilisé. Ainsi on trouve :

1. Piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC),
2. Piles à électrolyte alcalin (AFC);
3. Pile à acide phosphorique (PAFC);

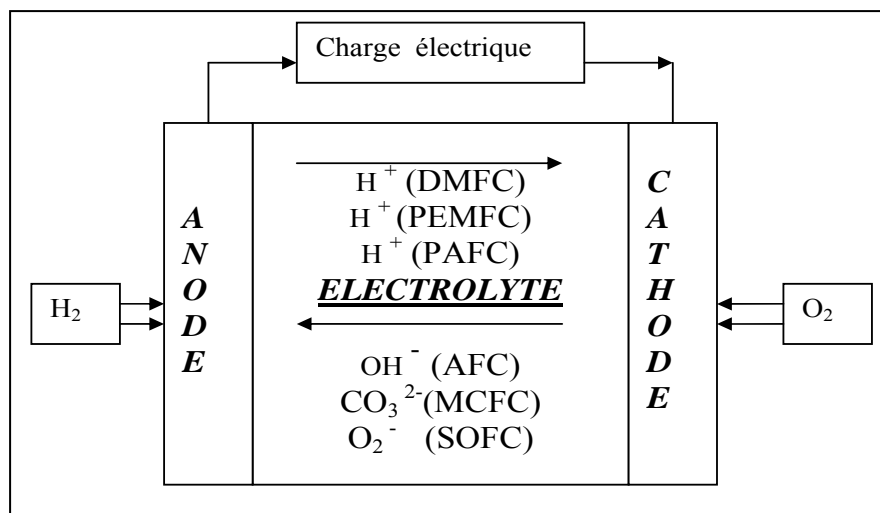


Fig. I-2 : Différents types de piles.

4. Piles à carbonate fondu (MCFC)
5. Piles à méthanol direct (DMFC), qui est en fait une PEMFC mais où on utilise comme carburant le méthanol qui est directement envoyé à l'anode et
6. Piles à oxyde solide (SOFC).

Une autre caractéristique utilisée pour classer les piles à combustible est la température de fonctionnement. On distingue ainsi :

- a. Les piles à basse température : AFC, PEMFC, DMFC et les PAFC.
- b. Les piles à haute température fonctionnant entre 600° et 1000°C : MCFC et les SOFC.

I.1.6.1. Principales piles à combustible

a. La pile alcaline

Elles étaient les premières à être développées pour les applications de la NASA. Elles sont peu coûteuses, les catalyseurs peuvent être des métaux peu précieux d'une part, et l'électrolyte est une solution alcaline pas difficile à trouver d'autre part [6].

A l'anode on a la réaction : $2H_2 + 4HO^- \rightarrow 2H_2O + 4e^-$ (I-6)

A la cathode on a la réaction : $O_2 + 4e^- + H_2O \rightarrow 4HO^-$ (I-7)

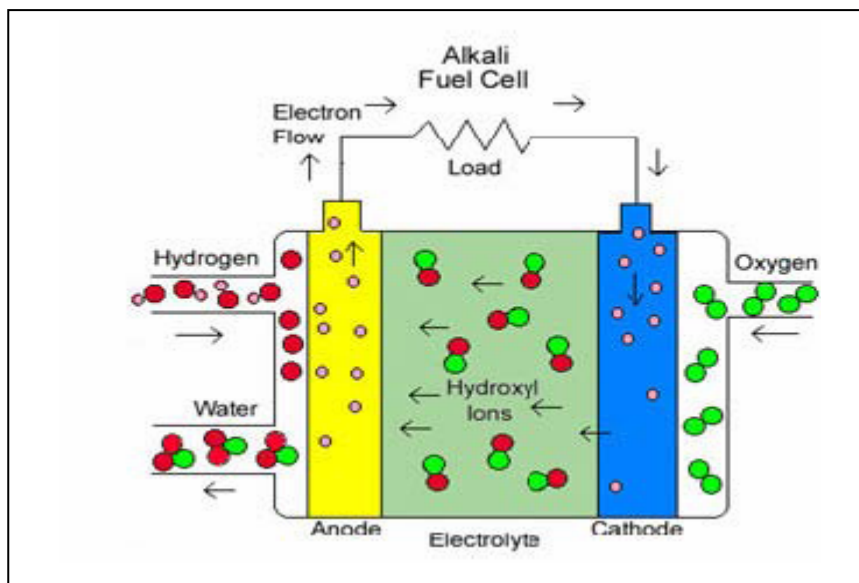


Fig.I-3 : Principe de fonctionnement de la pile AFC [15].

Les AFC (Alcaline électrolyte Fuel Cell) utilisent un électrolyte liquide, en général l'hydroxyde de potassium (KOH) contenu dans une matrice solide, qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène. Bien que ce type de piles sont de simple construction,

n'exigeant pas de matière spécifique pour l'électrolyte et sont performantes, elles ne peuvent cependant, fonctionner qu'en utilisant un gaz très pur. Le dioxyde de carbone est un poison pour l'électrolyte.



En effet le dioxyde de carbone présent dans l'air réagit avec les ions hydroxydes selon la réaction (I-8) qui réduit la concentration de ces ions et par la suite le rendement de la pile ce qui est un inconvénient majeur pour de nombreuses applications terrestres en particulier.

Afin de remédier à ce problème, on fait circuler la solution acide. Ceci empêche la formation du dioxyde de carbone et peut augmenter le rendement de la pile en utilisant la solution liquide pour le refroidissement ou en cas de non utilisation de la pile pour des batteries dans certaines applications tels que les véhicules.

b. La pile à acide phosphorique

La pile à acide phosphorique (PAFC : Phosphoric Acide Fuel Cell) est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour les applications stationnaires en tant que générateur. Des centrales électriques de types PAFC avec une puissance entre 5 & 20 Mw ont été installées dans différents endroits dans le monde [3; 6; 7]. Le recours à ce type est dû aux avantages qu'elles présentent : simple construction, stabilité thermique, chimique et électrochimique. L'électrolyte est de l'acide phosphorique sous forme liquide, non volatile à haute température et qui en plus supporte la présence du dioxyde de carbone. Cet acide dilué est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC (carbone de silicium).

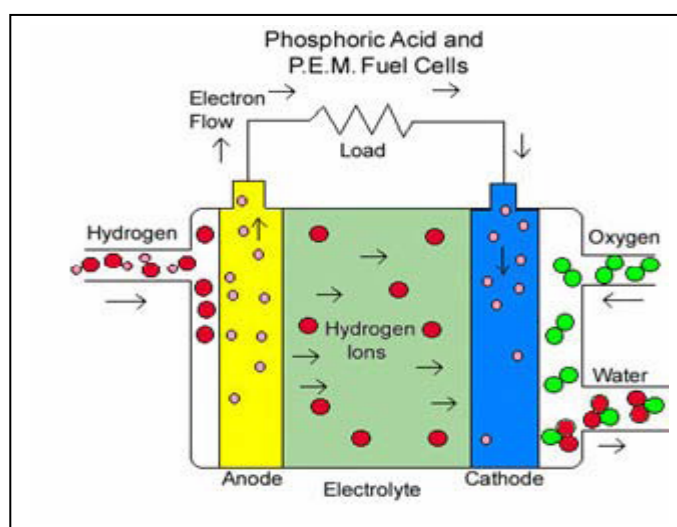


Fig. I-4 : Principe de fonctionnement des PAFC & PEMFC. [15]

Le développement enregistré dans le domaine des technologies des matériaux a permis d'atteindre le maximum de concentration de l'acide ce qui augmente considérablement la conductivité de l'électrolyte dont l'effet sur le rendement est très claire.

Les PAFC utilisent des électrodes de carbone avec catalyseur au platine qui permettent la diffusion des gaz.

c. La pile à membrane électrolyte polymérique

Ces piles, dites aussi à membrane échangeuse de protons, ont l'avantage de fonctionner à basse température permettant ainsi une utilisation simple et un démarrage rapide. Toutefois un flux de chaleur à 80 °C nécessite des refroidisseurs de grandes tailles ou une ventilation forcée.

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons H^+ . Elle fonctionne comme acide bien qu'elle est solide. Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. La basse température a aussi l'inconvénient que le catalyseur ne peut pas transformer le monoxyde de carbone (CO) dont la présence réduit le rendement de la pile. Il constitue un poison pour les particules de platine qui nécessite une purification de l'hydrogène relativement coûteuse.

La gestion de l'eau cause un problème particulier pour ces piles. En effet une hydratation adéquate de la membrane maintient sa conductivité et évite les échauffements locaux.

L'eau est produite à la cathode, elle doit être évacuée afin de ne pas obstruer les pores et priver les zones de réaction d'oxygène ce qui réduit dramatiquement les performances de la pile.

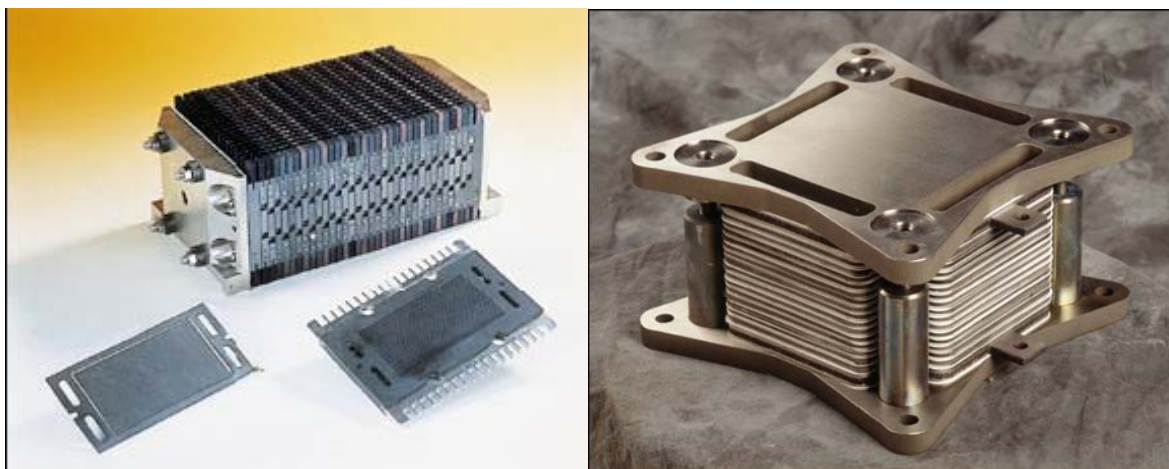


Fig.I-5: Pile PEMFC.

Enfin pour une modélisation détaillée des PEMFC on doit tenir compte du phénomène de transport de l'eau à travers la membrane. Ce phénomène est causé par la convection résultant du gradient de pression, de diffusion de l'eau causée par la différence de concentration et enfin au dipôle électrique appliqué par les protons sur les molécules de l'eau. [14]

d. Les piles à méthanol direct DMFC

La pile à méthanol direct (Direct Methanol Fuel Cell) est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant qui est directement en contact avec l'anode et non comme on le croirait, une pile qui utilise du méthanol comme source d'hydrogène par un reformage externe. La réaction qui a lieu à l'anode est :



Cette pile utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions ; ces électrolytes ne sont pas avantageux pour bloquer le passage du méthanol. Ce passage à travers la membrane dépend de plusieurs facteurs ; les plus importants sont la perméabilité de la membrane, son épaisseur, le taux de concentration en méthanol, la température de fonctionnement et des performances de l'anode.

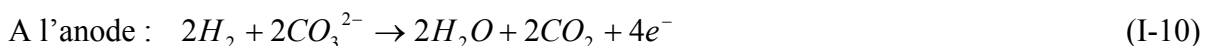
Un autre inconvénient est la présence des effluents contenant le dioxyde de carbone qui nécessite une épuration avant le rejet à l'atmosphère ceci réduit le rendement de ce type de piles.

Cependant, sa faible température et son démarrage rapide l'avantagent quant aux fluctuations des appels de charges. [15]

e. La pile à carbonate fondu

Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) sont considérées comme celles de la deuxième génération, leur température de fonctionnement élevée accélère la cinétique de la réaction de la réduction de l'oxygène et rend ainsi le recours aux matériaux nobles pour la catalyse peu évidente.

Les réactions qui ont lieu dans les MCFC sont :



L'électrolyte est un mélange carbonates de lithium et de potasse ou lithium et sodium contenu dans une matrice de céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium.

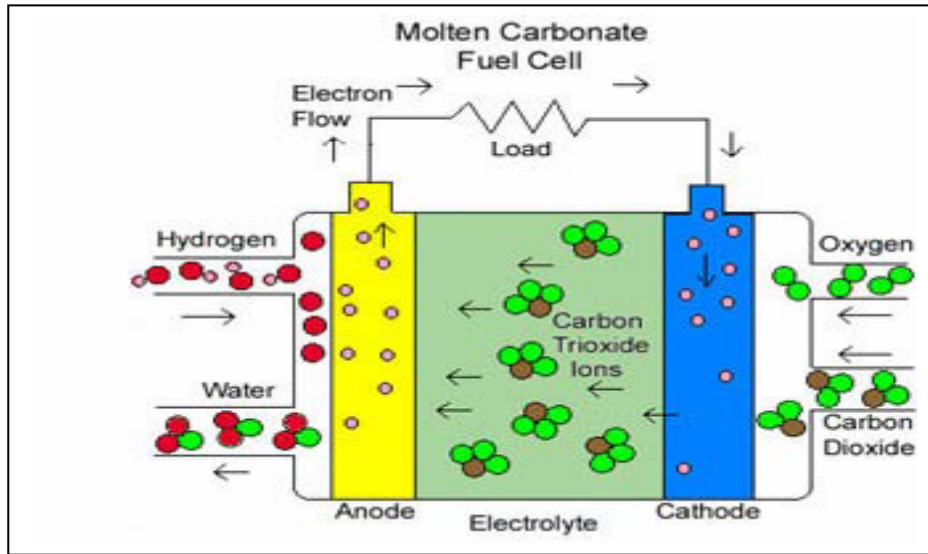


Fig. I-6 : Principe de fonctionnement des MCFC.[15]

f. Les SOFC

Les piles à oxyde solide sont très prometteuses dans les applications qui demandent une énergie constante variant peu dans le temps. Leur très haute température ne permet pas des démarrages rapides car la conductivité de l'électrolyte solide n'est pas suffisante pour les basses températures. D'un autre côté, un fonctionnement stable est préférable pour ce type des PAC. Cet inconvénient vu d'un autre côté est très bénéfique pour les systèmes dits de "cogénération". Ces piles seront vues en détails dans les chapitres qui suivent.

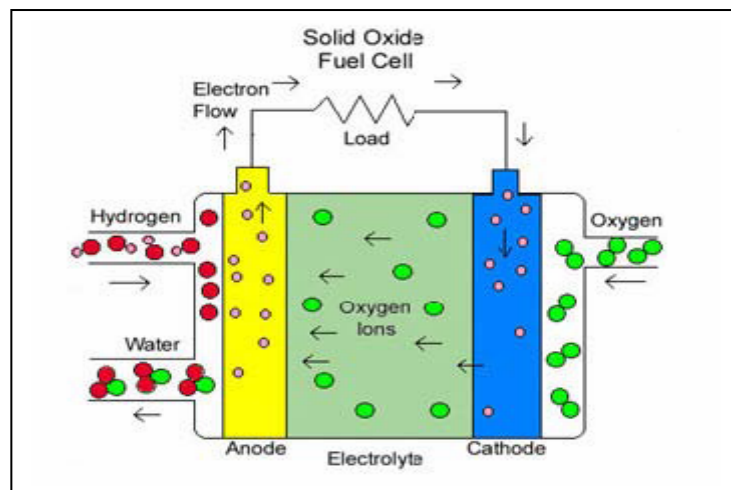


Fig.I-7 : Principe de fonctionnement de la pile SOFC.[15]

Type de pile	Electrolyte	Ion mobile	Anode	Cathode	Combustible
Alcaline (AFC)	Potasse liquide (KOH)	OH^-	Ni		Hydrogène
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	Membrane en polymère solide	H^+	Pt, Pt/Ru	Pt et ces alliages	Hydrogène
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique liquide	H^+	Pt	Pt/Cr/Co	Hydrogène, gaz naturel (reformage)
Carbonate fondu (MCFC)	Sel de carbonate fondu liquide	CO_3^{2-}	Ni, Ni/Cr	Li/NiO	Hydrogène gaz naturel méthanol
Oxyde solide (SOFC)	Céramique solide	O^{2-}	Ni/ZrO ₂	LaSrMnO ₃	Hydrogène gaz naturel méthanol
Méthanol direct (DMFC)	Membrane en polymère solide	H^+	Pt	Pt	Méthanol

Table. I-1 : Tableau comparatif des fonctionnements des PAC

I.1.7. Applications

Les PAC étant des convertisseurs électrochimiques, elles peuvent être utilisées là où l'énergie électrique est demandée. On les trouve pratiquement dans trois grands domaines d'application.

a. Applications stationnaires

Durant la dernière décennie, un changement structurel significatif a été observé dans le domaine de la production et de distribution de l'énergie électrique (P&D). Cette évolution ne semble être que le commencement. Des modifications nouvelles et profondes sont attendues. Ces changements de politique d'énergie sont essentiellement dus à deux facteurs : [16] le marché de production en courant continu et ensuite les accords de Kyoto.

Les avantages qu'offre le courant continu conjugués à ceux de la production décentralisée font des piles à combustible un candidat très favorable.

Une première application est la production de l'électricité pour les sites isolés où la tendance est le remplacement des groupes diesel par les piles. Même si le rendement est encore faible, il est acceptable car on réduit les coûts de la maintenance et les indisponibilités qui y sont liés.

Un autre avantage se manifeste dans le cas où on a besoin de chaleur telle que pour les hôpitaux et les hôtels, le recours à la cogénération est d'un apport très important. Ce procédé augmente le rendement de l'ensemble est justifié bien ce choix.

Avec une réglementation souple pour la production de l'énergie électrique; celle-ci a tout intérêt à opter pour la production décentralisée avec une intégration limitée dans le réseau de production globale afin de mieux préserver la stabilité des systèmes électriques et les intérêts des compagnies d'hydrocarbure.

b. Applications pour le transport

Dans ce domaine plusieurs prototypes sont en circulation depuis les années 1990. Avec un rendement meilleur que celui de moteur à combustion, pas polluant avec moins de bruits, ces atouts font que cette application soit la plus justifiée.



Prototype Honda FCX-V3 équipé d'un réservoir d'hydrogène sous pression.

Le choix du combustible exige le respect de plusieurs facteurs tels que la sûreté, la réglementation ou encore la logistique de distribution. Actuellement on utilise un combustible hydrogéné (méthanol ou gaz naturel) qui alimente un reformer embarqué.

La technologie utilisée dans ce type d'application est essentiellement de type PEMFC

c. Applications portables

La téléphonie mobile et les ordinateurs portables sont les domaines d'application par excellence. En effet la faible autonomie des batteries, même les plus performantes comme la

batterie lithium ion, ceci associé à la commercialisation croissante des deux produits justifie bien le choix des PAC.



Téléphone chargé par une micropac. (www.cea.fr/presse)

La solution adoptée est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission.

Ainsi l'autonomie ne sera limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène. L'utilisateur rechargera son portable comme on recharge un briquet en quelques secondes. Chaque recharge donnera 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.



Ordinateur alimenté par une pile Ballard.

I.2. Technologie des piles SOFC

I.2.1. Introduction

Les SOFC de l'anglais "Solid Oxide Fuel Cell", appelés ainsi en raison de la composition de la céramique qui forme l'électrolyte, sont des systèmes électrochimiques qui convertissent l'énergie interne d'un combustible directement en énergie électrique. Cet électrolyte est un conducteur en ion oxyde provenant de la réduction de l'oxygène à la cathode [17].

La caractéristique principale des SOFC est leur haute température de fonctionnement (800° C à 1000° C) nécessaire pour l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Cette haute température présente un double avantage. Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures facilement reformés en se passant de catalyseurs à base de métaux noble. Elle assure, d'autre part, la fourniture d'une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération. Mais elle présente également un inconvénient : la mise en température est longue et complique toute utilisation à cycle courts et répétitifs.

Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme suivant : l'oxygène est dissocié à la cathode en O^{2-} , les cations migrent à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et vont se combiner à l'anode avec l'hydrogène pour former de l'eau et libérer les électrons.

Une pile SOFC consiste en un assemblage de multiples cellules élémentaires, qui nécessite la présence de plaques pour les interconnecter. Elle comporte :

- Un électrolyte solide
- Une électrode à oxygène, la cathode
- Une électrode à combustible, l'anode.

I.2.2. L'électrolyte solide

Comme son nom l'indique, l'électrolyte d'un tel type de pile est solide. C'est l'électrolyte qui impose la température de fonctionnement de la pile. Il doit jouer un rôle d'isolant électronique au sein de la pile tout en étant conducteur par l'intermédiaire des ions O^{2-} qui diffusent de la cathode vers l'anode.

A l'heure actuelle, l'électrolyte le plus utilisé est le " Ytteria Stabilised Zirconium " ou " Zircone Stabilisé à l'Ytterium ". Il est important de noter ici qu'à l'état pur la zircone ou l'oxyde de zirconium, dérivé de l'arabe pour sa couleur bleue, n'est pas un bon électrolyte.

I.2.3. Structure de l'électrolyte

Comme mentionné plus haut l'oxyde de zirconium à l'état pur a une conductivité très faible. De plus, il a une mauvaise stabilité dans les atmosphères à la fois réductrice et oxydante. A la température ambiante et jusqu'à 1170° C, la zircone possède une structure cristalline monoclinique* (m). La structure se transforme en une forme tétragonale (t) au dessus de 1170° C. La variété monoclinique étant moins dense que celle tétragonale la transformation s'accompagne d'une variation de volume de 3 à 5 %. Ceci cause un effritement du matériau au cours de la transition et rend donc impossible la fabrication de pièce mécanique à base de zircone pure. La phase cubique existe au dessus du point de fusion c à d 2680° C.

L'addition de certain oxyde de valence différente stabilise la structure fluorine cubique de la zircone, de la température ambiante jusqu'au point de fusion et, en même temps augmente sa concentration en lacune d'oxygène. Cela augmente la conductivité ionique et entraîne vers une conduction ionique sur une large gamme de pression partielle en oxygène, rendant ainsi la zircone stabilisée utilisable pour électrolyte SOFC.

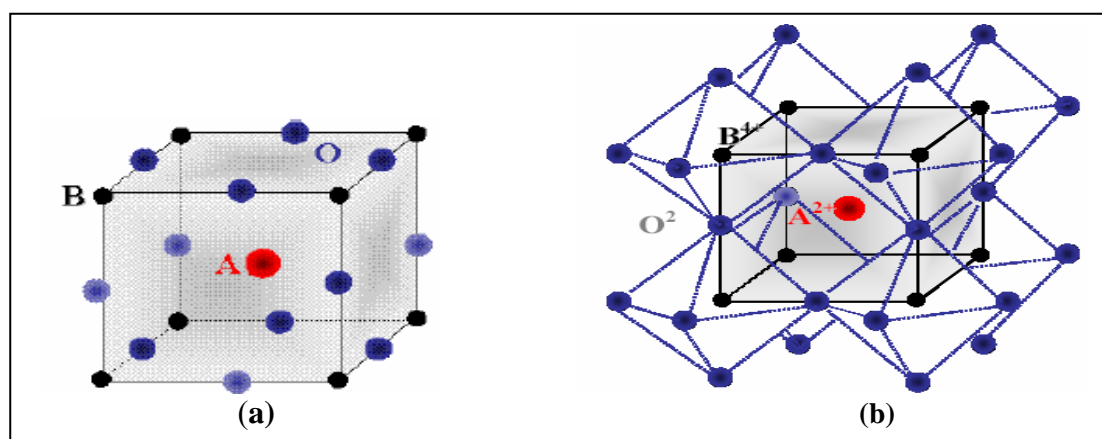


Fig.I-8 : Structure perovskite

La stabilisation est accomplie par la substitution directe d'un ion Zr^{4+} par un cation divalent ou trivalent ($Ca^{2+}, Mg^{2+}, Y^{3+} \dots$) de la taille appropriée. Ceci n'est donc ni plus ou moins que l'insertion de défaut au sein du réseau cristallin de la zircone. Un défaut qui va créer un déséquilibre, qui entraînera à la conduction des ions O^{2-} , par saut de proche en proche.

La notation de Kröger et Vink (K &V) donne:



(*) Monoclinique : se dit d'un système cristallin dont la symétrie est celle d'un prisme oblique à base d'un losange.

Ou encore



Où :

Y' : représente un ion Y^{3+} occupant un site d'un ion Zr^{4+} (charge -),

V_O^{00} : représente une lacune d'oxygène (charge 2+) et

O_O^X : est un ion O^{2-} sur un site d'ion O^{2-} (charge $x=0$).

On substitue des ions Zr^{4+} par des ions Y^{3+} de moindre valence à 8 % molaire $[(Y_2O_3)_{0.08}(ZrO_2)_{0.92}]$ qui est le pourcentage où le maximum de conductivité est atteint. Ainsi par l'introduction en quantité hautement précise, on peut espérer obtenir une pile dont le rendement est optimisé.

La zircone yettrie cubique est utilisée pour sa faible conductivité thermique (2 à 3 W/K/m) et son coefficient de dilatation élevé ($10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) en tant que barrière thermique et pour sa bonne conductivité ionique en tant qu'électrolyte pour les piles à combustible à oxyde solide. [17]

Les recherches récentes s'orientent vers la stabilisation de la zircone par l'oxyde de scandium Sc_2O_3 . La conductivité est meilleure que celle de la zircone yettrie pour des températures plus basses.

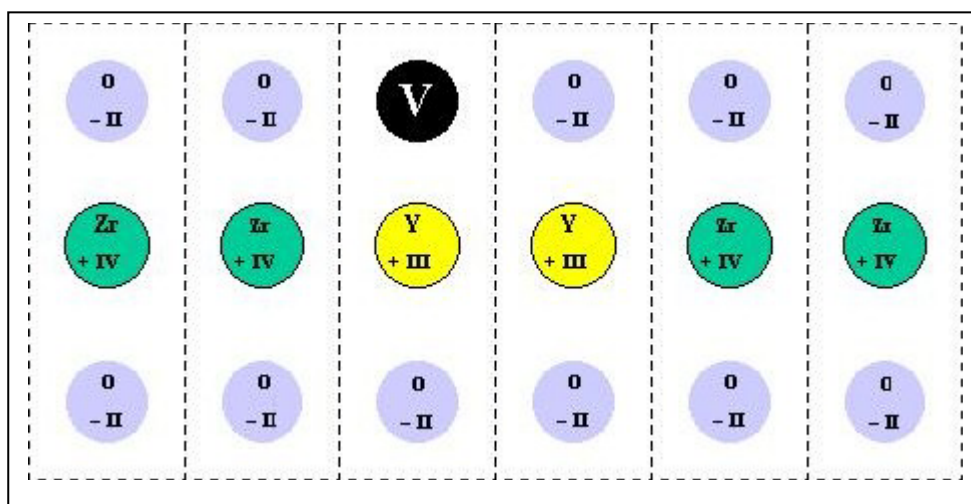


Fig.I-9 : Schématisation pour la création des impuretés.[19]

La réduction de la température de fonctionnement augmenterait considérablement la durée de vie de ce type de pile. Mais ceci conduit à une diminution de la densité de puissance de la pile à cause de la faible conduction ionique de l'électrolyte. Pour passer cette limitation il est envisagé soit de réduire l'épaisseur de l'électrolyte, soit d'utiliser de nouveaux

électrolytes et matériaux d'électrode présentant des activités catalytique et de conduction plus adaptés à ces températures de fonctionnement.

Parmi les matériaux proposés à la place de la zircone on trouve des oxydes tels que les gallates lanthanes dopés. Ils offrent une conduction suffisante à 700° C. Or à leur bonne conductivité s'opposent des difficultés technologiques difficilement surmontables ; coût élevé du gallium et manque de stabilité chimique du gallate de lanthane.

On doit noter ici que l'abaissement de la température induit une contrainte supplémentaire de catalyse pour la réaction lente de réduction de l'oxygène qui est fortement dépendante de la température au niveau de la cathode.

I.2.4. Principe de la diffusion

La diffusion dans les solides peut s'accomplir selon plusieurs mécanismes, nécessitant tous un défaut du cristal. Elle correspond à une succession de déplacement élémentaire d'atomes dans la structure .Elle s'apparente aux phénomènes osmotiques en biologie ou au mouvement brownien qui permet les échanges de chaleur entre molécules.

L'atome se déplace par sauts élémentaires vers une autre position d'équilibre .Dans un solide cristallin les directions et les longueurs des sauts sont bien définis. Chaque saut peut être effectué vers les sites premiers voisins à condition que le site soit libre, c à d que l'on ait une lacune. La probabilité d'avoir ce type de défaut est égale à la concentration des lacunes donnée par :

$$C_{lacune} = e^{-\frac{G_f}{kT}} \quad (I-14)$$

G_f : enthalpie libre de formation d'une lacune ;

k : la constante de Boltzmann ;

et T température absolue en Kelvin.

Pour que l'atome puisse changer de site il doit avoir l'énergie nécessaire ou suffisante. Pour cela il doit donc franchir la barrière d'énergie G_m qui représente l'enthalpie libre de migration. La probabilité de franchissement de cette barrière est donnée par :

$$e^{-\frac{G_m}{kT}} \quad (I-15)$$

La fréquence de saut d'un atome ou le nombre de réussite par unité de temps est donc :

$$\gamma_{atm} = \gamma_0 \left(e^{-\frac{G_f}{kT}} \right) \left(e^{-\frac{G_m}{kT}} \right) \quad (I-16)$$

γ_0 : Fréquence de Debye de vibrations de l'atome autour de sa position d'équilibre.
($\gamma_0 = 1013 \text{ s}^{-1}$).

La diffusion se fait au hasard sans flux de matière ; ce qui correspond à une concentration homogène d'atome. Si les concentrations sont inhomogènes, on est hors équilibre thermodynamique et il existe alors un gradient de concentration qui entraîne un flux de matière.

Ce flux est donné par la 1^{ière} loi de Fick :

$$J = -D \text{grad}(C) \quad (\text{I-17})$$

D : coefficient de diffusion (m^2/s) tel que $D = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$

Ea : Energie d'activation :

$E_a = G_m + G_f$: pour une diffusion d'atome ;

$E_a = G_m$: pour une diffusion de lacune.

Grad (C) : le gradient de la concentration, le signe moins signifie que le flux va des endroits les plus concentrés vers les moins concentrés.

La variation de la concentration d'une espèce en fonction du temps et de l'espace est donnée par la seconde loi de Fick dérivée de l'équation de conservation de la matière :

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (\text{I-18})$$

x : la distance.

I.2.4.1. La cathode

C'est à la cathode qu'a lieu la réduction de l'oxygène gazeux O_2 (g) en anions O^{2-} selon le bilan :



La cathode est donc simultanément un collecteur de charges et, le siège de la réduction de l'oxygène qui diffuse ensuite à l'état d'anions.

Autrefois cette tâche, en l'occurrence la réduction, était accomplie par des métaux nobles tels que le platine (Pt), le palladium (Pd) et autre l'argent (Ag). Mais leur coût prohibitif ainsi que leur instabilité physique et chimique ou encore leur incompatibilité avec la majorité des électrolytes a rendu leur utilisation non justifiable.

Cette double propriété, réduction de l'oxygène et la collecte des charges, est assurée le plus couramment par des oxydes de structure pérovskite tel que le manganite de lanthane dopé (LaMnO₃). On effet, à cause de la haute température de fonctionnement de l'électrolyte, seuls les matériaux nobles ou les oxydes conducteurs électroniques peuvent être utilisés comme matériaux cathodiques.

Le LaMnO₃ possède une conductivité intrinsèque de type « p » grâce à la formation de lacune cationiques. La conductivité électronique du matériau peut être augmentée en substituant un ion présentant moins d'électrons de valence soit sur le site A ou le site B. Dans les cristaux A est l'atome du milieu, B ceux des coins et les O sont placés sur les arêtes.

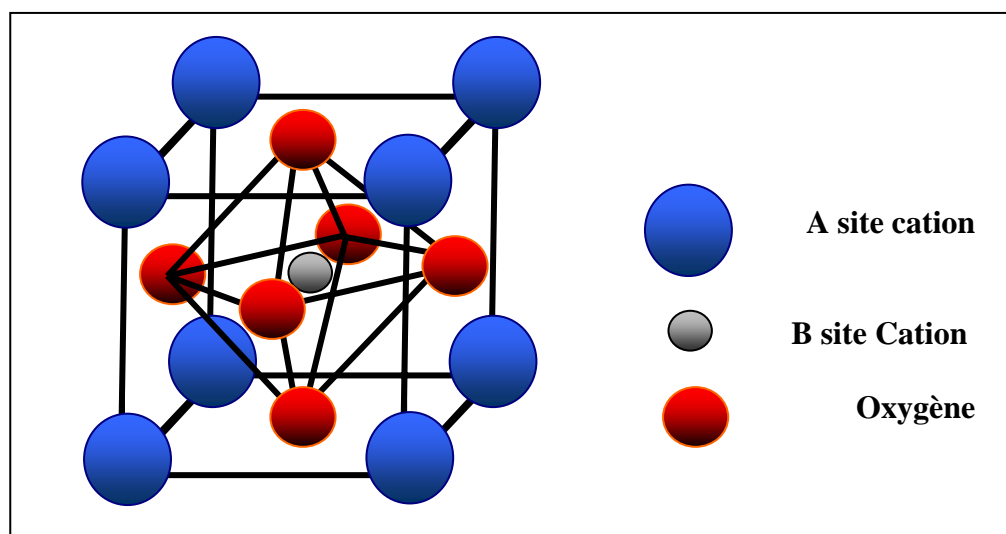


Fig. I-10 : Structure pérovskite

À l'heure actuelle, le matériau de cathode privilégié pour les SOFC est le manganite de lanthane dopé au stantium car il présente une haute conductivité électronique en atmosphère oxydante. [20]

Un paramètre important à prendre en considération est le coefficient d'expansion thermique. En effet, il faut que celui des électrodes soit à peu près égal à celui de l'électrolyte, afin de ne pas entraîner des distorsions trop grandes qui causeraient la rupture de la pile au sens physique du terme.

I.2.4.2. L'anode

C'est au niveau de l'anode que se produit la recombinaison des ions O²⁻ par l'oxydation de l'hydrogène selon :



Tout comme la cathode, l'anode se doit être poreuse pour permettre l'évacuation de la vapeur d'eau formée lors de la réaction précédente. L'anode est le plus couramment constituée d'un type de céramique très particulier : le cermet, un matériau composé de céramique et d'un métal par exemple le nickel qui est utilisé à cause de son faible coût.

Pour maintenir une porosité du nickel pendant de longues périodes à haute température et pour assurer d'autres propriétés voulues par l'anode, le nickel est souvent dispersé sur la surface d'un support céramique YSZ. Le support est ajouté à la formulation de l'anode sous forme de poudre ou de fibre. Les fonctions de YSZ au niveau de l'anode sont de supporter les particules du nickel métallique, inhiber la fonte des particules métalliques à la température de fonctionnement de la pile et assurer un coefficient d'expansion thermique acceptable en comparaison à ceux des autres composants de la cellule.

La conductivité du cermet nickel/YSZ dépend de sa teneur en nickel ; dont dépend aussi le coefficient d'expansion thermique.

Au dessus de 30 % le coefficient du nickel est plus grand que celui de YSZ. En même temps en dessous de ce pourcentage la conductivité du cermet est similaire à celle de YSZ signe d'un mouvement de conduction ionique à travers la phase YSZ. Au dessus du même pourcentage le nickel est d'environ trois fois plus grand, ce qui correspond à un changement du mécanisme en un mouvement électronique à travers le nickel.

Les composants des SOFC sont souvent réalisés par une série de procédés de frittage de poudre qui sont coûteux et lents nécessitant plusieurs phases de montées et descentes en températures.

La tendance est vers les procédés de projection plasma qui ont un potentiel intéressant pour diminuer les coûts de la production.

I.2.4.3. Plaques bipolaires

Deux rôles principaux sont à assurer par les plaques bipolaires :

La connexion électrique entre les cellules et la séparation entre les réactifs au sein des cellules. Le fait que ces inter connecteurs doivent être compatibles avec tous les composants et être stable dans les milieux réducteurs et oxydants impose des restrictions quand au choix des matériaux. A cela s'ajoute les coûts et les procédés mis en jeu pour leurs fabrications.

Ainsi deux grandes catégories se sont distinguées pour avoir répondu aux critères sus mentionnés.

Pour les hautes températures de fonctionnement la céramique dopée au lanthanide et chromite yttria s'impose. Ces pérovskites ont une excellente conductivité électrique qui augmente avec la température. Le contrôle des taux d'impuretés introduites permet d'avoir de

bonnes propriétés thermomécaniques ainsi qu'une excellente compatibilité avec les matériaux de l'électrolyte. Un inconvénient majeur réside dans le fait que ce type de matériaux est rigide et fragile.

Pour surmonter cet handicap tout en avantageant la réduction de la température de fonctionnement les tendances convergent vers des plaques bipolaires en acier inoxydable.

I.2.5. Technologies des SOFC

Le choix de la technologie dépend d'un certain nombre de critères, dont l'objectif est d'avoir une pile fiable et au moindre coût.

- **Performances électriques** : le rendement de la pile étant fonction de la tension à ces bornes, les pertes ohmiques doivent être réduites en minimisant le chemin emprunté par le courant.
- **Performances électrochimiques** : les gaz doivent être uniformément distribués dans la pile et doivent aussi atteindre les zones de réaction rapidement afin de réduire les pertes par concentration.
- **Gestion de la température** : ceci induit un refroidissement uniforme et efficace.
- **Intégrité de la structure mécanique** : les conséquences de la fatigue mécanique telles que les fissures et délaminage doivent être tenues au minimum.

Basé sur ces critères deux technologies ont été développées :

1. La technologie tubulaire et
2. La technologie plane, elle aussi subdivisée en technologie classique et technologie monolithique.

I.2.5.1. La technologie tubulaire

Cette technologie est la plus avancée du point de vue commercialisation. Un cylindre en céramique fermé à une extrémité sert de support et est couvert extérieurement de couches faisant office de cathode, d'électrolyte, d'anode et enfin un dépôt souvent obtenu par projection plasma sert d'inter connecteur. L'intérieur du tube sert à la distribution d'air tandis que le combustible est emmené par l'extérieur. [21]

Étant donné que les tubes sont obturés à leurs fins cette technologie n'a pas besoin des joints d'étanchéité à haute température ; ceci à pour effet de réduire les conséquences des contraintes mécaniques issues de celles thermiques et améliore ainsi la fiabilité de la pile. [22]

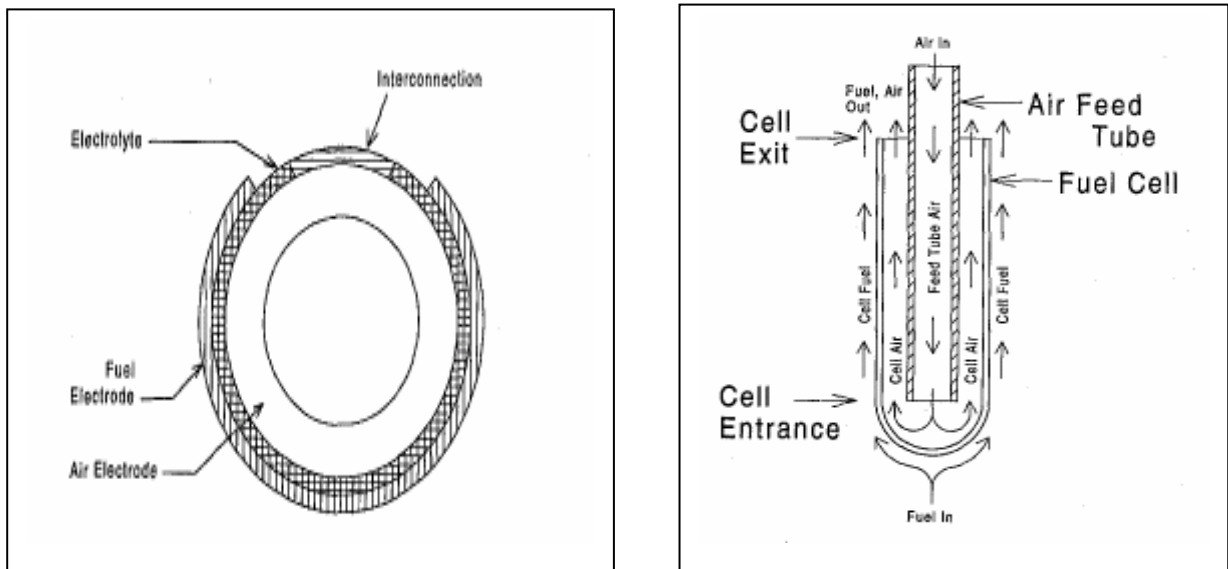
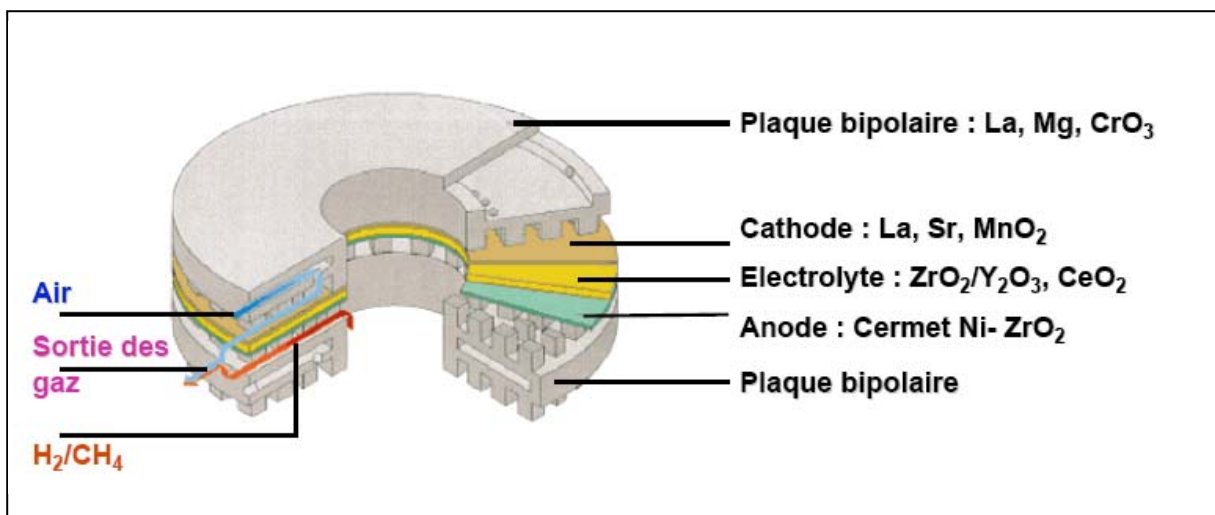


Fig. I-11 : technologie des piles

I.2.5.2. Technologie plane

La technologie plane plus récente est plus compacte que la précédente ; offre de meilleures performances en termes de la puissance spécifique en plus de la facilité des procédés de leurs fabrications. Encore, il est possible d'utiliser les métaux pour les plaques bipolaires si les températures de fonctionnement sont basses.

Fig. I-12 : technologie plane (Les piles SOFC : www.AFH2.org)

Cependant l'étanchéité est un des problèmes majeurs auxquels cette technologie doit faire face. Une autre difficulté réside dans la mise au point des plaques d'interconnexion assurant à la fois une bonne conduction électrique, une bonne tenue mécanique et enfin une bonne tenue à la corrosion et ce pour les hautes températures.

I.2.5.3. Technologie monolithique

Cette technologie est un arrangement de type nid d'abeilles [23]. Les anneaux des gaz oxydants et combustibles sont formés de couches plissées de matériaux de cathode et d'anode respectivement. Ces couches sont alternativement séparées par un ensemble multicouches plan mettant en jeu la séquence cathode/électrolyte/anode puis anode/matériau d'interconnexion /cathode.

La technologie monolithique permettrait une plus grande compacité et des densités de courant élevées.

Technologie	Différence de Potentielle (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

Table. I-2 : Table comparatif des performances des PAC.

I.2.6. Avantages et inconvénients

Les piles SOFC offrent plusieurs avantages :

- ✓ Un rendement énergétique élevé notamment en cogénération où on peut atteindre 80%.

Leur haute température de fonctionnement améliore la cinétique de réaction, évitant ainsi le recours aux catalyseurs à base de métaux nobles et permet aussi la possibilité d'obtenir l'hydrogène à partir des gaz naturels par vaporéformage tout en transformant le monoxyde de carbone produit en dioxyde de carbone qui peut être séquestré.

- ✓ Modularité, très faible impact sur l'environnement surtout en cas d'utilisation de l'hydrogène pur.
- ✓ Peu ou pas de bruit.

Bien que jouissant de tous ces avantages, les piles SOFC ne sont pas exemptes d'inconvénients :

- ✓ **La** mise en température est longue et complique toute utilisation à cycle court ou répétitif.
- ✓ **Leur** coût de commercialisation est encore élevé.

I.3. Performance des piles SOFC

I.3.1. Introduction

Afin de modéliser les PAC il utile de dresser un bref rappel sur les principes de l'électrochimie et des processus de conversion de l'énergie.

L'énergie comme vue précédemment est la capacité d'effectuer un travail. Elle est conservative. Elle se transforme d'une forme à une autre. Elle peut être sensible : c.-à-d. perçue, comme elle peut être potentielle : c.-à-d. cachée.

a. L'énergie mécanique

On l'associe aux objets en mouvement eux même ou à ceux qui ont un potentiel pour se mouvoir ou le faire sur d'autres objets.

Ainsi l'énergie cinétique est définie par $E_C = \frac{1}{2}mv^2$ pour un corps en mouvement de translation, ou encore par $E_C = \frac{1}{2}J\omega^2$ pour un autre en rotation.

L'énergie potentielle dans le champ gravitationnel est exprimée par $E_p = mgh$ où h est la hauteur, elle est de la forme $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ pour un ressort de raideur k .

b. L'énergie chimique

C'est une forme de stockage de l'énergie. Elle est cachée dans les liaisons entre atomes et entre molécules. Pour l'extraire on doit tout d'abord briser ces liaisons par un apport énergétique externe : réaction endothermique tel que la photosynthèse. Ensuite elle peut être restituée par recombinaison dans le but de créer des molécules stables : réaction exothermique telle que la combustion.

c. L'énergie électrique

Elle est associée aux champs électrique, magnétique et électromagnétique.

d. L'énergie thermique

Du point de vue macroscopique elle est définie comme étant l'énergie transmise d'un système à autre dont les températures sont différentes. Elle est associée aux vibrations des atomes et molécules.

I.3.2. Principes de la thermodynamique

La thermodynamique est la description quantitative des échanges de chaleur et d'énergie chimique. Elle repose sur le concept de système et les notions suivantes :

- ✓ Un système est la partie du monde étudiée ; il est dit ouvert s'il peut échanger de l'énergie et de la matière avec l'environnement. Il est fermé s'il ne peut échanger que l'énergie.
- ✓ Un système est isolé ou adiabatique s'il n'échange ni matière ni énergie.

La thermodynamique étudie l'évolution d'un système en considérant l'état initial et l'état final avant et après l'intervention d'un phénomène. Elle ne se préoccupe ni du temps ni de la voie suivie pour atteindre l'équilibre. Elle repose sur les deux principes suivants :

1. Pour tout système il existe une forme d'énergie propre au système appelée énergie interne U ; fonction extensive (dépend de la masse de l'échantillon) du system et dont la variation ne peut résulter que d'un transfert de travail W et d'un transfert de chaleur Q avec l'extérieur :

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q \quad (\text{I-20})$$

2. Pour tout système, il existe une fonction d'état extensive S appelée entropie.

L'entropie créée au sein d'un système fermé est toujours positive ou nulle.

Dans le cas général on trouve les deux principes de Clausius :

- ⇒ L'énergie totale de l'univers demeure constante.
- ⇒ L'entropie de l'univers tend vers un maximum. Il introduit la notion de réversibilité de la transformation d'énergie et de la dégradation de l'énergie dans le cas des transformations irréversibles.

I.3.3. Thermodynamique de la pile à combustible

I.3.3.1. Energie et tension des PAC

Pour tout système de conversion d'énergie, il est nécessaire de quantifier l'énergie apportée et l'énergie fournie. Dans le cas des PAC, l'énergie apportée est l'énergie chimique des gaz entrant dans le PAC .La pile fournie l'énergie sous forme électrique et thermique.

Si la quantification de ces deux dernières est facile. L'énergie apportée quand à elle, elle ne l'est pas. Le principe de l'enthalpie libre ou l'énergie libre de Gibbs est donc applicable.

On peut définir une grandeur nommée enthalpie notée H pour une température et une pression données. La variation de cette grandeur caractérise la variation de l'énergie chimique.

La seconde loi de la thermodynamique implique que l'on ne peut espérer recueillir du système que la variation d'enthalpie libre.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{I-21})$$

La variation d'enthalpie libre ΔG caractérise l'énergie chimique susceptible d'être transformée pour un travail interne en négligeant celui effectué par des changements en pression et en volume ($P \& V$), le reste de la variation énergétique est libérée sous forme de chaleur, représentée par $T\Delta S$ où ΔS représente la variation d'entropie du système. [20]

La variation de l'énergie libre de Gibbs pour une pile à combustible est :

$$\Delta G = G_{H_2O} - G_{H_2} - \frac{1}{2}G_{O_2} \quad (\text{I-22})$$

Connaissant le débit molaire on peut établir une relation entre l'énergie libre de Gibbs et l'énergie électrique. On se rappelle que deux électrons sont échangés par chaque molécule d'hydrogène. Une mole consiste en N_A électrons ($N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$: nombre d'Avogadro). La charge échangée par mole est :

$$-2eN_A = -2F \quad (\text{I-23})$$

Où :

e : La charge de l'électron ($= -1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

F : La constante de Faraday ($= 96485$ C mol⁻¹)

Le courant est le produit de la charge par le débit molaire :

$$I = 2Fd \quad (\text{I-24})$$

Le travail est le produit du courant de la charge par la tension V à ces bornes, il est égal à la variation de l'énergie libre dans le cas d'une réaction réversible :

$$\Delta G = -2FV \quad (\text{I-25})$$

D'où

$$V = -\Delta G / 2F \quad (\text{I-26})$$

On peut également calculer la tension en utilisant le bilan des puissances.

L'entropie $T\Delta S$ est résultat de la réaction et traduit la perte de chaleur dans le milieu

($\Delta S = \frac{Q}{T_{Fc}}$) ; cela nous permet d'exprimer le travail par :

$$W = \Delta H - Q = \Delta H - T\Delta S = \Delta G \quad (\text{I-27})$$

La puissance chimique est définie comme étant le produit de l'énergie libre de Gibbs par le débit molaire d :

$$P_{ch} = \Delta Gd \quad (\text{I-28})$$

La puissance électrique est définie comme le produit de $V I$ où I est exprimé en fonction du débit molaire : $I = -n F d$ et où n est le nombre d'électrons participant dans la réaction. Les puissances électrique et chimique sont égales pour une réaction réversible ceci nous permet d'écrire :

$$P_{Ch} = \Delta G d = P_e = V I = -V n F d \quad (I-29)$$

$$V = \frac{\Delta G}{2F} \text{ avec } n = 2 \quad (I-30)$$

I.3.3.2. Rendements des PAC

Le rendement d'une conversion d'énergie est donné par le rapport de l'énergie produite sur l'énergie fournie ou disponible.

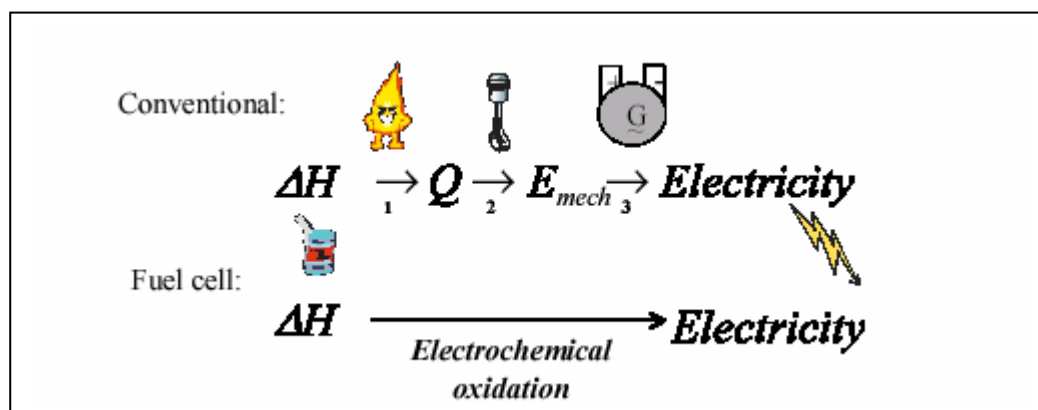


Fig. I-13 : Conversion d'énergie entre PAC et cycle conventionnel

Dans les systèmes électrochimiques, la quantification de l'énergie apportée est difficile. Pour ce la on fait appel à l'enthalpie ΔH , fonction d'état des produits et des réactifs.

Ainsi on définit le rendement énergétique maximal par la comparaison de l'énergie électrique créée qui n'est autre que l'énergie libre de Gibbs à l'énergie calorifique de la réaction électrochimique.

$$\eta_e = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (I-31)$$

On définit aussi le rendement en tension. Ce dernier est le rapport de la tension de la pile à la tension idéale. En effet la valeur théorique de 1.23 V n'est jamais atteinte à cause des différentes pertes dans la pile :

$$\eta_t = V / 1.23 \quad (\text{I-32})$$

Le rendement en tension permet de comparer plusieurs piles à combustible.

Le rendement en matière traduit la composition des gaz participants à la réaction. La quantité des gaz nécessaire ne peut donc être exactement fournie. A ceci sont ajoutés les problèmes de distributions des gaz dans les zones de réactions.

$$\eta_m = \text{débit}_{\text{consommé}} / \text{débit}_{\text{fourni}} \quad (\text{I-33})$$

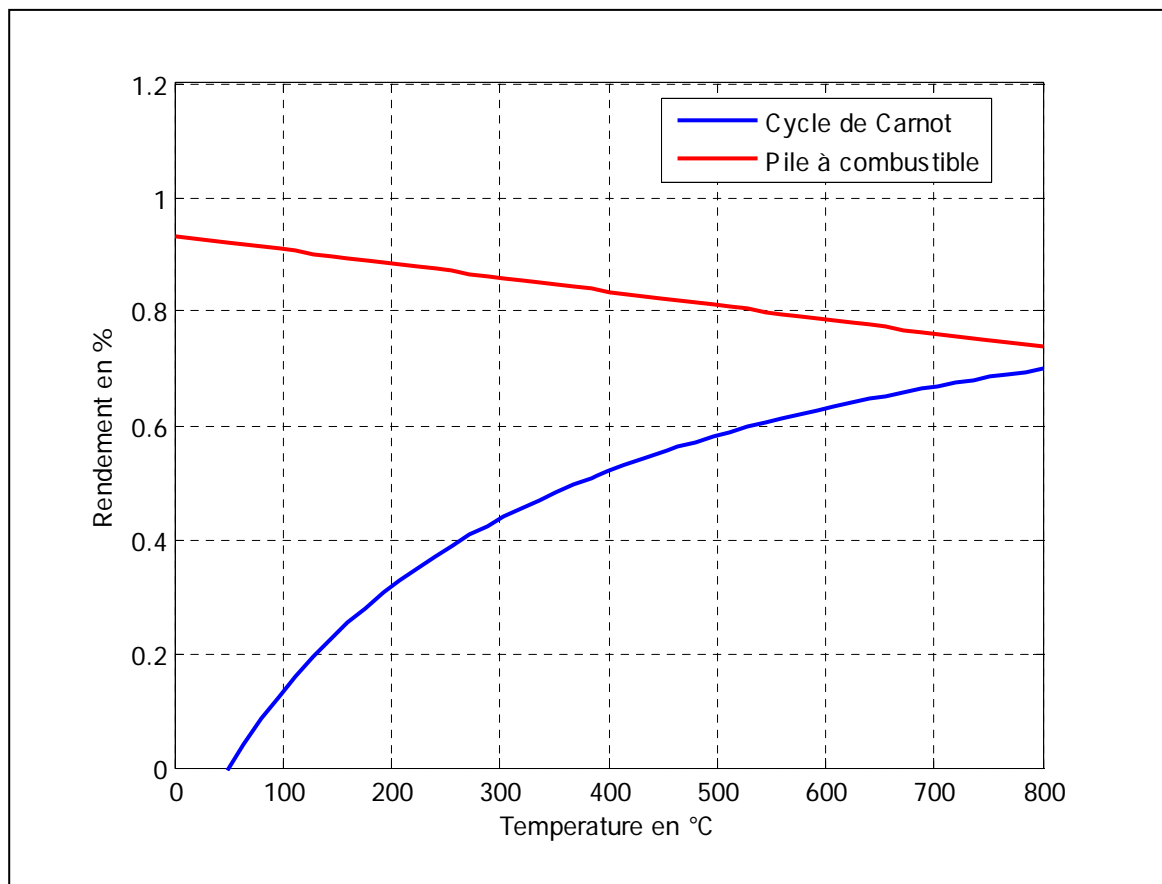


Fig. I-14 : Comparaison entre les rendements du cycle de Carnot et PAC

Pour tenir compte des phénomènes de recombinaison des espèces ainsi que des réactions secondaires qui peuvent avoir lieu dans les piles on définit le rendement faradique.

$$\eta_F = \frac{I}{I_{theo}} \quad (\text{I-34})$$

Le rendement faradique est le rapport du courant débité au courant théorique. Il permet de prendre en compte le fait que le nombre d'électron obtenu par mole n'est pas toujours égal à la valeur théorique. Le rendement global est le produit des rendements sus cités.

Les piles à combustible sont généralement utilisées dans les systèmes dits de cogénération. Cette exploitation particulière des piles augmente de façon remarquable le rendement des piles d'où l'intérêt suscité pour les PAC. Le rendement d'un tel système est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{Q + E}{Q_0} \quad (\text{I-35})$$

Où :

Q, E : Sont respectivement les énergies obtenues de la chaleur et électrique.

Q_0 : L'apport énergétique des réactifs.

I.3.3.3. Tension réversible (tension à vide)

Les performances d'une pile à combustible sont régies par la seconde loi de la thermodynamique du moment que les pertes dans ces systèmes sont inévitables. Pour ces piles les pertes irréversibles sont causées par :

- ↪ 1-La résistance ionique de l'électrolyte et celle électronique des électrodes et des plaques d'interconnexion.
- ↪ 2-Energies d'activation.
- ↪ 3-La diffusion des gaz vers les zones de réaction.

La variation de l'enthalpie libre en fonction de celles d'enthalpie représentative de l'énergie potentielle et d'entropie représentative de l'état du système et exprimée par :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = \Delta G_{\text{PRODUITS}} - \Delta G_{\text{REACTIFS}} \quad (\text{I-36})$$

La forme différentielle sera :

$$\partial G = \partial Q - \partial W + p\partial V + V\partial p - T\partial S + S\partial T \quad (\text{I-37})$$

Pour un procédé réversible les termes ∂Q et $T\partial S$ s'annulent mutuellement. En plus quand le système fournit uniquement un travail d'expansion ∂W et $p\partial V$ s'annulent aussi mutuellement.

La variation en fonction de la pression pour un processus isotherme :

$$\partial G = V\partial p = n\mathfrak{R}T \frac{\partial p}{p} \quad (\text{I-38})$$

Où \mathfrak{R} est la constante des gaz parfait. (8.314 J/mole K).

Partant de l'état 1 à l'état 2 :

$$G_2 - G_1 = n\mathcal{R}T \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{I-39})$$

On trouve la forme générale de l'enthalpie libre d'une espèce (i) en fonction de la température et de la pression :

$$G(T, p_i) = G^0 + \mathcal{R}T \ln\left(\frac{P_i}{P_0}\right) \quad (\text{I-40})$$

Où p_i est la pression partielle de l'espèce (i) ; le rapport $\frac{P_i}{P_0}$ est appelée fugacité des gaz.

D'une façon générale on parle d'activité a_i qui correspond à la fugacité des gaz parfait.

L'équation est connue sous le nom de l'équation de Nernst.

Pour les piles SOFC le potentiel de Nernst sera donné par l'équation suivante : [24]

$$E = E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{4F} \ln \left[\frac{(P_{O_2}^C)(P_{H_2}^A)^2}{(P_{H_2O}^A)^2} \right] \quad (\text{I-41})$$

Où

E^0 : La tension de la pile dans les conditions standards

$P_{O_2}^C$: La pression partielle de l'oxygène à la cathode,

$P_{H_2O}^A$: La pression partielle de l'eau

$P_{H_2}^A$: La pression partielle de l'hydrogène à l'anode.

Dans les systèmes des piles à combustible on travaille le plus souvent à pressions égales à l'anode et à la cathode ceci épargne les électrodes d'être exposées à des différences de pressions destructives. [25]

Les pressions seront exprimées par des coefficients dépendants des masses molaires et des concentrations en pourcents des composés :

$$\begin{pmatrix} P_{H_2} = \alpha P \\ P_{O_2} = \beta P \\ P_{H_2O} = \delta P \end{pmatrix} \Rightarrow E = E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{4F} \ln \left[\frac{(\alpha P)(\beta P)^2}{\delta P} \right] = E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{2F} \ln \left[\frac{\alpha \beta^2}{\delta} P^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{I-42})$$

Ou encore :

$$E = E^0 + \frac{\mathfrak{R}T}{2F} \ln \left[\frac{\alpha \beta^{\frac{1}{2}}}{\delta} \right] + \ln \left(P^{\frac{1}{2}} \right) \quad (\text{I-43})$$

On remarque que la tension de NERNST dépend fortement de la température dans les conditions de pression standards (P=1bar).

Il est à noter que l'expression de la tension peut être approximée ; et ce sans que la déviation ne soit remarquable en fonction de la température pour certaines valeurs de cette dernière grandeur par la formule suivante qui donne l'énergie libre de Gibbs par [26] :

$$\Delta G_f^0 = 188600 - 56(T - 1073.15) \quad (\text{I-44})$$

I.3.3.4. Le bilan de tension

L'équation de Nernst représente un état idéal. La tension réelle de la pile doit prendre en compte les différentes pertes qui ont lieu dans la pile (annexe 1) :

- Les pertes de potentiel dues à l'activation η_{ANODE} et η_{CATHODE} ;
- Les pertes ohmiques de l'électrolyte et des connecteurs;
- Les pertes de concentration η_{ANODE} et η_{CATHODE} .

I.3.3.5. Les chutes de tension d'activation

Ces phénomènes ont lieu dans les zones d'activation où un élément neutre sera transformé en ion ou c'est l'inverse qui se produit.

Du point de vue énergétique, toute réaction nécessite une certaine énergie dite d'activation, qui joue le rôle de l'étincelle pour la combustion. Dans le cas de l'oxydoréduction, pour qu'une espèce change son état d'oxydation, l'électron doit franchir la barrière d'activation. Une proportion de la tension produite par la pile sera donc consommée pour l'activation de la réaction chimique.

La chute de tension est liée au courant par l'équation de BUTLER-VOLMER :

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha n F}{\mathfrak{R}T} V_{ACT} \right) - \exp \left(- (1 - \alpha) \frac{n F}{\mathfrak{R}T} V_{ACT} \right) \right] \quad (\text{I-45})$$

I_0 : Le courant d'échange à l'équilibre électrodynamique ;

α : Coefficient de proportionnalité, égal à 1/2 en supposant une énergie d'activation symétrique pour les deux électrodes ;

Et n le nombre d'électrons mis en jeu pour la réaction d'oxydoréduction qui peut être pris égal à 1 ,2 ou 4 selon l'électrode utilisé [27]

Afin de résoudre cette équation tout en évitant les méthodes itératives et en tenant compte des suppositions sus citées, l'équation (I-45) deviendra :

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{F}{2\mathfrak{R}T} V_{ACT}\right) - \exp\left(-\frac{F}{2\mathfrak{R}T} V_{ACT}\right) \right] \quad (\text{I-46})$$

En posant : $\exp\left(\frac{F}{2\mathfrak{R}T} V_{ACT}\right) = x$

L'équation (I-46) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{I}{I_0} = x - \frac{1}{x} \Rightarrow x \frac{I}{I_0} = x^2 - 1$$

Ou encore $x^2 - \frac{I}{I_0} x - 1 = 0$

$$\Delta = \left(\frac{I}{I_0}\right)^2 + 4 > 0 \Rightarrow$$

L'équation a donc deux solutions de la forme

$$x_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{I}{I_0} + \sqrt{\left(\frac{I}{I_0}\right)^2 + 4} \right) \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{I}{I_0} - \sqrt{\left(\frac{I}{I_0}\right)^2 + 4} \right) \quad (\text{I-47})$$

On prend x_1 comme solution de l'équation (I-47)

$$x_1 = \exp\left(\frac{F}{2\mathfrak{R}T} V_{ACT}\right) = \frac{1}{2} \left(\frac{I}{I_0} + \sqrt{\left(\frac{I}{I_0}\right)^2 + 4} \right) \quad (\text{I-48})$$

qui est traduite sous la forme suivante [27] :

$$V_{ACT} = \frac{2\mathfrak{R}T}{F} \ln \left(\frac{1}{2} \left(\frac{I}{I_0} + \sqrt{\left(\frac{I}{I_0}\right)^2 + 4} \right) \right) \quad (\text{I-49})$$

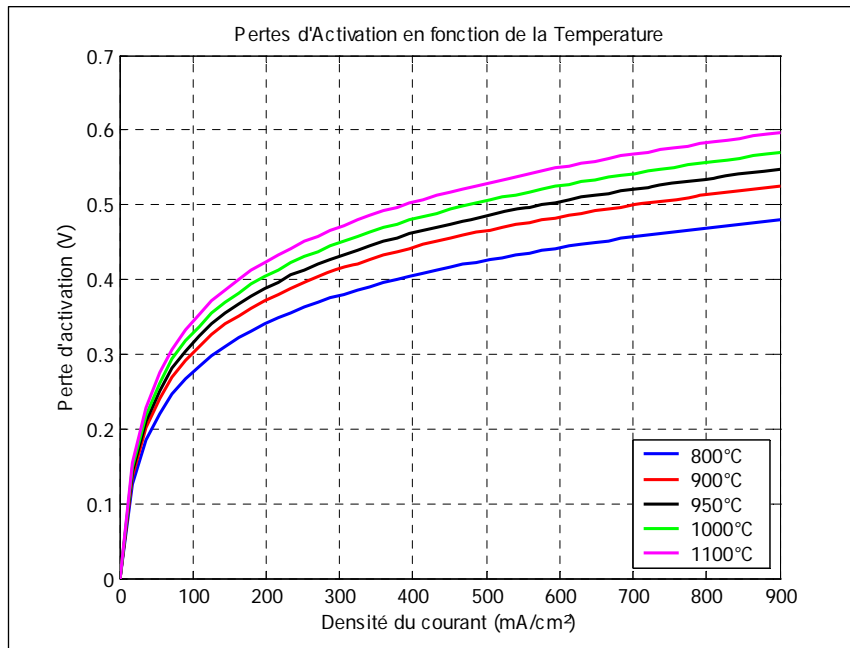


Fig.I-17 : Effet de la température sur les pertes d'activation.

Une autre approche peut être adoptée pour les deux domaines suivants :

- Dans le cas des faibles densités de courant, il est possible de faire un développement limité en série de Taylor de l'exponentielle de l'équation (I-50) sous la forme :

$$I = I_0 \left| \frac{\alpha n F}{\mathfrak{R} T} V_{ACT} \right| \quad \text{Ou} \quad |V_{ACT}| = \frac{\mathfrak{R} T}{I_0 \alpha n F} I \quad (\text{I-50})$$

Le terme $\frac{\mathfrak{R} T}{I_0 \alpha n F}$ est dit résistance de transfert de charge notée R_{CT}^c .

- Dans la région des grandes densités où $I \gg I_0$, l'équation de (I-50) est exprimée de la forme suivante :

$$V_{ACT} = \frac{\mathfrak{R} T}{n \alpha F} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = a \ln(I_0) - b \ln(I) \quad (\text{I-51})$$

Cette dernière équation est connue sous le nom de l'équation de Tafel.

Enfin ces pertes sont parfois aussi exprimées par les chutes de potentielles à l'anode et à la cathode selon la forme générale :

$$V_{ACT} = V_{ACT.A} + V_{ACT.C} = \frac{2\mathfrak{R} T}{\alpha n F} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{I}{2I_{0A}} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{I}{I_{0C}} \right) \right] \quad (\text{I-52})$$

I.3.3.6. Chutes de tension Ohmique

Ces pertes sont dues aux résistances que rencontrent les flux d'ions en traversant l'électrolyte ainsi qu'à celles rencontrées par les électrons dans les électrodes et les plaques d'interconnexion.

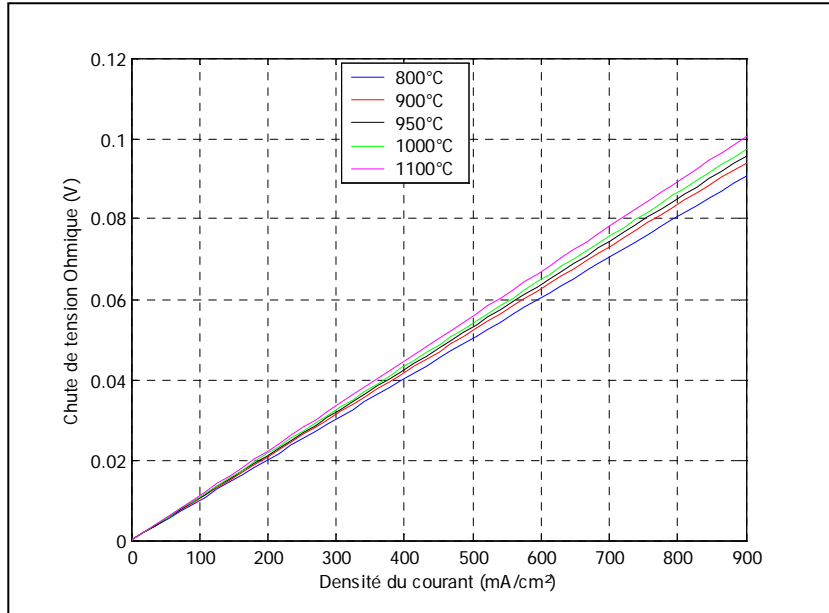


Fig. I-18 : Effet de la température sur les pertes ohmiques

Les pertes prédominantes sont celles qui se produisent au niveau de l'électrolyte. Ces chutes sont exprimées par la loi d'Ohm :

$$\eta_{Ohm} = (\rho_e l_e + \rho_a l_a + \rho_c l_c + R_{contact}) I \quad (I-53)$$

Les indices "e, a et c" sont respectivement relatifs à l'électrolyte, l'anode et la cathode.

La résistance est aussi liée à la température par la relation suivante [40] :

$$r = \alpha \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I-54)$$

Où α et β sont des constantes (égales à 0.2 et -2780 respectivement) [40].

I.3.3.7. Surtension de diffusion

La diffusion est le déplacement des espèces chargées ou non lorsqu'une hétérogénéité est produite dans un milieu, et qui par ce phénomène tend à retrouver son homogénéité.

Dans les piles à combustible, l'appel de courant se traduit par une diminution des concentrations des réactifs et la diffusion des gaz se produit à travers les électrodes pour

atteindre les zones de réactions. Une conséquence immédiate est la limitation des réactions dans la pile synonyme de chutes de tension supplémentaires.

Ce phénomène à travers une matière poreuse peut être décrit par la loi de Fick pour un modèle de diffusion simple ou aussi par la loi Stephan Maxwell lorsqu'on est en présence d'une hétérogénéité.

La loi de Fick qui s'apparente aux lois de Fourier, traduit la proportionnalité du flux de la matière au gradient de la concentration de l'espèce :

$$J_{xi} = -Dgrad(X_i) \quad (I-55)$$

J_{xi} : Flux de l'espèce i ;

X_i : Concentration de l'espèce ;

D : Coefficient de diffusion de l'espèce. Il est spécifique de l'espèce considérée et du milieu dans le quel elle diffuse ; et dépend de la température. Ceci peut être exprimé par la relation suivante : [24]

$$\frac{\partial}{\partial t} m = -D \frac{\partial}{\partial t} C = D \frac{C^0 - C^S}{\delta_N} \quad (I-56)$$

Où :

C^S : est la concentration à la surface de l'électrode ;

C^0 : est la concentration à $I = 0$;

δ_N : Longueur de la couche.

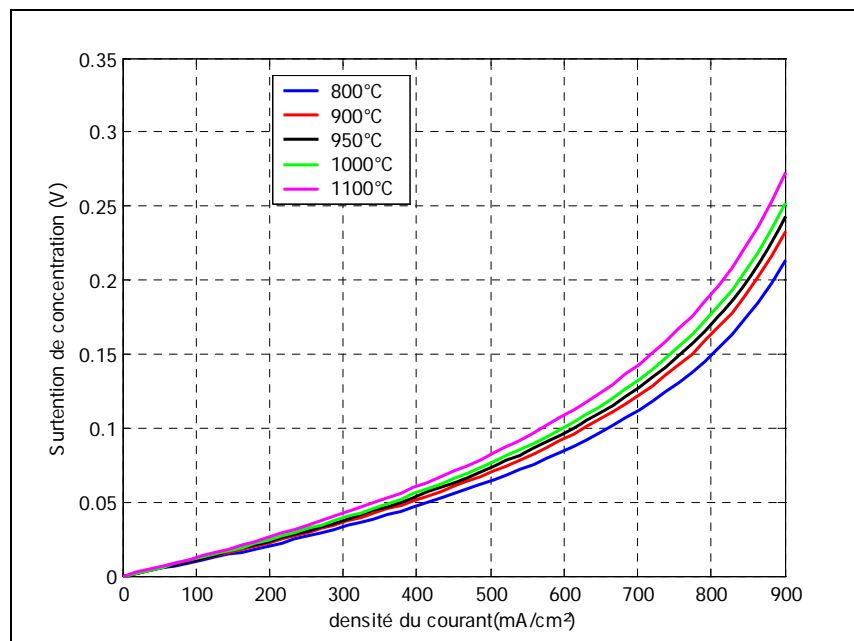


Fig. I-19 : Effet de la température sur les pertes de concentration

La densité du courant est reliée au transfert d'ions par la formule suivante :

$$J = nFD \frac{\partial}{\partial t} m \quad (\text{I-57})$$

Le courant de limitation s'obtient quand $C^S \rightarrow 0$; ceci implique que $J_{\text{lim}} = nFD \frac{C^0}{\delta_N}$

La chute de potentiel est la différence de tension entre la surface de l'électrode et l'électrolyte et est exprimée par la formule de Nernst comme suit :

$$\eta_d = E^S - E = \left(E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{zF} \ln(C^S) \right) - \left(E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{zF} \ln(C^0) \right) = \frac{\mathcal{R}T}{zF} \ln \frac{C^S}{C^0} \quad (\text{I-58})$$

En introduisant le courant de limitation

$$\eta_d = \frac{\mathcal{R}T}{zF} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{\text{lim}}} \right) \quad (\text{I-59})$$

Ces pertes sont liés à :

- * La faible diffusion des gaz à travers les électrodes poreuses ;
- * La dissolution des réactifs et des produits dans l'électrolyte ;
- * La diffusion des réactifs/produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse.

Le bilan global sera donné donc par l'équation

$$E = E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{4F} \ln \left[\frac{(P_{O_2}^C)(P_{H_2}^A)^2}{(P_{H_2O}^A)^2} \right] - \Sigma(\text{pertes}) \quad (\text{I-60})$$

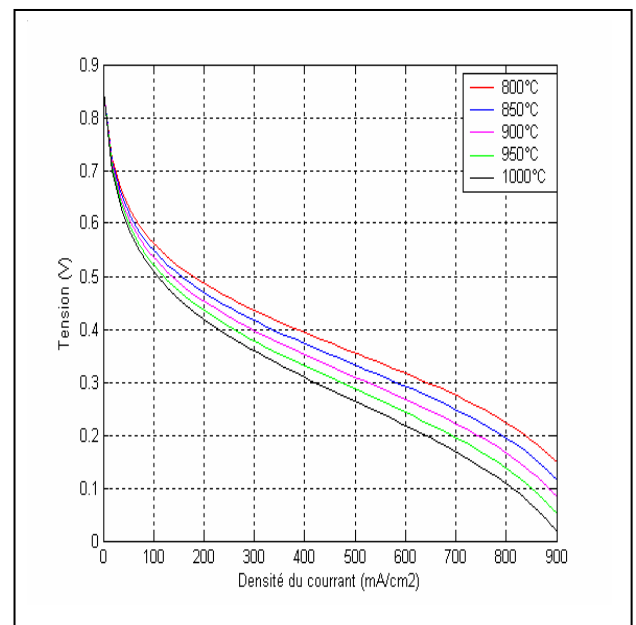
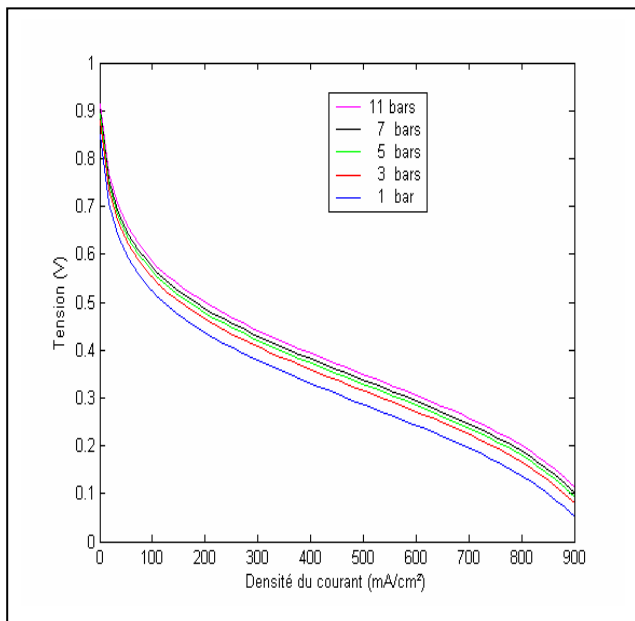


Fig.I-20 : Effet de la Pression sur la tension délivrée par la pile (T=1000°C) Fig.I-21 : Effet de la Température sur la tension délivrée par la pile (p=1bar)

La courbe de polarisation de la tension en fonction du courant est caractérisée par trois régions remarquables.

1. La première où les pertes d'activation sont les plus dominantes, elle correspond aux faibles densités de courant ;
2. La deuxième est la partie linéaire de la courbe où la pile peut être assimilée à un générateur de tension continue ayant une résistance interne égale à celle de la pile ;
3. En fin la dernière partie est celle où les pertes de concentration sont les plus dominantes. Elle correspond à la région des fortes densités de courant.

Il va de soi de dire qu'une augmentation de la puissance entraînerait une augmentation de la tension aux bornes de la pile pour une même température de fonctionnement. Par contre l'élévation de la température pour une même pression se traduit par des pertes supplémentaires est donc une tension réduite délivrée par la pile.

Sur la courbe de la densité de puissance on note qu'à partir de certaines valeurs du courant, la puissance diminue ; ce qui doit être tenu en compte lors de l'exploitation des piles

Ce phénomène est expliqué par le fait qu'au-delà de ces valeurs les pertes ohmiques et de concentration ne peuvent plus être tolérées.

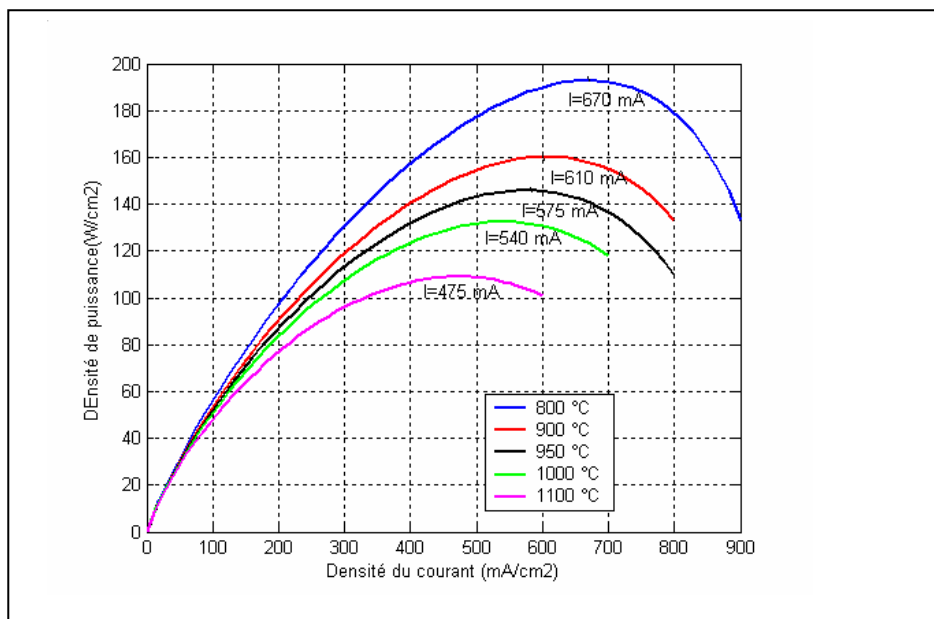


Fig.I-22 : Effet de la température sur la puissance délivrée (p=1 bar)

Chapitre II

Modélisation et commande des

Onduleurs dédiés aux réseaux électriques.

II.1. Introduction

L'introduction progressive des nouvelles et diverses sources d'énergie dans les réseaux de transport et de distribution de l'électricité a montré une fois de plus l'indispensabilité de l'électronique de puissance.

En effet, la forme de l'onde aux bornes de ces moyens de production, dits décentralisés, doit être adaptée aux caractéristiques exigées par la charge. Ces nouvelles sources peuvent être regroupées en deux parties : [28]

↳ Les technologies dédiées aux sources renouvelables telles que les éoliennes, le photovoltaïque ou encore les petites turbines hydrauliques.

↳ Les technologies émergentes comme les piles à combustible et les micros turbines.

Les onduleurs sont la catégorie la plus sollicitée, c'est pour cette raison qu'on s'est intéressé à leurs applications les plus connues qui sont :

1- L'alimentation sans interruption (ASI) qui conventionnellement recrée la tension à partir d'une source constante pour pallier aux défaillances d'une source alternative. La fréquence pour ce type d'utilisation étant fixe. [6]

2- La fréquence pour la seconde application est variable, on la rencontre essentiellement dans le domaine des entraînements des machines à vitesse variable.

Il va sans dire que le développement des composants à semi-conducteurs totalement commandés, puissants et rapides ainsi que l'utilisation de la PWM ont appuyé énormément le recours et l'intérêt de l'utilisation de ces éléments de l'électronique de puissance dans les applications sus mentionnées et essentiellement leurs intégrations dans les réseaux de transport et de distribution ; la ligne en courant continu sous La Manche est l'exemple le plus frappant.

II.2. Modélisation et simulation des onduleurs

II.2.1. Représentation de la structure des onduleurs

L'élément de base dans la constitution d'un onduleur est la cellule de commutation qui comprend une paire d'interrupteurs et dont la commande dépend de la caractéristique de la charge [6]. Chaque cellule ne doit jamais avoir ses deux interrupteurs passant en même temps. (Voir représentation)

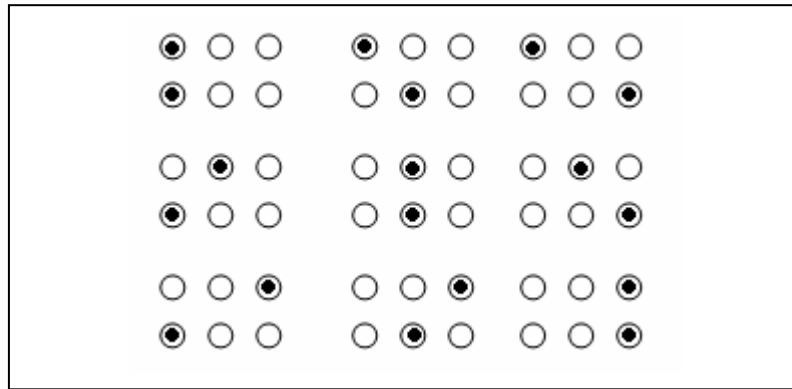


Fig. II-1. Représentation des différents états des interrupteurs (● fermé ; ○ ouvert)

A chaque interrupteur est associée une diode en anti-parallèle dite tête-bêche ou encore de roue libre.

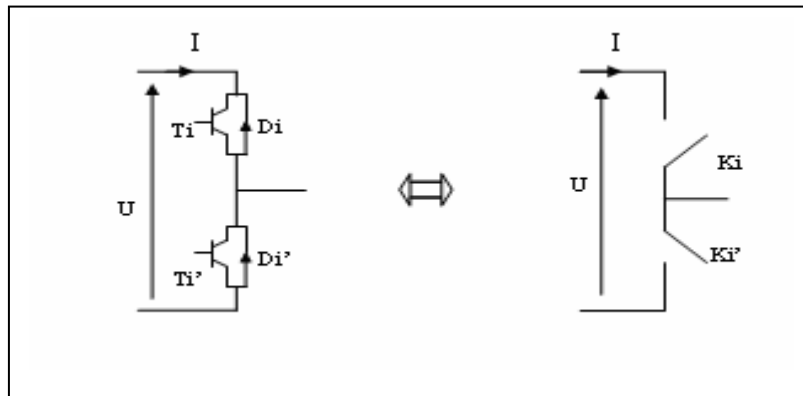


Fig. II-2 Représentation des cellules de commutation.

Le fonctionnement de l'onduleur obéit à un séquençage de 180° de conduction des interrupteurs d'un même bras. Les diodes assureront la continuité du courant de la charge généralement inductive. Le choix des interrupteurs est fonction et de la puissance devant être transitée et de la fréquence de commutation. On note que plus les composants sont rapides plus la puissance commutée est faible. Ainsi on trouve :

⇒ Transistors MOSFET (transistor à effet de champs) : composants très rapide mais la puissance est relativement faible ;

⇒ Transistors bipolaires moins rapides que le premier mais plus puissant ;

⇒ Transistors IGBT : des composants de gamme standard ;

⇒ Les thyristors GTO commutant très lentement les grandes puissances. Les thyristors sont commandés à la fermeture ; l'ouverture dépend d'un circuit extérieur.

La représentation de la puissance en fonction de la fréquence de commutation est donnée par la figure suivante.

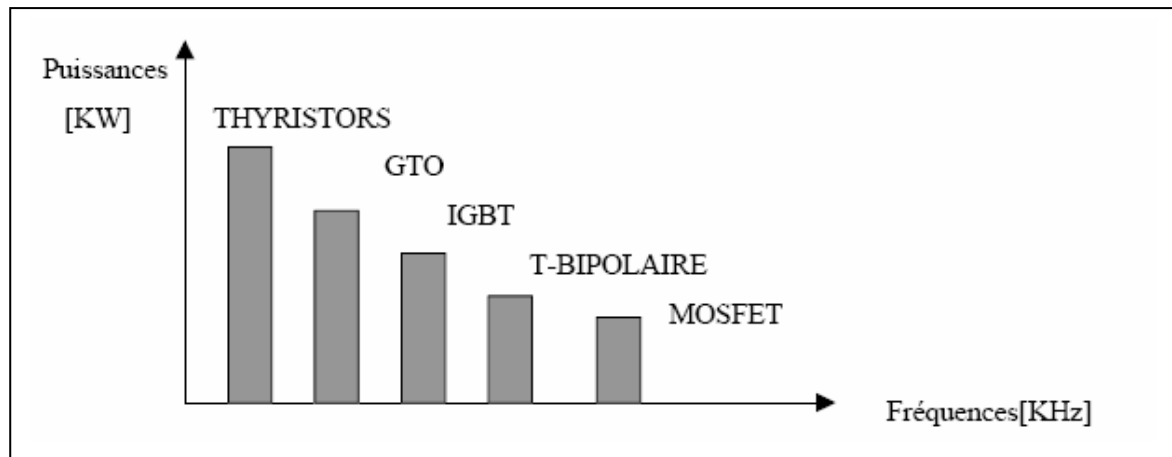


Fig. II-3 Représentation de la puissance des interrupteurs en fonction de la fréquence de commutation.

II.3. Topologie des alimentations sans interruption. (ASI)

Comme vu précédemment, une application importante des onduleurs est l'alimentation sans interruption (ASI) qui dans quelque situation telle dans le cas des installations hypersensibles (hôpitaux, aéroports ...) ou encore les centres informatiques ou de télécommunication est très importante. Toute interruption de la source principale peut mettre en péril la vie ou la sécurité des individus.

Les normes CEI 62040-3 et ENV50091-3 (le V signifie qu'elle est émise pour une durée probatoire de trois ans), définissent trois types d'ASI normalisées [29]. Les topologies peuvent être réparties en fonction des dispositions ci-dessous :

II.3.1. La disponibilité de la source principale.

Ce schéma d'exploitation est le plus classique. Il est reconnu aussi sous le nom de : "attente passive" ou sous le terme anglais «passive stand-by". On le trouve généralement dans la quasi-totalité des installations sensibles ou de première catégorie c.à.d. dont l'absence de tension ne peut être tolérée.

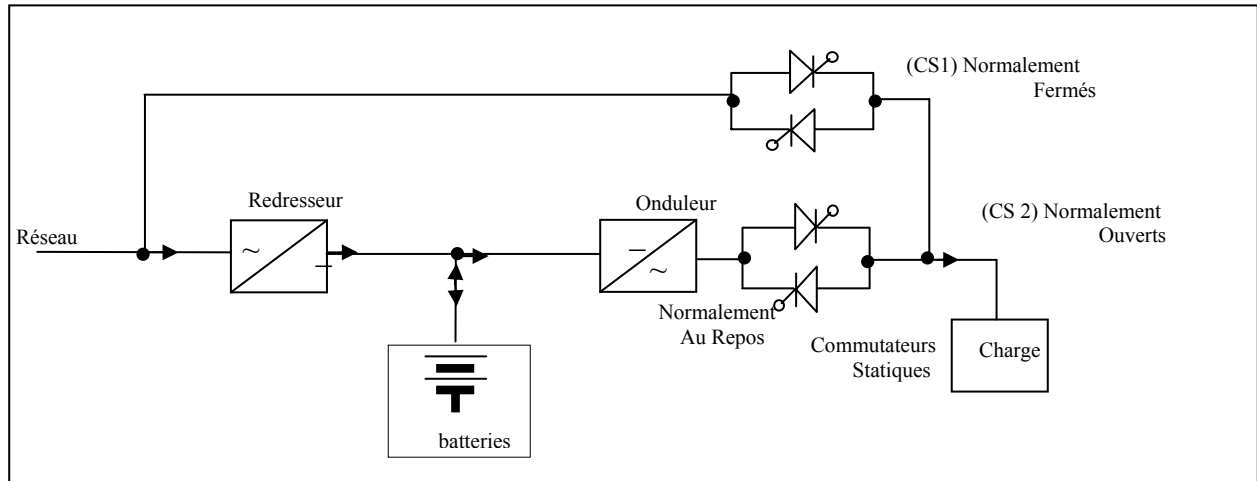


Fig.II-4 Schéma de l'alimentation "passive stand-by".

Dans ce mode l'alimentation de la charge est assurée par la source principale, un redresseur/chargeur assure toujours à partir du réseau la charge des moyens de stockage. Si la tension vient d'être hors tolérances spécifiée de l'ASI ou en cas de défaillance du réseau la charge bascule vers l'ensemble batterie onduleur.

Le temps de basculement est de l'ordre de 4 à 5 ms si on utilise des transistors et peut aller jusqu'à 30 à 50 ms dans le cas des systèmes mécaniques : contacteurs et autres.

On peut toujours à partir de cette application opter pour une alimentation assurée simultanément par les deux sources. Le système de transfert sera inutile dans ce cas.

Cette configuration est avantageuse pour sa simplicité, son coût réduit et aussi pour son faible encombrement.

L'absence de régulation de tension et de fréquence ainsi que l'inexistence d'un véritable isolement de la charge par rapport au réseau sont les principaux inconvénients de cette configuration.

II.3.2. Du mode de commutation

Dans ce mode l'onduleur joue un double rôle ; d'une part lorsque le réseau est disponible, il assure la charge des batteries. Il est commandé en redresseur.

En cas de défaillance de la source principale, il assure l'alimentation de la charge. Il est commandé en onduleur.

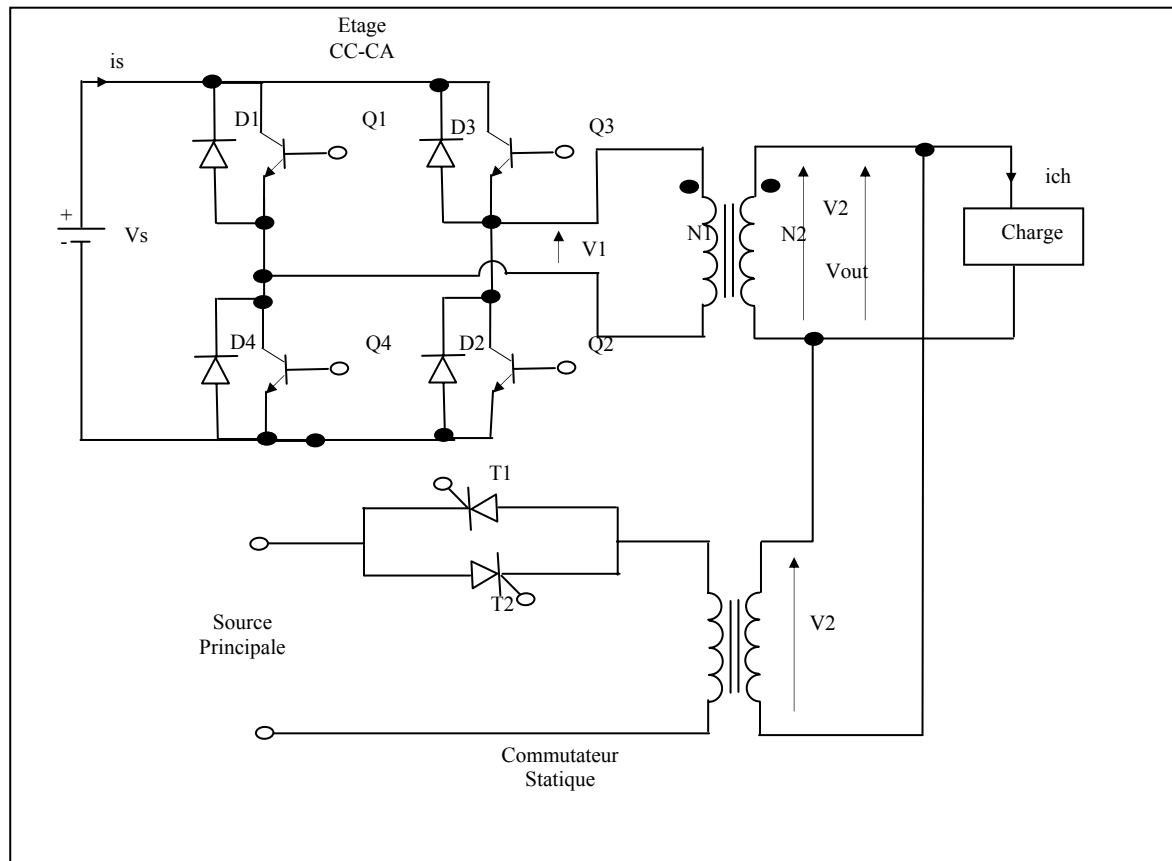


Fig. II-5 Représentation de l'alimentation selon le mode de commutation.

Cette configuration a en plus des inconvénients de la précédente ; un rendement faible en fonctionnement sur charge non linéaire.

II.3.3. ASI type double conversion " double conversion "

Dans ce mode, l'onduleur est placé entre le réseau et la charge. La puissance transite en permanence par l'onduleur. La puissance en mode normal, transite par la chaîne convertisseur/chargeur-onduleur, d'où cette appellation.

En mode d'autonomie la puissance nécessaire est assurée par la batterie. Un troisième mode dit de By-pass est aussi possible. Ce cas peut avoir lieu si on dispose d'un réseau de secours.

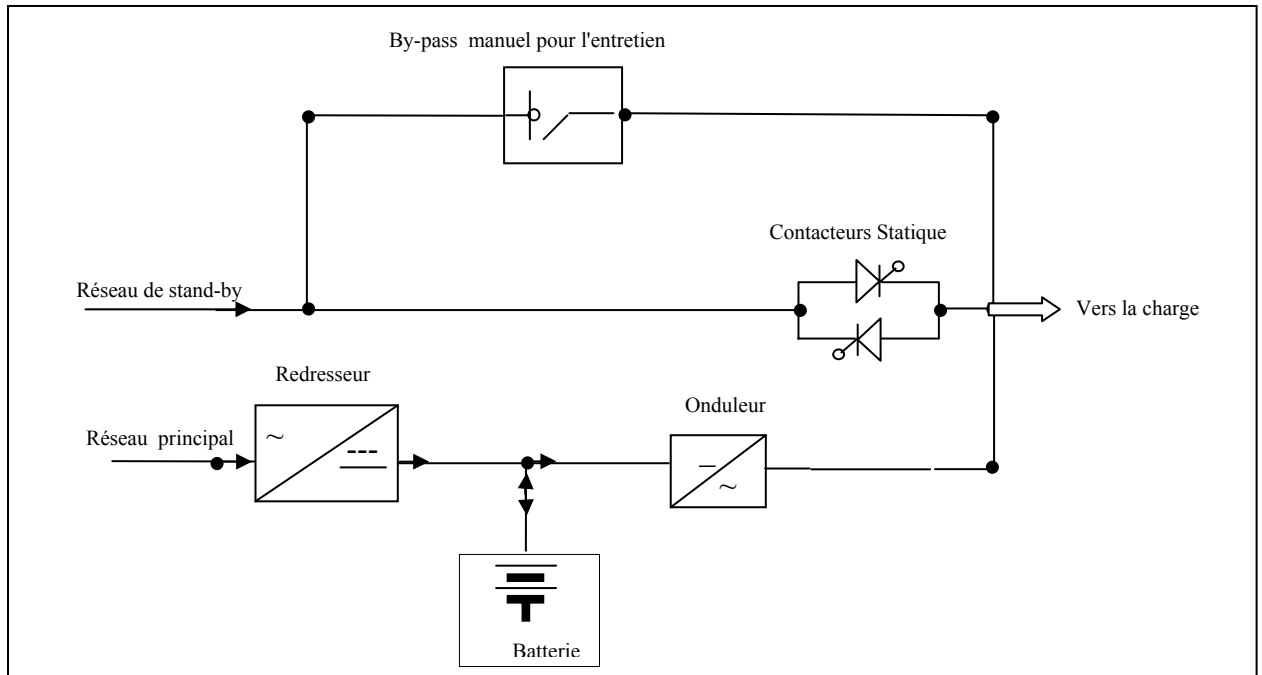


Fig. II-6 Représentation du mode double conversion.

Cette application présente de nombreux avantages :

1. Une régénération permanente de la tension fournie en sortie de l'onduleur ;
2. Isolation de la charge des fluctuations qui peuvent naître sur le réseau ;
3. Régulation de la tension d'alimentation de la charge ainsi que de la fréquence ;
4. Le passage en mode d'autonomie est instantané.

Malgré tous ces avantages le prix très élevé est l'inconvénient majeur.

II.4. Technique de commande

La technique de modulation de largeur d'impulsion ; PWM dans le jargon anglo-saxon est la plus utilisée. Elle consiste à introduire des commutations à des fréquences plus élevées que celle de la fondamentale transformant ainsi la tension de sortie en une suite de créneaux rectangulaires d'amplitude convenable. [30]

La PWM est réalisée par la comparaison d'une onde modulante de basse fréquence, généralement une sinusoïde à la fréquence industrielle à une porteuse haute fréquence.

La fréquence de la porteuse détermine la cadence de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection de la porteuse avec la modulante [31].

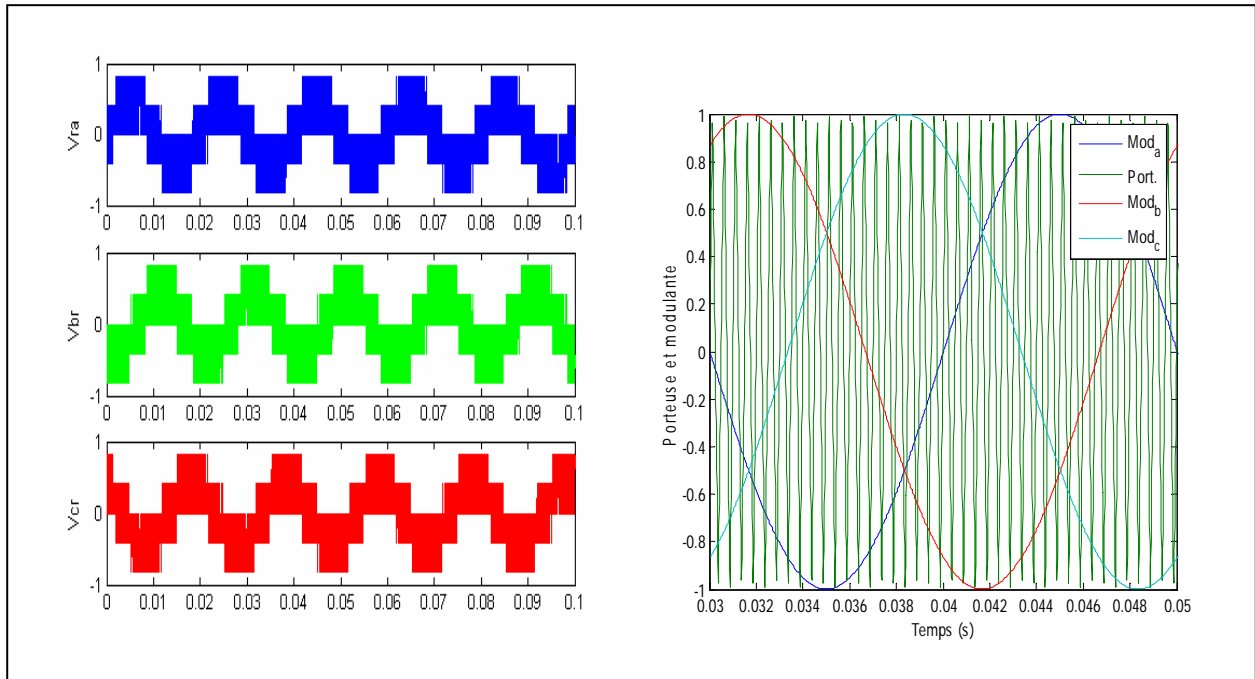


Fig. II-7. Représentation de la porteuse et de la modulante $f_{porteuse} = 1.5kHz$.

La logique de commande des interrupteurs est simple. Lorsque le signal de la modulante est supérieur à celui de la porteuse c'est l'interrupteur du haut qui conduit. L'interrupteur du bas conduira dans le cas contraire.

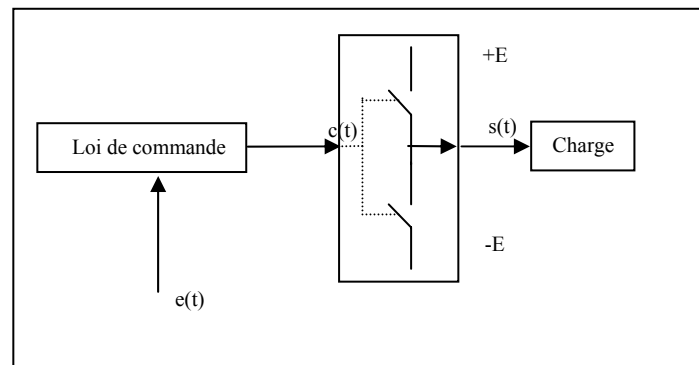


Fig. II-8.Représentation de la commande.

On définit deux rapports importants :

Rapport de modulation d'amplitude qui permet de régler la tension de sortie.

$$m_a = \frac{V_{réf}}{V_{tri}} \tag{II-1}$$

Rapport de modulation de fréquence qui procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

$$m_f = \frac{f_{réf}}{f_{tri}} \quad (\text{II-2})$$

Les conditions suivantes doivent être respectées:

1. La fréquence du signal de référence est toujours plus faible que celle de la porteuse.
2. L'Amplitude maximale du signal de référence plus petite que celle de la porteuse. (en boucle ouverte). [50]

II.5. Commande des onduleurs dédiés aux nouvelles sources de production

L'intégration des moyens de production décentralisée dans les réseaux de transport et de distribution de l'électricité a conduit à adopter des techniques de commande similaires à celles qu'on rencontre souvent dans le domaine de répartition de puissance. Il est démontré qu'un fonctionnement stable du réseau nécessite un excellent contrôle de l'écoulement de puissance. A la source, on contrôle généralement l'amplitude et la phase de la tension de sortie. [32]

La méthodologie est simple. A partir des valeurs de référence des puissances active et réactive, la puissance injectée au réseau peut être déterminée par une commande vectorielle de l'onduleur. [33 ; 34]. Le commande se fait dans le repère "dq". Le passage du repère réel au modèle de Park se fait par l'introduction de la matrice de transfert dite de Clarke.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_n \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

Où f dénote une grandeur physique qui peut être le courant ou la tension.

Les composants du flux sont donnés par :

$$\Psi_{dv} = \int_{-\infty}^t v_d d\tau \quad (\text{II-4})$$

$$\Psi_{qv} = \int_{-\infty}^t v_q d\tau \quad (\text{II-5})$$

L'amplitude sera exprimée par

$$\Psi_v = |\overline{\Psi}_v| = \sqrt{\Psi_{dv}^2 + \Psi_{qv}^2} \quad (\text{II-6})$$

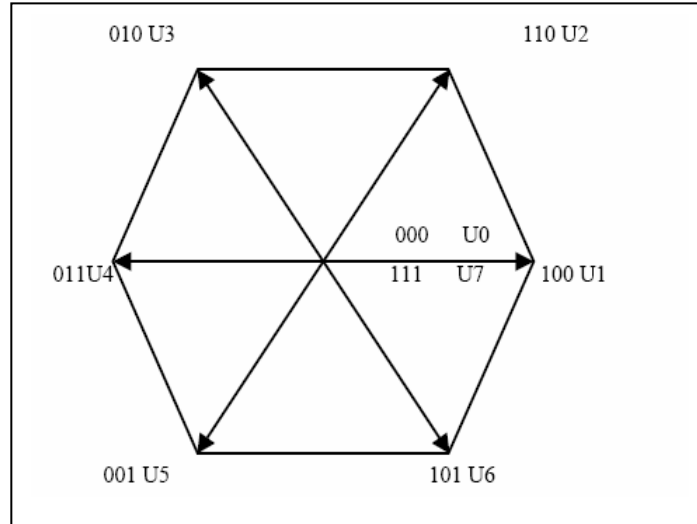


Fig. II-9 : Les huit vecteurs de tension dont deux sont nuls.

L'angle du vecteur par rapport à l'axe "q" est donné par

$$\delta_v = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\Psi_{dv}}{\Psi_{qv}} \right) \quad (\text{II-7})$$

La puissance active peut être écrite sous deux formes selon qu'on l'exprime en fonction des courants ou des flux :

$$P = \frac{3}{2} (e_q i_q + e_d i_d) = \frac{3}{2L} \omega \Psi_e \Psi_v \sin \delta_p \quad (\text{II-8})$$

De la même manière la puissance réactive est

$$Q = \frac{3}{2} \frac{\omega}{L} [\Psi_e \Psi_v \cos(\delta_p) - \Psi_e^2] \quad (\text{II-9})$$

Où

Ψ_v et Ψ_e : Les amplitudes des flux de l'onduleur et du réseau ;

$\delta_p = \delta_v - \delta_e$: Déphasage entre les deux grandeurs Ψ_v et Ψ_e ;

ω : Pulsation

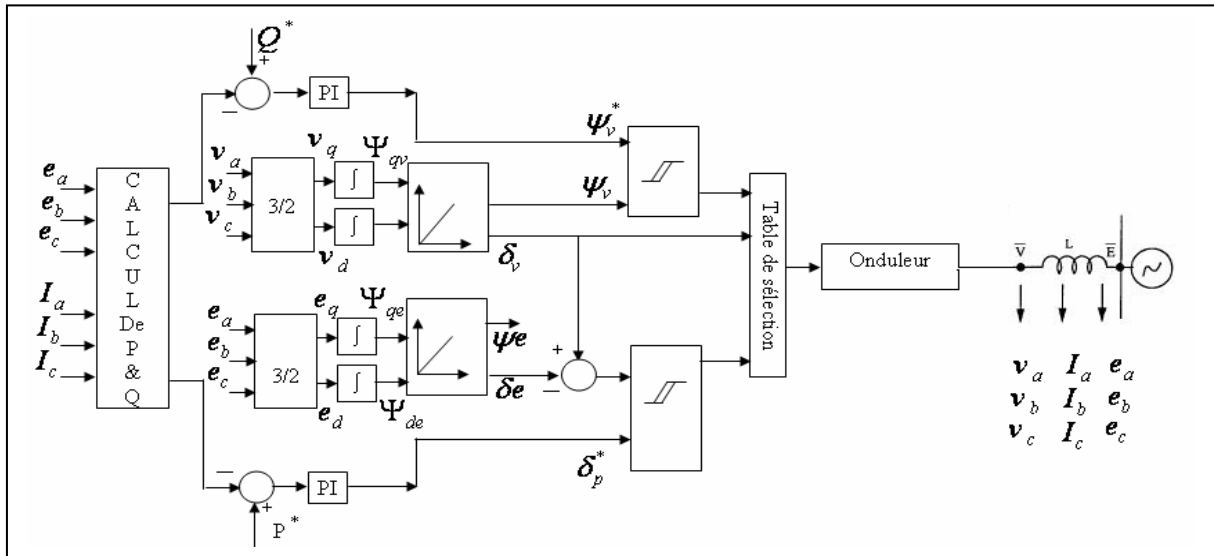


Fig. II-10 Représentation de la commande de onduleurs reliés aux réseaux électriques.

Le contrôle de la puissance active est possible en agissant sur l'angle qui peut être défini comme l'angle de transport ou de puissance. La puissance réactive, est réglée en agissant sur le flux. La sélection du vecteur est faite sur la base de la déviation des grandeurs mesurées sur les valeurs de consignes et aussi en fonction de sa position dans le repère "dq".

Le tableau de commutation de la structure de contrôle permet de sélectionner le vecteur approprié à chaque instant. Les règles de sélection des vecteurs sont données par le tableau suivant: Secteur (localisation de Ψ_v)

Le vecteur zéro est choisi pour diminuer δ_p

	I	II	III	IV	V	VI
Ψ_v Croître	2	3	4	5	6	1
Ψ_v Décroître	3	4	5	6	1	2

Table. II-1 Table de sélection des vecteurs

Un correcteur à hystérésis permet de contrôler et de maintenir l'extrémité du vecteur Ψ_v dans une fourchette bien déterminée.

La source peut être représentée par le schéma de la figure II-11. Il est intéressant de remarquer que la valeur moyenne de la tension du bus continu doit être constante. En effet si aucun échange d'énergie n'est effectué entre la source et le réseau la tension aux bornes de la capacité va augmenter linéairement.

Type de jeu de barre	Variables connues						Variables inconnues			
	P_d	Q_d	P_g	Q_g	V	θ	P_g	Q_g	V	θ
De Référence	*	*			*	*	*	*		
De charge	*	*							*	*
De Génération	*	*	*		*		*			

Table. II-2 Répartition des jeux de barre.

L'égalité des puissances reste toujours valable:

$$\int_{-\infty}^t (V_{dc} I - P) d\tau = \frac{1}{2} C V_{dc}^2 \quad (\text{II-10})$$

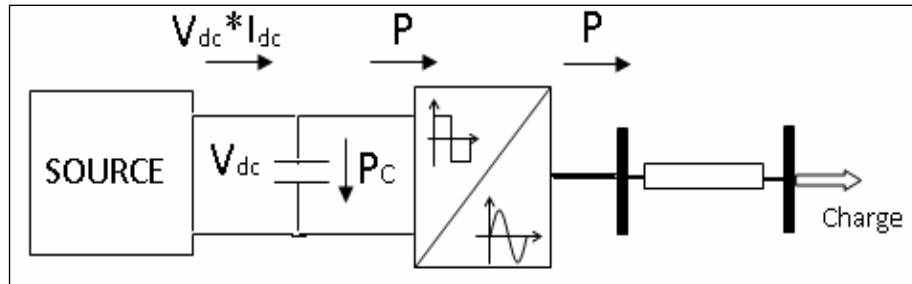


Fig. II-11 Flux de puissance des deux cotes (DC/AC).

a. Cas où la puissance active et l'amplitude de la tension sont les variables de commande

Le schéma reste pratiquement le même pour la puissance active. Pour la tension, un régulateur PI est utilisé. La valeur mesurée est comparée à une référence. L'erreur est introduite dans le régulateur. La puissance réactive est contrôlée ainsi en augmentant ou en réduisant la tension. La valeur maximale du réactive que la source peut produire est obtenue pour un angle de transport nul. Ceci nous permet d'exprimer cette valeur par:

$$Q_{\max} = \frac{1}{L\omega} (V_{\max}^2 - V_{\max} E^*) \quad (\text{II-11})$$

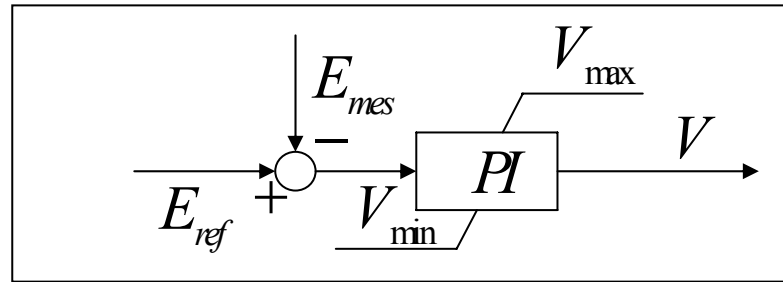


Fig. II-12. Représentation de la commande de la valeur efficace de la tension.

Ce qui donne les deux seuils de la tension :

$$V_{\max} = \frac{1}{2} \left(E^* \pm \sqrt{E^{*2} + 4Q_{\max}L} \right) \quad (\text{II-12})$$

$$V_{\min} = \frac{1}{2} \left(E^* \pm \sqrt{E^{*2} + 4Q_{\min}L} \right) \quad (\text{II-13})$$

b. Cas où la fréquence et la tension sont les paramètres de commande

Cette commande s'inspire de la caractéristique pulsation-puissance reproduisant le comportement des alternateurs : un appel de puissance se traduit par une baisse de fréquence.

Sachant que la puissance transmittant dans une inductance est exprimée par la relation suivante :

$$P = \frac{3}{L\omega} EV \sin \delta \quad (\text{II-14})$$

Où : V et E : sont les tensions de part et d'autre de l'inductance L ;

ω : La pulsation des grandeurs V et E ;

δ : Le déphasage entre les deux tensions ;

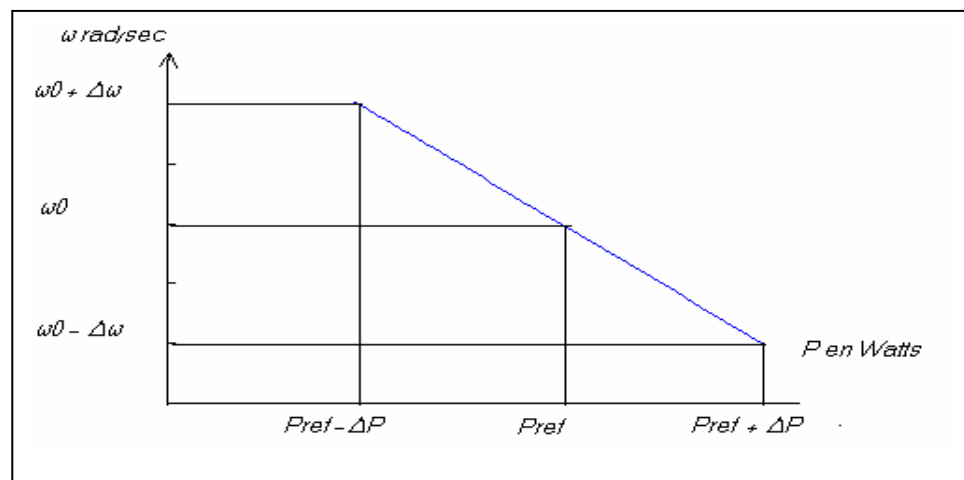


Fig. II-13. Caractéristique pulsation-puissance f/P.

Il est démontré qu'il suffit d'une faible variation de l'angle pour faire transiter une puissance donnée [35]. Pour des amplitudes identiques la puissance transitée est :

$$P_{transit} = \frac{3}{L\omega} V^2 \delta \quad (\text{II-15})$$

Il suffit d'agir sur la fréquence donc sur δ

La relation donnant la fréquence en fonction de la puissance est :

$$\omega_{ref} = \frac{\Delta\omega}{\Delta P} (P_{ref} - P_{mes}) + \omega_0 \quad (\text{II-16})$$

La pente de la caractéristique pulsation puissance est donnée par l'équation (II-17).

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P} = \frac{2\pi\Delta f}{\Delta P} = 2\pi k \quad (\text{II-17})$$

La figure (II-14) donne le schéma bloc en boucle fermée d'un correcteur proportionnel qui peut être utilisé; la fréquence est liée à l'angle par un intégrateur pur.

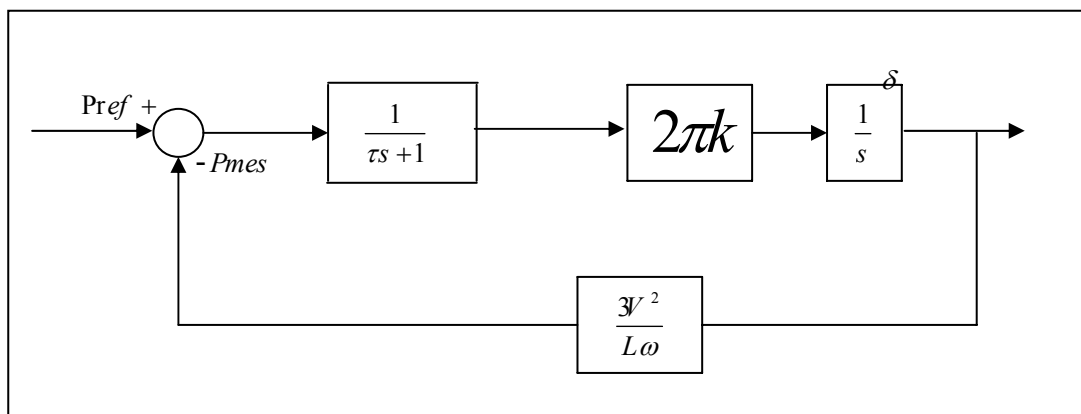


Fig. II-14. Le schéma bloc en boucle fermée d'un correcteur proportionnel.

Un filtre passe-bas est ajouté pour atténuer les composantes à 2ω dues à un éventuel déséquilibre en triphasé.

La tension aux bornes de la source est contrôlée par l'indice de modulation ; l'angle quand à lui est contrôlé par les signaux de référence de la modulante par rapport à la porteuse

$$P_{transit} = \frac{3}{L\omega} V^2 \delta \quad (\text{II-18})$$

Chapitre III

***Modélisation &
Simulation du système***

III.1. Introduction

Les piles SOFC sont d'un intérêt particulier dans la production décentralisée. En effet ces moyens offrent un avantage aux producteurs et aux consommateurs. En plus de l'électricité, ces moyens produisent aussi de la chaleur. Ainsi, leur contribution croit d'environ 70 Mw/An, plus de 160 stations sont installées par an [37].

La libération du marché de production de l'électricité est un stimulus très important pour le développement de cette catégorie de production. Une station SOFC consiste généralement en trois éléments principaux [10] :

- ✓ La source de production qui convertit l'énergie primaire en électricité ;
- ✓ Le convertisseur statique ;
- ✓ Un élément de stockage entre les deux éléments précédents.

Dans notre étude, le convertisseur statique est un onduleur dont le rôle est d'adapter la forme de l'énergie produite aux exigences de l'utilisateur.

Afin de suivre le comportement de la pile et de l'onduleur, le moyen de stockage n'est pas pris en considération.

III.2. Modèle dynamique de la pile

On s'intéresse dans ce paragraphe à la modélisation de la pile. Une série d'hypothèses est faite afin de trouver un modèle dynamique aussi complet que possible [38] :

- Les gaz sont idéaux ;
- Le volume des canaux transportant les gaz est fixe, leur longueur est petite. Ceci nous permet de négliger les chutes de pression et de ne considérer qu'une seule valeur pour la pression ;
- Bien que la température soit considérée constante, une approche mathématique facultative sera décrite pour sa prise en considération pour des éventuelles études ;
- La sortie du canal se fait via un seul orifice. Le rapport entre les pressions à l'intérieur et l'extérieur du canal est assez grand pour pouvoir considérer l'orifice comme étouffé;
- Seules les pertes ohmiques seront prises en considération ;
- L'équation de Nernst est appliquée pour déterminer la tension aux bornes de la pile.

III.3. Expression des pressions partielles

Les gaz étant idéaux, l'équation des gaz parfaits peut être appliquée :

$$pV = nRT \quad (\text{III-1})$$

Où :

V : Le volume du canal anodique et cathodique ;

n : Le nombre de moles de l'élément considéré dans le canal de l'anode ou de la cathode ;

R : Constante des gaz parfaits ;

T : Température absolue en degré Kelvin ;

Si l'élément considéré est l'hydrogène, en appliquant la dérivée à l'équation précédente on obtient :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (\text{III-2})$$

Où q_{H_2} représente le débit molaire de l'hydrogène [10].

On trouve trois contributions pertinentes au débit molaire de l'hydrogène : [10]

- Le débit injecté dans la pile $q_{H_2}^{in}$;
- Le débit qui participe à la réaction chimique $q_{H_2}^r$ et donc transformé en courant .
- Et enfin le débit excédent qui sort de la pile $q_{H_2}^{Out}$;

Ainsi, on peut exprimer l'équation (III-1) de la manière suivante :

$$\frac{V_{an}}{RT} \frac{d}{dt}(P_{H_2}) = (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{Out} - q_{H_2}^r) \quad (\text{III-3})$$

Le débit participant à la réaction chimique peut être exprimé, en faisant appel aux équations de l'électrochimie, par : [39]

$$q_{H_2}^r = \frac{N_o}{2F} = 2k_r I \quad (\text{III-4})$$

Où N_o : représente le nombre des cellules en série ;

F : Constante de Faraday ;

I : Le courant de la pile ;

k_r : Constante introduite pour des raisons de modélisation.

Le débit sortant de l'anode $q_{H_2}^{Out}$ est exprimé en fonction de la pression à l'intérieur de l'électrode. En effet selon l'hypothèse (4), la caractéristique suivante pour certaines valeurs de la température est vraie.

$$\frac{W}{p} = k\sqrt{M} \quad (III-5)$$

W : Débit massique (kg/s) ;

k : Constante de la valve fonction principalement de la surface de l'orifice ($\sqrt{kmol/g/atm.s}$) ;

p : Pression à l'intérieur du canal, on aura donc :

$$\frac{q_{H_2}^{Out}}{p_{H_2}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = k_{H_2} \quad (III-6)$$

k_{H_2} : Constante de la valve.

En appliquant la transformée de Laplace on trouve :

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{Out} - q_{H_2}^r) \frac{RT}{V_{an}} \quad (III-7)$$

En tenant compte des équations (III-4) et (III-5) on obtient :

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - k_{H_2} p - 2k_r I) \quad (III-8)$$

En introduisant l'opérateur de Laplace :

$$\frac{V_{an}}{RT} p_{H_2} s + k_{H_2} p_{H_2} = q_{H_2}^{in} - 2k_r I \quad (III-9)$$

En regroupant les termes équivalents :

$$k_{H_2} p_{H_2} \left(1 + \frac{V_{H_2}}{RTk_{H_2}} s \right) = q_{H_2}^{in} - 2k_r I \quad (III-10)$$

on obtient l'équation suivante : $\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RTk_{H_2}}$ En posant

$$p_{H_2} = \frac{1/k_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2k_r I) \quad (III-11)$$

De la même manière on détermine les expressions des pressions partielles pour l'oxygène et l'eau :

$$p_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - k_r I) \quad (III-12)$$

$$P_{H_2O_2} = \frac{1/k_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O}s} k_r I \quad (III-13)$$

Le model dynamique du cœur de la pile « stak » peut être décrite par la figure suivante : (voir annexe 2)

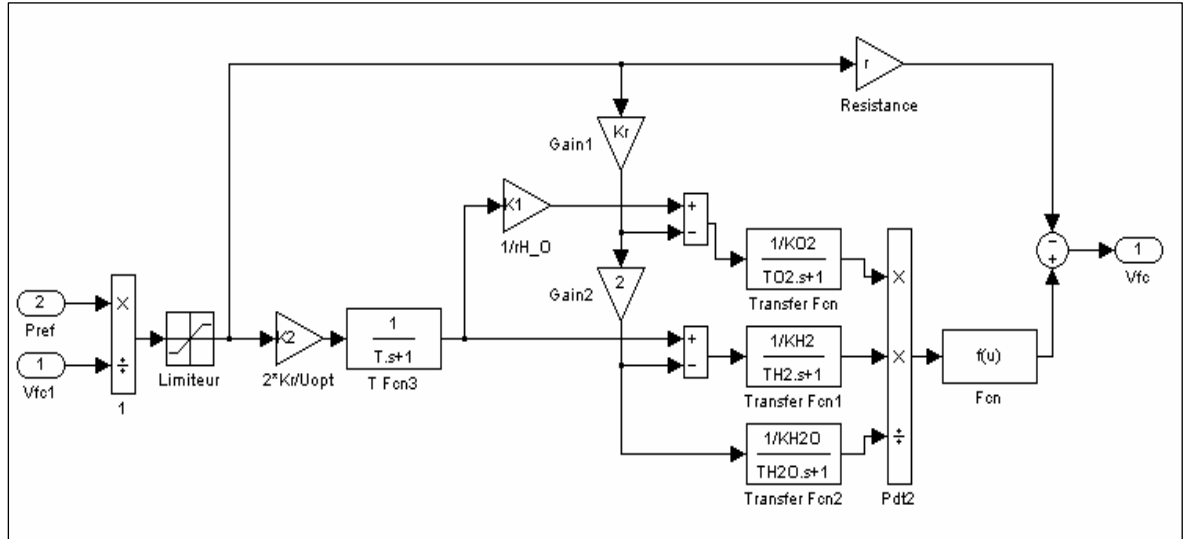


Fig. III-1 : Système SOFC (Modèle dynamique)

III.4. Calcul de la température

L'équation de la conservation de l'énergie est appliquée. Il faut noter qu'on considère une répartition uniforme de la température, c.à.d. que le gradient de la température (T°) est nul [40] :

$$M_p C_p \frac{d}{dt} T = q_e V_e + \sum Q_i \quad (III-14)$$

M_p : Masse de la pile en Kg ;

V_e : Volume en m^3 ;

C_p : chaleur spécifique donnée par [41] $C_p = \alpha + \beta T + \gamma T^2$;

q_e : Chaleur produite de la réaction par unité de volume ;

Q_i : Chaleur due aux transferts par conduction, convection et radiation.

Les pertes de chaleur seront déterminées en introduisant le rendement et la puissance produite:

$$\left(\rho C_p\right)_s \frac{d}{dt} T_s = \lambda_{eff(x)} \frac{d^2}{dx^2} T^s + \lambda_{eff(y)} \frac{d^2}{dy^2} T^s + \lambda_{eff(z)} \frac{d^2}{dz^2} T^s + \Phi \quad (III-15)$$

Φ : représente la part de la chaleur produite ou consommée dans les processus chimique et électrochimique ainsi que ceux échangés avec le milieu dans lequel se trouve la pile.

On peut trouver une équation sans dimension en introduisant les transformations suivantes :

$$\Theta = \frac{T - T_e}{T_0 - T_e} ; \tau = \frac{t}{\Delta t} ; \zeta = \frac{x}{h_{eff}} ; \xi = \frac{y}{h_{eff}} \text{ et } \gamma = \frac{z}{h_{eff}} \quad (\text{III-16})$$

$\Delta T = T_0 - T_e$: Différence de température de l'air de refroidissement entre entrée et sortie de la pile ;

Δt : Représente le temps de relaxation.

En introduisant le rendement de la pile exprimé par

$$P_p = P_e (1 - \eta) / \eta \quad (\text{III-17})$$

Théoriquement η_e est généralement supérieur à 70% [42]

$$\frac{d}{d\tau} \Theta = \frac{\lambda_s \Delta t}{(\rho C_p)_s h_{eff}^2} \left[\frac{\lambda_{eff}(x)}{\lambda_s} \frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} \Theta + \frac{\lambda_{eff}(y)}{\lambda_s} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \Theta + \frac{\lambda_{eff}(z)}{\lambda_s} \frac{\partial^2}{\partial \gamma^2} \Theta + \frac{1 - \eta_e}{\eta_e} \frac{UJ}{\lambda_s \Delta T / h_{eff}} \right] \quad (\text{III-18})$$

La solution de l'équation précédente dépend de deux facteurs sans dimensions

- ✓ $F_0 = \lambda_s \Delta t / (\rho C_p)_s h_{eff}^2$ Connu souvent sous l'appellation de nombre de Fourier, fonction de la structure des cellules ;
- ✓ $S_0 = \frac{UJ(1 - \eta_e)}{\eta_e \lambda_s \Delta T / h_{eff}}$ qui exprime le rapport entre deux flux de chaleur ou encore la perte

de chaleur résultant du chauffage par conduction d'une plaque dont h_{eff} et λ sont respectivement l'épaisseur et la conduction thermique.

Il est démontré à partir de plusieurs essais que F_0 et S_0 sont reliés par l'équation [43] :

$$F_0 = 0.72 S_0^{-1.1} \quad (\text{III-19})$$

Ainsi , on peut déterminer ΔT

$$F_0 = \frac{\lambda_s \Delta t}{(\rho C_p)_s h_{eff}^2} = 0.72 \left[\frac{1 - \eta_e}{\eta_e} UJ \frac{1}{\lambda_s \Delta T / h_{eff}} \right]^{-1.1} \quad (\text{III-20})$$

$$N_0 I_{fc} = 2Fq_{H_2}^r \left(\frac{1}{0.72} \right) \left[\frac{\lambda_s \Delta t}{(\rho C_p)_s h_{eff}^2} \right]^{0.909} = \left[\frac{1 - \eta_e}{\eta_e} UJ \frac{1}{\lambda_s \Delta T / h_{eff}} \right] \quad (\text{III-21})$$

Sachant que $T_{out} = T_{in} + \Delta T$ la variation de température peut s'exprimer par :

$$\Delta T = \left[\frac{1 - \eta_e}{\eta_e} UJ \frac{h_{eff}}{\lambda_s} \right] \left[\frac{1}{0.72 F_0} \right]^{0.909} \quad (\text{III-22})$$

Ainsi, on est arrivée à une équation qui exprime la variation de la température en fonction des caractéristiques de la pile. Le temps de relaxation est généralement compris entre 150 et 200 s.

III.5. Expression de la tension de NERNST

La tension aux bornes de la pile est exprimée en fonction des pressions partielles, et en appliquant la loi d'Ohm par : [40]

$$V_{dc} = V_0 - rI - \eta_{act} - \eta_{con} \quad (\text{III-23})$$

Où :

$$V_0 = N_0 \left(E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (\text{III-24})$$

V_0 : Tension réversible en circuit ouvert (V) ;

E^0 : Tension réversible en conditions standards (V) ;

r : Résistance ohmique (Ω) ;

T : Température en Kelvin ;

N_0 : Nombre de cellules ;

η_{act} : Pertes par activation ;

η_{con} : Pertes par concentration ;

I : Courant de la pile.

III.6. Considérations générales pour un fonctionnement optimal

III.6.1. Rapport entre les débits des réactants

En regardant la réaction de combustion :



On remarque que le rapport stoechiométrique est de 2 à 1. Un excès d'oxygène est toujours considéré afin de permettre une réaction aussi complète que possible.

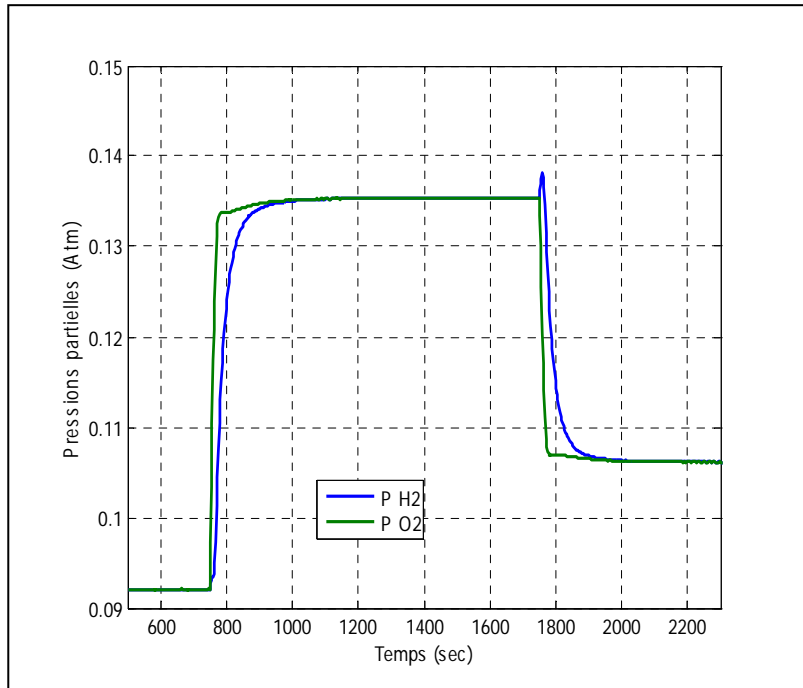


Fig. III-2 : Variation des pressions partielles suite aux variations de la charge en fonction du temps.

Ainsi il est intéressant pour des raisons de sécurité de maintenir une différence de pression qui ne dépasse pas 4 KPa en fonctionnement normal et, 8 KPa pendant les phases transitoires. [10]

Le débit d'oxygène peut être contrôlé par la commande de vitesse du compresseur d'air. Un rapport d'équilibre doit être maintenu entre les deux débits :

$$q_{O_2}^{in} = \frac{1}{r_{H-O}} q_{H_2}^{in} \quad (\text{III-26})$$

Où : $r_{H-O} = 1.145$

III.6.2. Rapport entre le débit hydrogène et le courant de la pile

Les équations de l'électrochimie montrent que le courant débité par la pile est proportionnel au débit d'hydrogène qui y entre :

$$N_0 I_{fc} = 2F q_{H_2}^r \quad (\text{III-27})$$

Une autre définition importante caractérise le fonctionnement des piles. L'utilisation du carburant qui est le rapport entre le débit participant à la réaction chimique et le débit total.

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} = \frac{q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out}}{q_{H_2}^{in}} \quad (\text{III-28})$$

L'utilisation est comprise entre deux seuils : [35]

* $U_f \geq 90\%$: une sur utilisation de fuel peut entraîner un manque de carburant, dans ce cas un dommage permanent serait inévitable ;

* $U_f \leq 70\%$ dans ce cas la tension des cellules s'accroîtra rapidement.

On doit noter dans ce cas qu'une tension faible aux bornes de la source peut entraîner dans certain cas une perte de synchronisme avec le réseau. [51].

La valeur optimale pour l'utilisation est de :

$$U_{opt} = 85\% \Rightarrow q_{H_2}^{ref} = \frac{2k_r I_{fc}}{U_{opt}} \quad (\text{III-29})$$

III.6.3. Contraintes de sécurité

Afin d'éviter tout incident désagréable, une limitation secondaire est imposée sur le débit d'hydrogène en limitant le courant de la pile entre deux seuils d'utilisation par l'équation suivante : [44]

$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2k_r} \leq I_{fc}^{in} \leq \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2k_r} \quad (\text{III-30})$$

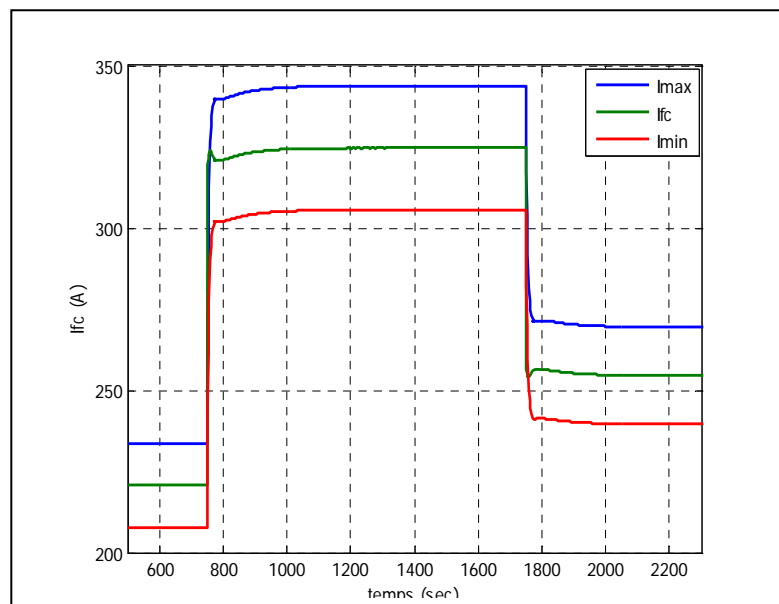


Fig. III-3 : Le courant de la pile compris entre les deux seuils de sécurité.

III.6.4. Topologies des convertisseurs statiques

Les "stacks" sont les pièces centrales de la source de production étudiée. Pour le système complet en plus des stacks on trouve :

- ✓ Les reformeurs dont le rôle est d'assurer l'approvisionnement du réservoir de stockage en hydrogène ;

- ✓ L'alimentation en air comprimé ;
- ✓ Les échangeurs de chaleurs. [45; 46]

La tension délivrée par la pile étant généralement continue, [47] [48] et non réglée, doit être adaptée pour l'utilisation qui comme il est exigé dans la plupart des cas en une tension alternative.

Le choix de la topologie dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la tension et la puissance délivrée. On note ici que le choix avant tout est technico-économique, qui ne peut être abordé dans cette étude. Plusieurs configurations sont possibles, dont chaque une est souhaitable pour une utilisation bien spécifiée.

a. Configuration Série :

Cette configuration nous rappelle celle qu'on trouve généralement dans l'association des batteries conventionnelles. Cette première méthode nous permet d'avoir la tension que l'utilisation requiert. Dans cette configuration l'onduleur voit une tension variable à ces bornes. En effet d'après la caractéristique tension-courant de la pile on a remarqué que l'augmentation du courant appelé par la charge entraîne une diminution de la tension délivrée par la pile.

Afin de remédier à ce problème deux solutions sont possibles :

- ✓ La première consiste à adopter pour l'onduleur une technique de commande qui nous permet de faire face aux variations de la tension à ses bornes ;
- ✓ La deuxième consiste à ajouter un hacheur DC/DC qui permet de maintenir une tension constante aux bornes de l'onduleur.

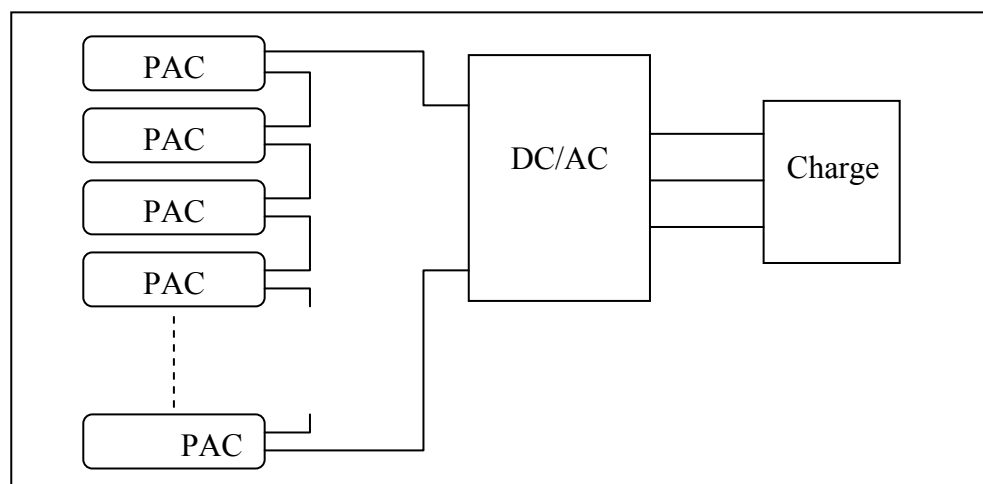


Fig. III- 4 : Configuration série.

Du point de vue économique la sollicitation à très haute fréquence des interrupteurs exige un onduleur trop cher, l'utilisation de l'étage DC/DC alors rend l'installation moins chère.

L'ajout d'un hacheur réduit la complexité de la commande de l'onduleur d'un côté mais rend celle du hacheur plus complexe. Un aspect important est la fiabilité de fonctionnement ; la défaillance d'une cellule a pour conséquence une élimination pure et simple de la pile toute entière.

b. Distribution En Continu :

Cette deuxième configuration vient pour améliorer la fiabilité de celle vue précédemment. Elle consiste en l'association des modules des SOFC directement à des hacheurs DC/DC. Ces convertisseurs, généralement des survolteurs assureront l'alimentation d'une barre continue.

Cette configuration est intéressante dans la mesure où elle permet de répondre aux besoins en énergie par une utilisation rationnelle des modules d'une part et permet d'optimiser les opérations de maintenance.

Cependant cette configuration n'est pas exempte d'inconvénients. Une attention particulière doit être faite quant aux courants qui sont produits, aussi le coût de telle installation est élevé.

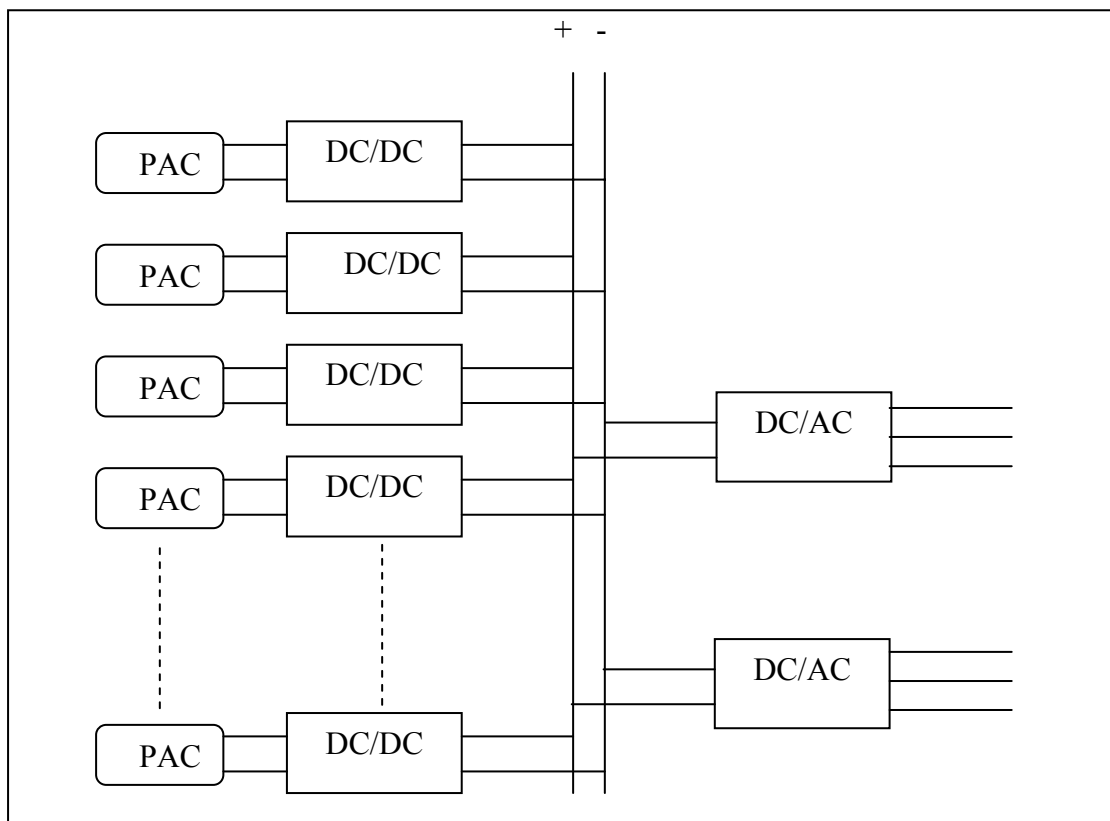


Fig. III-5 : Distribution en continu.

c. Configuration En Cascade A Multi Niveau :

Cette configuration est déduite de celle précédemment vue. Les modules dans ce cas sont reliés en série afin de pouvoir obtenir des niveaux de tension différents. Les modules sont reliés directement à des onduleurs, ou à des hacheurs.

La modularité, la possibilité d'obtention de large gamme des niveaux de tension et la redondance sont les principaux avantages de cette configuration.

Parmi les inconvénients on peut noter le coût de telle installation qui est élevé, et aussi les harmoniques produites ce qui nécessite une dépollution efficace donc coûteuse.

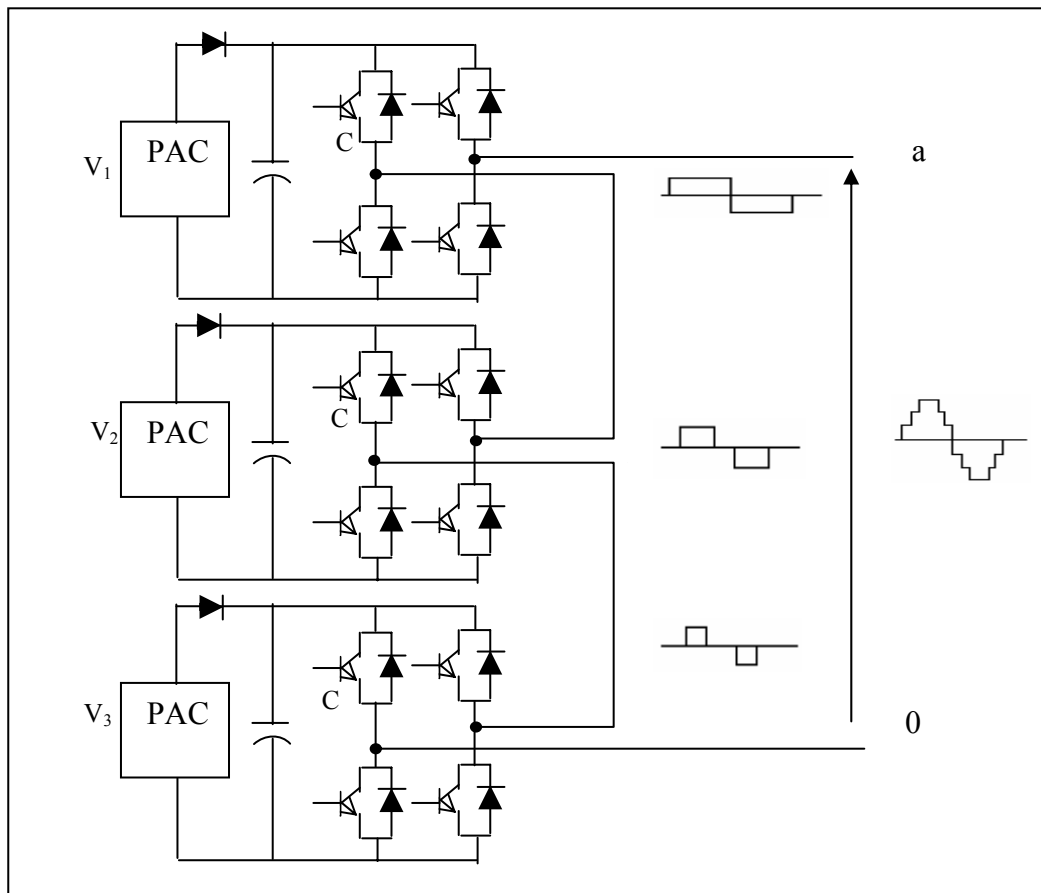


Fig. III-6 : Distribution en cascade à multi niveau.

III.7. Schéma de contrôle des onduleurs raccordés aux réseaux

Le recours aux énergies renouvelables a fait des convertisseurs statiques des éléments incontournables dans la production décentralisée. Ces sources sont généralement répertoriées en deux grandes familles dont la principale caractéristique est la tension produite; on trouve donc :

- ✓ les piles à combustible, les panneaux solaires, sources statiques, dont la tension est continue. Un convertisseur DC/AC est suffisant pour convertir la tension en alternative à la fréquence demandée.
- ✓ Les sources dynamiques telles que les éoliennes les micro-turbines qui exigent un étage de redressement.

Comme pour les onduleurs, la fonction principale de telles sources est le contrôle du flux des puissances actives et réactives entre la source et le réseau. Selon le cas, les paramètres de contrôle dépendent de la nature du jeu de barre choisi. Les puissances active et réactive sont données par les équations suivantes :

$$P = \frac{V_{ac} E}{X} \sin \delta \quad \text{Et} \quad Q = \frac{V_{ac}}{X} (V_{ac} - E \cos \delta) \quad (\text{III-31})$$

Où

V_{ac} : Tension aux bornes de l'onduleur ;

E : La tension du réseau ;

δ : Déphasage entre les deux tensions ;

La tension est donnée par :

$$V_{ac} = m V_{dc} \sin \delta \quad (\text{III-32})$$

Où m est l'indice de modulation et δ est l'angle de puissance [48 ; 40]

Pour un onduleur avec des interrupteurs idéaux où on admet que les pertes sont nulles, la puissance peut être exprimée aussi par la relation suivante :

$$P = P_{dc} = I_{dc} V_{dc} \quad (\text{III-33})$$

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le contrôle dans ce type de systèmes.

III.7.1. Contrôle PQ

Il est démontré que pour de faibles variations de l'angle δ ; la puissance active est proportionnelle à δ ; la première partie de l'équation (III-30) peut être exprimée de la manière suivante : $P = P_{\max} \delta$

D'après le graphe (voir Fig. III-7), on voit que pour un angle compris entre $0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{6}$

la relation entre P et δ demeure linéaire. Afin de déterminer l'angle dont dépendent les instants d'amorçage des interrupteurs du convertisseur statique [40], un régulateur PI est utilisé.

L'erreur entre la mesure de la puissance active et celle de référence est introduite au régulateur PI .

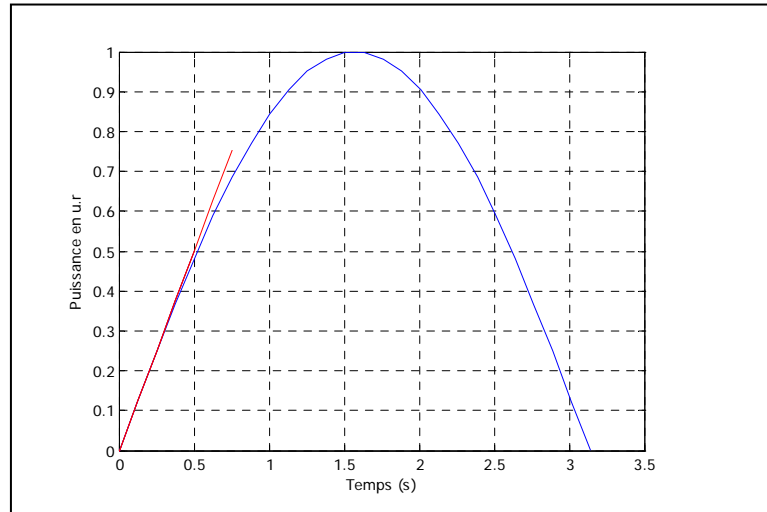


Fig. III-7 : Expression de la puissance en fonction de l'angle de puissance.

Il est aussi intéressant ici de noter qu'une deuxième approche peut être adoptée pour le calcul de l'angle δ . En effet, en supposant le convertisseur statique idéal, on peut écrire :

$$P_{ac} = P_{dc} = V_{pac} * I = \frac{V_{ac} E}{X} \sin \delta \quad (\text{III-34})$$

En introduisant le facteur d'utilisation U le débit sera lié au courant de la pile par l'équation suivante :

$$Q_{H_2} = \frac{(N_{stack} * N_0 * I)}{(2 * F * U)} \quad (\text{III-35})$$

Sachant que le courant et le débit d'hydrogène sont reliés par l'équation (III-26), l'angle peut être exprimé pour des variations de l'angle comprise entre $0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{6}$ par :

$$\sin \delta \simeq \delta = \frac{(2 * F * U * X) * Q_{H_2}}{(m * V_s * N_{stack} * N_0)} \quad (\text{III-36})$$

L'indice de modulation m est déterminé par la relation reliant la tension continue à celle aux bornes du convertisseur statique par équation (III-31).

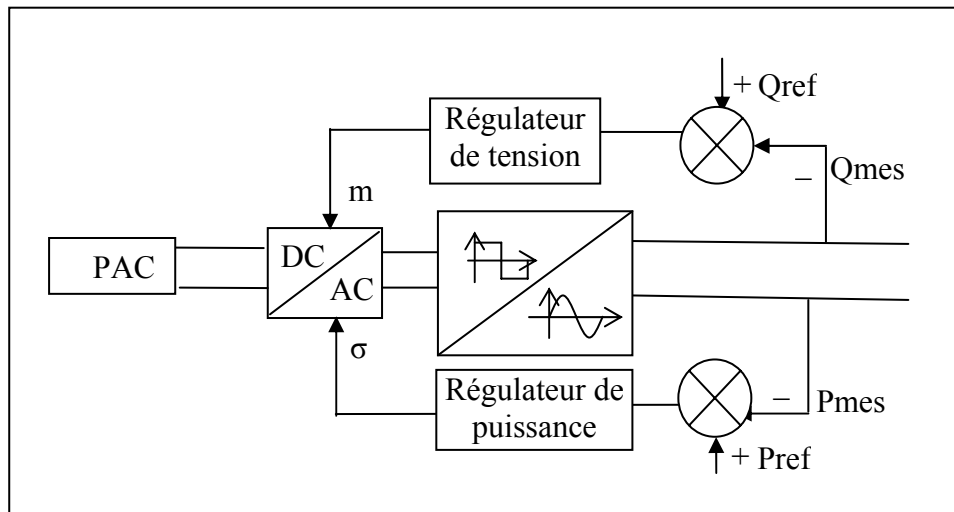


Fig. III-8: Schéma de commande global

L'utilisation des régulateurs type proportionnel peut être interprété par le fait que le plus loin que l'on est de la référence, le plus dure que l'on doit essayer de la regagner. Ainsi, on se rapprochant de la consigne le moins d'effort est développé. Le régulateur type intégrateur à une notion de temps, c'est l'accumulation de valeurs antérieures de l'erreur entre la consigne et la mesure.

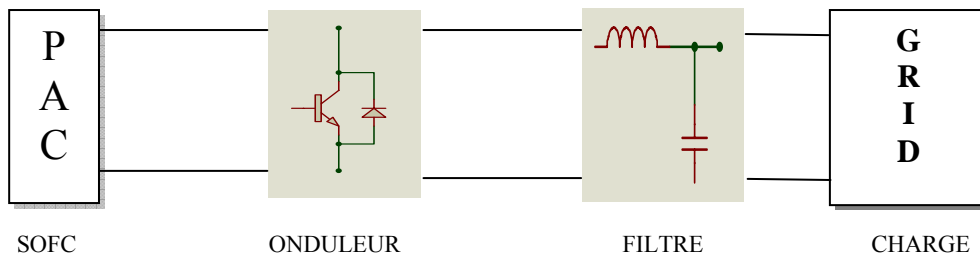


Fig. III-9 : schémas simplifié du modèle

Le contrôle de la puissance réactive permet de déterminer l'indice de modulation est par la suite la tension aux bornes de la source. A cet effet un régulateur de type PI est utilisé

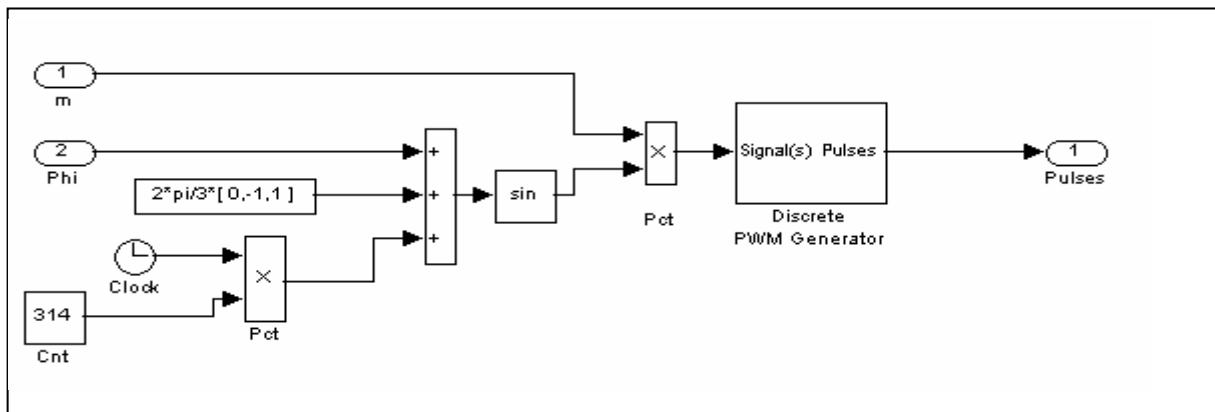


Fig. III-10: Génération des impulsions

III.8. Implémentation et résultats de la simulation

III.8.1. Réponse à une charge fixe de 60Kw.

Dans cette partie on procèdera à un premier essai qui va nous permettre de suivre le fonctionnement de la pile. Une charge fixe de 60 Kw est appliquée au système.

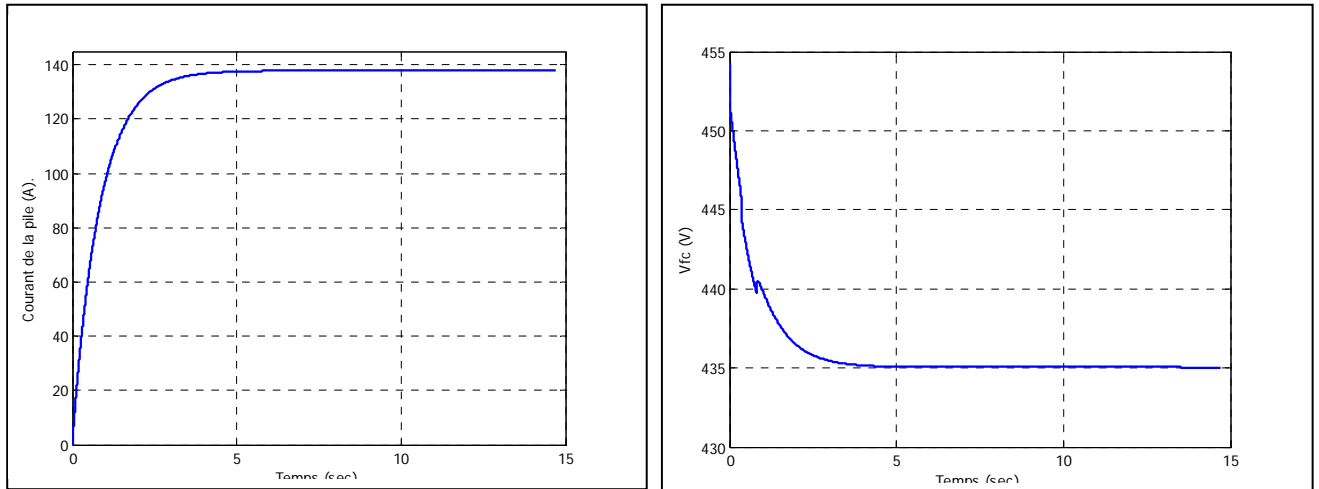


Fig. III-11: Courant I_{fc} aux bornes de la pile Fig. III-12 : Tension V_{fc} aux borne de la pile

Sur la Figure .III-12 on remarque que la tension V_{fc} prend presque 5s pour atteindre une valeur fixe de 435 V. Le courant de la pile I_{fc} quand à lui il prend aussi presque 5s pour atteindre une valeur fixe de 138 A.

Le débit d'hydrogène est fonction d'une part du courant I_{fc} et de la cinétique de la réaction chimique. Le retard est considérable il est de l'ordre de 20 s ; le recours à un régulateur PI réduit énormément le temps de réponse du reformeur.

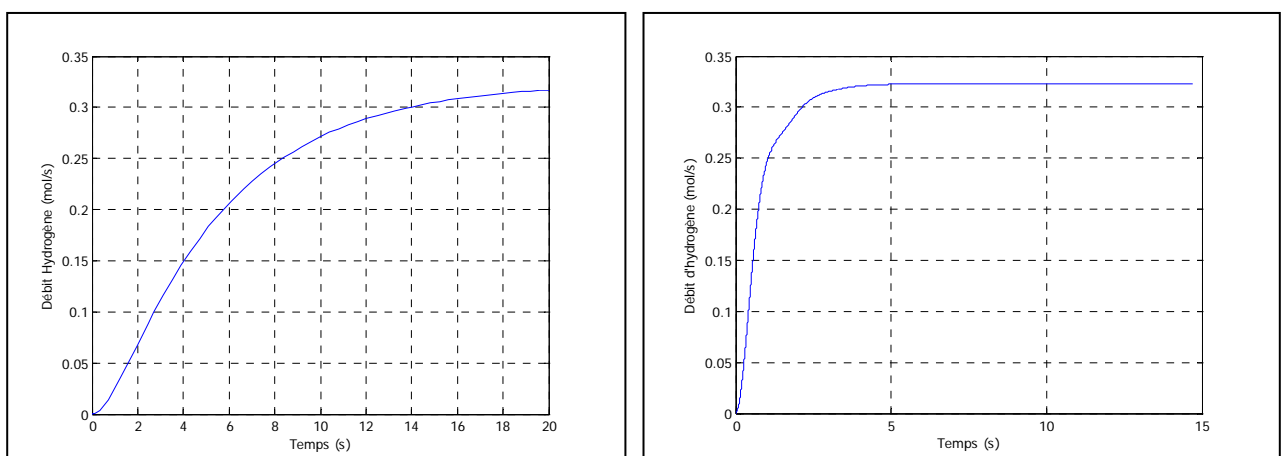


Fig.III-13 : Débit Hydrogène sans régulateur PI

Fig.III-14 : Débit Hydrogène avec régulateur PI

La puissance de la pile Pfc est fonction de la tension et du courant, il est normal que la réponse accuse le même retard enregistré sur les deux premiers.

Les Figure (III-15 et III-16) donnent l'angle et l'indice de modulation obtenue à partir du contrôle PV (puissance_tension). La valeur efficace de la tension aussi demeure constante après avoir atteint sa valeur de référence.

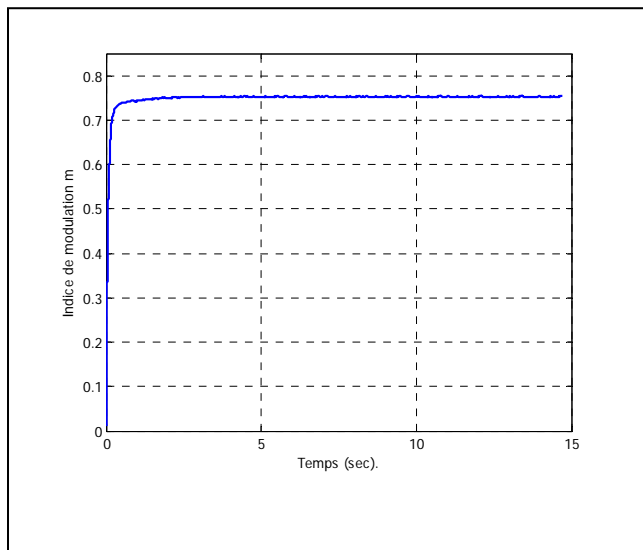


Fig.III-15: Indice de modulation m

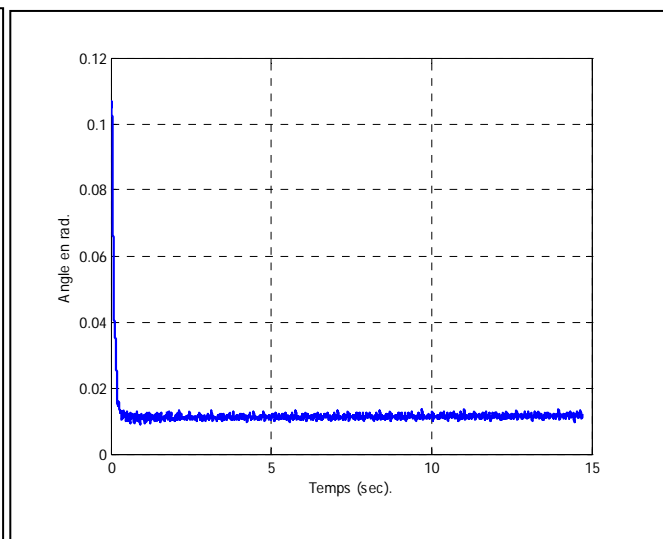


Fig.III-16 : L'angle δ

Sur les figures suivantes on note la réponse de l'onduleur à l'application de la charge. Le convertisseur prend pratiquement un temps très réduit, pratiquement de 0,3 s, par rapport à celui de la pile. Ce phénomène nous rappelle le comportement des alternateurs durant la variation brusque des la charge. En effet c'est aux systèmes électrique d'excitation d'y faire face en donnant le temps nécessaire aux vannes d'admission du fluide moteur (vapeur ou autre) pour atteindre la nouvelle consigne. En s'inspirant de ce comportement, on s'appuie sur les convertisseurs pour faire face aux variations rapides de la charge [49] le temps de réponse des systèmes électrique étant très faible par rapport aux autres systèmes qui doivent vaincre une inertie quelconque, telle que les systèmes mécanique ou les piles dont la réponse est dépendante de la cinétique des réactions chimiques, elles aussi fonction des catalyseurs qui augmentent la cinétique réactionnelle.

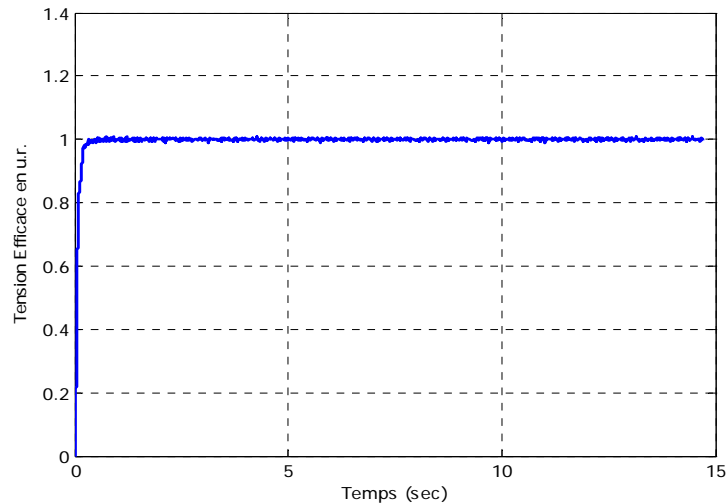


Fig. III-17: Valeur efficace de la tension aux bornes du convertisseur statique.

Sur la figure suivante on remarque les différences des temps de réponse pour cet exemple.

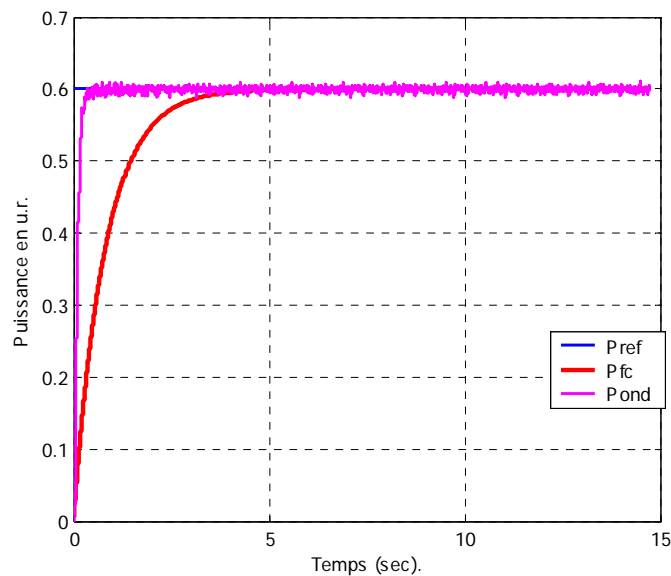


Fig. III-18 : Les puissances de référence, de la pile et celle aux bornes du convertisseur statique.

III.8.2. Réponse à une charge variable :

Dans cette deuxième phase, le système est soumis à une charge variable. A l'origine, on applique une charge de 70 KW qui passe à 100 KW à $t = 6.1$ s puis redescend à 80 KW à $t = 12.3$ s. Ces instants ont été choisis afin de pouvoir visualiser les réponses des systèmes trop lents dont le plus lent est 5 s comme on a pu le remarquer sur l'exemple précédent.

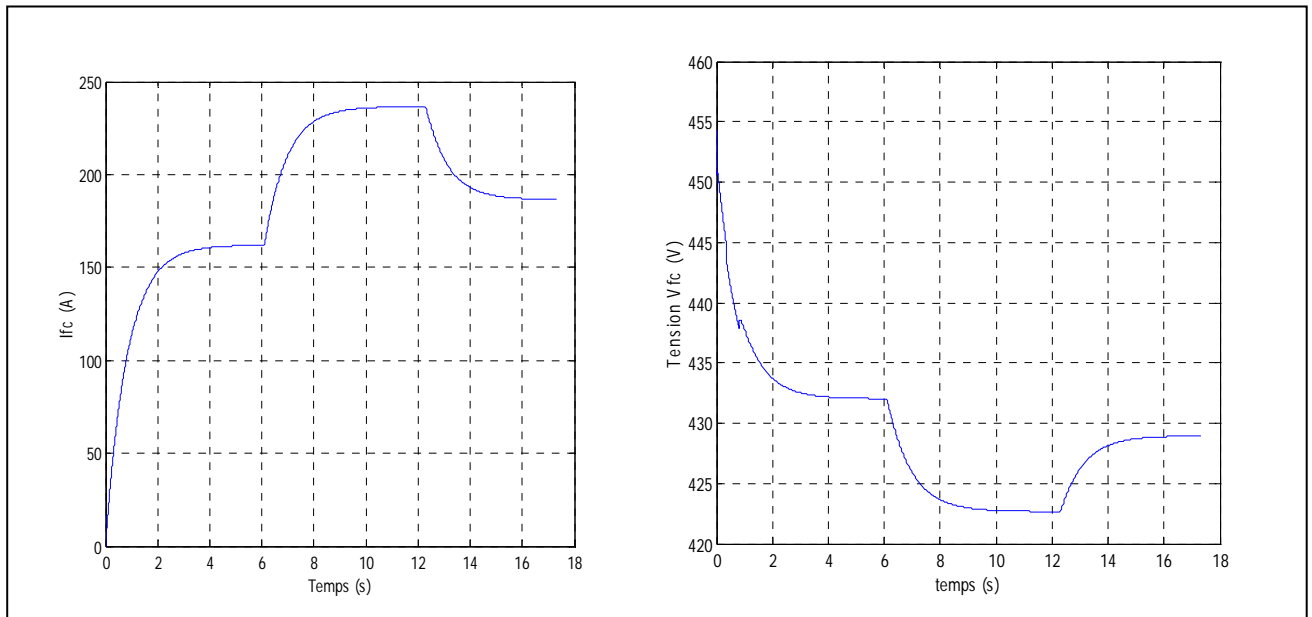


Fig.III-19 : Courant I_{fc} aux bornes de la pile Fig.III-20 : Tension V_{fc} aux bornes de la pile

Le courant I_{fc} fonction du rapport de la puissance de référence à la tension aux bornes de la pile, épouse pratiquement la même allure que celle de la puissance; le temps de réponse est pratiquement le même. Le comportement de la tension ne diffère pas de celui vu dans la partie précédente.

Le débit d'hydrogène suit la variation du courant de la charge. L'utilisation du régulateur PI pour le contrôle du débit d'hydrogène est remarquable du moment que la variation de la charge se fait à des petits intervalles comparés à ceux où il n'est pas utilisé.

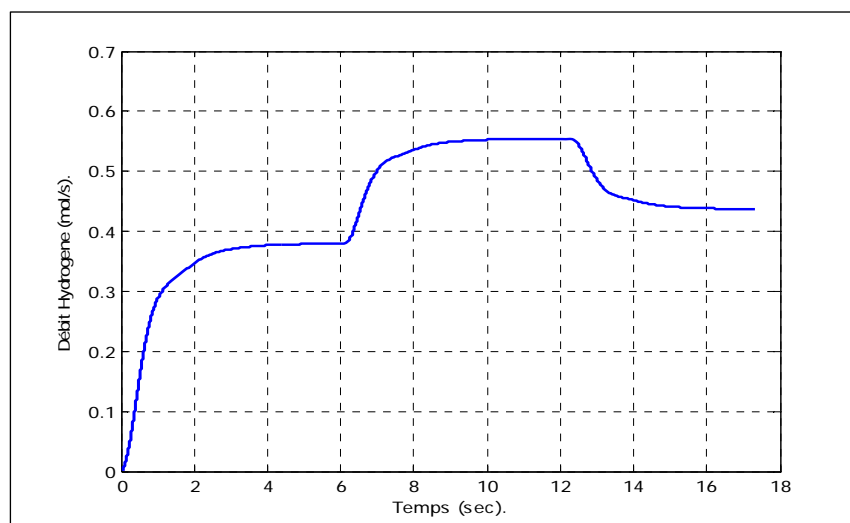


Fig.III-21: Débit Hydrogène absorbé par la pile fonction suite à l'appel du courant.

La valeur efficace de la tension prend des valeurs inquiétantes aux instants des variations de la charge. Ces dépassements causeront une perte de synchronisme inéluctable si le système était couplé au réseau. Comme première constatation l'utilisation d'un moyen de stockage paraît indispensable.

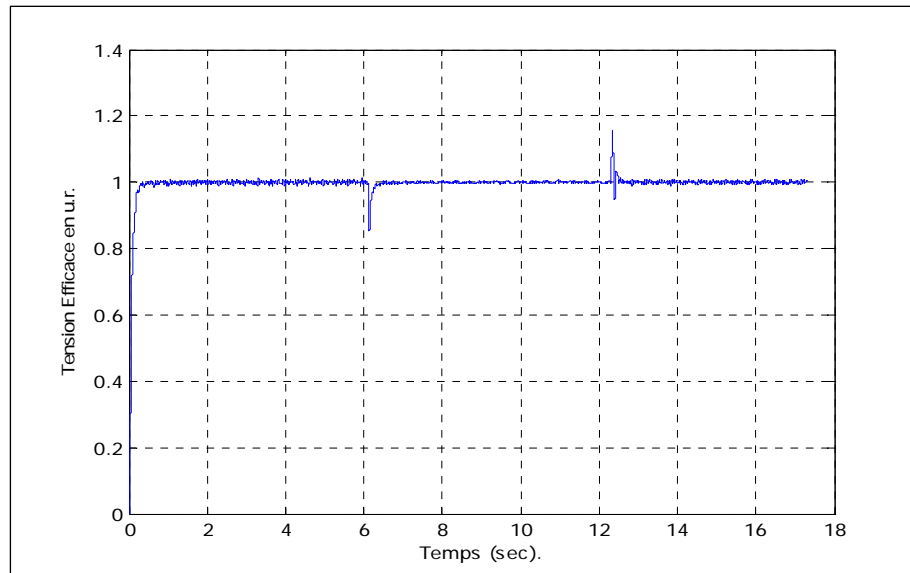


Fig.III.22 : Valeur efficace de la tension aux bornes de la charge.

Les graphes suivants donnent les variations de l'indice de modulation et de l'angle de phase obtenues à partir du contrôle PV utilisé.

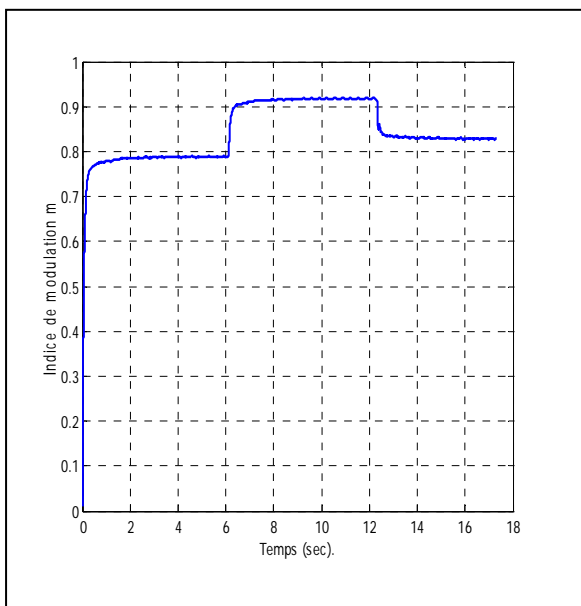


Fig.III-23 : Variation de l'indice de modulation m

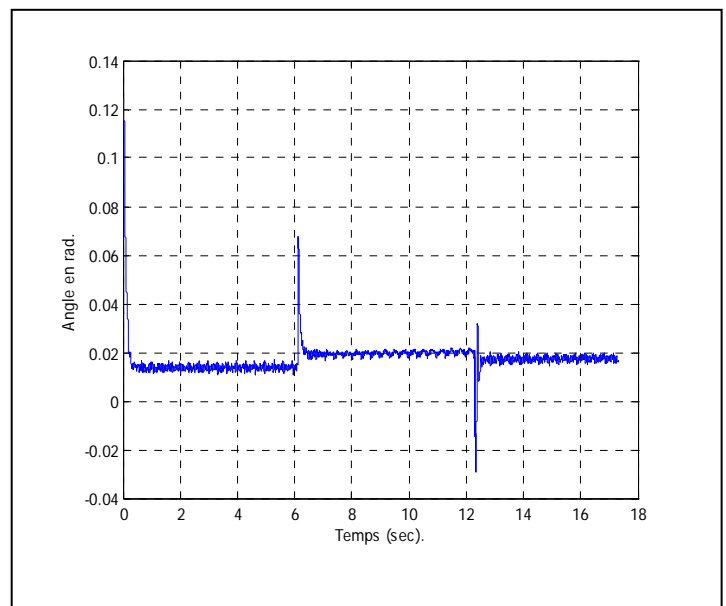


Fig.III-24: variation de l'angle δ

La réponse aux bornes de la source épouse la forme de la consigne pratiquement d'une façon parfaite.

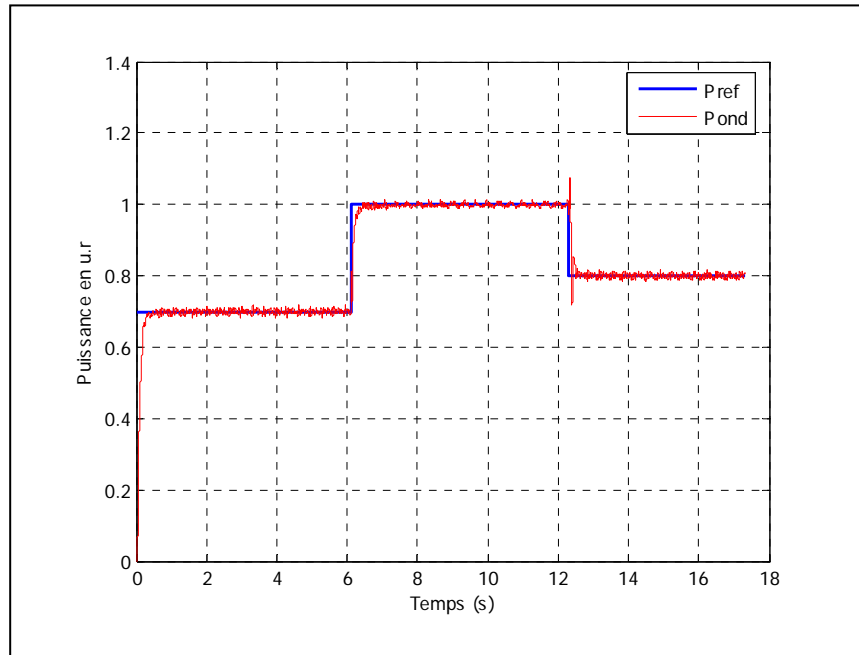


Fig.III-25 : Les puissances de référence et celle délivrée par la pile.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude du comportement dynamique d'une source de production de l'énergie électrique composée de l'association d'une pile à combustible type SOFC et d'un convertisseur statique a été réalisée dans ce travail dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Après une introduction au domaine des piles à combustible, peu exploré par notre communauté d'électrotechniciens, le principe de fonctionnement de ces générateurs électrochimiques et leurs différentes technologies étaient vus en détail.

Dans une seconde étape, l'interprétation des phénomènes physiques qui y ont lieu, l'application des lois de la thermodynamique pour la détermination des performances des piles et l'effet des différents paramètres sur le fonctionnement sont exposées.

Après une démonstration précise par les équations mathématiques de phénomènes d'activation et de diffusion une simulation sous MATLAB/SIMULINK des leurs effet sur la tension de la piles et sur la puissance délivrée a été faite.

Une approche pour l'étude du comportement dynamique des onduleurs dédiés aux réseaux électriques est aussi présentée. En effet le recours aux nouvelles sources de production s'est accompagné par une nouvelle vision de l'utilisation des onduleurs (FACTS : UPFC, SSSC, STATCOM...)

En dernière partie un modèle dynamique de la pile qui tient compte des considérations générales pour un fonctionnement fiable est exprimé. Aussi une approche pour calculer les variations de la température en ne tenant compte que des caractéristiques de la pile est introduite.

Une nouvelle vision pour la modélisation du système était faite. Elle repose sur le fait que:

- ✓ La variation du courant appelé par la charge se traduit par une baisse de tension si le débit du carburant demeure constant. Pour y remédier le débit était calculé en fonction de la puissance imposée par la charge.
- ✓ Pour faire face aux variations de la tension aux à l'entrée de l'onduleur, et pour compléter la première action, un régulateur est utilisé pour calculer l'indice de modulation approprié.
- ✓ Afin de déterminer les instants d'amorçages des interrupteurs du convertisseur statique, l'angle de puissance est calculé à chaque variation de la charge.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et ouvrent la voie vers de nouvelles perspectives pour l'étude des ces nouvelles sources d'énergie.

Suggestions et proposition :

Afin d'améliorer le rendement des ces générateurs il est préférable des les utiliser comme des sources de base. Leur association à des turbines à gaz ou leurs utilisations en cogénération s'avère très justifiable.

- L'étude de la qualité de la puissance par une filtration passive ou active.
- Une nouvelle vision doit être faite quant à l'utilisation des onduleurs dans le domaine du transport de l'énergie (FACTS : UPFC, SSSC, STATCOM...)
- L'application des techniques nouvelles pour la régulation des convertisseurs statiques dédiés aux réseaux électriques.
- L'utilisation des systèmes hybrides (Eolienne/Photovoltaïque-PAC).
- L'utilisation d'un étage intermédiaire pour la régulation de la tension continue.

REFERENCES

CHAPITRE I

[1] Livre blanc sur les énergies, débat national sur les énergies.

www.debat-energie.gov.fr

[2] Chunshan Song: "Fuel processing for low-temperature and high temperature fuel cells challenges and opportunities for sustainable development in 21st century".

[3] L'énergie au 21^{ème} siècle une réflexion prospective.

www.recherche.gov.fr/mstp/

[4] "Les énergies renouvelables, seule alternative à terme aux énergies fossiles "par F-T Tizraoui. In Energie & Mines N°2 Avril 2004.

[5] Jules verne : "l'île mystérieuse"

[6] H Foch, F Forest & T Meynard: "Onduleurs de tension ; Structure Principe. Application" Technique de l'ingénieur, Traité Génie Electrique.

[7] Brian COOK: " Introduction to fuel cell and hydrogen technology". Engineering Science and Education journal December 2002.

[8] Amel LACHICHI: " Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant – application aux convertisseurs pour piles à combustibles". Thèse doctorant, université de Franche- comte 2005.

[9] Jérôme LACHAIZE: "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à piles à combustibles (PAC) destinés à la traction". Thèse de doctorat à INP de TOULOUSE 2004.

[10] Emanuel Florin Mogos : " Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources". Thèse de doctorat E.N.S d'Arts et Métiers Centre de Lille 2005.

[11] Guillaume FONTES : " Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec le convertisseur statique". Thèse de doctorat. ENP Toulouse 2005.

[12] Tobias J. Beck : " Investigation of Novel Electro catalysts for the Oxygen Reduction Reaction for Proton Exchange Membrane Fuel Cell". Technishe Universitaet Munchen 2001.

[13] Wolfgang FREIDE : "Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM". Thèse de doctorat, INP de Lorraine 2003.

[14] Brandon M. Eaton: "One Dimensional, Transient Model of Heat Mass; and Charge Transfer in a Proton Exchange Membrane". Science Master Thesis. Faculty of the Virginia polytechnic and State University 2001.

- [15] Toh Min Joo, Benjamin: "Fuel Cell Controller", Bachelor of engineering thesis; Curtin University of Technology 2004.
- [16] Huayan Zhu, Robert J. Kee: "The influence of current collection on the performance of tubular anode-supported SOFC cells". Journal of Power sources Elsevier 2007
- [17] Jérôme FAZILLEAU : "Contribution à la compréhension des phénomènes impliqués dans la réalisation des dépôts finement structures d'oxydes par projection de suspension par plasma". Thèse de doctorat. Université de Limoges 2003.
- [18] Thameur Aloui, Kamel Halouani: "Analytical modeling of polarization in a solid oxide fuel cell using biomass syngas product as fuel" .Applied Thermal Engineering Elsevier 2007;
- [19] Ostein Mathisen and Steinar Selgebo : "Modeling and simulation of a solid oxide high temperature fuel cell Report" . The Norwegian University of Science and Technology 2003.
- [20] Fuel Cell Handbook (7Th Edition), US DOE; National Energy Technology Laboratory; Division of Fossil Energy 2003.
- [21] David J. Hall, R. Gerald Colclaser: "Transient Modeling and Simulation of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell" .IEEE 1999
- [22] Wei ZHANG: "Simulation of solid oxide fuel cell-based power generation processes with CO2 capture". Master thesis; university of Waterloo2006.
- [23] David Lee Damm: "Radiative and Transient Thermal Modeling of Solid Oxide Fuel Cell" Thesis of Master of Science. Georgia Institute of Technology 2005.
- [24] " High temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications". Edited by Subhash C Singhal and Kevin Kendall Elsevier 2003.
- [25] Prabha RamChandra Acharya: "An advanced fuel cell simulator". Master of Science Texas A & M University 2004.
- [26] Eric M Fleming, Ian A Hiskens: "Dynamics of Micro grid Supplied by Solid oxide fuel cells"; Bulk Power Systems Dynamics and Control VII August 19-24 ;2007 Charleston South Carolina USA.
- [27] Kyung Joong Yoon, Peter Zink, Srikanth Gopalan, and Uday B. Pal: "Polarization measurement on single-step co-fired solid oxide fuel cells (SOFCs) ". Journal of Power Sources Elsevier 2007.

CHAPITRE II

- [28] AmirHossein HajimirAgha: "Generation Control in Small Isolated Power System" Master Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm 2005.
- [29] J.P. Beaudet, J.N. Fiorina, P. Pinon : "Topologies d'ASI et normalisation". MGE UPS SYSTEMS11/99 (Merlin Gerin).

-
- [30] Guy Séguier : " L'électronique de puissance : les fonctions de base et leurs applications" Quatrième édition. Dunod Paris.
- [31] M. H.RASHID: "Power electronics hand book ", Academic Press of Florida Copyright , 2001.
- [32] BELKACEMI : recueil du cours modélisations des reseaux electriques.
- [33] Mukul C. Chandorkar, Deepakraj M. Divan and Rambabu Adapa: " Control of Parallel Connected Inverters in Standalone AC Supply Systems". IEEE 1993.
- [34] Francisco Jurado, Manuel Valverde, And Antonio Cano: "Effect of SOFC plant on distribution system stability". Journal of Power Sources Elsevier 2003.
- [35] Ludovic LECLERQ : "Apport inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes". Thèse de doctorat UST Lille 2004.
- CHAPITRE III**
- [37] Wolfgang Drenckhahn: "SOFC in dispersed Power Generation"; Journal of the European Ceramic Society19(1999). Published by Elsevier Science limited.
- [38] Caisheng Wang: " Modelling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems". Thèse de doctorat. Montana State University. Bozeman, Montana 2006.
- [39] J. Padullés, G. W. Ault, J. R. McDonald: "An integrated SOFC plant Dynamic Model for Power System Simulation" .Journal of Power Sources Elsevier 2000.
- [40] Kouros Sedghisigrashi, Ali Feliachi: " Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cell – Part I: Fuel Cell Dynamic Model ". IEEE 2004.
- [41] R. Saisset, C. Turpin, S. Astier, B. Lavage:"Study of Thermal Imbalance in Arrangement of Solid Oxide Fuel Cell by Mean of Bond Graph Modeling ". IEEE 2002.
- [42] J. Padullés, G.W. Ault, J. R. McDonald: "An Approach to the Dynamic Modeling of Fuel Cell Characteristics for Distributed generation Operation". IEEE 2000.
- [43] Elmar Achenbach: "Response of a Solid oxide Fuel Cell to load change". Journal of Power Sources Elsevier 1995.
- [44] Xiaorui Wang, Biao Huang; Tongwen Chen:" Data-driven predictive control for Solid Oxide Fuel Cell ". Journal of Power Sources Elsevier 2006.
- [45] Wolfgang Dreuckhahn:" SOFC in Dispersed Power generation". Journal of the European Ceramic Society; published by Elsevier Science Limited 1999.
- [46] Anthony B. Campbell, Joe F Ferral and Nguyen Q; Minh: "Solid Oxide Fuel Cell power System"; IEEE 2003.

- [47] B. Bouneb, D.M. Grant, A. Cruden, J.R. McDonald: "Grid connected inverter suitable for Economic Residential Fuel Cell Operation". E.P.E. 2005 Dresden.
- [48] M. Tanrioven and M. S. Alam: "Modeling, Control and Power Quality Evaluation of a PEM Fuel cell Based Power Supply for residential Use." IEEE 2004.
- [49] Kouros Sedghisigrashi, Ali Feliachi: " Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cell –Part II: "Control and Stability Enhancement" IEEE 2004.
- [50] Ben Aissa Amar: " Etude et simulation d'une alimentation stabilisée à performances améliorées". Mémoire de magistère. Université de Biskra 2005/2006.
- [51] Kouros Sedghisigrashi, Ali Feliachi: "control of grid-connected fuel cell power plant for transient stability enhancement".IEEE 2002.

ANNEXE 1 : [26]

Paramètre	Valeur	unite
T	1273.15	K
Va	0.2	m ³
Vc	0.2	m ³
$\frac{N_{H_2}}{V_a}$	2.0	$\frac{\text{mol}}{\text{s}}$
$\frac{N_{O_2}}{V_a}$	1.0	$\frac{\text{mol}}{\text{s}}$
N0	384	-
A	0.1	m ³
Aa	.0025	m ³
Ac	.0025	m ³
Cfa	.75	-
Cfc	.75	-
Patm	101325	Pa
MH2	$\times 10^{-8}$ 2.016	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
MH2O	18.016×10^{-8}	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
MN2	$\times 10^{-8}$ 28.014	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
MO2	$\times 10^{-8}$ 31.998	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$
j0	1500	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
jl	10000	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
Td	1	s

ANNEXE 2 : [10]

Paramètres	Représentation	Valeur
P rate	Puissance Nominale	100 Kw
T	Température Absolue	1273 K
F	Constante de Faraday	96487 C/mol
R	Constante universelle des gaz	8314 J/(Kmol.K)
N0	Nombre de cellule dans le « stack »	384
E0	Potentiel standard idéal	1.18 V
Kr	Constante de calcul,	$\text{kmol/ (s.A)} \cdot 10^{-6} \cdot 0.996^*$
U max	Utilisation maximale de combustible	0.9
U min	Utilisation minimale de combustible	0.8
U opt	Utilisation optimale de combustible	0.85
KH2	Constante molaire de la valve pour l'eau	$\frac{20 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}}{2.4 \cdot 10^6} \cdot 8.34^*$
KH2O	Constante molaire de la valve pour oxygène	$\frac{20.2 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}}{2.4 \cdot 10^6}$
KO2	Constante molaire de la valve pour le débit d'hydrogène	$\frac{20.2 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}}{2.4 \cdot 10^6}$
τ_{H_2}	Temps de réponse pour le débit d'hydrogène	26.1 s
τ_{H_2O}	Temps de réponse pour le débit de l'eau	78.3 s

τ_{O_2}	Temps de réponse pour le débit d'oxygène	2.91 s
r	Resistance correspondante aux pertes ohmiques	0.126 s
τ_e	Constante de temps correspondante à la réponse électrique	0.8 s
τ_f	Constante de temps correspondante au processus de combustible	5 s
τ_{H_2}	Rapport stœchiométrique entre hydrogène et oxygène	1.15 s