

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيادة –
Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par : Karima Ghezali

Sujet

**Modélisation de l'effet de température
d'une pile à combustible**

Soutenue publiquement en **27/06/2024** devant le jury composé de :

Dr: M.Rachedi

Univ. Saida

Président

Pr : M.Mankour

Univ. Saida

Rapporteur

Dr: K.Arzag

Univ. Saida

Examineur

Année universitaire 2023/2024



Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu « ALLAH » qui m'a aidé pour que ce travail soit achevé et pour que j'aie réussi.

*Je tien à remercier très sincèrement mon encadreur, Mr. **MANKOUR Mohamed**, pour ses conseils précieux, ses orientations*

judicieuses, sa patience, sa diligence, ainsi que ses suggestions et critiques qui ont facilités l'achèvement de ce présent travail.

Mes précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin, pour élaborer ce travail.

GHEZALI Karima





Dédicaces

*C'est grâce a Allah seul que j'ai pu achever se
travail. Je le dédie à :*

*Mes très chères parents pour leur soutien et leur
aide durant toute ma période d'étude, dont je leurs
doit toute ma reconnaissances et mon respect*

Toute la famille GHEZALI

*A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et
de prés.*

A Tous mes enseignants

*A toute la promotion 2023/2024 plus
particulièrement la chacun par son nom.*

GHEZALI Karima



Introduction générale	01
Chapitre I: LES ENERGIES RENOUVELABLES	
I.1 Introduction	03
I.2 Energies renouvelables	04
I.3 Croissance des énergies renouvelables dans les divers secteurs de la consommation	05
I.4 Différents types des énergies renouvelables	06
I.4.1. Energie hydraulique	06
I.4.1.1 Principe de fonctionnement	06
1. Retenue de l'eau	
2. Conduite forcée de l'eau	
3. Production d'électricité	
4. Adaptation de la tension	
I.4.1.2 Avantages et les inconvénients	07
I.4.1.3. Rendement et production mondiale	08
I.4.2. Energie biomasse	09
I.4.2.1. Principe de fonctionnement	09
1. Combustion	
2. Production de vapeur	
3. Production d'électricité	
4. Production de chauffage	
5. Recyclage	
I.4.2.2 Rendement et production mondiale	10
I.4.2.3. Avantages et les inconvénients	11
I.4.3 Eolienne	12
I.4.3.1. Fonctionnement	12
I.4.3.2. Rendement et production mondiale	13
I.4.3.3 Avantages et les inconvénients	14
I.4.4. Energie géothermique	16
I.4.4.1. Production d'électricité à base géothermique	16
I.4.4.2. Rendement et production mondiale	17
I.4.4.3. Avantages et les inconvénients	17
I.4.5. Energie solaire	18
I.4.5.1. Rendement et production mondiale	18
I.4.5.2. Tour solaire (cheminée solaire)	19
I.4.5.3. Tour solaire thermique	20
I.4.6. Energie photovoltaïque	21

I.4.6.1. Principe de la conversion photovoltaïque	21
I.4.6.2. Technologies des cellules photovoltaïques	22
I.4.6.3. Avantages et les inconvénients d'une installation PV	22
I.4.7 Pile à combustible:	23
I.4.7.1 Principe d'une pile à combustible	23
I.4.7.2 Principaux composants d'un PAC	24
I.4.7.3 Types de piles à combustible	25
I.5 Conclusion	25
Chapitre II: GENERALITE SUR LA PILE A COMBUSTIBLE	
II.1 Introduction	26
II.2 Histoire de L'hydrogène et de la pile à combustible	27
II.2.1 Hydrogène	27
II.2.1.1 Hydrogène comme vecteur énergétique	27
II.2.1.2 Production d'hydrogène à partir des énergies fossiles	27
II.2.1.3 Production de l'hydrogène par décomposition de l'eau	28
II.2.1.4 Production directe à partir de la biomasse	28
II.2.1.5 Réseaux de distribution	29
II.2.1.6. Stockage de l'hydrogène	30
a. Stockage sous forme liquide	
b. Stockage gazeux sous haute pression	
c. Stockage sous basse pression	
II.2.1.7 Aspects de sécurité de l'hydrogène en tant que combustible	31
II.2.1.8 Risque de fuite	31
II.2.1.9 Risque d'inflammabilité	31
II.2.1.10 Risque de formation d'une nappe explosive	31
II.2.1.11 Avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'hydrogène	32
II.3 Historique des piles à combustible	32
II.4 Généralités sur la pile à combustible	33
II.5 Différents types de piles et principe de fonctionnement	34
II.5.1 Pile à combustible à membrane (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	34
II.5.2 Pile à combustible à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell)	35
II.5.3 Pile à acide phosphorique (Phosphorique Acid Fuel Cell)	35
II.5.4 Pile alcaline (Alcaline Fuel Cell)	36
II.5.5 Pile à méthanol direct (Direct Méthanol Fuel Cell)	37

II.5.6 Pile à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell)	38
II.6 Principe de fonctionnement	40
II.7 Etudes précédentes	41
II.8 Eléments constituant la pile à combustible	43
II.8.1 Electrodes	44
II.8.2 Electrolyte	45
II.8.3 Plaques bipolaires	45
II.9 Configurations des piles	46
II.9.2 Géométrie planaire	47
II.9.3 Géométrie monolithique	48
II.10 Applications des piles à combustible	49
II.10.1 Stationnaire	49
II.10.2 Transport	50
II.10.3 Portable	50
II.11 Avantage et l'inconvénient des piles à combustible	50
II.12 Conclusion	52
Chapitre III: DIMENSIONNEMENT ET MODÉLISATION DU PAC SOFC	
III.1 Introduction	53
III. 2 Dimensionnement du stack pile à combustible	54
III.2.1 Détermination du nombre de cellules	54
III.2.2 Détermination de la surface des cellules	56
III.3 Présentation des modèles de la pile à combustible	59
III.3.1 Modèle d'Aguiar	59
III.3.2 Modèle d'A.C. Burt	61
III.3.3 Tableau récapitulatif	62
III.4 Performances réelles d'une cellule SOFC	62
III.4.1 Pertes ohmiques	63
III .4.2 Pertes d'activation	63
III 4.3 Pertes de concentration	64
III.4.4 Expression de la tension de sortie de la pile à combustible	64
III.5 Simulation de la pile SOFC	65
III 5.1 Résultats de simulation sous MATLAB	66
III.6 Conclusion	69
Conclusion générale	70

LISTE DES FIGURES

Figures	Titres des figures	Pages
Figure I.1	: Part de l'énergie renouvelable sans la production électrique mondiale en 2011	04
Figure I.2	: Part estimée de l'énergie renouvelable dans consommation énergétique en 2010	04
Figure I.3	: Nouveaux investissement mondiaux dans l'énergie renouvelable en 2004-2011	05
Figure I.4	: Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	06
Figure I.5	: Capacité hydroélectrique mondiale pour les cinq pays de tête 2011	09
Figure I.6	: La production de l'énergie de biomasse	09
Figure I.7	: La production mondiale des agglomérés de bois en 2000-2011	11
Figure I.8	: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	13
Figure I.9	: La capacité mondiale totale de l'énergie éolienne en 1996-2011	14
Figure I.10	: Part de marche des premiers de l'éolienne en 2011	14
Figure I.11	: Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique	17
Figure I.12	: Principe d'une cheminée solaire	19
Figure I.13	: Schéma de la production de l'électricité	20
Figure I.14	: Principe d'une tour solaire thermique	20
Figure I.15	: Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque	21
Figure I.16	: Principe élémentaire d'une pile	24
Figure I.17	: Réactions produites	24
Figure II.1	: Stack d'une pile à combustible à membrane	35
Figure II.2	: Géométrie des piles PAFC	36
Figure II.3	: Technologie circulaire	38
Figure II.4	: Technologie plane	39
Figure II.5	: Pile de Sulzer Hexis	39
Figure II.6	: Schéma de principe de fonctionnement d'une pile de type SOFC.	41
Figure II.7	: Eléments d'une PAC	44
Figure II.8	: Schéma de principe de la géométrie tubulaire	46
Figure III.1	: Caractéristique Tension/Courant (tension par cellule)	55
Figure III.2	: Caractéristique Puissance/Courant (puissance par cellule)	55
Figure III.3	: Géométrie d'une cellule de la pile SOFC avec logiciel Comsol	57
Figure III.4	: Fraction Molaire Oxygène avec logiciel Comsol	57
Figure III.5	: Fraction Molaire hydrogène avec logiciel Comsol	58
Figure III.6	: Puissance de la pile SOFC avec logiciel Comsol	58
Figure III.7	: Circuit équivalent de la pile SOFC	65
Figure III.8	: Caractéristique Tension Courant de la pile SOFC avec variation de la température	66
Figure III.9	: Puissance de la pile SOFC avec variation de la température	67
Figure III.10	: Pertes d'activations en fonction de la variation de la température	67
Figure III.11	: Pertes de concentration avec variation de la température	68
Figure III.12	: Pertes Ohmiques avec variation de la température	68

Notations et symboles :

Abréviations

PAC : Pile à Combustible

PEM : Proton Exchange Membrane (Membrane d'échange de protons)

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Pile à Combustible à Membrane d'Echange de Protons)

DMFC : Direct Methanol Fuel Cell (Pile à Combustible au Méthanol Direct)

DEFC : Direct Ethanol Fuel Cell (Pile à Combustible à l'Ethanol Direct)

MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell (Pile à Combustible à carbonate fondu)

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell (Pile à combustible à oxyde solide)

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell (Pile à combustible à acide phosphorique)

AFC : Alkaline Fuel Cell (Pile à combustible alcaline)

PV : Photovoltaïque

Symboles	Unité	Désignation
P_{pile}	W	Puissance électrique brute du stack
N_{celle}	—	Nombre de cellules de l'empilement
E_{celle}	V	Tension par cellule
J	A/m ²	Densité de courant
S_{pile}	m ²	Surface active des cellules
V_{bus}	V	Tension du bus
$U_{stack-ch}$	V	Tension du stack en pleine charge
E_{ch}	V	Tension de la cellule en pleine charge
P_{utile_max}	W	Puissance utile maximale soit 400k
$I_{pac-max}$	A	Courant maximal
I	A/cm ²	La densité de courant débité par la pile
R	Ω	La résistance ohmique totale d'une cellule
R_e	Ω	La résistance au flux d'ions dans O ⁻² l'électrolyte
R_a	Ω	La résistance au flux d'électrons e ⁻ dans l'anode
R_c	Ω	La résistance au flux d'électrons e ⁻ dans la cathode
R_{cont}	Ω	La résistance de contact des composants de la pile
r_0	Ω	La résistance interne à la température
α	-	Coefficient de transfert de charges
i	A/cm ²	La densité de courant débité par la pile
i_0	A/cm ²	La densité de courant
O_2	-	Oxygène
H2	-	Hydrogène
H2O	-	L'eau
CO2	-	Le dioxyde de carbone
CO	-	Le monoxyde de carbone
2CO	-	Le gaz carbonique

Introduction général

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

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

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

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

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

Le deuxième chapitre, concerne sur les piles à combustibles, son principe de fonctionnement, ses domaines d'application et leur modèle, sa structure et ses caractéristiques ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes utiliser dans le futur.

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

Chapitre I

LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.1 Introduction

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs

Comparées aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années, fournissant ainsi des alternatives intéressantes aux sources actuelles d'énergie.

I.2 Les énergies renouvelables

Etant donnée l'absence de la définition unique concernant l'énergie renouvelable on peut adopter les définitions suivantes :

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et de la biomasse, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [1].

Une source d'énergie qui se régénère assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont définies comme un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'aboutit pas à l'épuisement de la source originelle et est renouvelable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont multiples et fondamentalement diverses par leurs mécanismes physiques chimiques ou biologiques [2].

Les sources renouvelables d'énergie sont désignées comme une énergie disponible à partir de processus de conversion énergétique permanent et naturel, économiquement exploitable dans les conditions actuelles ou dans un avenir prévisible [3].

Les figures ci-dessous montrent les énergies renouvelables illustrées par des données chiffrées à l'échelle mondiale.

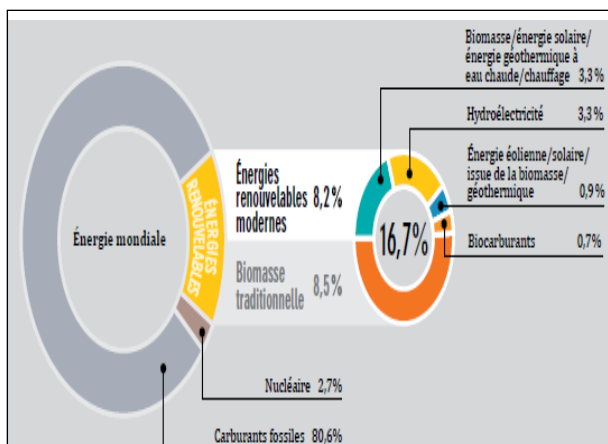


Figure I.1 : Part de l'énergie renouvelable sans la production électrique mondiale en 2011

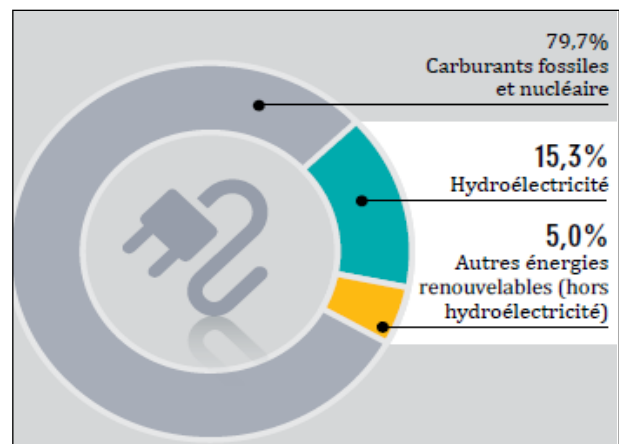


Figure I.2: Part estimée de l'énergie renouvelable dans consommation énergétique en 2010

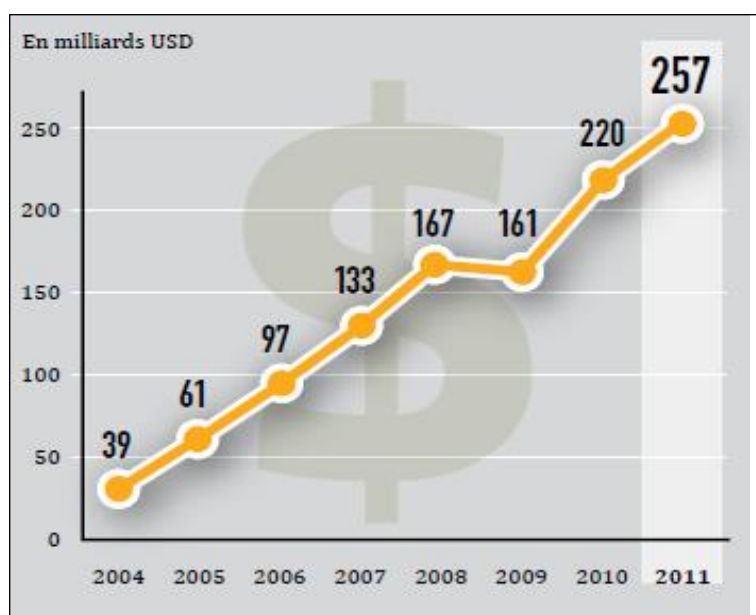


Figure I .3 : Nouveaux investissement mondiaux dans l'énergie renouvelable en 2004-2011

I.3 Croissance des énergies renouvelables dans les divers secteurs de la consommation

Les sources d'énergies renouvelables ont fortement augmenté pour représenter, selon les estimations, 16,7% de la consommation énergétique finale mondiale en 2010. Sur ce total, la part des énergies renouvelables modernes, en nette augmentation ces dernières années, est estimée à 8,2 %, contre seulement 8,5 % pour la biomasse traditionnelle en léger déclin. Durant 2011, les énergies renouvelables modernes ont continué de progresser sensiblement dans l'ensemble des secteurs de la consommation: l'électricité, le chauffage, le refroidissement, et le transport. Dans le secteur électrique, les énergies renouvelables représentent près de la moitié du total estimé de la capacité électrique mondiale ajoutée durant 2011 (208 gigawatts/GW). L'énergie photovoltaïque éolienne et solaire atteint respectivement près de 40 % et 30 % de la capacité des nouvelles énergies renouvelables, devant l'hydroélectricité (près de 25 %). À la fin 2011, le total de la capacité mondiale des énergies renouvelables dépassait le seuil de 1 360 GW, en hausse de 8 % par rapport à 2010. Les énergies renouvelables atteignent plus de 25 % de la capacité énergétique totale mondiale (estimée à 5 360 GW en 2011), et fournissent, selon les estimations, 20,3 % de l'électricité mondiale. Les énergies renouvelables non liées à l'hydroélectricité ont dépassé le seuil de 390 GW, enregistrant une augmentation de leur capacité de 24 % durant 2010.

I.4 Les différents types des énergies renouvelables

I.4.1. L'énergie hydraulique

Les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le Soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entrainer des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé...) [4].

I.4.1.1 Principe de fonctionnement

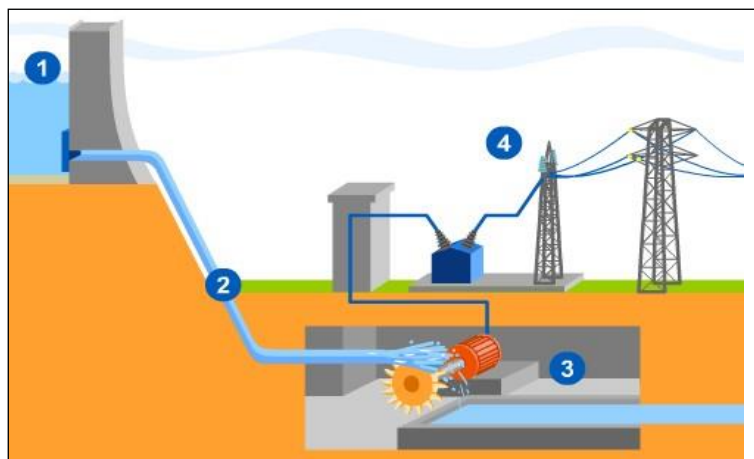


Figure I.4: Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

1. La retenue de l'eau

Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.

2. La conduite forcée de l'eau

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas.

La plupart des centrales hydrauliques en France sont automatisées. Chaque centrale se met en marche selon un programme pré-défini en fonction des besoins d'électricité.

3. La production d'électricité

À la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute et du débit de l'eau. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

4. L'adaptation de la tension

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension. L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite.

I.4.1.2 Les avantages et les inconvénients :

Avantages

- Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenu. Ce procédé permet de stocker l'énergie électrique en surplus du réseau en une énergie potentielle qui sera transformée à nouveau.
- Démarrage et arrêt des centrales très rapides.
- Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.

- Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports). Facilité d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modérée.
- Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.
- Souplesse d'exploitation, qu'accroissent encore les progrès de l'automatisme et des télécommandes.

Inconvénient

- Modification du débit et du niveau de l'eau.
- Perturbation de la faune et de la flore.
- Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.
- Risque pour les personnes en aval lié au barrage [4].

I.4.1.3. Rendement et production mondiale

Une capacité ajoutée de 25 GW, selon les estimations, est apparue en 2011, suscitant un accroissement de la capacité mondiale installée de près de 2,7 %, à environ 970 GW. L'hydroélectricité continue de produire plus d'énergie que toute autre ressource renouvelable, avec une production estimée à 3 400 TWH durant 2011. L'Asie a été au premier rang des régions les plus actives dans l'élaboration de projets, même si les marchés plus anciens se sont concentrés sur la modernisation des stations existantes en vue de l'amélioration du rendement et de l'efficacité. L'hydroélectricité fournit de plus en plus de services d'équilibrage, en ayant notamment recours à l'accroissement de la capacité de pompage, dans l'objectif de faire face à l'utilisation accrue des ressources solaires et éoliennes. Les entreprises ont signalé un accroissement de leurs ventes en 2011, et les grands groupes ont investi dans de nouvelles stations, et acquis de petites sociétés en vue de rattraper des retards représentant plusieurs milliards de dollars.

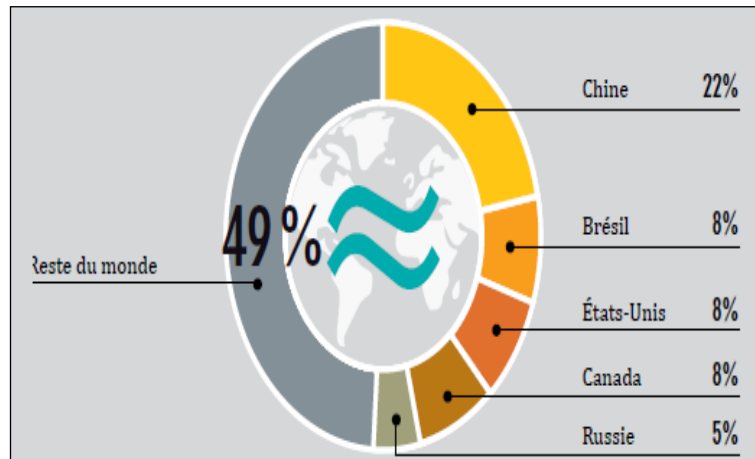


Figure I.5: Capacité hydroélectrique mondiale pour les cinq pays de tête 2011

I.4.2. L'énergie biomasse

La biomasse se définit comme « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers ».

Toutes ces matières organiques peuvent dégager de l'énergie soit par combustion directe ou suite à une ou plusieurs étapes de transformation.

I.4.2.1. Principe de fonctionnement

Les principaux modes de génération de cette énergie biomasse, sont présentés sur la figure (I.6)

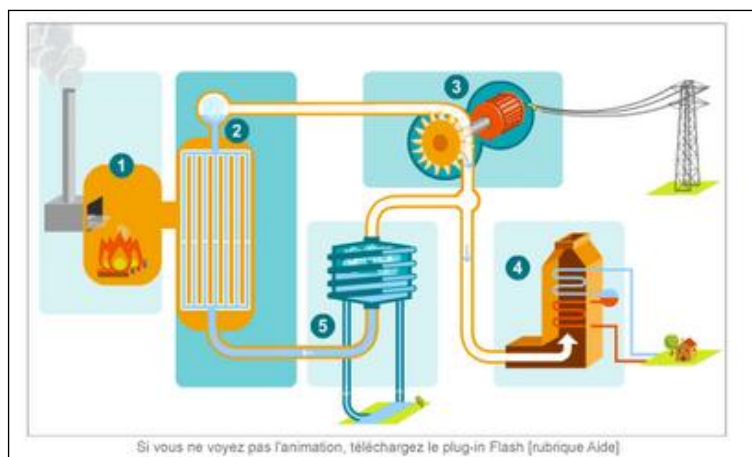


Figure I.6: La production de l'énergie de biomasse

1. La combustion

La biomasse brûle dans une chambre de combustion en dégageant de la chaleur.

2. La production de vapeur

La chaleur transforme l'eau de la chaudière en vapeur

3. La production d'électricité

La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité transportée dans les lignes.

4. La production de chauffage

A la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est utilisée pour le chauffage grâce à un générateur.

5. Le recyclage

Le reste de la vapeur est transformée en eau grâce à un condenseur.

I.4.2.2 Rendement et production mondiale

La capacité de l'énergie issue de la biomasse a augmenté de quelque 66 GW en 2010, pour atteindre près de 72GW à la fin 2011. Les États-Unis ont été, dans le monde, au premier rang des producteurs d'électricité issue de la biomasse, devant les pays de l'UE, le Brésil, la Chine, l'Inde et le Japon. La plupart des pays africains producteurs de sucre ont produit de l'électricité et assuré le chauffage en ayant recours à la production combinée chaleur-force basée sur la bagasse. Les améliorations apportées, ces dix dernières années, à la logistique prévalant dans la collecte, le transport et le stockage de la biomasse, et l'augmentation des échanges commerciaux internationaux (en particulier pour les agglomérés) ont contribué à supprimer les barrières pesant sur la taille des entreprises. La taille des installations a pu ainsi s'accroître dans plusieurs pays.

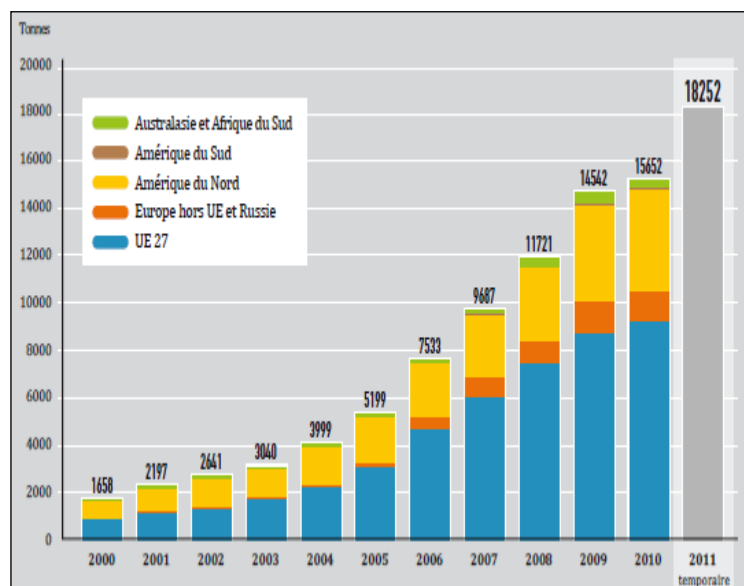


Figure I.7: La production mondiale des agglomérés de bois en 2000-2011

I.4.2.3. Les avantages et les inconvénients :

Avantages

- C'est une matière première qui est renouvelable. Elle peut être produite indéfiniment en l'utilisant raisonnablement et de façon durable ;
- Biodégradable rapidement ;
- Produits issus de la biomasse sont souvent non-toxiques ;
- Elle dégage autant de CO₂ qu'elle n'en absorbe (les plantes absorbent du CO₂ lors de la photosynthèse) ;
- La biomasse est l'une des énergies renouvelables les plus rentables ;
- La biomasse est disponible partout ;
- La biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie [3].

Inconvénients

- Leur rendement énergétique est assez faible ;
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole ;
- Dégage du CO₂ ;

- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement ;
- Provoque la pollution des eaux et des sols ;
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

I.4.3 L'éolienne

L'humanité utilise le vent depuis la nuit des temps (bateau à voile, moulin à vents...).

C'est certainement la forme d'énergie renouvelable qui connaît le plus fort développement les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (plus 55% en productivité, moins 50% en niveau de bruit)

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique. Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de forces moyennes fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au-delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes.

1.4.3.1. Fonctionnement

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

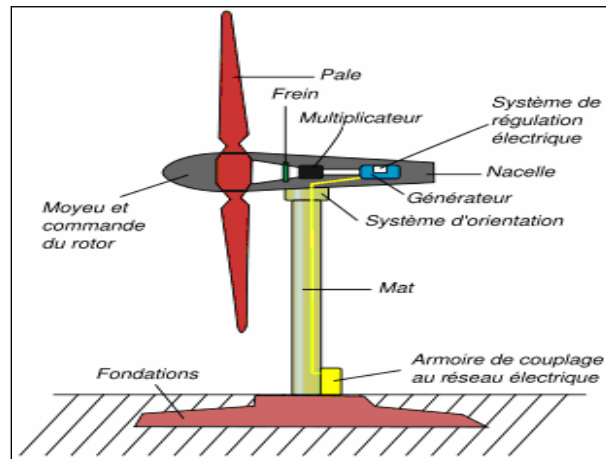


Figure I.8: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

I.4.3.2. Rendement et production mondiale

La capacité de l'énergie éolienne a augmenté de 20 % en 2011, pour atteindre environ 238 GW en fin d'année, représentant ainsi la plus importante capacité ajoutée en matière de technologies basées sur les énergies renouvelables. La Chine a assumé près de 44 % du marché mondial (avec des capacités ajoutées légèrement moindres qu'en 2010), devant les États-Unis et l'Inde, l'Allemagne restant le principal marché en Europe. Malgré sa part de marché relativement modeste, le secteur de l'énergie éolienne offshore a continué de croître, en s'appuyant sur l'utilisation de turbines plus volumineuses et la réalisation de mouvements en eau plus profonde à une distance plus grande des côtes. La dynamique de l'accroissement de la taille des projets éoliens et des turbines afférentes s'est poursuivie. De même, l'utilisation de turbines de petite taille s'est accrue et l'intérêt porté aux projets communautaires d'énergie éolienne se consolide dans plusieurs pays.

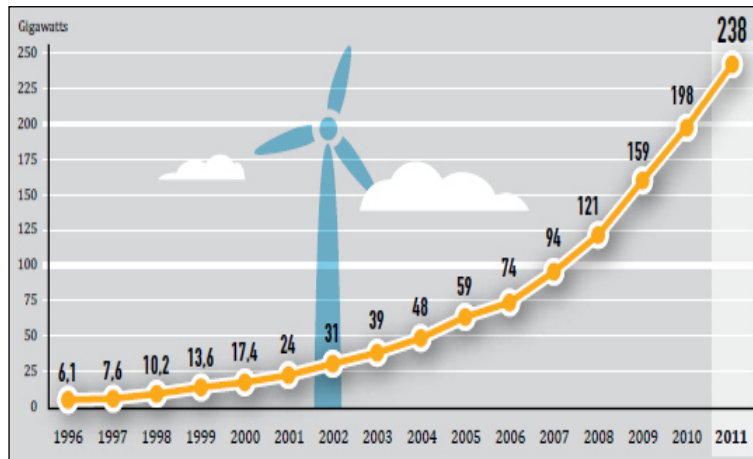


Figure I.9: la capacité mondiale totale de l'énergie éolienne en 1996-2011

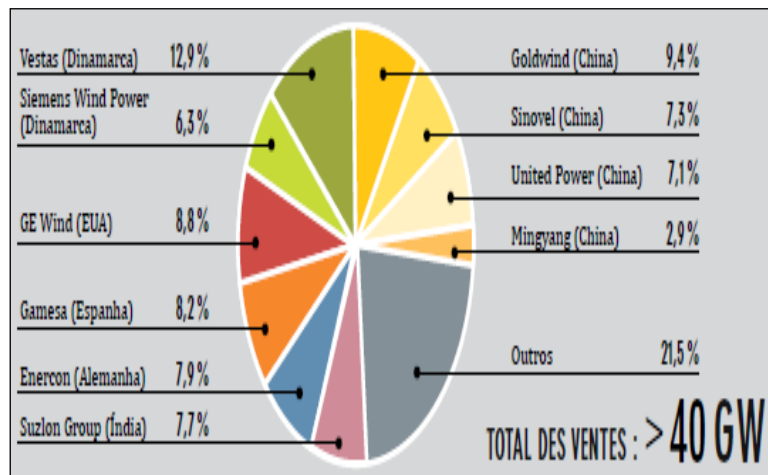


Figure I.10: part de marche des premiers de l'éolienne en 2011

I.4.3.3 Les avantages et les inconvénients :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

- **Avantage**

L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [3].

- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc. ...

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique-Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [5].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [3].

- **Inconvénients**

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif .Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils extrémités de pale, mécanismes de transmission etc....
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

I.4.4. L'énergie géothermique

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. A part cela il existe également la géothermie volcanique. En général, l'énergie géothermique est exploitée en pompant en utilisant des puits de forage de l'eau chaude provenant d'une zone du sous-sol poreuse imprégnée d'eau très chaude. La chaleur produite sert dans la plupart des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments. Au cas de températures au-dessus de 150°C la production d'électricité est possible, la puissance installée était de 8 GW électriques en 1998 pour le monde entier [5].

La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol soit poreux ou perméables et contiennent des aquifères.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : [6]

- * Haute (>180°C).
- * Moyenne (>100°C).
- * Basse (>30°C).
- * Très basse énergie (<30°C).

I.4.4.1. La production d'électricité à base géothermique

Ce sont les centrales géothermiques qui autorisent ce procédé de récupération. La géothermie à haute énergie (température supérieure à 150°), utilise la vapeur émise par les fortes températures des eaux géothermales pour produire de l'électricité. La géothermie à moyenne énergie (entre 100 et 150°) quant à elle, utilisera un fluide intermédiaire [2].

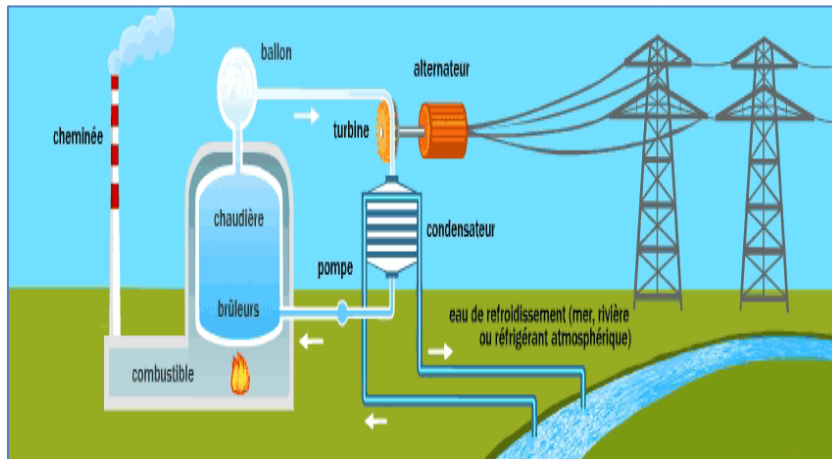


Figure I.11: Principe de fonctionnement d'une centrale géothermique

I.4.4.2. Rendement et production mondiale

L'énergie géothermique a produit, selon les estimations, 205 TWh (736 PJ) en 2011, dont un tiers sous forme d'électricité (avec une capacité estimée à 11,2 GW) et deux tiers sous forme de chaleur. Pas moins de 78 pays ont utilisé l'énergie géothermique directe en 2011. La majeure partie de la croissance enregistrée dans l'utilisation directe a reposé sur les pompes à chaleur géothermiques, lesquelles assurent le chauffage et le refroidissement et connaissent un taux de croissance annuel de 20 % en moyenne. L'électricité géothermique n'a que peu progressé en 2011, mais son taux d'expansion devrait s'accélérer grâce aux projets en cours d'élaboration sur les marchés traditionnels et aux initiatives ciblant les nouveaux marchés de l'Afrique de l'Est et d'autres régions. Si l'expansion de l'industrie géothermique est freinée par la prévalence des risques élevés inhérents au développement des nouvelles ressources, et à l'insuffisante sensibilisation à son égard, l'électricité géothermique progresse néanmoins grâce au développement des nouvelles technologies telles que les stations à cycle binaire et les capacités de développement hydraulique, lesquelles accroissent la gamme des ressources exploitables et améliorent la rentabilité des stations existantes.

I.4.4.3. Les avantages et les inconvénients

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques et elle représente comme une source d'énergie constante de forte puissance. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Elle s'apparente davantage à une ressource minière, par la réalisation de ses forages profonds, par les lourds investissements qui la caractérisent et par son exploitation qui consiste à extraire les

calories du noyau terrestre et par le fait qu'elle est épuisable. Et par contre la géothermie est limitée au nombre de site.

I.4.5. L'énergie solaire

La surface de la terre reçoit chaque année 1,61 018 kWh (équivalent à une puissance continue de 180 106 GW), 30% sont directement réfléchis dans l'espace, 45% sont absorbés, convertis en chaleur et rayonnés dans l'infrarouge. Les 25% restant alimentent les cycles hydrologiques (24%) et la photosynthèse (0,06%) soit l'équivalent d'une moyenne de 45 106 GW. L'énergie rayonnée au sol vaut environ 720,1015 kWh. Selon les régions, l'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m², de 1100 kWh à 2300 kWh/an, soit une puissance moyenne (répartie sur l'année, en tenant compte des alternances jour-nuit et des périodes nuageuses) de 120 à 260 W par m² et une puissance crête de plus d'1 kW/m². Cette énergie peut être directement transformée en chaleur avec un excellent rendement ou, encore, en électricité mais dans des conditions nettement moins bonnes. Une partie de cette énergie sert à la photosynthèse : 950,1012 kWh, ce qui conduit à la production lente de matières combustibles comme le bois ou les fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Les combustibles fossiles à la différence du bois sont le fruit d'une longue accumulation et ne peuvent être considérés comme renouvelables [4].

I.4.5.1. Rendement et production mondiale

La production mondiale moyenne s'élève à 91 GWh / jour en 2010 dont 87 GWh / jour de photovoltaïque et 4 GWh / jour de solaire thermodynamique.

Producteurs majeure en 2010:

- Allemagne (12 TWh) ;
- Espagne (7 TWh) ;
- Japon (4 TWh).

0,7 % : proportion d'électricité d'origine solaire dans la production d'électricité renouvelable mondiale en 2010.

+38 % : taux de croissance annuel moyen de la production d'électricité d'origine solaire entre 2000 et 2010. Il s'agit de la plus forte hausse parmi les énergies renouvelables devant l'éolien (+27% par an en moyenne). Cette augmentation doit être relativisée par la faible production solaire.

38 450 MW : puissance mondiale installée en 2010. Elle a pratiquement quintuplée en 2006 et 2010.

La proportion de la puissance solaire totale installée dans l'Union européenne est de 76% en 2010.

4 m² de capteurs thermiques permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de 4 personnes sous nos latitudes et 10 m² assurent le chauffage d'une maison de 100 m².

Pour rappel : il existe actuellement 2 voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité.
- le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique qui se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

I.4.5.2. La tour solaire (cheminée solaire)

Les cheminées solaires sont des centrales électriques qui utilisent la force d'un courant d'air ascendant. L'air est chauffé par effet de serre dans un collecteur exposé au soleil. Sa masse volumique baisse et l'air est accéléré et amené vers le milieu du collecteur, où il monte dans la cheminée en passant par des turbines (fig 1.12). Celles-ci transforment l'énergie de l'écoulement en énergie mécanique et actionnent des générateurs pour produire de l'électricité [3].

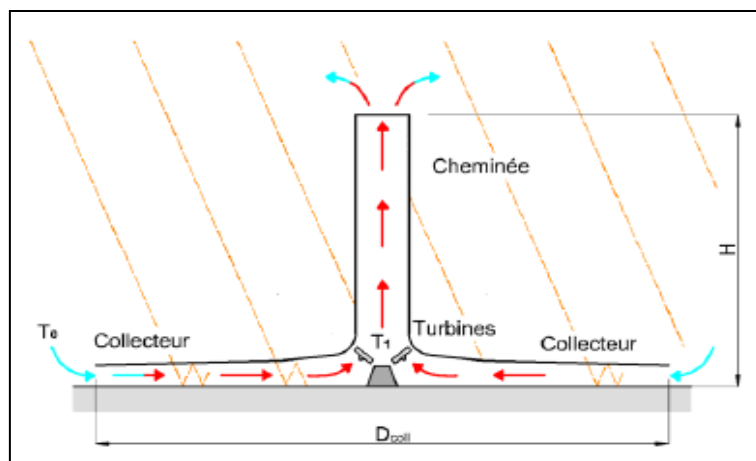


Figure I.12: principe d'une cheminée solaire

Le principe de la cheminée solaire a été développé par l'espagnol Isidoro Cabanyes en 1903.

L'allemand Jörg Schlaich a développé et construit la première et unique centrale de ce genre à Manzanares, en Espagne.

Le rayonnement du soleil chauffe l'air et le sol sous le toit vitré. Pour augmenter l'inertie thermique de la centrale, il est possible d'installer au sol des tuyaux remplis d'eau (fig1.13). Ceci permet de produire de l'électricité aussi pendant la nuit.

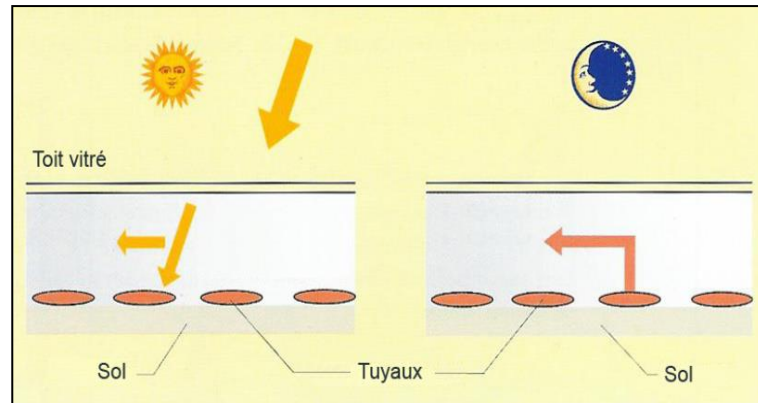


Figure I.13: schéma de la production de l'électricité

I.4.5.3. La tour solaire thermique

Une tour solaire thermique est une centrale électrique qui concentre le rayonnement du soleil à l'aide de miroirs réglables, pour ainsi chauffer de l'eau qui se vaporise, elle sert à convertir la chaleur en énergie électrique grâce à des turbines situées en bas de la tour. La vapeur d'eau va ensuite actionner une turbine.

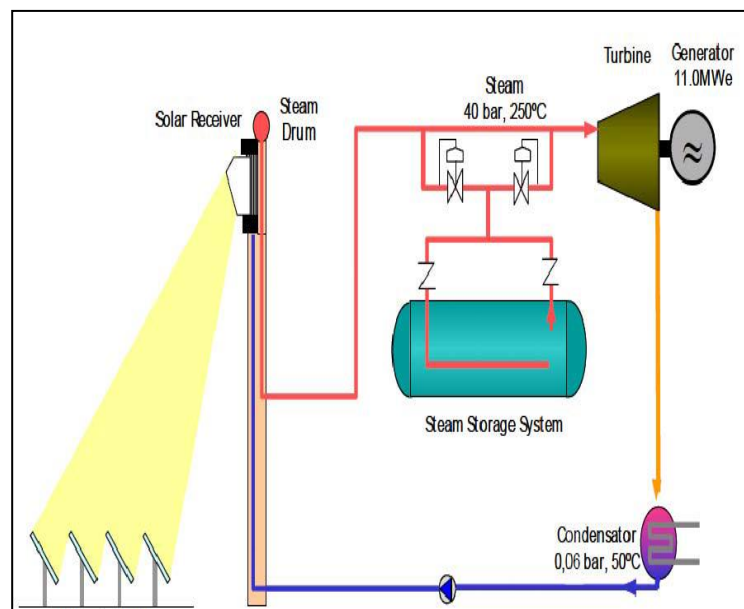


Figure I.14: Principe d'une tour solaire thermique

I.4.6. L'énergie photovoltaïque

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standards fournissent une puissance moyenne de 100 W par m² (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production.

I.4.6.1. Principe de la conversion photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

Une cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs [7]

La figure (I.14) illustre une cellule PV typique.

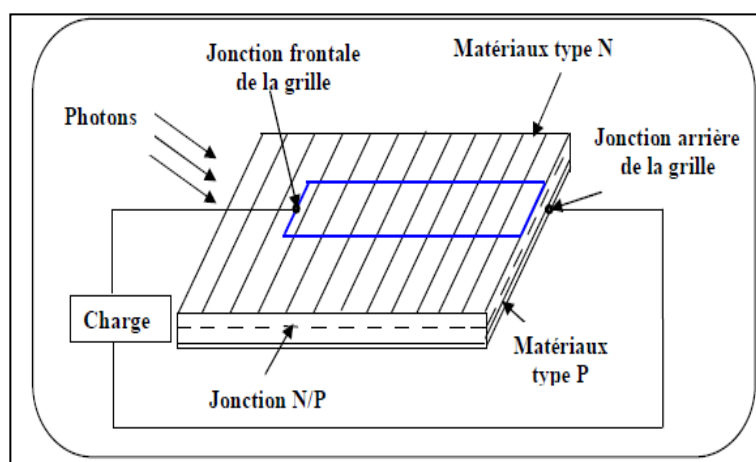


Figure I.15 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque

I.4.6.2. Technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.
- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

I.4.6.3. Les avantages et les inconvénients d'une installation PV

- **Avantages**

- d'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milli-Watt au Méga-Watt.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

- **Inconvénients**

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- tributaire des conditions météorologiques.
- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.4.7 Pile à combustible:

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse. Sir William Grove est souvent considérée comme l'inventeur de la pile à combustible en 1839.

Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique qui présente une énergie 3 fois plus importante que l'essence, en une énergie électrique utilisable directement et une énergie thermique qu'il est possible de valoriser [8].

I.4.7.1 Principe d'une pile à combustible

Une pile à combustible permet de convertir directement de l'énergie chimique en énergie électrique. Par ailleurs, le combustible est fourni en continu à la différence des piles traditionnelles. On peut ainsi obtenir du courant de façon continue. Pour utiliser des combustibles type méthanol ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement bien plus élevées: 800 à 1000°C. La réalisation de piles fonctionnant à de telles températures est problématique : on préfère donc utiliser de l'hydrogène [9].

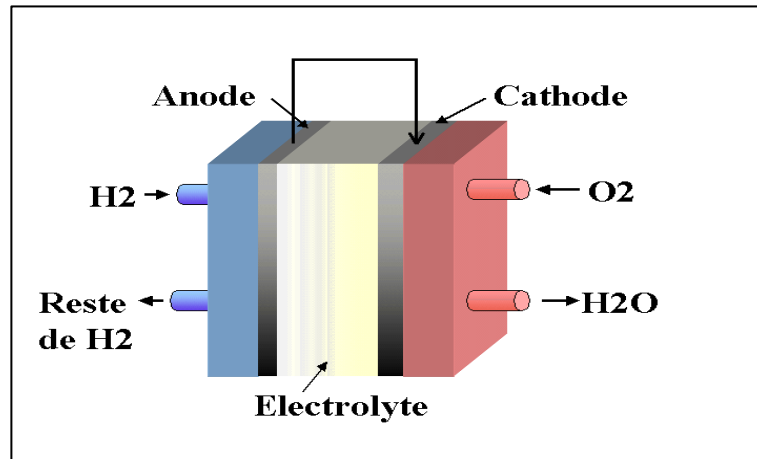


Figure I.16: Principe élémentaire d'une pile

I.4.7.2 Les principaux composants d'un PAC

Une pile à combustible est constituée des trois principaux éléments

- ✓ L'anode qui est alimentée par un combustible (hydrogène, méthanol, etc.) ;
- ✓ La cathode qui est alimentée par un comburant (oxygène) ;
- ✓ L'électrolyte, solide ou liquide, qui sépare les deux électrodes, assure la diffusion des ions intermédiaires de la réaction d'oxydation du combustible.

L'électrolyte doit empêcher le passage des électrons qui passent à travers le circuit électrique [10].

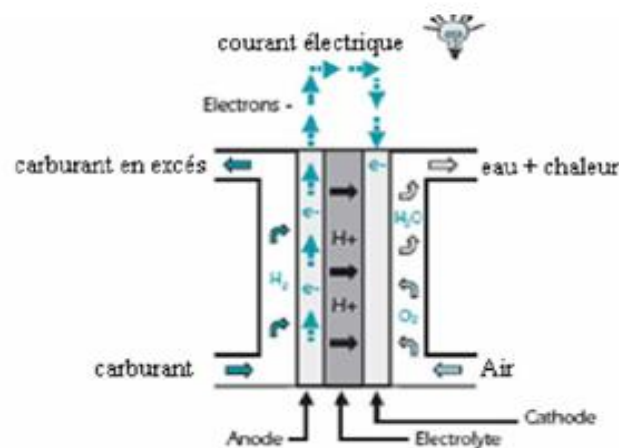


Figure I.17: Réactions produites [10]

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène) comme le montre la figure (I.17)

I.4.7.3 Types de piles à combustible

La classification des piles à combustible se fait généralement selon la nature de l'électrolyte, la température à laquelle la pile fonctionne et, d'autre part, le type d'ions assurant la conduction ionique. On trouve ainsi [8] :

- ✓ La pile à membrane échangeuse de proton (PEMFC, *Polymer electrolyte fuel cell*) (80°C)
- ✓ La pile à combustible alcaline (AFC, *Alkaline fuel cell*) (100°C)
- ✓ La pile à acide phosphorique (PAFC, *Phosphoric acid fuel cell*) (200°C)
- ✓ La pile à carbonates fondus (MCFC, *Molten carbonate fuel cell*) (700 °C)
- ✓ La pile à électrolyte solide (SOFC, *Solid oxyde fuel cell*) (800°C-1000°C) [8].

I.5 Conclusion

D'après ce que nous avons vu dans les paragraphes précédents, on peut conclure que le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Le CO₂ apparaissant comme le principal gaz responsable du renforcement de l'effet de serre, sa présence est trop importante dans les pays industrialisés et est principalement généré par la combustion de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel).

L'utilisation des sources d'énergies renouvelables semble être une solution adéquate car, c'est surtout l'usage des énergies fossiles qui renforce le phénomène d'effet de serre et donc le réchauffement de la planète. Encourager le développement de ces énergies, c'est parvenir à une indépendance énergétique qui ne peut être que positive à notre développement.

Chapitre II

GENERALITE SUR LA PILE A COMBUSTIBLE

II.1 Introduction

Les piles à combustible sont des générateurs électrochimiques qui permettent de convertir l'énergie chimique d'un combustible, comme l'hydrogène, en énergie électrique. L'utilisation de l'hydrogène pur comme combustible conduit théoriquement à une pile non polluante puisque le seul produit généré par la pile est alors de l'eau.

Une cellule élémentaire de pile à combustible se compose de 3 éléments:

- Deux électrodes,
- Un électrolyte.

Les deux électrodes sont placées de part et d'autre de l'électrolyte. Le combustible (hydrogène, méthanol) arrive à l'anode et la cathode est alimentée en oxygène (oxygène provenant de l'air, enrichi ou non en oxygène).

II.2 L’histoire de L’hydrogène et de la pile à combustible

II.2.1 L’hydrogène

L’hydrogène est l’élément le plus léger et le plus abondant dans l’univers. Mélangé à l’oxygène, il peut brûler en libérant de l’énergie. Il possède une grande quantité d’énergie par unité de poids, mais il contient une petite quantité d’énergie par unité de volume à température ambiante et à pression atmosphérique. Il n'existe pratiquement pas à l'état naturel sur terre et il est presque toujours combiné à d'autres éléments. C'est pourquoi il doit être produit par électrolyse, par reformage de vapeurs ou de gaz naturel, par gazéification de biomasse, ou par oxydation et reformage d’hydrocarbures ou de biomasse.

II.2.1.1 L’hydrogène comme vecteur énergétique

L'hydrogène représente le bon choix comme future source d'énergie non polluante pour de nombreuses raisons. En voici quelques-unes de ces raisons :

- L'hydrogène peut être produit à l'aide de plusieurs sources. Il est tout à fait renouvelable car l'élément de départ le plus abondant et le plus propre pour produire de l'hydrogène est l'eau ;
- L'hydrogène peut être stocké à l'état gazeux, à l'état liquide, ou à l'état solide. Il peut aussi être stocké dans différentes substances chimiques telles que le méthanol, l'éthanol, ou les hydrures métalliques ;
- Il peut être produit par le biais d’un convertisseur électrochimique ou converti en électricité avec un bon rendement ;
- Il peut être transporté et stocké avec autant de sécurité que les combustibles utilisés de nos jours [11].

II.2.1.2 Production d’hydrogène à partir des énergies fossiles

Aujourd’hui, 95 % de l’hydrogène est produit à partir des combustibles fossiles par reformage: cette réaction chimique casse les molécules d’hydrocarbure sous l’action de la chaleur pour en libérer l’hydrogène. Le vapo reformage du gaz naturel est le procédé le plus courant : le gaz naturel est exposé à de la vapeur d’eau très chaude, et libère ainsi l’hydrogène qu’il contient. Mais la production d’hydrogène par reformage a l’inconvénient de rejeter du gaz carbonique ($2CO$) dans l’atmosphère, principal responsable de l’effet de serre. Pour éviter cela, la production d’hydrogène à partir de combustibles fossiles supposerait

donc d'emprisonner le gaz carbonique par des techniques qui doivent faire l'objet de développements (on envisage, par exemple, de réinjecter le gaz carbonique dans les puits de pétrole épuisés). L'hydrogène produit à partir du gaz naturel est le procédé le moins cher. Mais son prix de revient reste le triple de celui du gaz naturel. Comme ce mode de production est polluant et comme les ressources en énergies fossiles sont appelées à décroître, diversifier les modes de production s'avère indispensable [12].

II.2.1.3 Production de l'hydrogène par décomposition de l'eau

Une voie possible consiste à dissocier les atomes d'oxygène et d'hydrogène combinés dans les molécules d'eau (selon la réaction $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$). Cette solution est la plus intéressante en termes d'émission de gaz à effet de serre... à condition toutefois d'opérer cette dissociation à partir de sources d'énergie elles-mêmes non émettrices de $2 CO$. Parmi les procédés envisageables, deux sont actuellement à l'étude : l'électrolyse et la dissociation de la molécule d'eau par cycles thermochimiques. L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un courant électrique. La production d'hydrogène par électrolyse peut se faire dans de petites unités réparties sur le territoire national. Pour être rentable, ce procédé exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. Actuellement, la production d'hydrogène par électrolyse coûte 3 à 4 fois plus chères que la production par reformage du gaz naturel. Elle souffre de plus d'un mauvais rendement global. L'électrolyse à haute température, qui est une amélioration de l'électrolyse classique, permettrait d'obtenir de meilleurs rendements. L'autre procédé de décomposition de la molécule d'eau par cycles thermochimiques permet d'opérer la dissociation de la molécule à des températures de l'ordre de 800° à 1000 °C. De telles températures pourraient être obtenues par le biais de réacteurs nucléaires à haute température de nouvelle génération, actuellement à l'étude, ou de centrales solaires [12].

II.2.1.4 Production directe à partir de la biomasse

La biomasse est une source de production d'hydrogène potentiellement très importante. Elle est constituée de tous les végétaux (bois, paille, etc.) qui se renouvellent à la surface de la Terre. L'hydrogène est produit par gazéification, laquelle permet l'obtention d'un gaz de synthèse ($CO + H_2$). Après purification, celui-ci donne de l'hydrogène. Cette solution est attrayante car la quantité de CO_2 émise au cours de la conversion de la biomasse en hydrogène est à peu près équivalente à celle qu'absorbent les plantes au cours de leur croissance ; l'écobilan est donc nul.

Un jour, il sera peut-être possible de produire de l'hydrogène à partir de bactéries et de micro algues. On a en effet découvert récemment que certains de ces organismes avaient la particularité de produire de l'hydrogène sous l'action de la lumière. Mais ce procédé n'en est aujourd'hui qu'au stade du laboratoire. Pour que l'hydrogène puisse réellement devenir le vecteur énergétique de demain, il faut qu'il soit disponible à tout moment, et en tout point du territoire. Mettre au point des modes de transport, de stockage et de distribution efficaces représente donc un enjeu crucial [12].

II.2.1.5 Les réseaux de distribution

La logique de distribution industrielle est en général la suivante: l'hydrogène est produit dans des unités centralisées, puis utilisé sur site ou transporté par pipelines. Le transport gazeux par pipelines permet de connecter les principales sources de production aux principaux points de son utilisation. Des réseaux de distribution d'hydrogène par pipelines existent déjà dans différents pays pour approvisionner les industries chimiques et pétrochimiques (environ 1050km en France, en Allemagne et au Benelux sont exploités par Air Liquide). La réalisation de ces infrastructures industrielles démontre que l'on dispose d'une bonne maîtrise de la génération et du transport d'hydrogène. Un bémol cependant: le coût du transport est Environ 50% plus cher que celui du gaz naturel et une unité de volume d'hydrogène transporte trois fois moins d'énergie qu'une unité de volume de gaz naturel. Pour distribuer l'hydrogène, des infrastructures de ravitaillement devront être développées. La mise au point de stations-service ne semble pas poser de problèmes techniques particuliers. Une quarantaine de stations pilotes existent d'ailleurs déjà dans le monde, en particulier aux États-Unis, au Japon, en Allemagne et en Islande. Il faudra cependant du temps pour que ces stations-service couvrent tout le territoire, ce qui risque de freiner le développement de l'hydrogène dans les transports. Pour pallier cette difficulté, certains constructeurs automobiles envisagent d'utiliser des carburants qui contiennent de l'hydrogène plutôt que l'hydrogène lui-même. Dans ce cas, l'étape de reformage a lieu à bord du véhicule. L'intérêt du procédé est alors réduit puisque le reformage produit du dioxyde de carbone, principal responsable de l'effet de serre [13].

II.2.1.6. Le stockage de l'hydrogène

Concevoir des réservoirs à la fois compacts, légers, sûrs et peu coûteux est déterminant puisque c'est précisément cette possibilité de stockage qui rend l'hydrogène particulièrement attractif par rapport à l'électricité. [14]

a. Stockage sous forme liquide

Conditionner l'hydrogène sous forme liquide est une solution a priori attrayante. C'est d'ailleurs sous cette forme qu'il est utilisé dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est, après l'hélium, le gaz le plus difficile à liquéfier. Cette solution entraîne une dépense énergétique importante et des coûts élevés qui rendent son application plus difficile pour le grand public. [14]

b. Stockage gazeux sous haute pression

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits: de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars aujourd'hui, et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. Mais cette compression a un coût. De plus, même comprimés à 700 bars, 4,6 litres d'hydrogène sont encore nécessaires pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence. Le risque de fuite d'hydrogène doit être également pris en considération compte tenu du caractère inflammable et explosif de ce gaz dans certaines conditions.

Or, en raison de la petite taille de sa molécule, l'hydrogène est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux. Il en fragilise, de plus, certains en les rendant cassants. L'étude du stockage haute pression consiste donc, pour l'essentiel, à éprouver la résistance des matériaux à l'hydrogène sous pression. Ces matériaux doivent être résistants mais relativement légers (mobilité oblige). Les réservoirs métalliques, utilisés actuellement, se révèlent encore coûteux et lourds au regard de la quantité de gaz qu'ils peuvent emporter. Des réservoirs non plus métalliques mais en matériaux polymères sont en cours d'élaboration pour répondre à ces contraintes. [14]

c. Stockage sous basse pression

Une alternative à l'utilisation de réservoirs sous pression gazeuse consisterait à stocker l'hydrogène dans certains matériaux carbonés ou dans certains alliages métalliques capables

d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire. Ce mode de stockage fait actuellement l'objet de nombreuses études. [14]

II.2.1.7 Les aspects de sécurité de l'hydrogène en tant que combustible

L'idée reçue est que « L'hydrogène est plus dangereux que les carburants traditionnels », ce postulat est à nuancer. Certes, comme tout combustible, l'hydrogène peut s'enflammer et/ou exploser en cas de fuite. Néanmoins, pour comparer les niveaux de dangerosité entre les carburants traditionnels et l'hydrogène, il convient de discerner la nature du risque évalué. [15]

II.2.1.8 Risque de fuite

La petite taille de la molécule d'hydrogène lui permet de s'échapper à travers des ouvertures de taille extrêmement faible. Le risque de fuite est donc plus élevé avec l'hydrogène qu'avec les autres combustibles.

II.2.1.9 Risque d'inflammabilité

Lorsqu'une nappe d'hydrogène se forme, le risque d'inflammabilité est nettement plus élevé que pour une nappe d'essence ou de gaz. L'énergie requise pour l'enflammer est environ 10 fois plus faible que pour le gaz naturel.

II.2.1.10 Risque de formation d'une nappe explosive

L'hydrogène se disperse plus rapidement que les carburants traditionnels. Il se dilue 4 fois plus vite dans l'air que le gaz naturel et 12 fois plus vite que les vapeurs d'essence. Cette volatilité est un facteur protecteur limitant la formation de nappes d'hydrogène. Rappelons que l'hydrogène est utilisé dans l'industrie. Des moyens de prévention permettent d'en limiter les risques, comme par exemple l'ajout d'un gaz inerte (tel que le CO₂) pour diminuer l'inflammabilité de l'hydrogène. L'utilisation d'un système de ventilation et l'inflammation délibérée de l'hydrogène évitent aussi la formation d'une nappe explosive. Si une réglementation est appliquée en milieu industriel, elle reste encore à définir pour les applications grand public de l'hydrogène.

Des mesures de sécurité en garantiraient l'utilisation, notamment dans le cas des véhicules à hydrogène et des infrastructures de distribution. [15]

II.2.1.11 Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'hydrogène

Voici quelques avantages et quelques inconvénients pour l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique. [16]

-Les avantages :

- Molécule très énergétique, (120 MJ/kg contre 50 MJ/kg pour le méthane) ;
- Ni polluant ni toxique ;
- Sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau ;
- C'est le plus léger des gaz (grande diffusion dans l'air = sécurité) ;
- Son transport est aisé (pipes) ;
- Selon son mode de production : réduction des émissions, en particulier le CO₂.

- Les inconvénients :

- Pas présent à l'état naturel ;
- Sa légèreté implique que sa densité énergétique volumique est moins favorable au stockage et au transport sous forme gazeuse, comparé au gaz naturel (10,8 MJ/m³ contre 39,8 MJ/m³ pour le méthane) ;
- Limite d'inflammabilité et de détonation avec l'air plus large que pour le gaz naturel (4,1% - 72,5vol.% et 5,1% – 13,5vol. % pour le méthane) ;
- Energie minimale à fournir pour l'enflammer (10 fois inférieure à celle d'hydrocarbures classiques) ;
- Flamme presque invisible ;
- Image dans le public, acceptabilité non acquise.

II.3 Historique des piles à combustible

La première pile à combustible fut construite peu avant 1840 par William Grove. Il s'agissait d'une pile hydrogène/oxygène à basse température avec des électrodes en platine et de l'acide sulfurique dilué comme électrolyte.

La principale matière première énergétique étant, à cette époque, le charbon, celui-ci sera rapidement utilisé comme combustible pour la mise au point des piles. En 1855 de nouvelles piles, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mises au point. Mais les

résultats ne sont satisfaisants pas et en 1939, le bilan est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène.

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement “ industriel ”. Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels. Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux. Ce fut d'abord la NASA qui les utilisa pour ses engins spatiaux dans les années 60: les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités.

Depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grosses entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics, dans le cadre de programmes nationaux ou multi nationaux de diversification énergétique ou de protection de l'environnement.

En 1998, l'offre commerciale est tous les jours plus importante, et si certaines filières semblent, dans l'état actuel de nos connaissances, proches de la Maturité économique, d'autres, très prometteuses, ont encore à résoudre des problèmes technologiques pour devenir compétitives, fiables et sûres.

La France participe de plus en plus activement avec la création d'un réseau pile à combustible (Réseau PACO) et l'implication de certaines de ses entreprises (Renault, Air Liquide, Helion..). La première pile française d'Helion a vu le jour en 2002, Plusieurs prototypes de pile à combustible sont étudiés pour des applications stationnaires de petite puissance. [17]

II.4 Généralités sur la pile à combustible

La pile à combustible est un générateur qui utilise un procédé électrochimique contrôlé pour convertir l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique. Elle met en jeu, sans les mélanger, un combustible et un comburant. Les plus utilisés en combustibles sont l'hydrogène, le méthanol, le monoxyde de carbone ; et en comburant on se sert généralement de l'oxygène pris dans l'air. La pile est composée de l'assemblage de plusieurs cellules élémentaires comportant une chambre cathodique et une chambre anodique séparée par deux électrodes, et un électrolyte solide ou liquide selon le type de pile. La différence entre une pile

à combustible et les autres piles est que sa structure ne réagit pas, elle reste invariante. Ici, les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence. La régulation consistera donc en la production permanente des réactifs et à l'évacuation des produits de réaction

II.5 Les différents types de piles et principe de fonctionnement

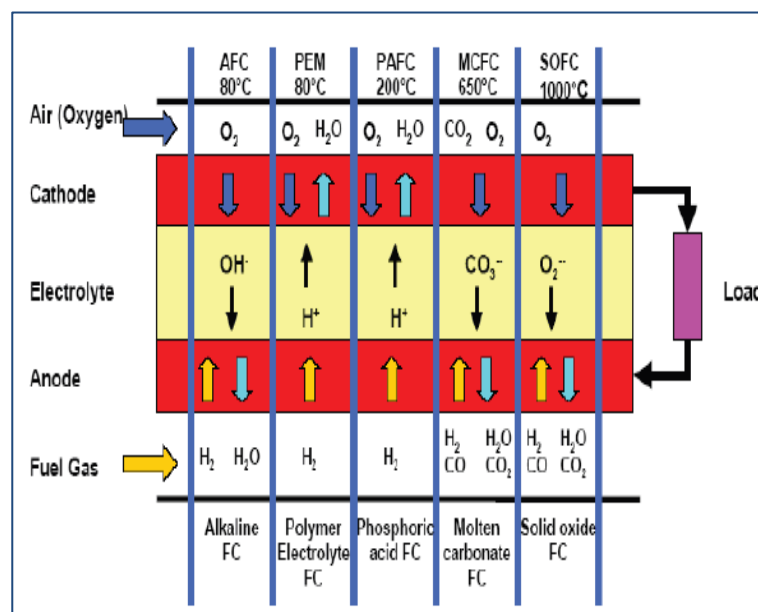


Tableau (II.1) : Différents Types de piles à combustible [18]

II.5.1 Pile à combustible à membrane (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) : PEMFC

Sa température de fonctionnement relativement basse laisse envisager une technologie simplifiée pour assurer un démarrage rapide et une évacuation aisée de la chaleur produite à température ambiante. Elle est multi usage et couvre un large spectre de puissance. Elle est insensible à la présence du CO_2 dans l'air. Elle a une durée de vie supérieure grâce à son électrolyte solide. Son fonctionnement se dégrade au-delà de 60° et 90°C. [18]

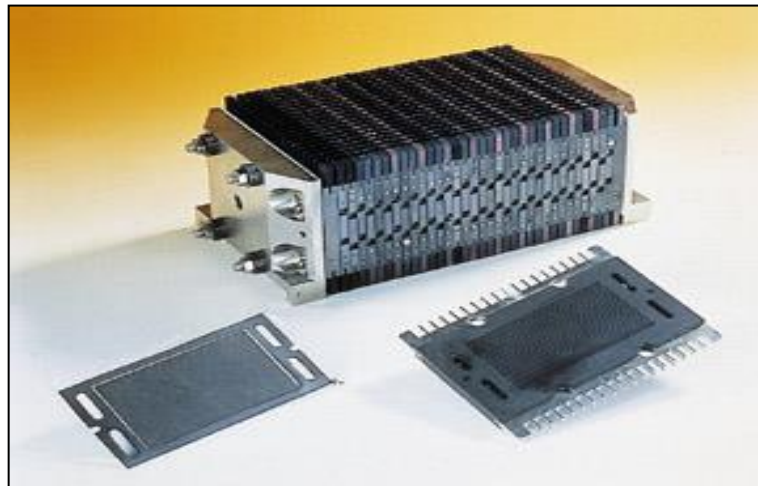


Figure II.1 : Stack d'une pile à combustible à membrane

II.5.2 Pile à combustible à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell) : MCFC

Elle est dite à « électrolyte liquide » et fonctionne à haute température (650°C). Cette température permet : la valorisation de calories rejetées à haut niveau thermique ; le reformage direct des combustibles types hydrocarbures. Quelques-uns de ses inconvénients sont la gestion d'un électrolyte physique et des risques de corrosion, la nécessité d'injecter du CO_2 à la cathode ce qui complique le système.

II.5.3 Pile à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell) : PAFC

De toutes les piles à combustible, elle est la plus développée et la plus proche de la commercialisation. Sa température de fonctionnement et sa taille sont particulièrement adaptées à un fonctionnement en cogénération de chaleur. Elle utilise l'acide phosphorique concentré comme électrolyte immobilisé dans une matrice de carbure de silicium. Ce liquide visqueux a l'avantage d'être peu volatil, d'avoir une bonne conductivité ionique à haute température et une bonne solubilité de l'oxygène. Etant donné que l'acide phosphorique se solidifie à 42°C , il faudra à tout moment maintenir la pile en veille chaude, même pendant les périodes d'arrêt.

Ses électrodes sont composées de grains de carbone catalysés avec le platine et immobilisés dans du poly-tétra-fluor éthylène pour les empêcher d'être noyés dans l'électrolyte.

Le rendement électrique de la pile est constant entre 50 et 100% de la puissance nominale et décroît avec le temps par suite de vieillissement.

Le Rendement thermique varie en fonction de la température d'entrée et de sortie de réseau de chaleur sur lequel la pile est raccordée.

Le vieillissement de la pile est le résultat des facteurs suivants :

- Une coalescence des particules de catalyseur réduisant la surface active de celui-ci.
- Une évaporation de l'électrolyte.
- Une corrosion des électrodes et de l'enceinte de l'empilement.

L'excédent d'hydrogène non utilisé dans le cœur est brûlé dans le reformeur.

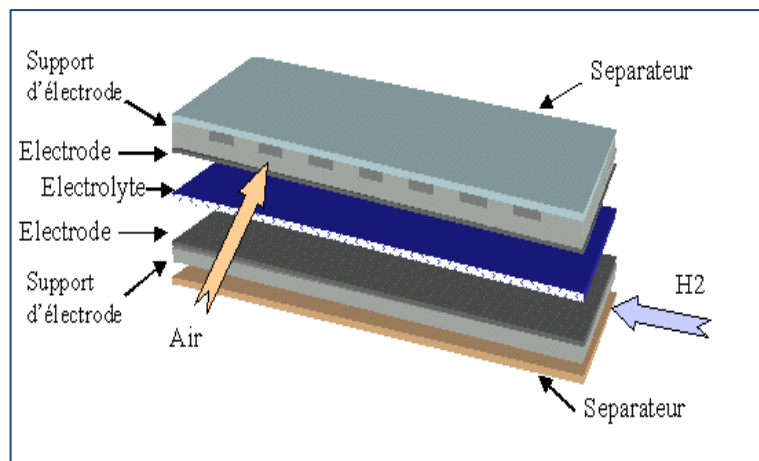


Figure II.2: Géométrie des piles PAFC

II.5.4 Pile alcaline (Alcaline Fuel Cell) : AFC

C'est une pile à combustible hydrogène/oxygène fonctionnant avec un électrolyte alcalin usuellement de la potasse concentrée. La caractéristique courant-tension est excellente grâce à la meilleure cinétique de la réduction de l'oxygène à la cathode. Cependant, le principal inconvénient avec les piles alcalines est qu'il faut purger les réactifs de toute traces de dioxyde de carbone, Qui réagit avec le milieu alcalin pour former des carbonates (nuisibles à la pile) ; ce qui diminuerait alors la durée de vie de la pile.

Elle travaille à basse température, environ 60 à 80°C, à pression atmosphérique, mais peuvent supporter jusqu'à 230°C à plus forte pression. Son rendement électrique est supérieur à 40%.

II.5.5 Pile à méthanol direct (Direct Méthanol Fuel Cell) : DMFC

Cette pile a généralement un électrolyte à acide fort pour rejeter le gaz carbonique produit par la réaction. Une pile à combustible à utilisation directe du méthanol peut générer de 300 à 500 milliwatts d'énergie par centimètre cubique. Des piles mises ensemble fourniront l'énergie nécessaire pour tous les besoins des watts et des kilowatts pour les applications véhiculaires et immobiles.

La création de combustible liquide des piles à combustible à utilisation directe du méthanol a plusieurs avantages sur le combustible de gaz. Une pile à combustible à utilisation directe du méthanol (DMFC) :

- Élimine vaporiseur de combustible.
- Élimine les pressions hautes et les températures hautes. Les DMFC opèrent effectivement à température ambiante et basse pression
- Élimine les systèmes complexes de l'eau et du management thermal, qui sont nécessaires pour maintenir l'équilibre de température et de pression dans les piles à combustible du type réformateur.

À cause de ceci, la pile à combustible :

- Élimine la nécessité pour le chauffage intérieur et les plaques de refroidissement.
- Élimine le processus d'humidification de la technologie réformateur, sans lequel les membranes deviennent sèches. L'état liquide de DMFC fournit une baignoire constante pour les membranes.
- Baisse la taille et les poids du système, avec l'élimination du réformateur, qui est très grand et chère.
- Utilise une bi plaque qui peut être construite des non-métaux légères et flexibles, qui coûtent moins que les métaux.
- Cette pile présente certes l'avantage de permettre un stockage liquide du combustible, mais l'inconvénient d'une réaction anodique très lente entraînant une forte diminution de la tension de la pile et donc de la puissance. De nouveaux catalyseurs toujours à base d'alliages binaires ou ternaires de platine sont développés pour tenter de résoudre ce type de problèmes. [19]

II.5.6 Pile à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell) : SOFC

Ce sont les piles qui travaillent à plus haute température (de 800° à 1000°C). Cette température est nécessaire pour permettre à l'électrolyte d'avoir une conductivité suffisante. Les catalyseurs utilisés sont à base d'oxydes et de nickel, insensible au polluant. Des efforts sont menés pour envisager une densité de puissance élevée et un rendement électrique proche de 60%. De plus la chaleur utile peut être récupérée à un niveau de température suffisant pour l'utilisation industrielle.

On trouve plusieurs technologies de SOFC :

- **La technologie cylindrique** : Ici un tube sert de support à l'ensemble qui l'entoure sous forme de couches concentriques.

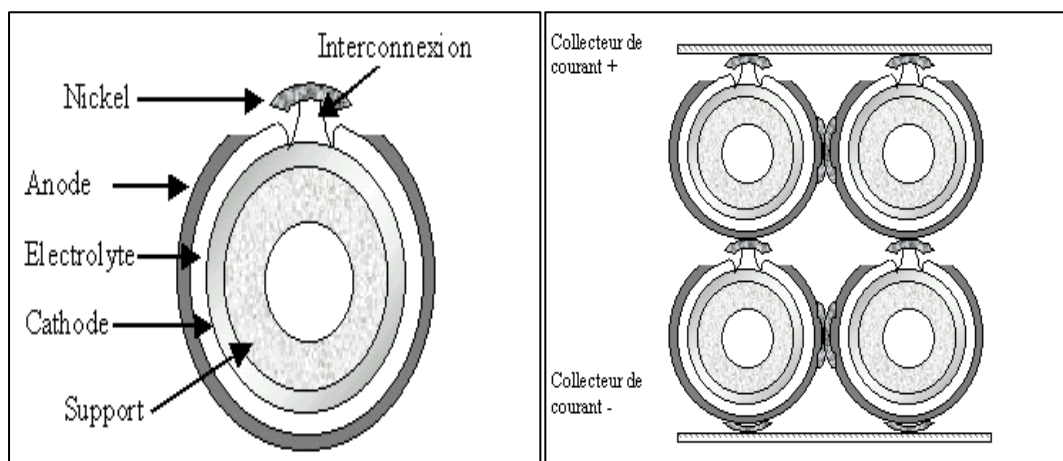


Figure II.3: Technologie circulaire

- **La technologie plane** : Cette structure est plus compacte et plus simple. Chacune des cellules est reliée aux unes par des plaques bipolaires et séparées des autres par des joints d'étanchéité, qui cause parfois un véritable problème dans l'utilisation de ses piles.

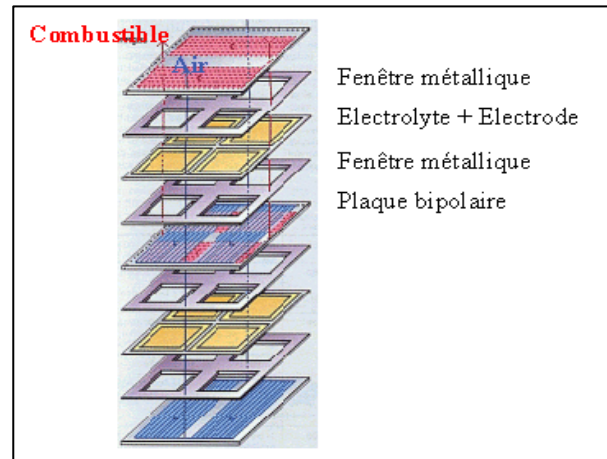


Figure II.4: Technologie plane

- **La technologie dite de Sulzer hexis** : c'est une structure plane et circulaire. Les cellules sont séparées des autres par des échangeurs

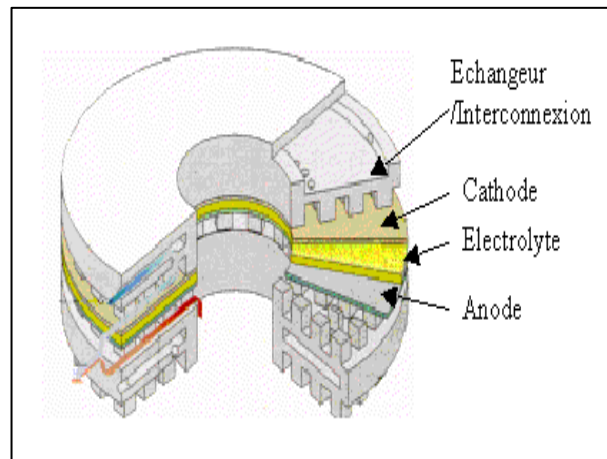


Figure II.5 : Pile de Sulzer Hexis

Type de pile ¹	Electrolyte	T (°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	potasse (liquide)	80	Espace, transports. Gamme : 1 - 100 kW
Acide polymère (PEMFC)	polymère (solide)	60-120	Portable, transports, stationnaire Gamme : 10 mW – 250 kW
Acide phosphorique (PAFC)	acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaire Gamme : 200 kW - 10 MW
Carbonate fondu (MCFC)	sels fondus (liquide)	650	Stationnaire Gamme : 200 kW - 10 MW
Oxyde solide (SOFC)	céramique (solide)	700 -1000	Stationnaire, transports Gamme : 1 kW - 1 MW

Tableau II.2: Les différents types de piles à combustible. [19]

II.6 Le principe de fonctionnement

Les piles à combustible permettent donc la transformation directe de l'énergie chimique de la réaction d'un combustible l'hydrogène avec un comburant l'oxygène en énergie électrique. L'énergie électrique provient de l'échange électronique de la réaction chimique et non pas de la chaleur dégagée par cette dernière. Pour ce faire, deux compartiments contenant respectivement le comburant et le combustible sont réalisés de part et d'autre de l'électrolyte évitant ainsi le mélange des gaz et donc la réaction chimique directe.

De part et d'autre de l'électrolyte dans chaque compartiment gazeux sont disposées des électrodes qui assurent dans le même temps, le transport des électrons et des espèces ioniques

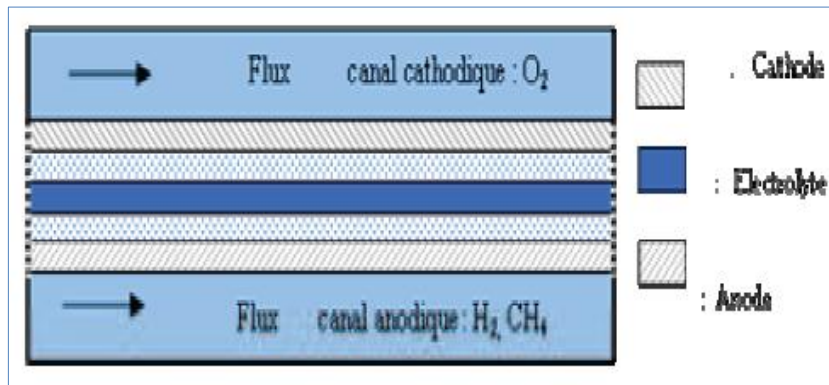
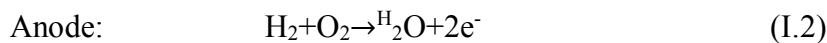
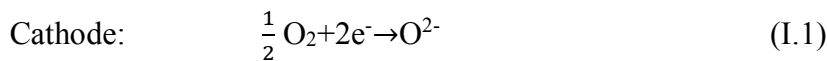


Figure II.6 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pile de type SOFC.

Les réactions électrochimiques et la réaction globale sont



La littérature scientifique e différée des autres littératures par une structuration typique selon la discipline le type d'écrit. Le scientifique dans sa recherche est amené à accorder une importance considérable à (un 1) fois au contenu qu'à la présentation de ses écrits .Pour cela, il faudrait s'intéresser d'avantage à la rédaction et à la communication scientifique afin d'être sûr que la recherche soit connue auprès de son consommateur véritable, à savoir l'autres chercheur.

II .7 Etudes précédentes:

Jason Le Masters [01]

a développé un code informatique en différence finie, capable d'exécuter des calculs de conception préliminaires pour l'analyse des contraintes thermiques qui peuvent avoir lieu dans les piles à combustible à oxyde solide. Ce modèle analyse la fabrication, le démarrage (start-up) et opère dans les conditions de fonctionnement en état stationnaire. Ce code a été minutieusement modelé pour inclure des changements significatifs (la structure), des nouvelles sources de chaleur (électrochimiques), des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides (air température élevée et hydrogène). des conditions de flux et des différentes propriétés des fluides (air température élevée et hydrogène). Ce code était comparé au code commercial avec FLUENT.

Eduardo Hernandez-Pacheco [02]

A développé un modèle électrochimique thermique pour simuler la performance d'une pile à combustible à oxyde solide sous des conditions de fonctionnement différentes et des facteurs géométriques. La température, le courant, la distribution du gaz et le carburant utilisé ont été calculés avec le modèle dans différentes régions.

Les résultats de modélisation ont montré de bons résultats pour des réductions de gradients de température à l'intérieur de la pile.

Srividya Valluru [03]

Son travail caractérise les contraintes thermiques surgissant pendant le fonctionnement des piles à combustible à oxyde solide planaire. Ce facteur est important pour l'efficacité de ce genre de pile. Les contraintes thermiques sont calculées à partir des champs température en utilisant le code ANSYS. Une approche d'analyse de contrainte thermique couplée est mise en œuvre pour un modèle en deux et trois dimensions.

C. LAMY et J.-M. LEGER

Après un bref aperçu historique, le principe des piles à combustible est tout d'abord rappelé en mettant l'accent sur les problèmes d'électro catalyse fondamentale qui se posent lorsqu'on veut améliorer leur fonctionnement (rendement énergétique, densités de courant et densités de puissance,...). Les différents types de piles à combustible sont ensuite présentés, en soulignant leurs avantages et inconvénients, et leurs applications possibles, notamment au véhicule électrique. Le problème du stockage du combustible hydrogène est également abordé. Pour terminer, cet article discute en détails les deux types de piles les plus aptes à équiper un véhicule électrique, c'est-à-dire la pile H₂/air à membrane échangeuse de protons, et la pile méthanol air à combustion directe **PEMFC**.

Albert GERMAIN

Laboratoire de Chimie industrielle Qu'est-ce qu'une analyse de cycle de vie ?

Une analyse de cycle de vie ou écobilan est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux tout au long de la vie d'un « produit » (du « berceau à la tombe »

c'est-à-dire de l'extraction des matières premières à la fin de vie du produit en passant par les étapes de production et d'utilisation).

Les piles à combustible. Une pile à combustible **PEMFC** est un moyen de production d'énergie qui permet de convertir un combustible et de l'oxygène en chaleur et électricité. Le combustible habituellement utilisé est l'hydrogène. Objectif Le but de cette étude est de comparer d'un point de vue environnemental différents moyens de production énergétique. La comparaison est réalisée sur l'ensemble de la chaîne d'alimentation (de l'extraction du gaz naturel à la production d'électricité).

Mihai RADULESCU

Lors des prochaines décades, l'hydrogène pourrait être amené à prendre une place importante en tant que vecteur énergétique. Il pourrait remplacer progressivement les combustibles liquides à base de pétrole dans les transports où la demande en énergie est en croissance constante. L'hydrogène peut également remplacer les combustibles gazeux en transportant l'énergie entre les zones de production et de consommation. Il pourra donc participer à l'optimisation de l'utilisation des énergies en améliorant l'efficacité des différentes filières, au même titre que l'électricité aujourd'hui [Bejan].

On s'intéresse principalement aux installations de cogénération (de production d'électricité et de chaleur) utilisant des piles à combustible basse température (de type **PEMFC**) et haute température (de type SOFC). Le rendement électrique de la pile est relativement élevé par rapport à d'autres technologies.

II.8 Les éléments constituent la pile à combustible

Chaque type de pile a sa structure géométrique propre figure (II.7), cependant les composants principaux restent les mêmes. Le cœur de la pile est constitué :

- Des électrodes.
- L'électrolyte (La membrane).
- Des backings (couche de diffusion entourant les électrodes).
- Les plaques bipolaires. [18]

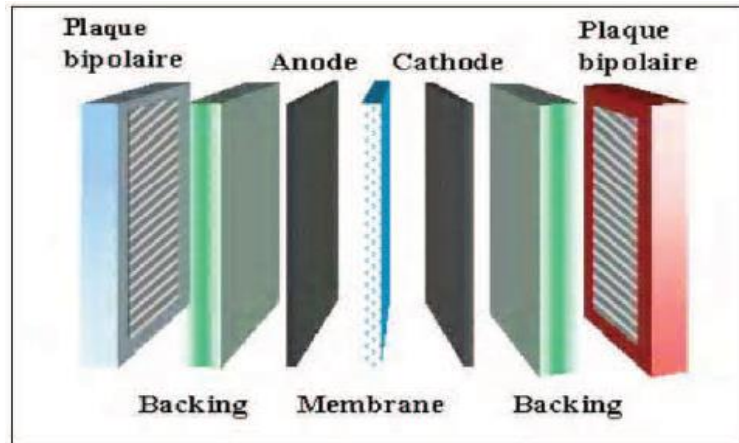


Figure II.7: Eléments d'une PAC [18]

L'agencement exact de ces composants entre eux ainsi que la nature des composants dépend du type de pile. Leur rôle reste cependant le même.

II.8.1 Les électrodes :

Les électrodes sont le siège des réactions électrochimiques : une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces réactions dépendent de plus de l'état de surface des électrodes et de la facilité avec laquelle les réactions se réalisent. Pour que l'hydrogène (ou tout autre carburant) soit oxydé, un catalyseur est nécessaire. De même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques. Une température plus élevée permettrait en théorie de faciliter ces échanges, mais cela impose des contraintes sur les matériaux. Les électrodes qui transportent les ions et les électrons sont le lieu des réactions. Par conséquent, ces éléments doivent être poreux, conducteur et posséder une grande surface d'échange.

- **Les catalyseurs**
- **Du côté anode**

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux : platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme de particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe. Ces électrodes sont très sensibles au CO et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage, on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance. De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher (80F/g) ou la diminution de la

quantité nécessaire : alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) afin d'éviter le problème d'empoisonnement au CO.

- **Du côté cathode**

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

II.8.2 L'électrolyte

L'électrolyte varie en fonction du type de pile : KOH pour les piles AFC, membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC ou les DMFC, acide phosphorique pour les PAFC, carbonates fondus pour les MCFC et oxydes solides pour les SOFC. Il permet que les ions (et pas les électrons) transitent de l'anode vers la cathode. Ces électrolytes déterminent la température de fonctionnement de la pile. Les caractéristiques de chaque type de pile sont leur conductivité ionique, leur étanchéité aux gaz, leur stabilité face aux réactifs chimiques, leurs propriétés mécaniques. A cela s'ajoute d'autres contraintes selon le type de pile, le niveau de la température, les composants des gaz, les espèces ioniques passant à travers l'électrolyte ainsi que les conditions de pression. Quant à l'électrolyte, il doit être dense et imperméable aux différents gaz utilisés. L'imperméabilité aux gaz est nécessaire pour éviter tout contact entre l'oxygène et l'hydrogène qui serait préjudiciable au bon fonctionnement de la cellule.

L'électrolyte est également un bon conducteur ionique pour assurer la migration des ions. En revanche, il ne doit pas conduire les électrons pour ne pas mettre la pile en court-circuit en créant un contact électrique entre l'anode et la cathode.

II.8.3 Les plaques bipolaires

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Elles ont, aussi plusieurs rôles :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur,
- Collecter le courant,
- Gérer les flux d'eau.

Généralement en graphite, ces plaques doivent être conductrices du courant, mais aussi permettre une diffusion homogène des gaz jusqu'aux électrodes ainsi Qu'intervenir dans la

gestion de l'eau à évacuer ou à apporter pour humidifier (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent être résistantes aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique).

La structure de ces ensembles est intéressante : des canaux y sont gravés pour permettre le passage des réactifs. Réalisés par usinage, ils sont très chers.

A ces composants essentiels qui forment le cœur de la pile s'ajouteront ensuite des auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement. Il s'agit des réservoirs pour le carburant et l'eau, du compresseur pour l'air, de l'humidificateur, des pompes pour le carburant et l'eau, des échangeurs de chaleur pour refroidir la pile, de l'onduleur pour transformer le courant continu.

II.9 Configurations des piles :

Les parties suivantes présentent les différentes géométries qui ont pu être existes. La variété des géométries est importante : elles ont toutes des avantages et des inconvénients qui sont souvent un compromis entre coût de fabrication, facilité d'empilement et donc de pouvoir réaliser des piles de tailles variables, ou même encore facilité dans la résolution des problèmes d'étanchéité des chambres gazeuses qui est un point très important pour les piles à combustible.[20]

II.9.1 Géométrie tubulaire :

La géométrie telle que schématisée sur la figure (2.8), présente les avantages suivants :

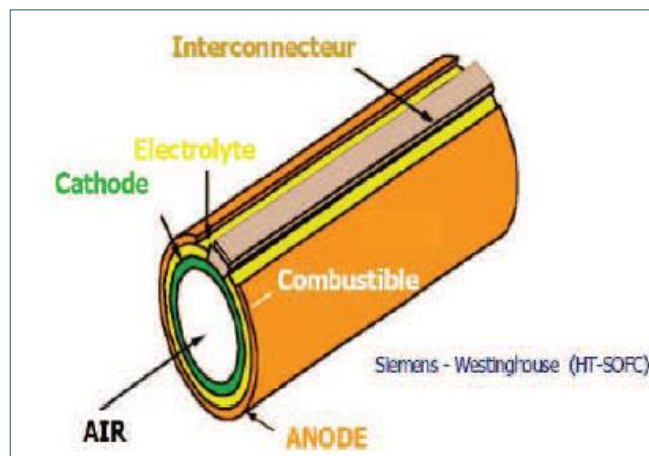


Figure II.8 : Schéma de principe de la géométrie tubulaire

- L'absence de joints d'étanchéité dans la zone dite « chaude » de fonctionnement de la pile entre les deux compartiments gazeux, ce qui est très important pour des céramiques fonctionnant et fabriquées à hautes températures.
- La structure complète est robuste car les couches sont déposées sur un support épais et chaque cellule de cette géométrie est indépendante des autres.
- Cette indépendance permet quelques degrés de liberté dans le désaccord dilatométrique entre les matériaux sans craindre de fissures ou de ruptures. Cependant, les inconvénients suivants sont développés :
 - Le chemin du courant à travers de la pile est relativement long. Ce chemin est court à travers de l'électrolyte et des inters connecteurs mais long à travers des électrodes.
 - Les tubes support des couches apportent un poids supplémentaire inutile qui diminue d'autant la densité de puissance de la pile.
 - L'épaisseur du tube support diminue la quantité d'oxygène transporté vers les sites réactionnels de la cathode, diminuant ainsi les performances. Ainsi, la diffusion des gaz à travers du support peut devenir l'étape limitant de la pile. Néanmoins, ce phénomène peut être annihilé si la cathode est utilisée directement comme support.
 - Enfin, le procédé de dépôt par EVD (Electrochemical Vapor Déposition) qui est très utilisé limite drastiquement le choix des dopants pour l'électrolyte et les interconnecteurs ce qui peut limiter les performances

II.9.2 Géométrie planaire :

La géométrie planaire présente les avantages suivants :

- La conduction se faisant perpendiculairement au plan des cellules, la résistance interne des dispositifs ne dépend pas de la surface des cellules mais seulement de leur épaisseur qu'il convient alors de minimiser pour réduire la résistance électrique.
- La flexibilité des systèmes en géométrie planaire est plus importante que dans les autres géométries. En effet, les cellules peuvent être de section carrée, rectangulaire, ronde voir même hexagonale, et on peut rajouter des cellules à la suite autant que nécessaire sans pour autant perturber la gestion des gaz ni du système complet.
- Cette géométrie est simple de fabrication et met en œuvre des techniques peu onéreuses. Les différents éléments, électrolyte, électrodes ou interconnecteurs peuvent être fabriqués

séparément évitant les cofrittages. Il est donc aussi possible dans ce cas d'intégrer des composants métalliques comme pour les interconnecteurs.

- Enfin, les contrôles qualité des différents éléments sont plus faciles du fait de leur grande indépendance les uns des autres. Cependant, les inconvénients suivants sont aussi présents :

- Cette géométrie nécessite l'utilisation de joints haute température pour l'étanchéité entre les compartiments. Des joints, compressifs (joint d'or), céramiques (verres) ou ciments ont été proposés sans pour autant être complètement satisfaisants. Des contraintes mécaniques importantes peuvent apparaître et détériorer les cellules, mais aussi des réactions chimiques, surtout pour les verres, avec les composants de la pile et diminuer tout ou partie des performances.

- En pratique, augmenter la taille et la longueur des dispositifs augmente le parcours des ions et électrons et donc aussi la résistance interne. D'autre part, la réalisation indépendante de chacun des éléments apporte une grande résistance de contact lors de l'assemblage final des éléments, et il est donc parfois préférable de faire des empilements des matériaux suivis de cofrittage.

II.9.3 Géométrie monolithique.

Les avantages principaux de cette géométrie sont :

- Une dimension des cellules très petite qui augmente les surfaces actives et réduit les pertes résistives grâce à la réduction du chemin des courants ionique et électronique. En effet, les ions comme les électrons traversent dans le plan de l'électrolyte et des électrodes, la résistance interne est donc faible.

- Grâce à la résistance interne faible, les piles de géométrie monolithique peuvent fonctionner à des densités de courant plus élevées tout en ayant la même tension de sortie que pour d'autres géométries.

- Enfin, la densité de puissance est accrue grâce à l'augmentation des surfaces actives, à de plus grande densité de courant et aussi grâce à l'élimination des supports de dépôt. Ces piles sont donc aussi moins lourdes que pour les géométries précédentes.

Cependant, les inconvénients suivants peuvent être soulignés :

- Le principal inconvénient est l'obtention de la structure ondulée qui nécessite donc un circuit de l'ensemble du fait de cette structure très imbriquée.

- L'intégrité de la structure dépend de l'accord dilatométrique de chacun des matériaux entre eux mais aussi du retrait de frittage de chacun pour ne créer aucune fissure, mais surtout aucune contrainte qui pourrait se révéler lors du fonctionnement.

Enfin, pour s'assurer de la qualité des structures finies, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques d'analyse non destructives.

II.10 Applications des piles à combustible

La pile à combustible peut être utilisée dans quasiment toutes les situations où de l'énergie électrique est demandée. Par ordre de taille, trois types d'applications sont généralement distingués. Les applications stationnaires visent la fourniture d'énergie électrique dans des réseaux de grande ou petite taille et simultanément d'énergie thermique.

Dans des véhicules, elles permettent l'entraînement ou la fourniture d'électricité pour les appareils de bord. Finalement, les applications portables couvrent un grand champ d'appareils électriques : ordinateurs, caméscopes, téléphones et autres. A ces grands domaines s'ajoutent les applications de niches. [20]

II.10.1 Stationnaire :

Dans les applications stationnaires, la pile à combustible délivre de l'énergie électrique à des endroits où un réseau n'est pas disponible ou quand la production simultanée de chaleur et de l'électricité (cogénération) permet un rendement élevé. Un autre concept de production décentralisée voit aujourd'hui le jour. Il s'agit des centrales de production électriques virtuelles construites à l'aide d'un grand nombre de piles à combustibles dispersées dans la zone alimentée. Dans le premier cas. Un apport de combustible (généralement de l'hydrogène sous pression) est moins cher que l'établissement d'une alimentation continue par câble. La pile à combustible remplace le générateur diesel utilisé habituellement. Le gain en rendement est souvent moins important que la diminution du bruit et de la maintenance. L'hydrogène peut également être produit sur place par des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques. La cogénération permet une production d'énergie avec un rendement très élevé, car les pertes sont valorisées sous forme de chaleur. La pile à combustible peut remplacer une chaudière à gaz dans un immeuble. Dans ce cas, elle sera alimentée en gaz naturel de ville. Un grand nombre d'installations de démonstration avec une puissance entre 1 kW pour des maisons individuelles et quelques centaines de kW pour des résidences a été installé dans différents pays. Un ensemble de petites centrales domestiques mises en réseau et commandées à partir

d'un centre de contrôle peut rapprocher la production d'énergie du lieu de consommation et donc réduire les pertes dans le réseau tout en profitant des avantages de la cogénération.

II.10.2 Transport :

Utilisée dans des véhicules, les piles à combustible peuvent contribuer à une baisse de pollution et à un comportement plus agréable lors de la conduite. Le rendement plus élevé par rapport à un moteur à explosion permet de diminuer le besoin d'énergie du véhicule. De plus, en fonction du combustible utilisé (hydrogène, gaz naturel), il peut être localement peu polluant ou même non polluant. Un déplacement des rejets vers la zone de production du combustible peut présenter un intérêt notamment pour les véhicules utilisés dans les zones urbaines. Finalement, l'hydrogène constitue un vecteur de stockage d'énergie électrique permettant de remplacer une batterie

II.10.3 Portable :

Pour des applications portables, les piles à combustible sont en concurrence avec les batteries. On espère gagner en temps d'autonomie et pouvoir recharger plus vite des réserves d'énergie épuisées. Les piles utilisées dans ce domaine doivent être extrêmement robustes et peu sensibles aux conditions extérieures. De plus, de fortes contraintes d'encombrement et de poids sont imposées. Il est important de noter que les applications portables sont la seule application où l'utilisateur peut attendre des gains importants en termes de confort et pour lesquels il est prêt à payer le prix. Un grand nombre de prototypes a été réalisé, Le méthanol est le combustible préféré pour les petites applications car il est liquide et peut être facilement transporté. L'autorisation pour le transport aérien de cartouches de méthanol vient d'être obtenue par Smart Fuel Cell. A côté des applications civiles, l'armée américaine travaille sur des systèmes d'une puissance d'environ 50 W pour équiper des soldats. [21]

II.11 Avantages et l'inconvénient des piles à combustible : [21]

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré, SOFC ou MCFC par exemple, mais aussi du type d'application visé, portable ou stationnaire par exemple. Toutefois, des avantages et inconvénients généraux ressortent souvent. Les avantages sont les suivants:

- **Rendement de la conversion énergétique :**

Grâce à la conversion directe de l'enthalpie libre de la réaction chimique en énergie électrique, les pertes dues normalement à la combustion du combustible, puis à la conversion

de cette chaleur de combustion en énergie mécanique et enfin de l'énergie mécanique en électrique sont évitées; ceci nous donne un rendement important.

- **Modulabilité :**

Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes. La taille d'une pile à combustible peut facilement être augmentée ou réduite et le rendement électrique est relativement indépendant de la taille de la pile.

- **Flexibilité :**

Les piles à combustible pouvant avoir différentes tailles, elles peuvent aussi par conséquent être disposées en différents endroits avec un minimum de place. Ne comportant pas de parties mobiles, le fonctionnement des piles se fait sans nuisances sonores. De ce fait, les piles à combustible peuvent très bien être à proximité de quartiers résidentiels.

- **Propreté :**

Les piles à combustible rejettent moins de gaz nocifs (CO_2 , NO_x).

Cependant il y a aussi des inconvénients qui sont les suivants :

- **Coûts importants liés aux matériaux :**

Les piles à combustible hautes températures sont schématiquement de deux types, cylindrique ou planaire. Pour les cylindriques, les coûts de fabrication sont élevés mais il y a moins de problèmes pour les systèmes car les empilements se font avec des cellules indépendantes mécaniquement les unes des autres, et parce que l'étanchéité se fait en zone froide. Pour les piles planaires, les coûts de fabrication sont moins importants, mais les problèmes apparaissent pour la réalisation des systèmes car les empilements se font en reliant mécaniquement les cellules et les étanchéités se font en zone chaude.

- **Economie.**

L'introduction de dispositifs sur le marché de l'énergie implique pour le moment un capital important pour faire face au coût des retours sur investissements. En effet, il n'y a pas de réseau de distribution d'hydrogène par exemple. [21]

- **Les inconvénients**

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement:

- Le poids et le volume ;
- Coût trop élevé de production et de maintenance.

- Durée de vie trop faible.
- Gestion thermique délicate.
- Disponibilité insuffisante de l'hydrogène.
- Le plus gros problème actuellement reste le prix.

La plupart des piles à combustible ne sont encore que des prototypes et leur durée de vie reste insuffisante. Plusieurs systèmes PEMFC de Plug Power ayant une puissance électrique de 5 kW ont fonctionné environ 12 000 h et des petites installations AFC d'Orbiter Fuel Cell ont fonctionné 15 000 h. Dans le cas de certaines applications, il faut évacuer la chaleur générée par la pile. Cela impose donc un système de refroidissement. Utiliser de l'hydrogène à grande échelle suppose que l'on ait réglé les problèmes liés à son stockage et à sa distribution. Tout autre combustible que l'hydrogène impose l'utilisation d'un reformeur, une contrainte importante en espace, en poids. [20]

II.12 Conclusion

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

Ce deuxième chapitre nous a permis d'introduire la notion de pile à combustible, le principe de fonctionnement et les différentes technologies de piles combustibles existantes actuellement. Il est en effet nécessaire de bien avoir à l'esprit ces notions afin de comprendre le mécanisme de transfert de chaleur et de masse et par conséquent les causes d'augmentation de la température dans la pile, sujet traité dans cette thèse.

Chapitre III

DIMENSIONNEMENT ET MODELISATION DU PAC SOFC

III.1 Introduction

L'objectif visé de ce travail est l'étude numérique des effets thermiques tout en quantifiant la performance dans une pile SOFC. L'étude bibliographique nous a permis de faire un choix du modèle physique et mathématique régissant le phénomène de transfert thermique et massique dans les différentes parties d'une PAC SOFC (interconnexion cathodique, cathode, électrolyte, anode et interconnexion anodique). Le modèle mathématique porte plus d'intérêt aux différents types de source de chaleur; source de chaleur due à la perte ohmique, source de chaleur due à la perte d'activation, source de chaleur due à la perte de concentration et source de chaleur due aux réactions chimiques ainsi qu'aux dimensions des électrodes et de l'électrolyte. A la fin de ce chapitre, on expose la procédure de simulation numérique retenue pour la résolution de ces équations gouvernantes.

III.2 Dimensionnement du Stack pile à combustible

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

III.2.1 Détermination du nombre de cellules

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

$$P_{pile} = N_{celle} \cdot E_{celle} \cdot J \cdot S_{pile} \quad (III.1)$$

Paramètre :

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

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

E_{celle} = Tension par cellule (V)

J = Densité de courant (A/m²)

S_{pile} = Surface active des cellules (m²)

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

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

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

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

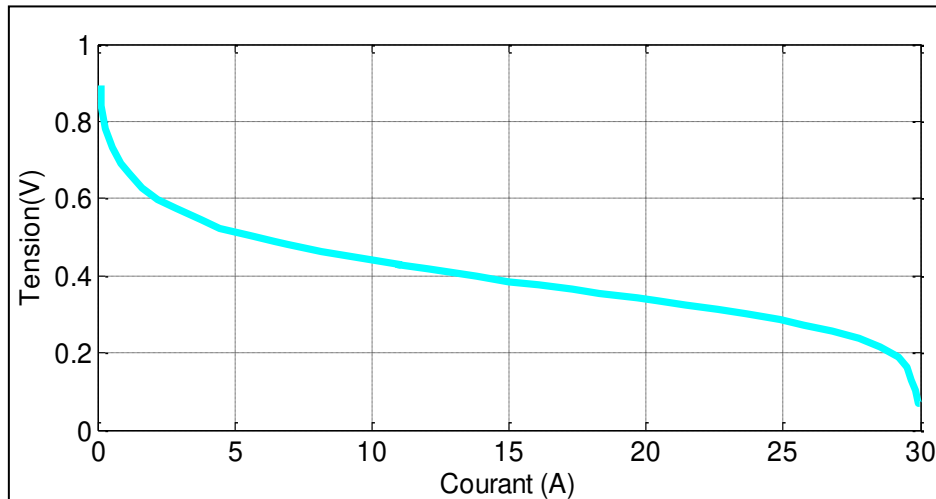


Figure III-1: *Caractéristique Tension/Courant (tension par cellule)*

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

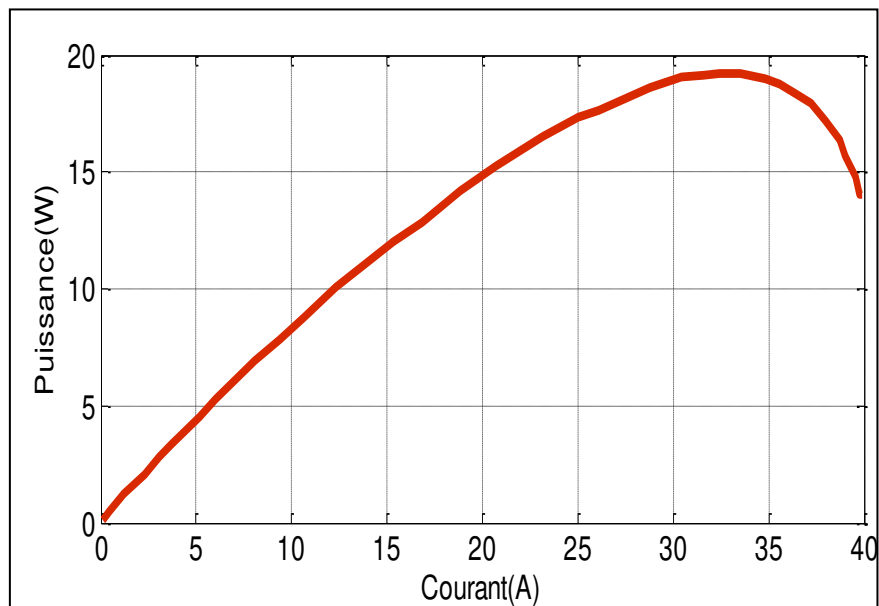


Figure III-2 : *Caractéristique Puissance/Courant (puissance par cellule)*

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

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

Paramètre

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

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

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

III.2. 2 Détermination de la surface des cellules

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

$$I_{\text{pac}} = \frac{P_{\text{pile-max}}}{U_{\text{stack-ch}}} = 1147\text{A} \quad S_{\text{pile}} = \frac{I_{\text{pac-max}}}{j} = 1956\text{cm}^2 \quad (\text{III.3})$$

Paramètre :

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

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

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

$$P_{\text{pile-max}} = (1 + 0.1)P_{\text{utile_max}} \quad (\text{III.4})$$

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

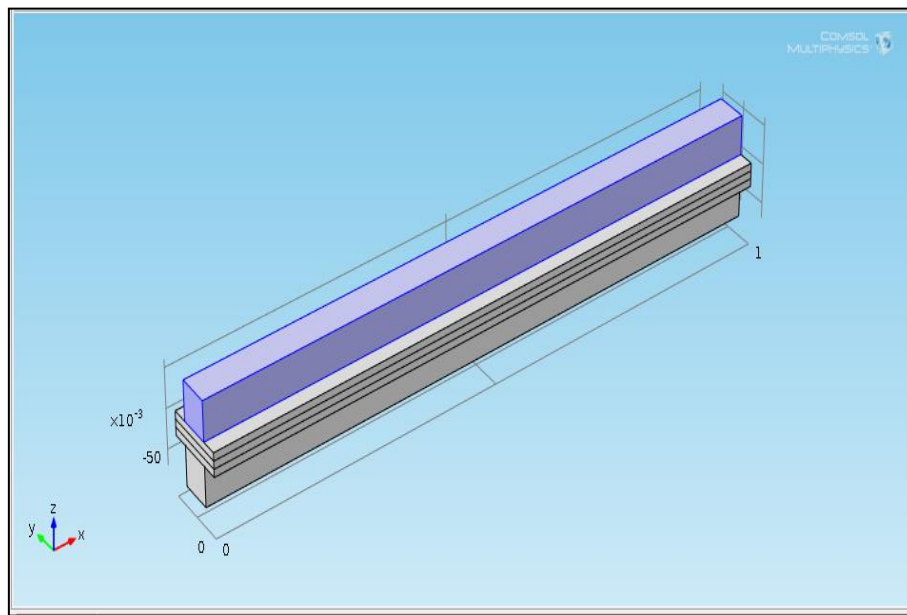


Figure III-3 géométrie d'une cellule de la pile SOFC avec logiciel Comsol

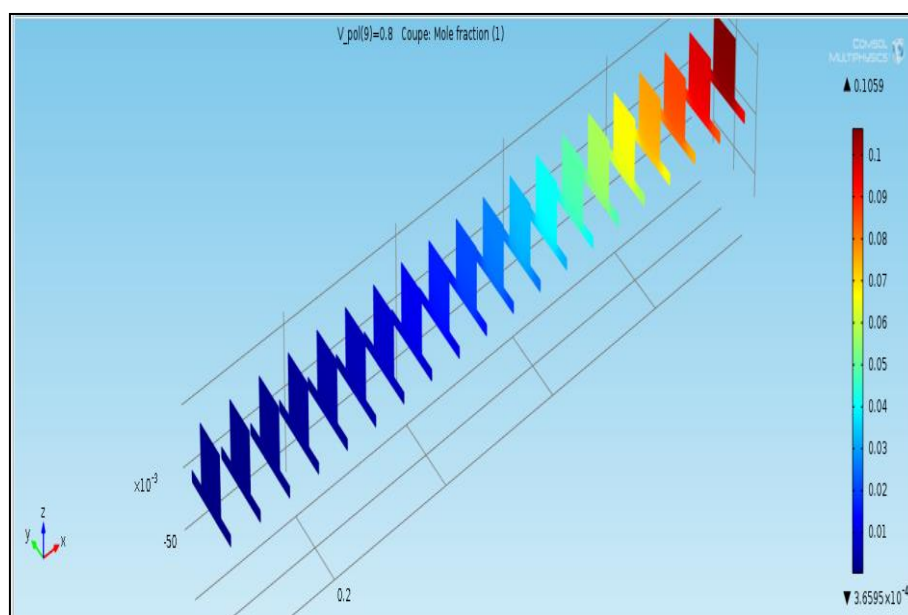


Figure III-4: Fraction Molaire Oxygène avec logiciel Comsol

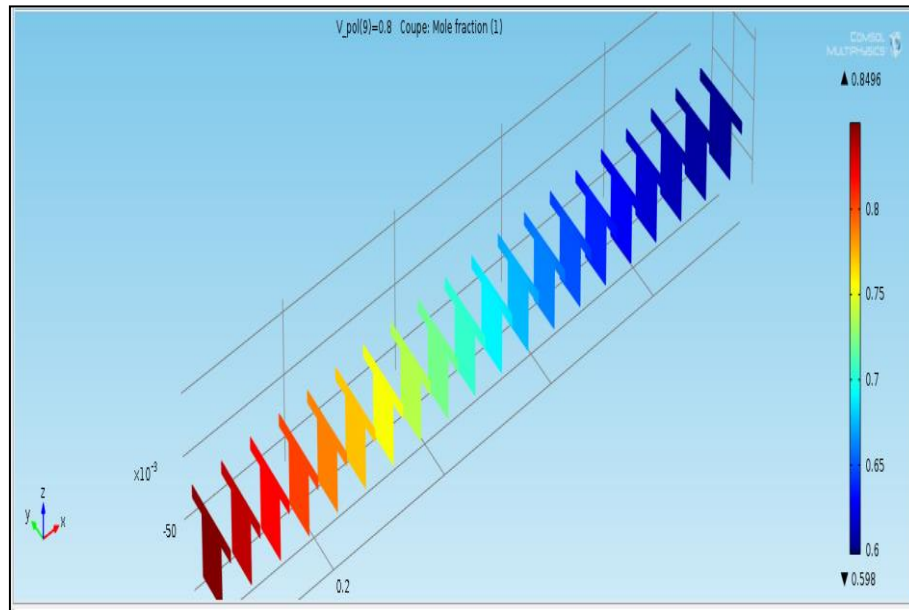


Figure III-5: Fraction Molaire hydrogène avec logiciel Comsol

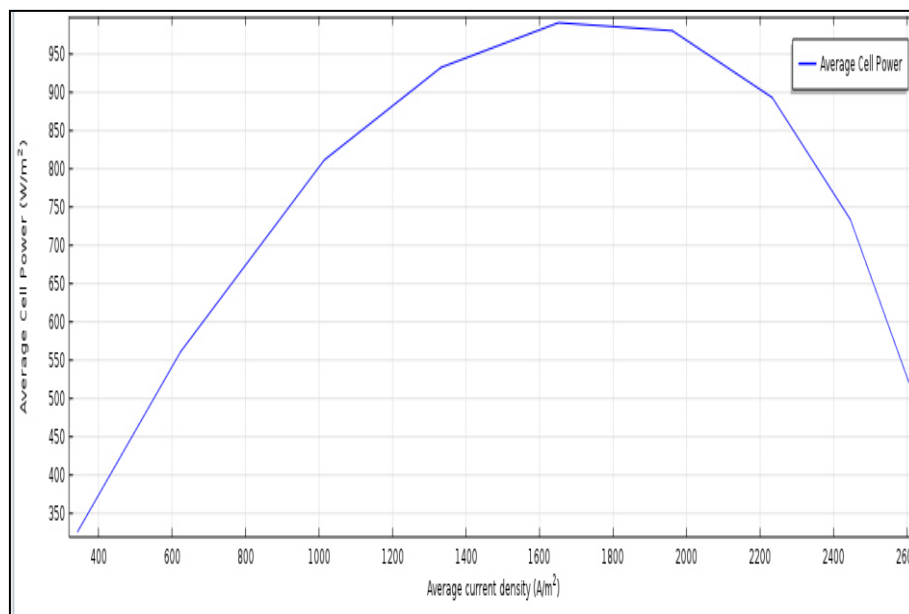


Figure III-6: Puissance de la pile SOFC avec logiciel Comsol

III.3 Présentation des modèles de la pile à combustible

III.3.1 Modèle d'Aguiar [34]

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

$$E_{nernst} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{(H_2O)}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (III.5)$$

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

$$U_{cell} = E_{nernst} - n_{ohm} - n_{conc,an} - n_{conc,catl} - n_{act,an} - n_{act,catl} \quad (III.6)$$

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

$$n_{ohm} = i \cdot R_{(ohm)} \quad (III.7)$$

La résistance interne d'une cellule est calculée par:

$$R_{ohm} = \frac{e_{an}}{\sigma_{an}} + \frac{e_{ele}}{\sigma_{ele}} + \frac{e_{cat}}{\sigma_{cat}} \quad (III.8)$$

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

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

$$n_{conc,an} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2O,TPB} \cdot P_{H_2,f}}{P_{H_2o,f} \cdot P_{H_2,TPB}} \quad (III.9)$$

$$n_{conc,catl} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2,a}}{p_{O_2,TPB}} \right) \quad (III.10)$$

Pour calculer les pertes de concentration, la relation entre les pressions partielles des trois espèces H_2O , H_2 , O_2 à l'interface (point de contact triple) et la densité de courant est nécessaire. Les pressions partielles des trois espèces au niveau des interfaces électrolyte/électrodes sont en fonction des pressions partielles de ces espèces au niveau des canaux, elles sont exprimées comme suit:

$$P_{H_2,TPB} = P_{H_2,f} - \frac{RT e_{an}}{2F D_{eff,an}} I \quad (III.11)$$

$$P_{H_2,TPB} = P_{H_2o,f} + \frac{RT e_{an}}{2F D_{eff,an}} I \quad (III.12)$$

$$P_{H_2,TBP} = P + (P - P_{O_2,a}) \cdot \exp\left(\frac{RTe_{act}}{4FD_{eff,cat,P}} i\right) \quad (III.13)$$

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

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

$$\eta_{act,an} = \frac{RT}{anF} \ln\left(\frac{P_{H_2,f}}{P_{H_2,TBP}} \cdot \frac{i}{i_{0,an}}\right) \quad (III.14)$$

$$\eta_{act,cat} = \frac{RT}{anF} \ln\left(\frac{P_{O_2,a}}{P_{O_2,TBP}} \cdot \frac{i}{i_{0,act}}\right) \quad (III.15)$$

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

$$i_{0,an} = \frac{RT}{nF} k_{an} \exp\left(\frac{-E_{an}}{RT}\right) \quad (III.16)$$

$$i_{0,act} = \frac{RT}{nF} k_{act} \exp\left(\frac{-E_{act}}{RT}\right) \quad (III.17)$$

Paramètre	Désignation	Unité
σ_{ele}	$3.34 \cdot 10^4 \exp\left(\frac{-10300}{T}\right)$	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
σ_{an}	80.E3	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
σ_{cat}	8.3E3	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
$D_{eff,an}$	3.66 E-5	m^2/s
$D_{eff,cat}$	1.37 E-5	m^2/s
k_{an}	1.37 E-5	$\Omega^{-1} \cdot m^{-2}$
k_{cat}	2.35 E11	$\Omega^{-1} \cdot m^{-2}$
E_{an}	140	KJ/mole
k_{cat}	137	KJ/mole
P	1	bar

Tableau III.1: Expressions et paramètres [34]

III.3.2 Modèle d'A.C. Burt [35]

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



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

$$E_{nersat} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{(H_2)X(O_2)}{X(H_2O)}\right) + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p}{p^0}\right) \quad (III.19)$$

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

$$E_0 = \frac{\Delta G^0}{nF} \quad (III.20)$$

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

$$U_{cell} = E_{nersnt} - n_{ohml} - n_{concl} - n_{act} \quad (III.21)$$

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

$$n_{act} = \frac{RT}{n_a F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (III.22)$$

$$n_{ohml} = iR_{act} + iR_{ohm} \quad (III.23)$$

$$n_{concl} = -\frac{RT}{na F} \ln\left(1 - \frac{i}{i(L)}\right) \quad (III.24)$$

Représentée par les différentes formes des équations de Tafel :

$$n_{act} = \frac{RT}{n_a F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (III.25)$$

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

$$n_{ohml} = iR_{act} = iR_{ohm} \quad (III.26)$$

$$n_{concl} = -\frac{RT}{na F} \ln\left(1 - \frac{i}{i(L)}\right) \quad (III.27)$$

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

III.3.3 Tableau récapitulatif [35] :

	Potentiel de Nernst	Perte Ohmique
Modèle d'Aguilar	$E_{\text{nernst}} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{\text{(H2O)}}}{P_{\text{H2}} P_{\text{O2}}^{1/2}}\right)$	$n_{\text{ohm}} = i \cdot R_{\text{(ohm)}}$
Modèle de C.A. Burt	$E_{\text{nersat}} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{X(\text{H2})X(\text{O2})}{X(\text{H2O})}\right) + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p}{p^0}\right)$	$n_{\text{ohml}} = iR_{\text{act}} + i R_{\text{ohm}}$

Perte d'activation	Perte de concentration	Perte d'activation anodique	Perte de concentration anodique
/	/	$\eta_{\text{act,an}} = \frac{RT}{an F} \ln\left(\frac{P_{\text{H2,f}}}{P_{\text{H2,TPB}}} \cdot \frac{i}{i_{0,\text{an}}}\right)$	$n_{\text{conc,an}} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H2O,TPB}} \cdot P_{\text{H2,f}}}{P_{\text{H2O,f}} \cdot P_{\text{H2,TPB}}}$
$n_{\text{act}} = \frac{RT}{na F} \ln\left(\frac{i}{i_{0,\text{act}}}\right)$	$n_{\text{concl}} = -\frac{RT}{na F} \ln\left(1 - \frac{i}{i(L)}\right)$	/	/

Perte activation cathodique	Perte de concentration cathodique
$\eta_{\text{act,an}} = \frac{RT}{an F} \ln\left(\frac{P_{\text{O2,a}}}{P_{\text{O2,TPB}}} \cdot \frac{i}{i_{0,\text{act}}}\right)$	$n_{\text{conc,catl}} = \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{p_{\text{O2,a}}}{p_{\text{O2,TPB}}}\right)$
/	/

III.4 Performances réelles d'une cellule SOFC

Le potentiel électrochimique théorique E donné par l'équation (III.6) subit une chute de tension causée par les pertes électrochimiques, ces pertes appelées souvent polarisations proviennent principalement de trois sources :

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

III.4.1 Les pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues d'une part à la résistance de contact des différentes couches de la pile et d'autre part à la résistance que rencontrent les particules chargées, les ions O^{2-} dans l'électrolyte et les électrons e^- dans les électrodes, les plaques d'aminée des gaz et les connexions. D'après la loi d'Ohm, la chute de tension ohmique globale à l'intérieur de la pile SOFC peut être exprimée comme :

$$V_{ohm} = RI \quad (III.28)$$

- I : La densité de courant débité par la pile [A/cm^2]
- R : La résistance ohmique totale d'une cellule [Ω], qui est la somme des quatre résistances :

$$r = R_e + R_a + R_c + R_{cont} \quad (III.29)$$

Tel que :

- R_e : La résistance au flux d'ions dans O^{2-} l'électrolyte [Ω].
- R_a : La résistance au flux d'électrons e^- dans l'anode [Ω].
- R_c : La résistance au flux d'électrons e^- dans la cathode [Ω].
- R_{cont} : La résistance de contact des composants de la pile [Ω].

D'autre part, la résistance ohmique peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$r = r_0 \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (III.30)$$

Où r_0 est la résistance interne à la température T_0 , T_s et α sont des constants.

III.4.2 Les pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues à la vitesse de la réaction électrochimique, la réaction de l'hydrogène étant rapide, tandis que celle de l'oxygène est plus lente. Pour que les réactions démarrent, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. Les équations des pertes d'activation sont données par :

$$V_{act} = A_a \ln \left(\frac{i}{i_{0a}} \right) + A_c \ln \left(\frac{i}{i_{0c}} \right) \quad (III.31)$$

On peut écrire (III.31) comme suit :

$$V_{act} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (III.32)$$

$$A = A_a + A_c = \frac{RT}{\alpha nF} \quad (III.33.a)$$

$$i_0 = (i_{0a})^{\frac{A_a}{A}} \cdot (i_{0c})^{\frac{A_c}{A}} \quad (III.33.b)$$

Avec :

- α : Coefficient de transfert de charges, il dépend de la réaction impliquée et le matériau de l'électrode.
- i : La densité de courant débité par la pile [A/cm^2]
- i_0 : La densité de courant d'échange qui représente la valeur minimale fournie par la pile [A/cm^2]

Généralement dans une pile à combustible à hydrogène, les pertes d'activation à l'anode sont négligeables devant celle de la cathode. Les pertes d'activation sont exprimées par la loi de Tafel suivante :

$$V_{act} = V_{act_c} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (III.34)$$

III. 4.3 Les pertes de concentration

Lorsque, à une électrode, il y a une perte de potentiel dû à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactants, on a alors la formation d'un gradient de concentration. De nombreux facteurs peuvent contribuer à des pertes de concentration : la faible diffusion du gaz à travers les électrodes poreuses, la dissolution des réactants ou des produits dans l'électrolyte, la diffusion des réactifs ou des produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse. A des densités de courants élevées, la faible vitesse de transport des réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la contribution majeure à la polarisation de concentration. On peut exprimer ces pertes par l'équation suivante [36,37, 38, 39]:

$$V_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (III.35)$$

Où i_L est la densité de courant limite en [A/cm^2], elle représente la valeur maximale que la pile peut fournir avant de subir une chute de tension lors d'une saturation de la concentration côté cathode.

III.4.4 Expression de la tension de sortie de la pile à combustible

Après l'identification des différentes chutes, l'expression de la tension en charge aux bornes d'une cellule est comme suite figure (III.7) : [40,41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]

$$V_{cell} = E - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc} \quad (III.36)$$

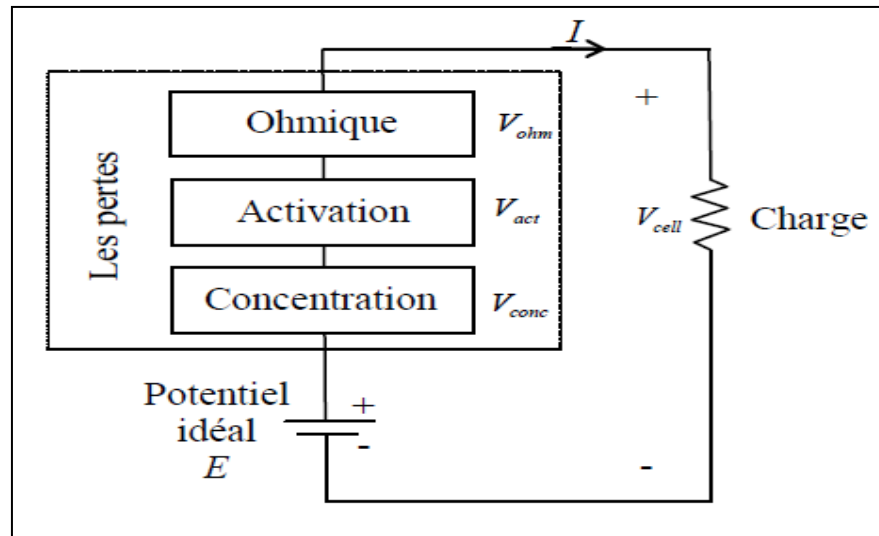


Figure (III.7) Circuit équivalent de la pile SOFC

La tension de sortie d'un stack V_s de N_{cell} piles unitaires reliées en série est définie comme suite :

$$V_s = N_{cell} V_{cell} \quad (III.37)$$

III.5 Simulation de la pile SOFC

La simulation et les modèles mathématiques sont certainement utiles pour le développement de divers dispositifs de production d'électricité, cependant, ils sont encore plus importants s'agissant du développement de cellules de carburant. Ceci est dû à la complexité des cellules et des systèmes basés sur eux, et à la difficulté de la caractérisation expérimentale de leur fonctionnement interne. Cette complexité peut être expliquée par le fait que dans la cellule de carburant, les réactions électrochimiques sont étroitement couplées, et également par le fait que la conduction électrique, la conduction ionique, et le transfert thermique ont lieu simultanément. C'est pourquoi une étude complète des cellules a besoin d'une approche multidisciplinaire. La simulation de ces cellules nous permet de focaliser les recherches expérimentales à améliorer l'exactitude des interpolations et les extrapolations des résultats. En outre, les modèles mathématiques peuvent servir d'outils valables à la conception et à l'optimisation des systèmes de cellules de carburants. Des simulations sont effectuées sur des divers systèmes en utilisant divers logiciels. Nous nous intéressons dans ce

travail au procédé de simulation effectué sur le système de la pile SOFC en utilisant MATLAB /SIMULINK.

III. 5.1 Résultats de simulation sous MATLAB :

Effets de la Températures :

Différentes températures, qui sont typiques de la SOFC, sont montrées dans les figures suivantes. (figure (III.8) au figure (III.12))

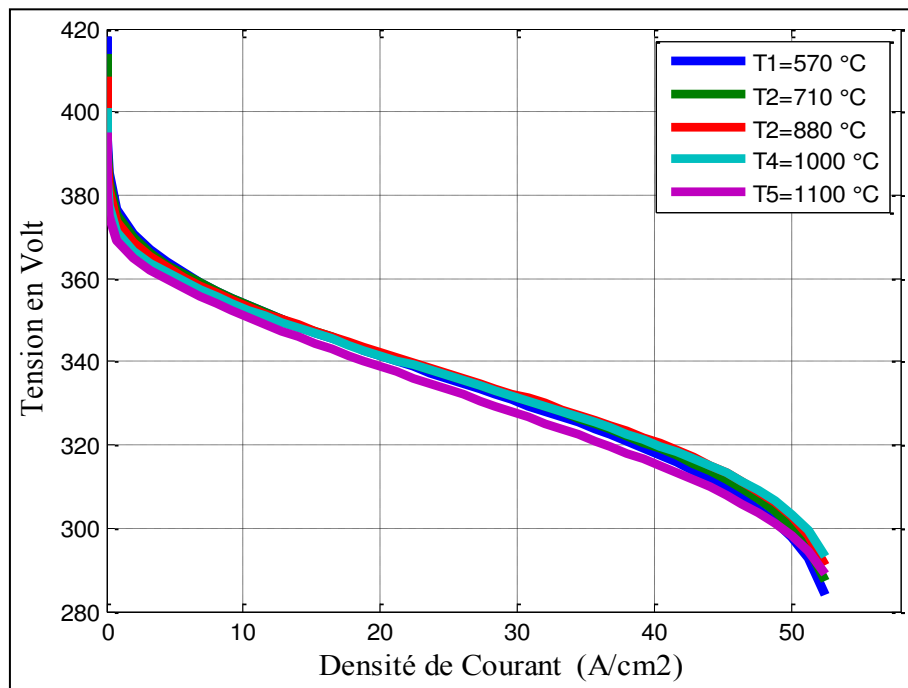


Figure (III.8) Caractéristique Tension Courant de la pile SOFC avec variation de la température

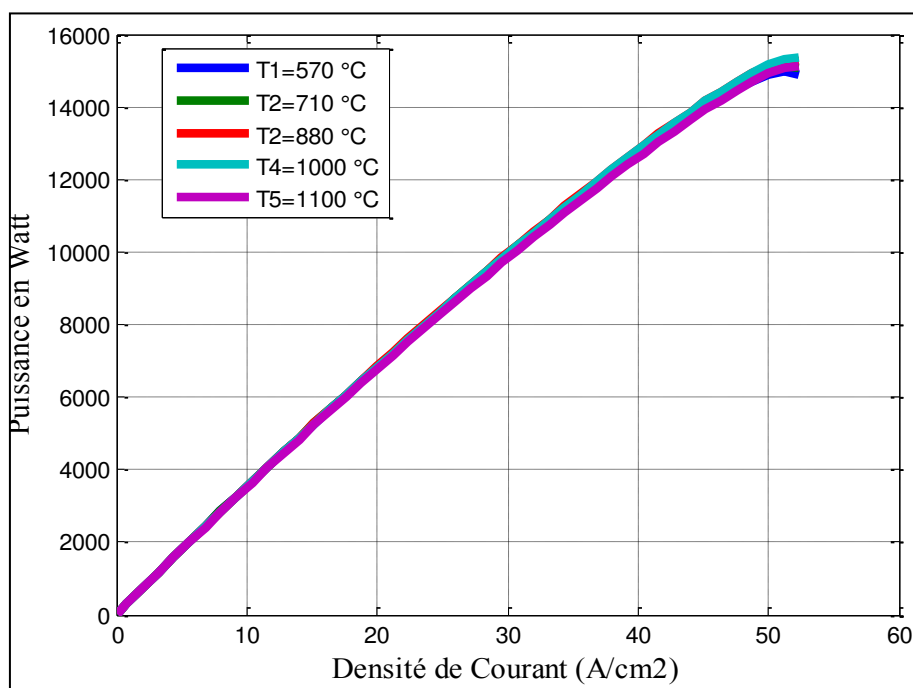
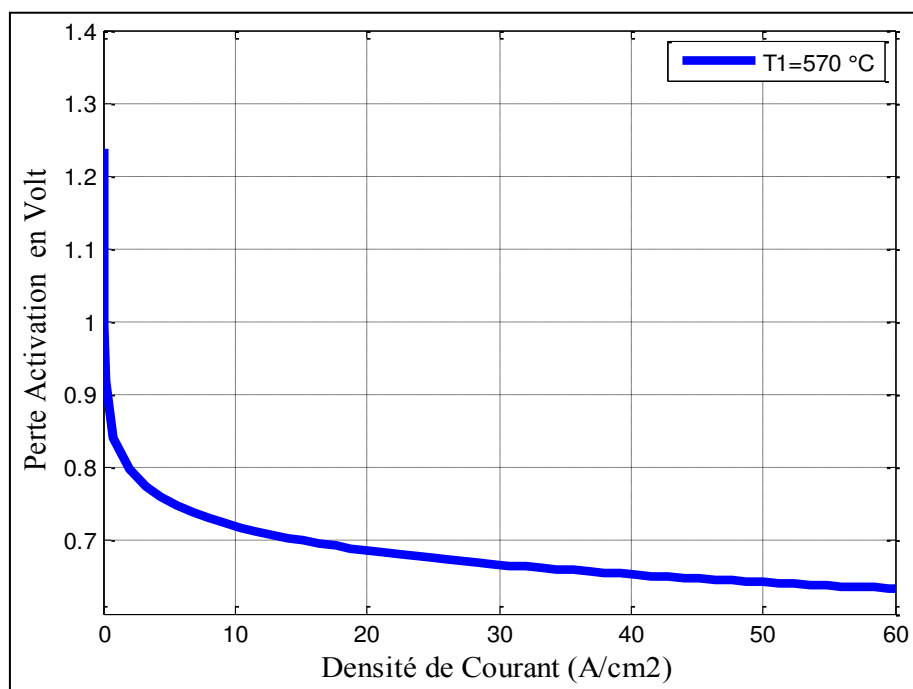
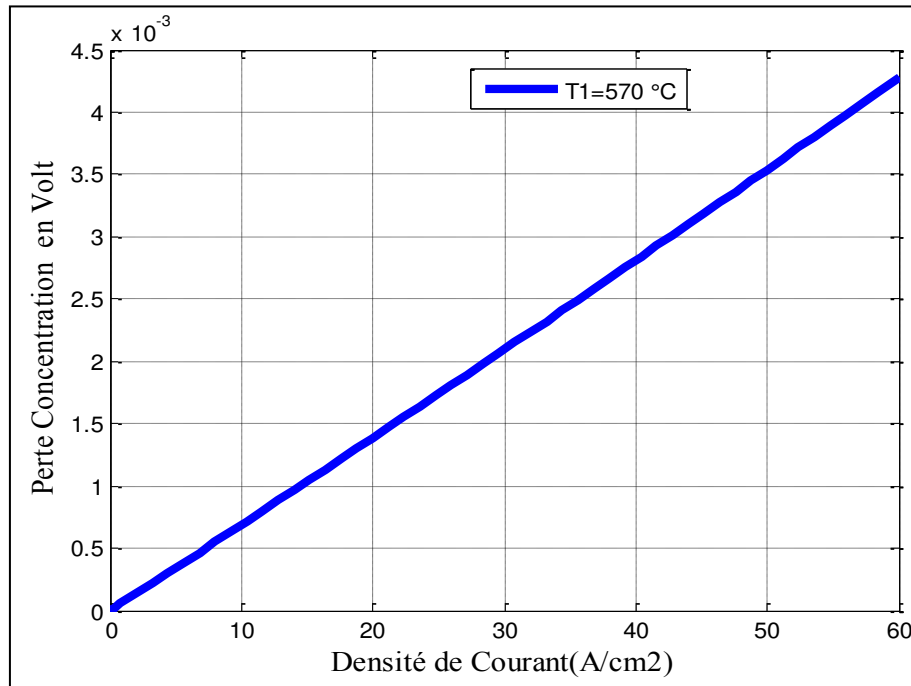


Figure (III.9) Puissance de la pile SOFC avec variation de la température



Figure(III.10) Pertes d'activations en fonction de la variation de la température



Figure(III.11) Pertes de concentration avec variation de la température

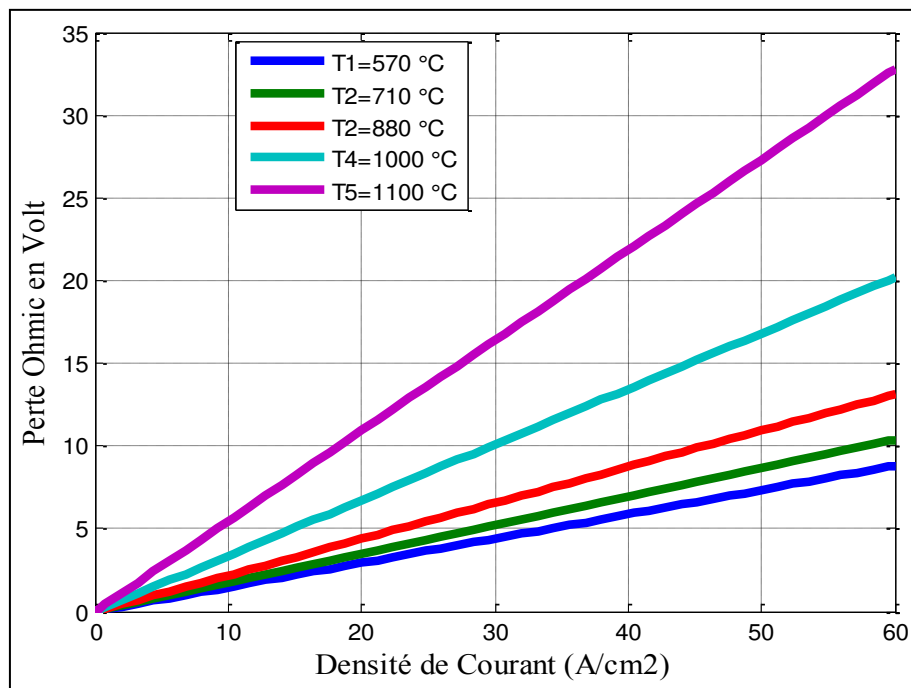


Figure (III.12) Pertes Ohmiques avec variation de la température

La chute de tension d'activation domine la chute de tension dans la région de faible courant figure (III.11).

Lorsque le courant de charge augmente, la chute de tension ohmique augmente rapidement et devient la contribution principale à la chute de tension de la SOFC figure (III.12).

Lorsque le courant de charge dépasse une certaine valeur, la tension de sortie de la pile à combustible chute brusquement en raison de la chute de tension de concentration à l'intérieur de la SOFC figure (III.11).

Enfin on conclut que la tension de sortie de la SOFC est plus élevée à une température plus basse dans la zone de faible courant alors que la tension est plus élevée à une température plus élevée dans la zone de fort courant, on peut voir que l'augmentation de la température de la cellule a un effet bénéfique sur la tension de la cellule, ce qui s'explique par la forte conduction ionique de la cellule (électrolyte plus électrodes) à des températures plus élevées (par exemple $T = 880^{\circ}\text{C}$ et $T = 1100^{\circ}\text{C}$) Figure(III.9). Ainsi, pour assurer le bon fonctionnement de la cellule, il est nécessaire d'augmenter la température.

III. 6.Conclusion

Les piles à combustible du type SOFC fonctionnent à hautes températures, de l'ordre de 550 à 1200°C. Ces dernières peuvent, dans une certaine mesure, être avantageuses car la chaleur dégagée peut être mise à profit pour d'autres systèmes thermiques.

La fourniture d'une chaleur élevée facilement exploitable en turbine à gaz. Le rendement global peut alors atteindre 80 %.

Les travaux réalisés dans ce chapitre nous ont conduit à différencier les types de pile à combustible selon la membrane. En choisissant la pile à combustible du type SOFC dans la simulation et qui nous a fourni des informations importantes concernant l'influence du courant et de la tension de sortie de la pile. Nous avons constaté aussi que l'évolution de tension peut être divisée en trois zones : la zone des pertes par activation, la zone de la chute ohmique et la zone des pertes par concentration. Et que pour assurer un bon fonctionnement de la cellule, il est nécessaire d'augmenter la température.

La variété dans les expressions de la source chaleur due à la formation d'eau donne des élévations de température plus ou moins élevées. $T_{\text{H}_2} = T_{\text{air}}$: L'effet des différentes sources de chaleur est plus important dans une SOFC fonctionnant aux mêmes températures de gaz. C'est la réaction chimique qui dégage plus de chaleur. Les surtensions électriques (concentration et activation) donnent ensemble un minimum de chaleur contrairement à la surtension Ohmique qui donne une chaleur considérable.

Conclusion générale

Depuis quelques décennies, l'insertion à grande échelle des sources d'énergies renouvelables doit contribuer efficacement au développement économique des pays suite aux fluctuations des coûts de combustibles qui ne cessent d'augmenter. Afin de remplacer en grande partie, les sources d'énergies conventionnelles dans la production de l'électricité, les chercheurs doivent penser sérieusement aux développements économique et technique de ces types d'énergies au futur proche. Cependant, sur le plan de l'exploitation et du fonctionnement, il apparait des facteurs d'incertitudes et d'intermittences vis-à-vis du réseau électrique. Par conséquent, les interventions d'un gestionnaire de réseau actuel doivent inclure la prise en compte de différents aléas liés au fonctionnement et à la gestion optimale du réseau.

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

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

Le deuxième chapitre nous a permis d'introduire la notion des sources non polluantes d'électricité PAC qui peut convenir à toute une gamme d'applications. L'autonomie de ces systèmes exigera des batteries d'accumulateurs pour le stockage électrique dans le but d'assurer une fourniture d'énergie quasi permanente ainsi on a détaillé les modèles de la piles à combustibles avec leurs applications dans toutes les domaines.

Le travail est basé sur l'étude de la performance de la pile à combustible à oxyde solide. Pour une meilleure compréhension des phénomènes ayant lieu dans une pile SOFC, des équations mathématiques ont été développées par un outil numérique choisi par l'environnement Matlab /Simulink.

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

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

Cette étude montre le champ de température et celui des fractions massique d'eau dans les trois parties; anode, électrolyte et cathode de la pile SOFC.

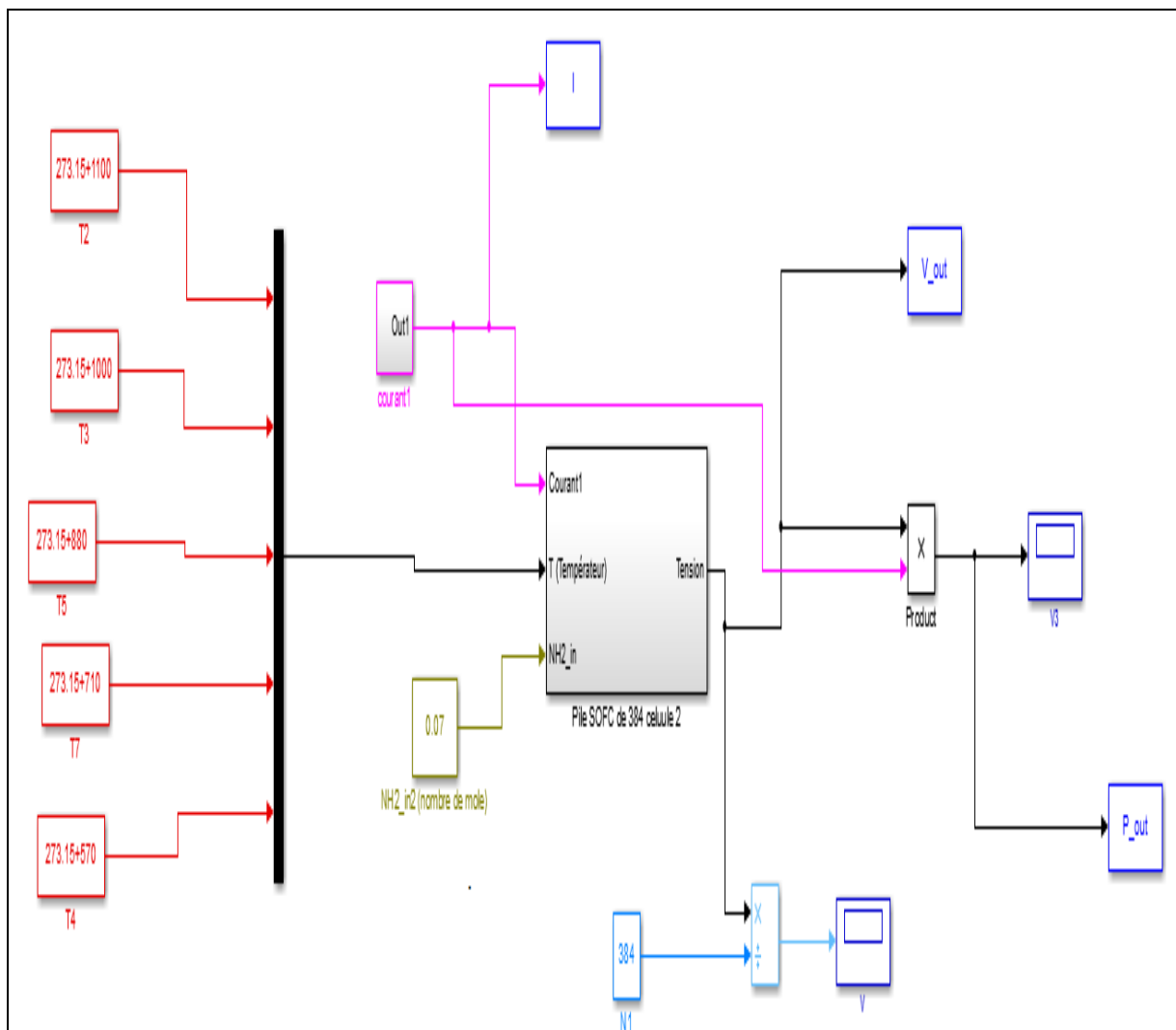
Et la distribution de température dans deux types de plans, un parallèle au sens de l'écoulement et l'autre perpendiculaire, est analysée en fonction des types de source de chaleur et en fonction de la densité de courant.

Comme perspective :

- 1) L'application des systèmes hybrides.
- 2) Introduire l'intelligentes artificiels.
- 3) Investir dans le domaine des matériaux et les nanomatériaux.
- 4) Développer le facteur de l'hydrogène et les systèmes de stockages.

Annexe

La figure représente le schéma bloc du modèle SOFC simulé avec Matlab Simulink



Bibliographie

- [1] Rapport Mondial REN21 sur les Energies Renouvelables, 2012 C.Jules, G.Paul, N.Jordan, G. Guillaume, C. Madie, "Fonctionnement d'une centrale hydraulique (4AB - E1)", le site du collège MTAd'Auvergne à Thouars, 2013.
- [2] K.Khachatryan " Le rôle des Energies Renouvelables dans la Politique de L'Union Européenne", Centre International de Formation Européenne Promotion Nice, 2006/2007.
- [3] H.Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ", thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [4] M. Lopez, "Contribution L'optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée", Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes » Paris Sud11.
- [5] Wood Energy Barometer. Systèmes solaires n°158. Décembre 2003. EurObserv'ER.
- [6] J S. R. Bull, "Renewable Energy Today and Tomorrow", Proceedings of the IEEE, vol.
- [7] Zerga, F. Benyarou et B. Benyousef, " Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin ", Rev .Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95100).
- [8] Matthew M. Mench, "Fuel Cell Engines", John Wiley and Sons, ISBN 978-0-471-68958-4(cloth) , 2008.
- [9] K. Kordesch et G. Simader, "Fuel cells and Their applications", VCH, Weinheim, ISBN3-527-28579, 1996.
- [10] Reginald H.Garrett, Charles M. Grisham, B. Lubochinsky, Biochimie, De Boeck university, 2000, 1292 p. (ISBN2744500208)
- [11] Institut Français du Pétrole (IFP), L'hydrogène: vecteur énergétique de la future
- [12] Fabien Auprêtre, l'hydrogène comme vecteur énergétique, Compagne Européenne des Technologies de l'Hydrogène.URL : <http://ipnweb.in2p3.fr/~ed421/ED421/hydrogene.pdf>
- [13] Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Juillet
- [14] Blunier B., Miraoui A., Piles à Combustible : Principes , modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés, 2007, ellipses éditions Techno sup Génie Energétique, 1st ed., Paris.
- [15] Barbir F., PEM Fuel Cells: Theory and Practice, 2005, Elsevier Academic Press, 1st ed., Oxford, UK
- [16] B.WAHDAME, « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à Combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de Belfort montbéliarde et de l'université de France – Comté, 2006.

- [17] M.ZANDI, « contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAINE, 2010.
- [18] Yixin Lu, Laura Schaefer, Peiwen Li. Numerical study of a flat-tube high power density solid oxide fuel cell Part I. Heat/mass transfer and fluid flow. *Journal of Power Sources* 140 (2005) 331-339.
- [19] Qiusheng Wang, Lijun Li, Cheng Wang, Numerical Study of Thermoelectric Characteristics of a Planar Solid Oxide Fuel Cell with Direct Internal Reforming of Methane. *Journal of Power Sources* 186, Issue 2 (2009) 399-407.
- [20] Ferguson, J., Fiard, J., Herbin, R. Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 58 (1996) 109-222.
- [21] Chaisantikulwat, C. Diaz-Goano, E.S. Meadows. Dynamic modeling and control of planar anodesupported solid oxide fuel cell. *Computers and Chemical Engineering* 32 (2008) 2365–2381
- [22] AnchasaPramuanjaroenkij, Sadik Kakac, Xiang Yang Zhou. Mathematical analysis of planar solid oxide fuel cells. *International Journal Of Hydrogen Energy* 33 (2008) 2547-2565.
- [23] Xiongwen Zhang, Jun Li, Guojun Li, Zhenping Feng, Numerical study on the thermal characteristics in a tubular solid oxide fuel cell with indirect internal reformer. *International Journal of Thermal Sciences* 48, Issue 4 (2009) 805-814.
- [24] K.J. Daun, S.B. Beale, F. Liu, G.J. Smallwood. Radiation heat transfer in planar SOFC electrolytes. *Journal of Power Sources* 157 (2006) 302–310.
- [25] Moussa CHNANI. Modélisation Macroscopique de piles PEFC et SOFC pour l'étude de leur couplage. Thèse de doctorat. Institut FEMTO-ST- Département ENISYS UMR CNRS 6174 – UFC – ENSMM – UTBM. 2008.
- [26] M.A. Khaleel, Z. Lin, P. Singh, W. Surdoval, D. Collin. A finite element analysis modeling tool for solid oxide fuel cell development: coupled electrochemistry, thermal and flow analysis in MARC. *Journal of Power Sources* 130 (2004) 136–148.
- [27] Pei-Wen Li, Minking K. Chyu, Simulation of the chemical/electrochemical reactions and heat/mass transfer for a tubular SOFC in a stack. *Journal of Power Sources* 124 (2003) 487–498.
- [28] Masayuki Suzuki, Naoki Shikazono, Koji Fukagata, Nobuhide Kasagi. Numerical analysis of coupled transport and reaction phenomena in an anode-supported flat-tube solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources* 180 (2008) 29–40.
- [29] Vinod M. Janardhanan, Vincent Heuveline, Olaf Deutschmann. Performance analysis of a SOFC under direct internal reforming conditions. *Journal of Power Sources* 172 (2007) 296–307.

- [30] Subhash C Singhal et Kevin Kendall. High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications. Elsevier, livre. 2003.
- [31] Ed. Frank Kreith. Mechanical engineering Handbook.1999.
- [32] Suryanarayana Raju Pakalapati. A new reduced order model for solid oxide fuel cells. PhD thesis (2006) West Virginia.
- [33] David L. Damm, Andrei G. Fedorov. Local thermal non-equilibrium effects in porous electrodes of the hydrogen-fueled SOFC. Journal of Power Sources 159 (2006) 1153–1157.
- [34] Sunil Murthy, Andrei G. Fedorov. Radiation heat transfer analysis of the monolith type solid oxide fuel cell. Journal of Power Sources 124 (2003) 453–458.
- [35] Yingru Zhao, Congjie Ou, Jincan Chen. A new analytical approach to model and evaluate the performance of a class of irreversible fuel cells. International journal of hydrogen energy 33 (2008) 4161 – 4170.
- [36] Xiongwen Zhang, Guojun Li, Jun Li, Zhenping Feng. Numerical study on electric characteristics of solid oxide fuel cells. Energy Conversion and Management 48 (2007) 977–989.
- [37] Ying-Wei Kang, Jun Li, Guang-Yi Cao, Heng-Yong Tu, Jian Li, Jie Yang. Dynamic temperature modeling of an SOFC using least squares support vector machines. Journal of Power Sources 179 (2008) 683–692.
- [38] Yaneeporn Patcharavorachot, Amornchai Arpornwicheanop, Anon Chuachuensuk. Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell: Role of support structures. Journal of Power Sources 177 (2008) 254–261.
- [39] D. S´anchez, R. Chacartegui, A. Mu˜noz, T. S´anchez. Thermal and electrochemical model of internal reforming solid oxide fuel cells with tubular geometry. Journal of Power Sources 160 (2006) 1074-1087.
- [40] Lijin Wang, Huisheng Zhang, Shilie Weng. Modelling and simulation of solid oxide fuel cell based on the volume–resistance characteristic modeling technique. Journal of Power Sources 177 (2008) 579–589.
- [41] Yunzhen Yang, Guilan Wang, Haiou Zhang, Weisheng Xia. Comparison of heat and mass transfer between planar and MOLB-type SOFCs. Journal of Power Sources 177 (2008) 426–433.
- [42] P. Aguiar, C.S. Adjiman, N.P. Brandon. Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance. Journal of Power Sources 138, (2004) 120-136.
- [43] A.C. Burt, I.B. Celik, R.S. Gemmen, A.V. Smirnov. A numerical study of cell-to-cell variations in a SOFC stack. Journal of Power Sources 126, Issues 1-2 (2003) 76-87.
- [44] Yixin Lu. Numerical Simulation of a Flat Tube High Power Density Solid Oxide Fuel Cell. PhD Thesis (2005) University of Pittsburgh.
- [45] P. Costamagna, A. Selimovic, M. Del Borghi and G. Agnew. Electrochemical Model of the Integrated Planar Solid Oxide Fuel Cell (IP-SOFC). Chemical Engineering Journal 102 (2004) 61-69.

- [46] E. Hernández-Pacheco, M.D. Mann, P.N. Hutton, D. Singh and K.E. Martin. A Cell-Level Model for a Solid Oxide Fuel Cell Operated with Syngas from a Gasification Process. *International Journal of Hydrogen Energy* 30 N°11 (2005) 1221-1233.
- [47] R. Bove, P. Lunghi and N.M. Sammes. SOFC Mathematic Model for Systems Simulations. Part One: From a Micro-Detailed to Macro-Black-Box Model. *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 181-187.
- [48] M. Mankour, M. Sekour, and L. Boumadien, "Thermal Characterization of a SOFC Fuel Cell," *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 2020, pp. 930-936, doi: /10.1007/978-3-030-63846-7.