

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière :Energie renouvelable

Option : Energie Renouvelables Photovoltaïque

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

*Modélisation et simulation d'un système
hybride(Photovoltaïque – Pile à combustible)*

Présenté par :

- MAMMERI HOUARI
- MOUSSAOUI MOHAMMED SALEM

Soutenu le : 2020

Devant le jury composé de :

Mme BEN YAHIA NAIMA

MAA

Président

Mme TKOUTI NACIRA

MCB

Encadreur

Mme DERRAJI BELLOUME KARIMA

MAA

Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

« Nous remercions Dieu qui nous a offert la vie et seul capable de nous offrir la joie, le bonheur, la prospérité et la santé. »

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire Madame

T.Nacira Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Biskra, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Enfin, nous remercions les amis de la résidence : Bachir, Sid Ahmed et Abdessamad,

Merci à tous ces fidèles

Dédicace

À ma mère et à mon père en premier lieu

A mes chers frères abdelhai ,lahcen, othman,ahmed et krimo ...,

pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours

universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux

tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible, Merci d'être

toujours là pour moi

MOHAMMED SALEM

MOUSSAOUI

Resumé:

L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances d'un système autonome stationnaire de production d'énergie électrique et thermique, couplant un champ photovoltaïque et un système de stockage par l'hydrogène, composé d'un électrolyseur, d'une unité de stockage de gaz et d'une pile à combustible de haute température.

L'hydrogène est l'unique moyen de stockage de l'électricité. Les applications stationnaires de quelques kW sont évaluées par simulation numérique.

ملخص

إن الهدف من هذه الدراسة هو تقييم أداء نظام الحكم الذاتي في توليد الطاقة الكهربائية و الحرارية، مع اقتران النظام لتوليد الطاقة الشمسية، ونظام لتخزين الهيدروجين، وتتألف من محلل كهربائي للماء، وخلية الوقود ذو درجة الحرارة العالية.

الهيدروجين هو الوسيلة الوحيدة لتخزين الطاقة الكهربائي

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the performance of an autonomous stationary power generation and thermal coupling a PV array and a storage system for hydrogen, consisting of an electrolyze, a storage unit of gas and a fuel cell of high temperature.

Hydrogen is the only means that stores electricity. Stationary applications of a few kilowatts are evaluated by numerical simulation.

Liste des figures :

Figl.1.1: structure basique d'une cellule solaire

Fig I.1.2: Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairagements (E).

Fig I.1.3 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées

Fig I.1.4 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

Fig I.1.5 : Circuit équivalent complet d'une cellule PV.

Fig I.1.6 : caractéristique résultant d'un groupement de N, cellules en série

Fig I.1.7 : caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

Fig I.1.8 : Les différences zones de la caractéristique I (V)

Fig I.1.9 : ruban métallique d'une cellule

Fig I.1.10 : Schéma d'une cellule élémentaire

Fig I.1.11 : champ photovoltaïque

Fig I.1.12 : Schéma équivalent d'une cellule idéale

Figl.1.13 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Fig I.1.14 : Cellule photovoltaïque monocristalline

Fig I.1.15 : Cellule photovoltaïque poly cristallines

Fig I.1.16 : Cellule photovoltaïque amorphes.

Fig I.1.17 : Organigramme Algorithme Perturber et observer, 'P&O'

Fig I.1.18 : Organigramme Algorithme Incrément de la conductance, 'INC'

Fig I.1.19 : Organigramme Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{cc}

Fig I.1.20 : Organigramme Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc}

Fig I.1.21 : Schéma Algorithme à base de la logique floue

Fig I.2.1 : Pile à combustible.

Fig I.2.2 : L'expérience de Sir William Grove

Fig I.2.3 : Projet Gemini

Fig I.2.4 : principe de fonctionnement d'une pile de PEM

Fig I.2.5 : Composants d'une cellule PEMFC

Fig I.2.6 : Montage d'une membrane entre les plaques bipolaires

Fig I.2.7 : Schéma d'une couche de diffusion

Fig I.2.8 : Plaques bipolaires de pile PEM

Fig I.2.9 : Schéma de fonctionnement d'une cellule d'un électrolyseur.

Fig I.3.1 : Description du système PV-FC.

Fig I.3.2 : a) Comparaison de la caractéristique électrique d'un électrolyseur avec le point de puissance maximale d'un champ solaire ; b) Influence du nombre de cellules d'électrolyse sur le rendement du couplage PV- EL soit direct soit par l'intermédiaire d'un MPPT

Fig I.3.3 : Schéma de contrôle d'un système PV-H₂, proposé par Ulleberg

Fig II.1 : Circuit équivalent du modèle

Fig II .2 : Structure de base et nature des charges et sources

Fig II.3.1.4 .1 : L'effet de pression

Fig II.3.1.4.2 : L'effet de température

Fig II.3.1.4.3 : PàC caractéristique tension-courant, deux puissances (700W et 400W), à T = 55C.

Fig II.3.2 : Hypothèses du modèle électrique des composants électrochimiques.

Fig II.3.3 : Flux de gaz entrant et sortant du périphérique de l'électrolyseur.

Fig II .4.3 : Schéma électrique équivalent de nb élément de batterie en série

Figure III-1 : Description du système PV-FC.

Fig III-2: schéma simulink de la commande MPPT logique flou sur Matlab

Fig III-3: courbe de l'éclairement

Fig III-4 Modelé simulink du contrôleur flou

Fig III-5 panneau PV (courant, tension, puissance (côté entrée))

Fig III-6 panneau PV (courant, tension, puissance (côté sortie))

Fig III-7simulation de la cellule

Fig III-8 Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM.

Fig III-9 Caractéristiques des pertes ohmiques

Fig III-10 L'effet de R_m

Fig III-11 L'effet IL

Fig III-12 Effet de la température de la cellule

Liste des tableaux :

Tableau 1.1: Les différents types de piles à combustible.

Tableau I.2: Principaux projets sur les systèmes autonomes de production d'énergie couplant générateurs renouvelables et stockage d'hydrogène.

Tableau I.3: Caractéristiques des systèmes installés et présentés dans le tableau précédent.

Tableau des métiers :

Liste des figures :	5
Liste des tableaux :	7
Introduction générale	10
1 Chapitre 1 :Généralité sur la photovoltaïque et la pile à combustible	12
1.1 Introduction	13
1.2 Cellule photovoltaïque	13
1.2.1 L'effet photovoltaïque	15
1.2.2 Caractéristique électrique	17
1.2.3 La constitution d'un module photovoltaïque	21
1.2.4 Modélisation du module photovoltaïque	23
1.2.5 Types de cellules photovoltaïques (PV)	24
1.2.6 Commande	26
1.2.7 Conclusion	31
1.3 Généralité sur la pile à combustible	31
1.3.1 Introduction	31
1.3.2 Historique	31
1.3.3 Applications des piles à combustibles	33
1.3.4 Les différents types de piles à combustible	34
1.3.5 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible	35
1.3.6 Pile à Combustible PEMFC	35
1.3.7 principe de fonctionnement d'une PEMFC	35
1.3.8 Structure de la pile à combustible PEMFC	37
1.3.8.5 Electrolyseurs	39
1.3.9 Les avantages et les inconvénients de PEMFC	40
1.3.10 Conclusion	40
1.4 Systèmes PV-H2 existants [29]	41
1.4.1 Présentation des projets	41
1.4.2 Architecture du système complet	44
1.4.3 Lois de dimensionnement [33]	44
1.4.4 Architecture électrique [30]	45
1.4.5 Algorithme de contrôle [28]	46
2 chapitre 2 : modélisation du système (PV-PàC)	48
2.1 Introduction	49
2.2 modalisation d'un champ photovoltaïque:	49
2.2.1 la modélisation d'une cellulesolaire:	49

2.2.2	Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire	52
2.3	Convertisseurs.....	52
2.3.1	Convertisseur continu-continu (DC-DC) :.....	52
2.3.2	Commande MPPT d'un convertisseur DC/DC :	55
2.3.3	Modélisation de la pile à combustible et Electrolyseurs.....	58
2.3.4	Modèle d'Amphlett et al.....	59
2.3.5	Modèles électriques.....	66
2.3.6	Modèles thermiques.....	68
2.3.7	Autres paramètres	71
2.4	Modélisation de la batterie.....	73
2.4.1	Modèle de la charge de la batterie.....	73
2.4.2	Modèle de la décharge de la batterie.....	73
2.5	Conclusion :	74
3	Chapitre 3 : simulation du système (PV-PàC).....	75
3.1	Introduction :	76
3.2	Système hybride PV- pile à combustible proposé :.....	76
3.3	Générateur PV.....	76
3.3.1	Commande MPPT:	77
3.4	Pile à combustible :	79
3.4.1	Description de PEMFC :.....	79
3.5	Conclusion.....	84
	Conclusion général :.....	85
	Références	86

Les ressources renouvelables sont diverses et inépuisables. La convertir en énergie thermique,

Les produits chimiques ou électriques présentent peu de risques pour l'homme et l'environnement.

Ils viennent sous de nombreuses formes, dont certaines sont naturellement stockables (comme la biomasse ou Barrages hydroélectriques), d'autres non, en particulier ceux qui convertissent l'énergie renouvelable, discontinu, aléatoire et ingérable : c'est particulièrement le cas les sources éoliennes et photovoltaïques, et ce sont les plus réactifs en termes de potentiel futur.

L'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène est le processus le plus courant. Eau il peut provenir de diverses sources utilisées en électrolyse. Il peut être pris de la mer en l'état des sites côtiers ou des eaux souterraines, en particulier pour l'extrême sud. Utilisation l'eau thermale pourrait être un choix judicieux.

Un point très important à noter est que la production d'hydrogène se fait par électrolyse de l'eau d'électricité fournie par les énergies renouvelables (éoliennes, complexes photovoltaïques) elle permettrait, sans polluer, ces énergies d'être stockées, transportées et réutilisées.

Pour produire cette énergie électrique propre à partir de l'énergie chimique émise par la combustion de l'hydrogène dans le cadre de la nouvelle technologie, la pile à combustible est le principal composant du secteur de l'hydrogène pour produire de l'électricité polluante et à haute énergie rendement.

Le but de cette étude est d'étudier la synthèse de la production d'hydrogène solaire à l'aide du logiciel de simulation matlab

Le système se compose de panneaux photoélectriques et d'un électrolyseur. les panneaux , les systèmes photovoltaïques et l'électrolyseur fournissent de l'énergie électrique.[32]

L'électrolyseur produit hydrogène et oxygène.

Ce travail est organisé de manière à permettre la lecture à différents niveaux. c'est ça Il est organisé en trois chapitres:

- ✚ Le premier chapitre est consacré aux généralités des systèmes photovoltaïques, et traite également de la production d'hydrogène, des propriétés physiques, des processus chimiques, de la production et du stockage de l'hydrogène.
- ✚ Au deuxième semestre nous étudions les équations mathématiques avec la modélisation de l'électrolyseur, du générateur, des cellules photovoltaïques et des piles à combustible en plus de la logique floue

✚ Enfin, le chapitre 3 est une présentation de la simulation d'un système PV-PAC (Fog Logic, Photovoltaic Fuel Cell) avec la comparaison entre les deux systèmes

1 Chapitre 1 :Généralité sur la photovoltaïque et la pile à combustible

1.1 Introduction

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire [1].

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride. Et afin d'amortir le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut multiplier les sources de natures différentes. On obtient alors un système dit multi-sources [2]

1.2 Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées : [2]

- ✚ D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- ✚ d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- ✚ d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- ✚ les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

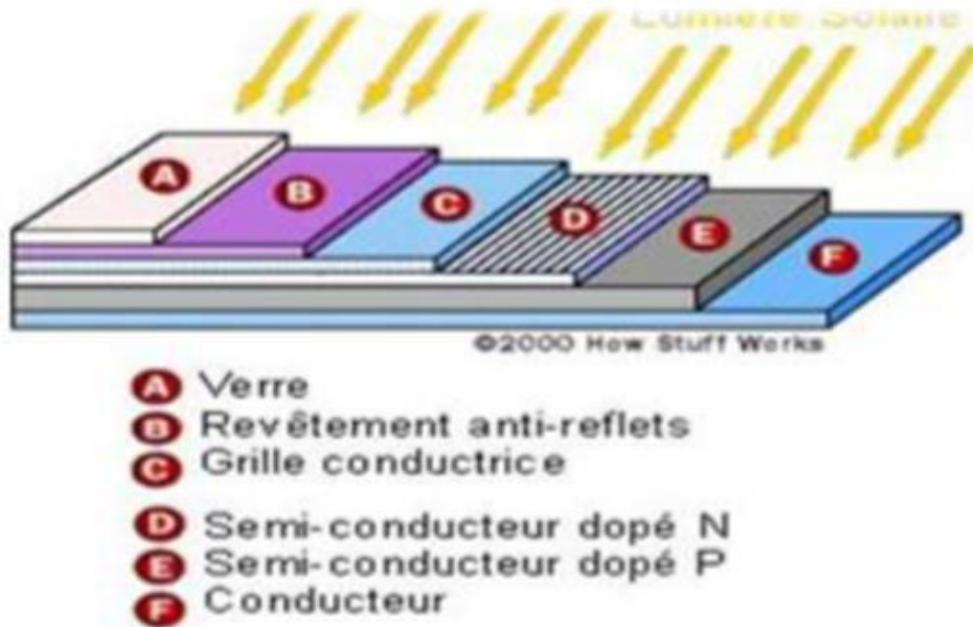


Fig.1.1 structure basique d'une cellule solaire[2]

Une 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 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [4]

En associant les cellules **PV** en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur **PV** selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur **PV** est donnée par [4].

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (1.1)$$

Avec

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV

1.2.1 L'effet photovoltaïque

1.2.1.1 Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la **Fig.1.2**.sans éclairage, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction. Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g .

La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction [4].

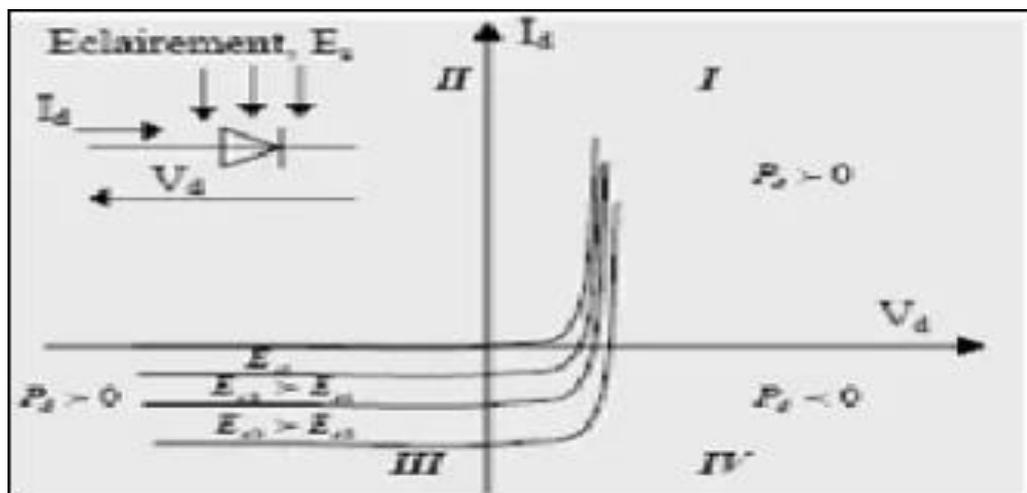


Fig I.1.2 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairages (E).[4]

1.2.1.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ✚ absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- ✚ conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteurs.
- ✚ collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la **Fig I.1.3**

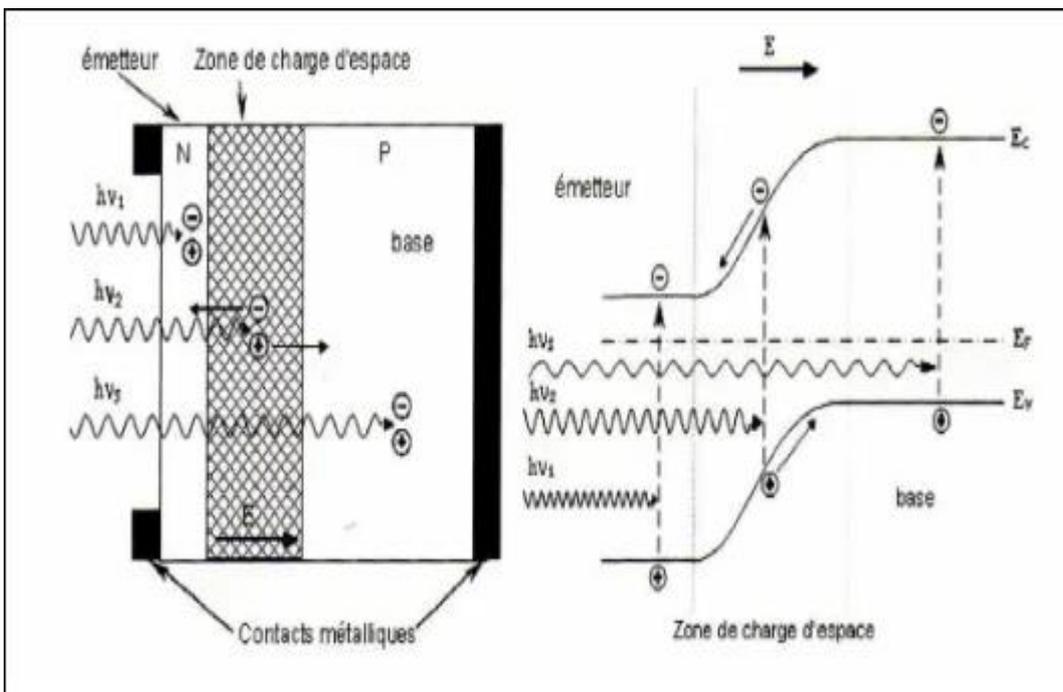


Fig I.1.3: Structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées[4]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

✚ dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un courant de diffusion

✚ dans la zone de charge d'espace, le pair électron/ trou créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un courant de génération [4].

1.2.2 Caractéristique électrique

1.2.2.1 Propriétés

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire **Fig I.1.4**. La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants [26]. Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.

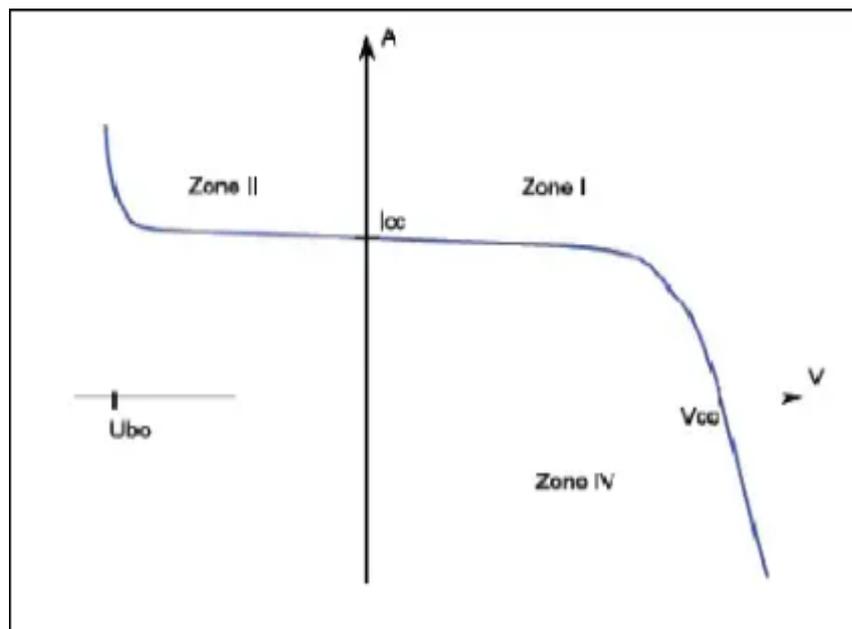


Fig I.1.4: Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque[4].

La tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement. Son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et les tailles de cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin). Une cellule PV peut être modélisée par les schémas présentés sur la (**Fig I.1.5**). La (**Fig I.1.5 (a)**), modélise la cellule PV dans les 1^{er} et 4^{ème} quadrants.

Pour simuler la caractéristique de la cellule dans le 2^{ème} quadrant une quatrième branche est rajoutée en parallèle (**Fig I.1.5(b)**). Cette branche est constituée d'un générateur de tension U_{bo} (U_{bo} tension

d'avalanche) et d'une diode mise en série. Elle simule le fonctionnement de la cellule PV lorsqu'elle est polarisée en inverse [4].

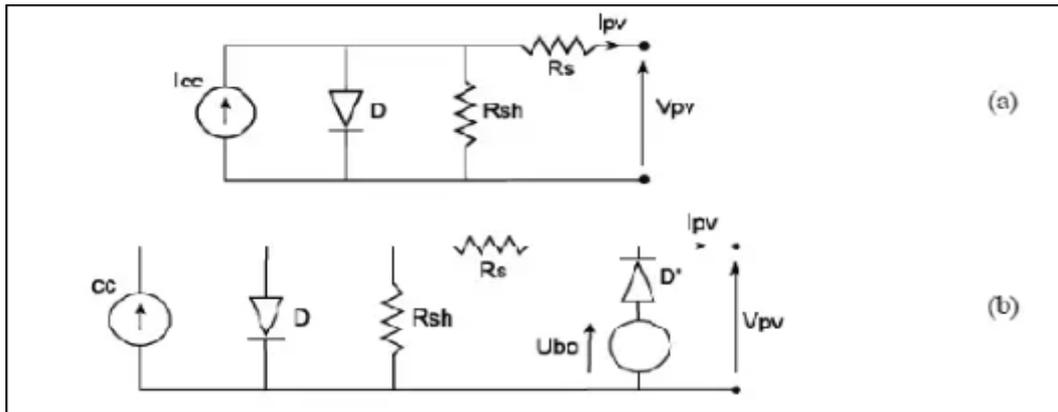


Fig I.1.5: Circuit équivalent complet d'une cellule PV.[4]

I.1.4.1 .1 Mise en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Fig I.1.6 . L'équation (1.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules :

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (1.2)$$

Avec :

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible [4].

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons} = 0.6V \cdot 36 = 21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{op} proche de celle d'une tension de batterie de 12V [4].

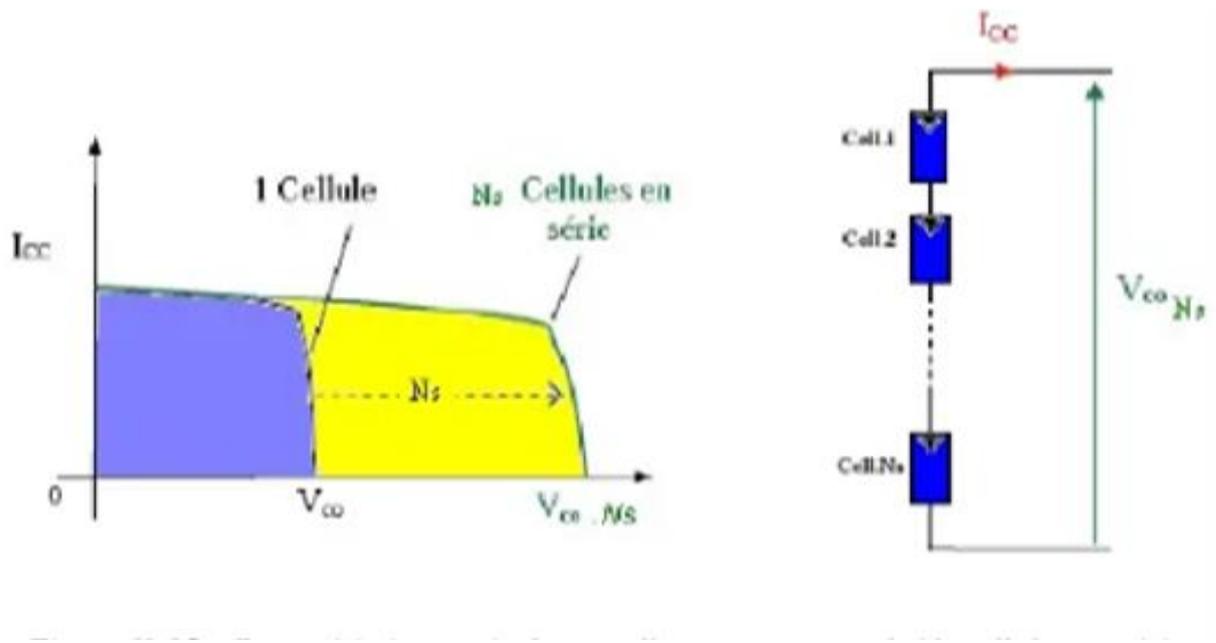
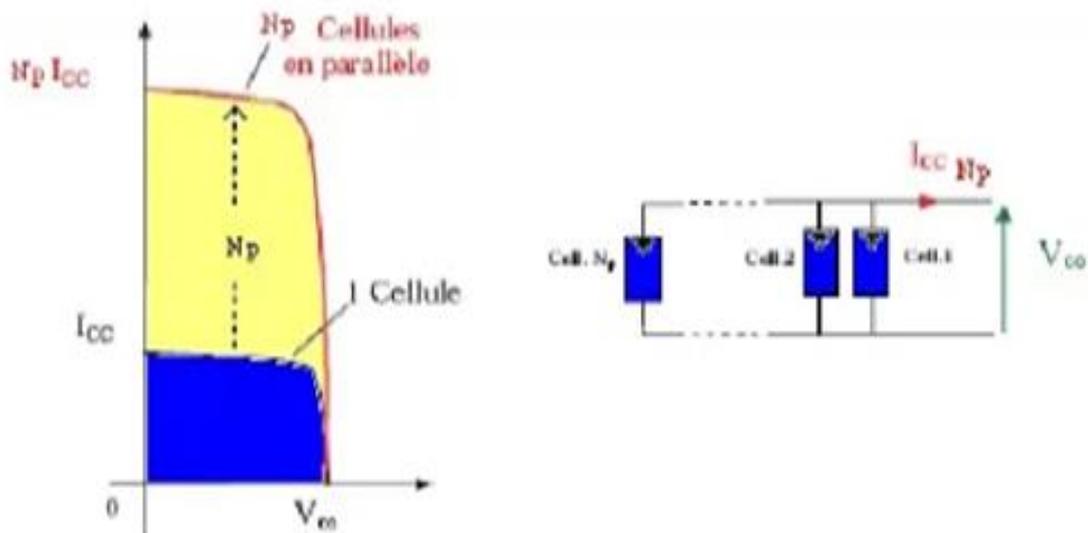


Fig I.1.6 :caractéristique résultant d'un groupement de N_s cellules en série[4]

I.1.4.1 .2 Mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, **Fig.1.7** . L'équation **(1.3)**résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules [4]



FigI.1.7 : caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.[4]

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (1.3)$$

Avec

I_{cc} : le courant de court circuit

1.2.2.2 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.[4]

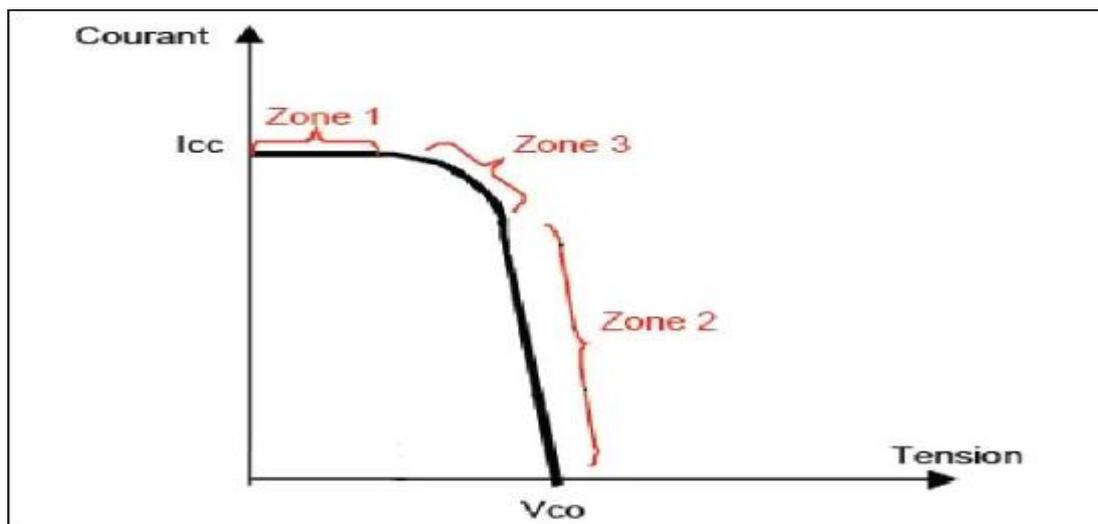


Fig I.1.8 : Les différences zones de la caractéristique I (V)[4]

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- ✚ Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (Zone 1),
- ✚ Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (Zone 2),
- ✚ Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone 3). C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{max} , V_{max}), et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées [4].

1.2.3 La constitution d'un module photovoltaïque

✚ Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

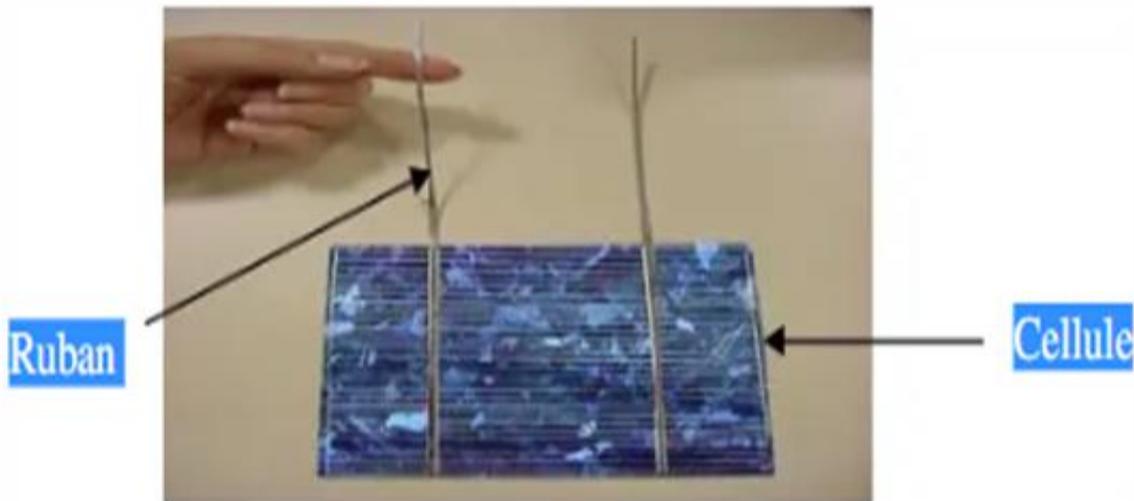


Fig I.1.9 : ruban métallique d'une cellule[4]

- ✚ les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA) : Ethylène Acétate de Vinyle
- ✚ le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- ✚ un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- ✚ la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR
- ✚ connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass
- ✚ les 2 câbles unipolaires sont raccordés [4]

1.2.3.1 Principe de la conversion photovoltaïque

La tension générée par une cellule photovoltaïque 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 [3]

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées sur les deux couches Du semi-conducteur, l'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroitre la quantité de lumière absorbée [3].

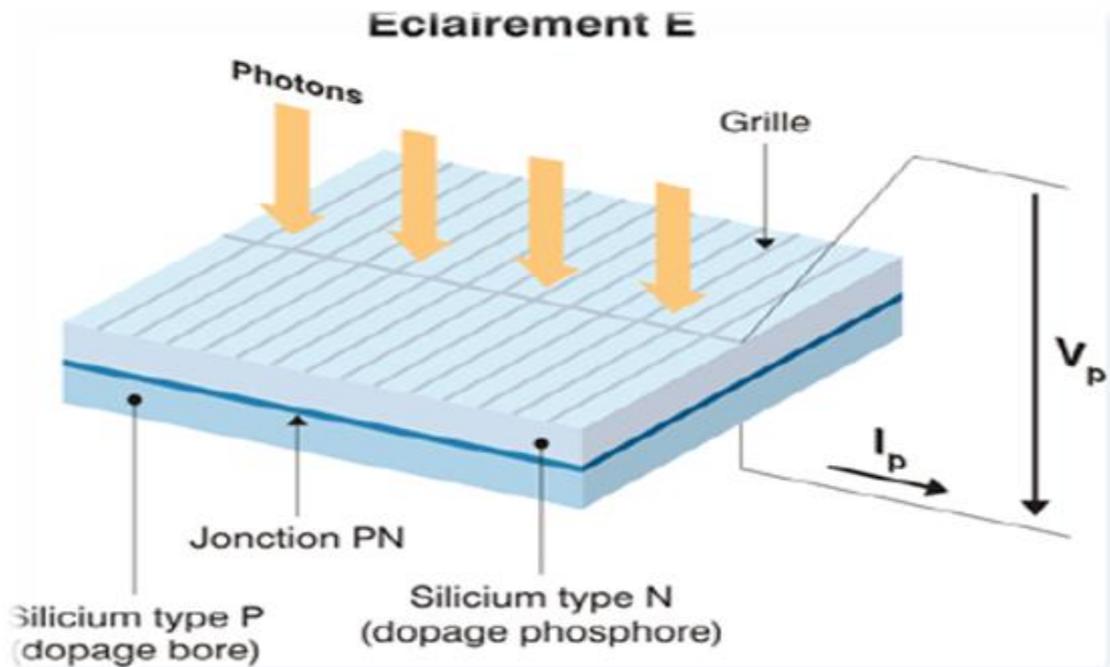


Fig I.1.10 :Schéma d'une cellule élémentaire[3]

1.2.3.2 Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le module PV avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure **Fig I.1.11** représente un champ photovoltaïque [3]



Fig I.1.11 : champ photovoltaïque[3]

1.2.4 Modélisation du module photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. [3].

1.2.4.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure Fig I.1.12 , qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [3]

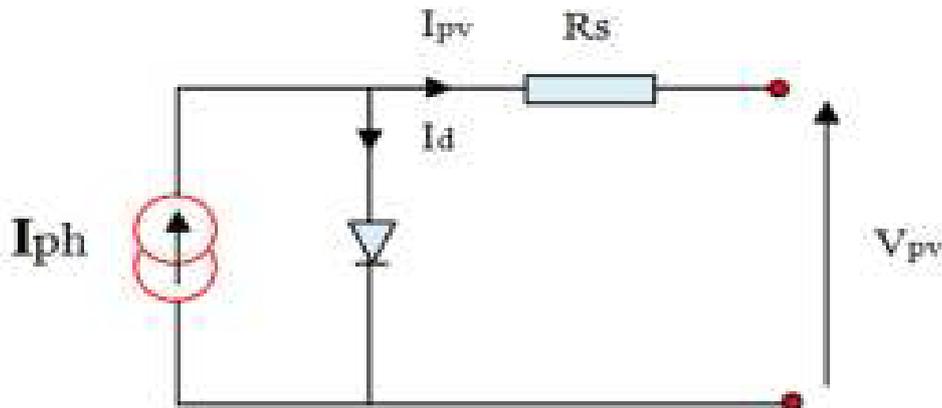


Fig I.1.12 :Schéma équivalent d'une cellule idéale[3]

✚ L'équation retenue de ce modèle est : $I_{pv} = I_{ph} - I_d$ (1.4)

✚ Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{cc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i \times (T_c - T_{ref})] \times \frac{E}{E_{ref}} \quad (1.5)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{v_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (1.6)$$

$$V_t = \frac{BKT}{q} \quad (1.7)$$

1.2.4.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte l'effet résistifs parasites dues a la fabrication et représente sur la Fig I.1.13 . Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure a (R_s) : [3]

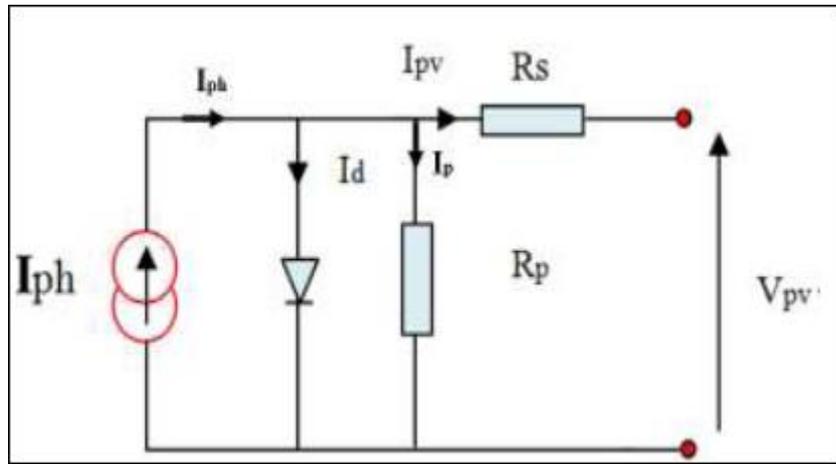


Fig1.13 :Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [3]

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.8)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{vd}{vt}} - 1 \right) \quad (1.9)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (1.10)$$

En substituant les équations (1.7 ; 1.8) dans l'équation (1.6), le courant IPV devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{vt} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (1.11)$$

$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (1.12)$$

1.2.5 Types de cellules photovoltaïques (PV)

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. En dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double.

✚ Cellules au silicium monocristallin :

Les cellules au silicium monocristallin illustré sur la Fig 1.1.14 offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 16 à 19%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite on obtient une puissance de 120 à 190 Wc /m² [5]

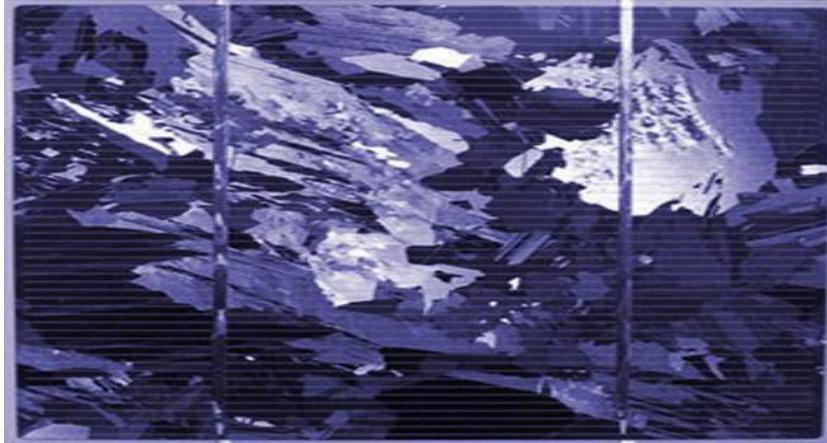


Fig I.1.14 Cellule photovoltaïque monocristalline[5]

✚ Cellules au silicium poly cristallin (ou multi cristallin) :

Les cellules au silicium poly cristallin ont en général un rendement compris entre 12 et 14%. Il faut environ 8m² de cellules pour obtenir 1kWc. Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin, la **Fig I.1.15**représente une cellule PV poly cristallin.

Les cellules poly cristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu. [5]

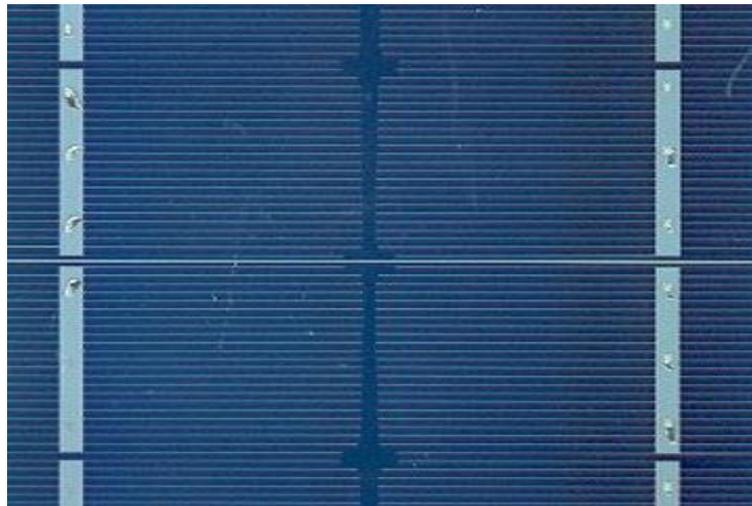


Fig I.1.15Cellule photovoltaïque poly cristallines[5]

✚ Cellules au silicium amorphe

Les cellules photovoltaïques amorphes comme sur la **Fig I.1.16**sont fabriquées avec un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Les cellules sont de couleur gris foncé.

Il s'agit d'un type de cellule bon marché, que l'on retrouve dans la plupart des objets du quotidien fonctionnant à l'énergie solaire (calculatrice et montre solaire par exemple). Cette technologie est pratique car utilisable sur de nombreux supports et elle peut fonctionner si faible ensoleillement. Cependant ces cellules ont des rendements limité (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m² pour obtenir 1kWc) [5]

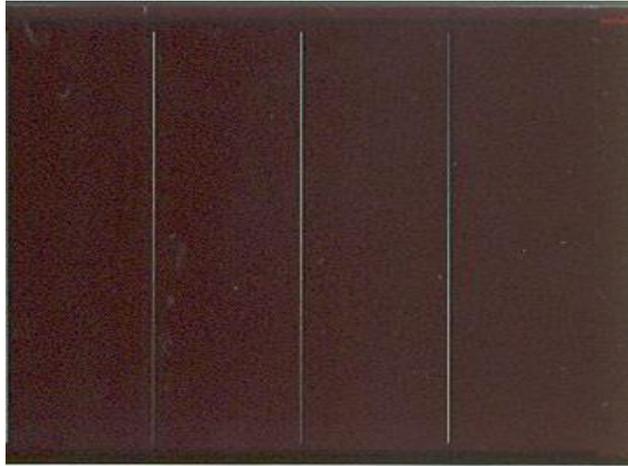


Fig I.1.16 Cellule photovoltaïque amorphes.[5]

1.2.6 Commande

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique (α) en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires. [18]

✚ Algorithme Perturber et observer, 'P&O' :

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique (α). En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant ($k - 1$). Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, 'PMP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'PMP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. [18]

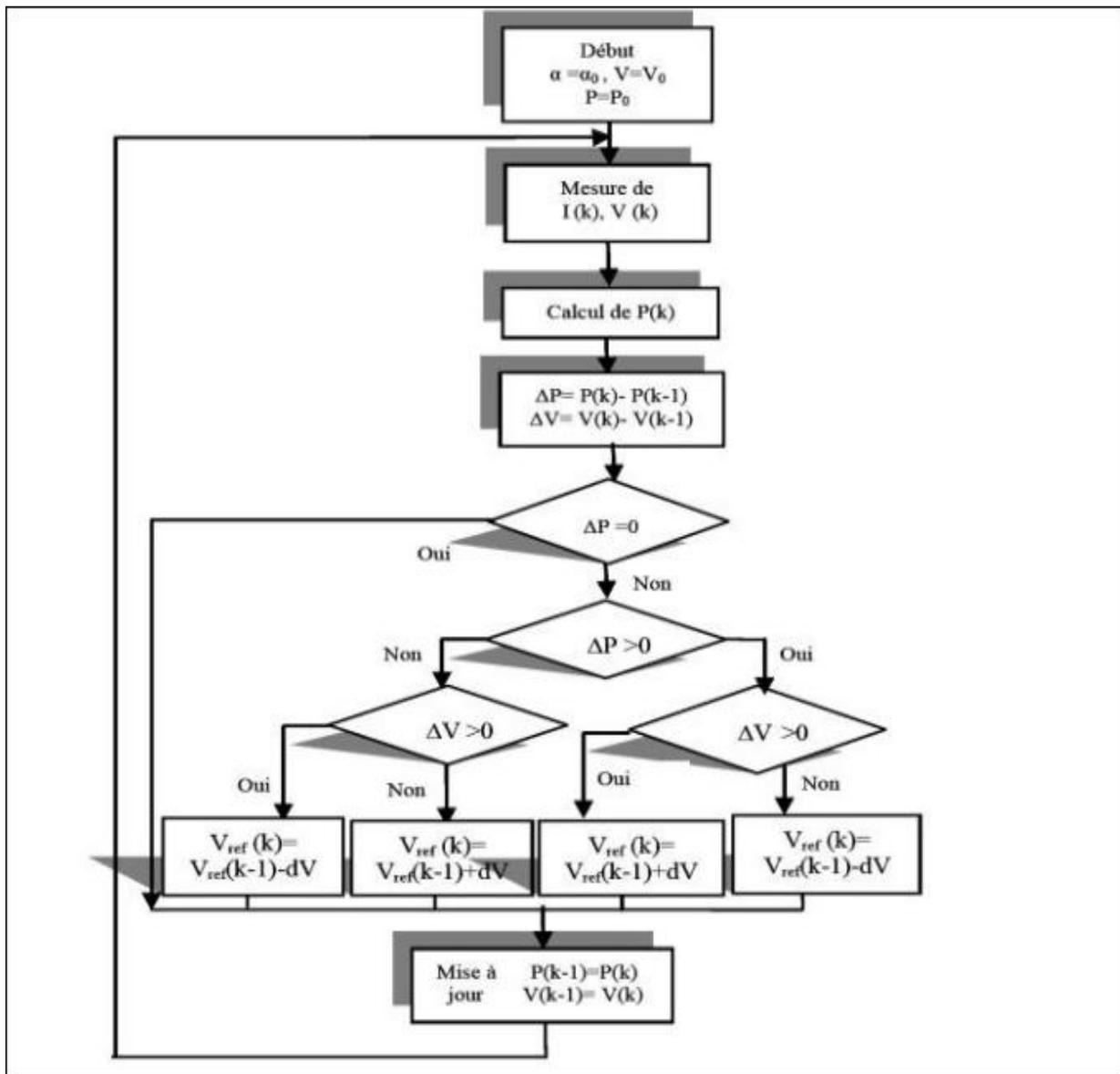


Fig I.1.17 : Organigramme Algorithme Perturber et observer, 'P&O' [18]

✚ Algorithme Incrément de la conductance, 'INC' :

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'PMP'. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. [18]

Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'PMP'

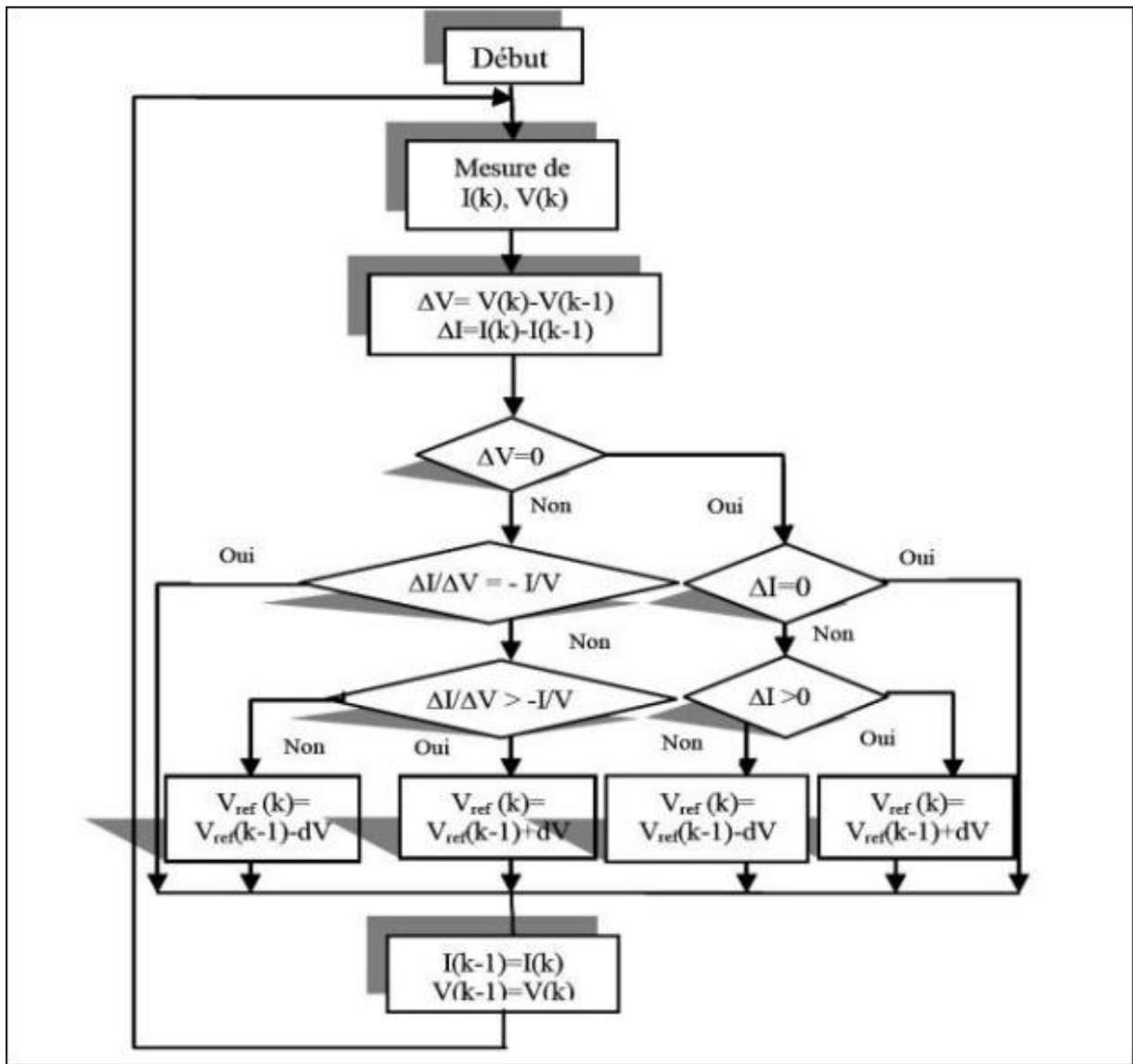


Fig I.1.18 : Organigramme Algorithme Incrément de la conductance, 'INC' [18]

✚ Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{oc} :

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante: $V_{mp} = k \times V_{oc}$, Où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8. [18]

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{oc} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale. [18]

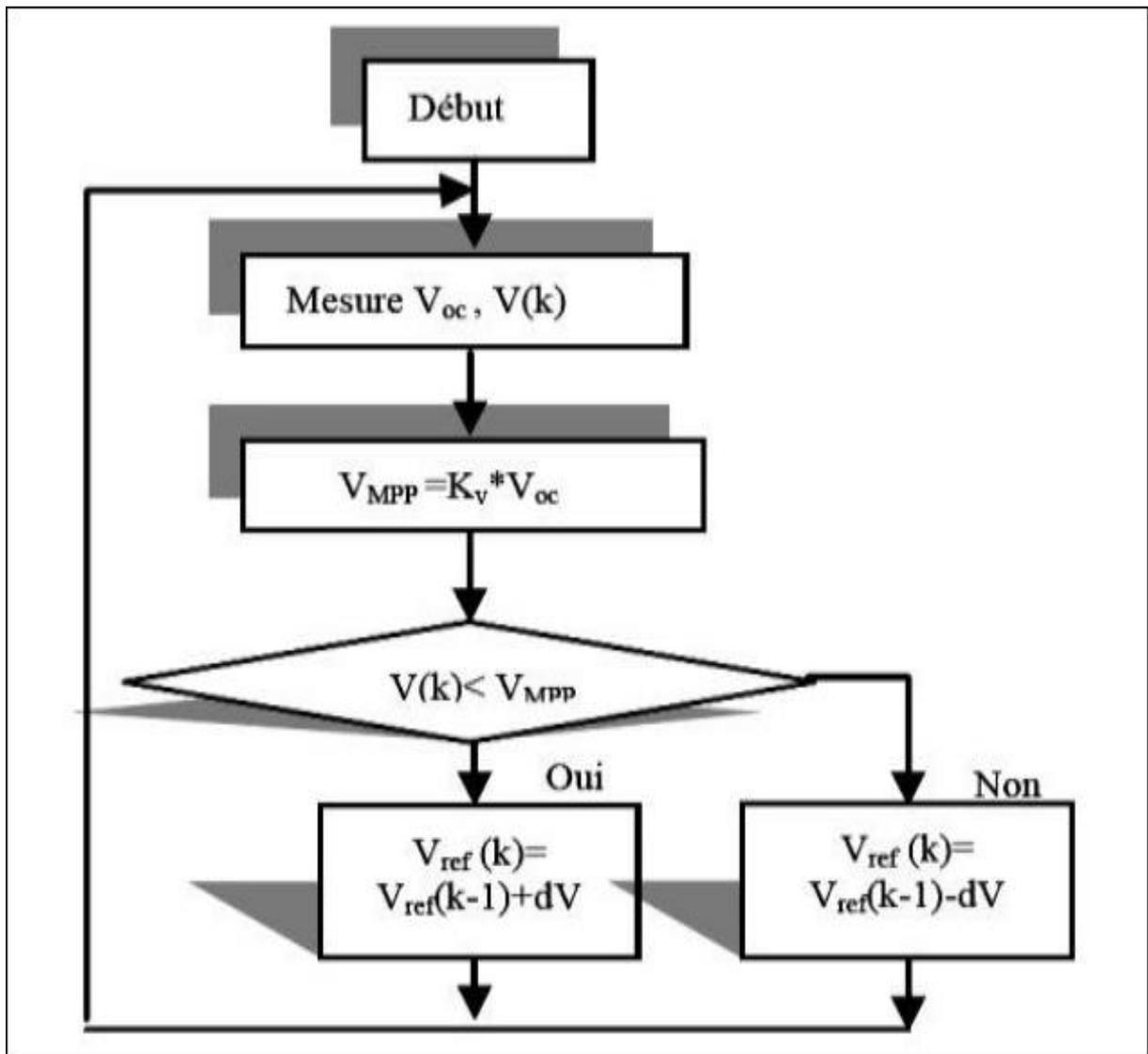


Fig I.1.19: Organigramme Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension V_{cc} [18]

✚ Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc} :

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante:

$I_{mp} = k \times I_{cc}$, Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92. [18]

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal.

Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale[18]

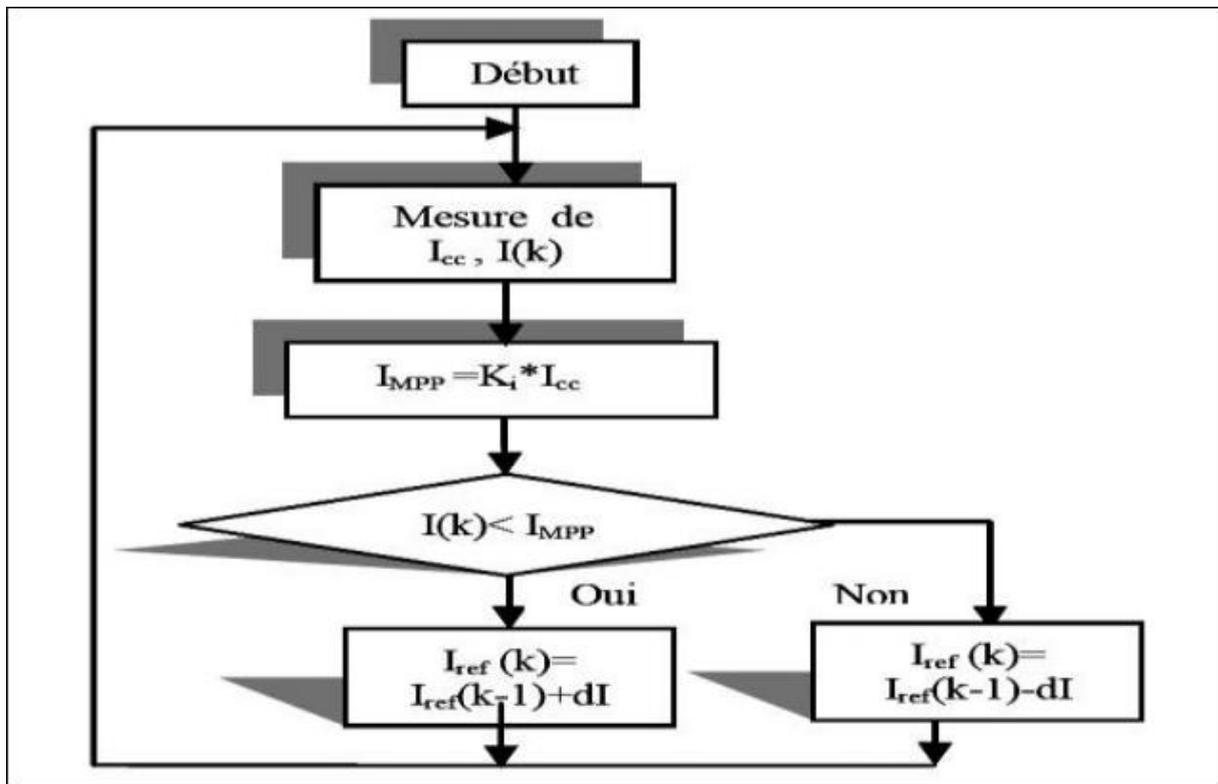


Fig I.1.20 : Organigramme Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant I_{cc} [18]

✚ Algorithme à base de la logique floue :

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

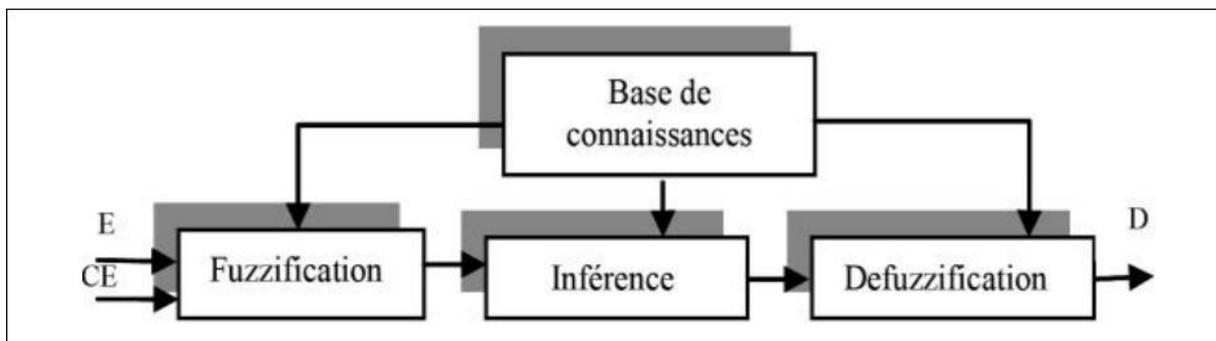


Fig I.1.21 : Schéma Algorithme à base de la logique floue [18]

En particulier, cette commande est mieux adaptée aux systèmes non linéaires. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois blocs: la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Fig I.1.21). La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous.

Dans notre cas, on a deux entrées, l'erreur E et la variation de l'erreur CE définies comme[18]

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{I(k) - I(k-1)} \quad \dots \quad CE = E(k) - E(k-1) \quad (1.13)$$

1.2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques, et nous nous sommes intéressés à la production photovoltaïque. Dans ce qui suit, nous étudierons la logique floue et la précision de son contrôle pour fournir la meilleure valeur qu'un panneau solaire peut produire

1.3 Généralité sur la pile à combustible

1.3.1 Introduction

Une pile à combustible est un générateur d'énergie électrique. Elle transforme directement l'énergie chimique du combustible en énergie électrique. C'est un système qui ne produit pratiquement pas de nuisances sonores, puisqu'il ne comporte pas de composants mécaniques en mouvement, comme les turbines et les moteurs. De plus, le courant électrique est produit tant que la pile est alimentée conjointement en combustible (hydrocarbures, alcools, biomasse, gaz naturel, hydrogène) et en comburant (oxygène de l'air). Aujourd'hui, la pile à combustible a atteint une maturité technique la rendant opérationnelle dans plusieurs domaines d'applications.[7]

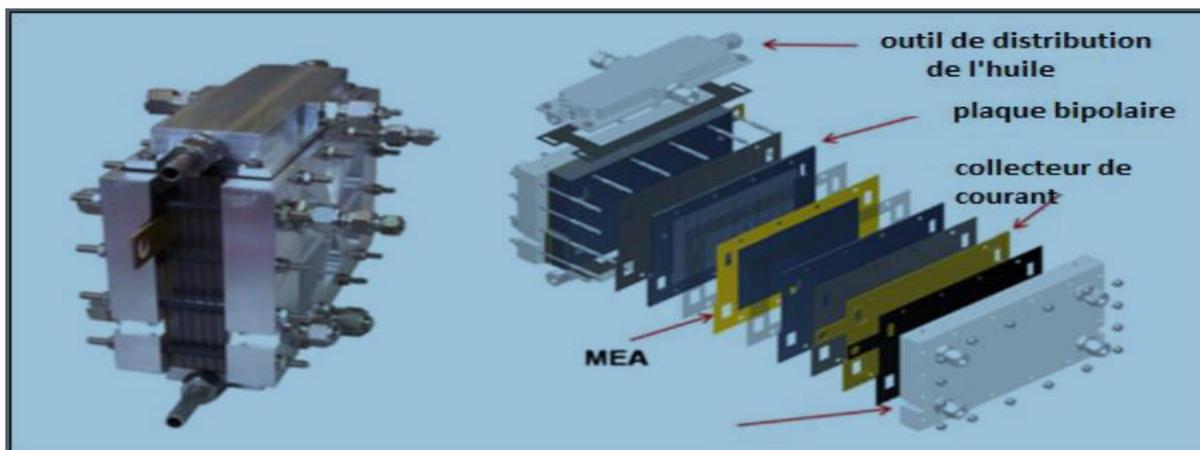


Fig I.2.1 Pile à combustible.[7]

1.3.2 Historique

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839. Toutefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation n'étant alors pas une nécessité.

Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une « redécouverte » vers la fin du 20^e siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits.. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un

courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Christian Friedrich Schönbein observe en réalisant une électrolyse que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience.

En 1839, lors d'une conférence scientifique à Birmingham, Schönbein rencontre l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillait à l'époque sur les batteries électriques. Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes. Ceci débouche sur la célèbre expérience de Grove avec une pile à combustible: il s'agissait d'une cellule hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Nous sommes en 1845, Grove génère un courant sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, c'est la première pile à combustible.

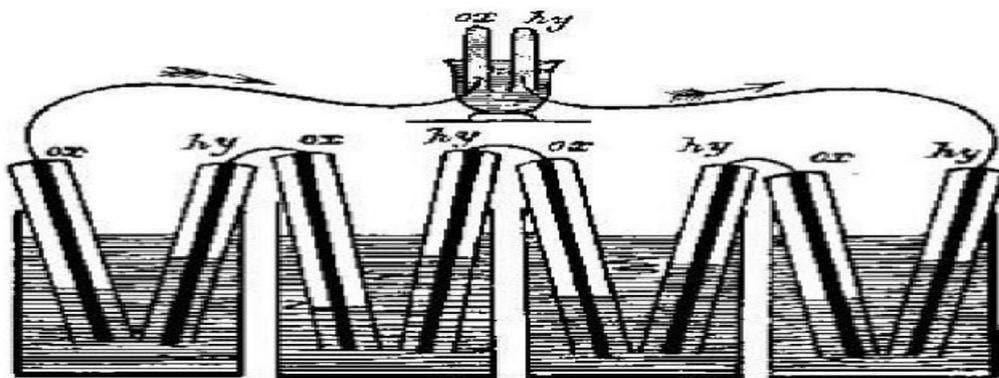


Fig I.2.2: L'expérience de Sir William Grove. [8]

Par la suite, la pile à combustible resta plus ou moins en latence durant près d'un siècle et après quelques légères améliorations par différents scientifiques du début du 20ème siècle, c'est Francis T. Bacon qui en 1935 enclenche le progrès le plus important en réalisant un prototype de pile à combustible remplaçant l'électrolyte acide par un électrolyte alcalin. L'avantage de ce dernier est d'être moins corrosif pour les électrodes. Cette pile à combustible aboutira en 1953 sur la création d'un premier générateur électrique de 1kW.

Le principe physique est établi, des dizaines de laboratoires et d'industriels vont se lancer dans les piles à combustible.

Néanmoins les coûts restant très élevés, ils sont un obstacle important à son utilisation, hormis pour la NASA qui peut se permettre de tels investissements. Ainsi elle l'utilise, avec succès, comme générateur électrique pour les missions Gemini et Apollo en 1963 et 1968.



Fig I.2.3: Projet Gemini. [9]

Dans les années 1980 alors que les Etats-Unis et le Japon vont poursuivre de manière très active leurs recherches, l'Europe (à l'exception de l'Allemagne) va se désintéresser de ces travaux.

Ainsi, depuis sa découverte la pile à combustible a connu de nombreuses améliorations (perfectionnement des électrodes, optimisation de la température de fonctionnement ...), mais le principe reste le même. [8]

1.3.3 Applications des piles à combustibles

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées. [11]

1.3.3.1 Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement.

1.3.3.2 Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).

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

Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude).

Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.

1.3.3.3 Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante.

1.3.4 Les différents types de piles à combustible

De manière concrète, plusieurs technologies existent suivant les types de constituants considérés. [12]

On les classe souvent suivant les électrolytes utilisés comme le présente la **Tableau 1.1**

Tableau 1.1: Les différents types de piles à combustible.

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydants	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime (?)	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU), Maritime (?)

SOFC: (Solid Oxide Fuel Cell), [12]

MCFC : (Molten Carbonate Fuel Cell),

AFC: (Alkaline Fuel Cell),

DMFC: (Direct Methanol Fuel Cell),

PAFC: (Phosphoric Acid Fuel Cell),

PEMFC: (Proton Exchange Membrane Fuel Cell),

1.3.5 Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

Les avantages

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages : [13]

- ✚ De hauts rendements énergétiques même à charge partielle
- ✚ De faibles émissions sonores
- ✚ Peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé)
- ✚ Elles sont de construction modulaire,
- ✚ Diverses températures de fonctionnement (PEMFC)
- ✚ Pas de parties rotatives.

Les inconvénients

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ?

En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler : [13]

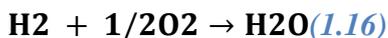
- ✚ Le coût.
- ✚ Le poids et le volume.
- ✚ La durée de vie.
- ✚ La gestion thermique du module.
- ✚ Le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi.

1.3.6 Pile à Combustible PEMFC

La pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) est un convertisseur d'énergie permettant de transformer une énergie chimique en énergie électrique. Les avantages de cette technologie face aux préoccupations écologiques de nos jours sont surpassés par la trop courte durée de vie actuelle de cette technologie. Ainsi dans la suite seront développés un historique rapide concernant la pile à combustible de manière à mettre en lumière l'absence d'intérêt qui lui fut porté. Le fonctionnement des différents types de piles existants sont ensuite évoqués avant de se concentrer sur la pile PEMFC. [9]

1.3.7 principe de fonctionnement d'une PEMFC

Une pile à combustible fonctionne sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau. Des Réactifs chimiques permettent la production d'énergie électrique. De manière générale, le combustible est de l'hydrogène et il se combine avec de l'oxygène pour former de l'eau selon une réaction chimique globale universellement connue :[14]



La réaction électrochimique met en œuvre une membrane d'électrolyte solide conductrice de protons, et théoriquement imperméable aux gaz réactifs (Hydrogène et Oxygène). L'électrolyte est prise en sandwich entre deux électrodes (l'anode et la cathode). L'assemblage membrane d'électrodes (MEA, Membrane Electrode Assembly), est représentée schématiquement sur la Fig I.2.4.

Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs pour activer la réaction d'un côté. À l'anode,

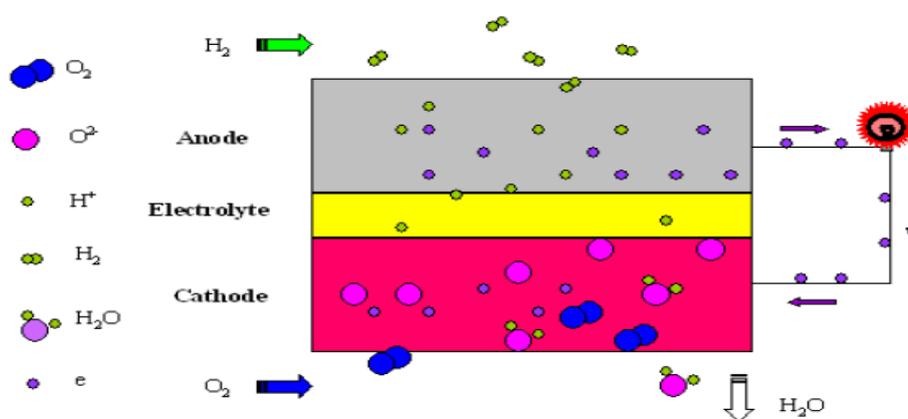
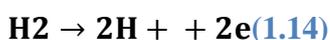


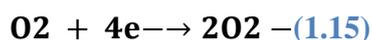
Fig I.2.4 : principe de fonctionnement d'une pile de PEM[14]

Les ions et les électrons sont produits par l'oxydation du combustible (hydrogène), selon l'équation 1.14. Les électrons sont toujours transférés de l'anode à la cathode. Et puis, à la cathode, les électrons permettent la réduction de l'oxydant (oxygène de l'air) et la production des ions d'oxygènes comme l'équation 1.15. Les réactions électrochimiques peuvent être représentées de façon schématique par :

À l'anode :

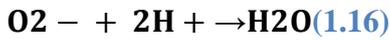


À la cathode :



Comme l'électrolyte est un conducteur protonique, le matériau ne permet que le passage des ions. Les ions produits sur l'anode sont toujours transférés de l'anode à la cathode. Finalement, à la cathode, les ions se combinent avec les ions oxygènes pour donner des molécules d'eau. Les réactions électrochimiques peuvent être représentées de façon schématique par l'équation 1.16.

À la cathode :



Cette relation correspond à celle de la combustion de l'hydrogène et l'oxygène. L'énergie de la réaction est libérée combustion se produit à l'aide d'un catalyseur en platine (Pt).

La réaction chimique globale de la pile est la suivante



1.3.8 Structure de la pile à combustible PEMFC

La cellule de type PEMFC est constitué d'une membrane (l'électrolyte), de deux électrodes (catalyseurs), de deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires.[15]

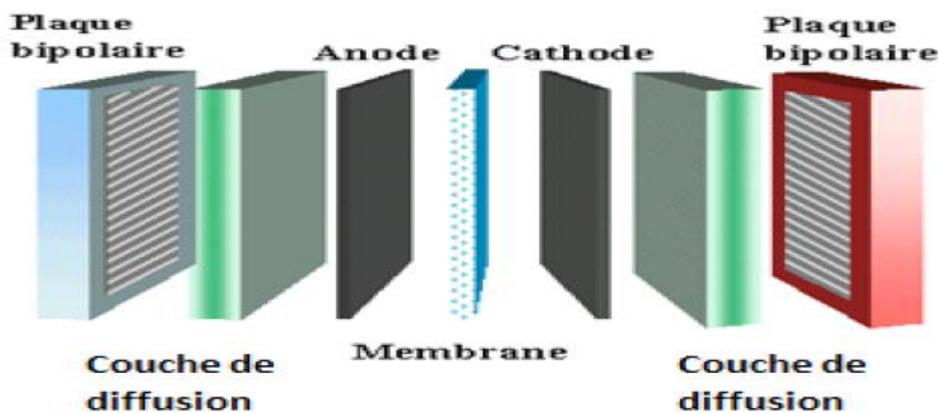


Fig I.2.5: Composants d'une cellule PEMFC[15]

1.3.8.1 Electrodes

Un électrolyte est une substance qui permet la dissociation d'un élément en ions chargés négativement et positivement. Le développement de ce composant, membrane conductrice de protons, a été l'élément clef de la percée des piles PEMFC à partir des années quatre-vingt. Plusieurs propriétés sont demandées à ces polymères:

- ✚ une conductivité protonique plus élevée que possible, afin de limiter les pertes associées à la chute de tension due à la résistance interne;
- ✚ une étanchéité suffisante pour empêcher le mélange des réactifs.

Les membranes répondant aujourd'hui à ces spécificités sont composées de macromolécules per fluorées contenant des fonctions acides SO_3H^+ dont la dissociation en présence d'eau permet la mobilité des protons. Leur température maximale d'utilisation est aux environs de $85^\circ C$. [10]

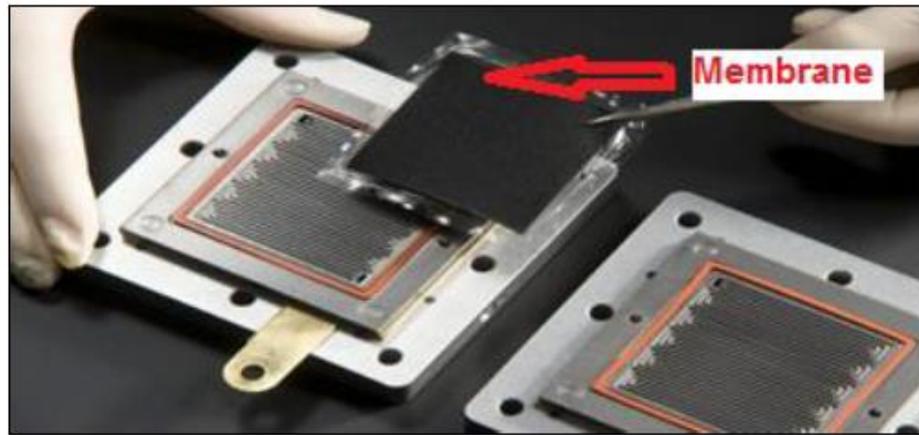


Fig I.2.6 Montage d'une membrane entre les plaques bipolaires. [7]

1.3.8.2 Couche de diffusion

C'est une couche poreuse entre la couche de catalyseur et la plaque bipolaire, elle a plusieurs fonctions :

- ✚ fournit un chemin pour les réactifs des canaux d'écoulement à la couche de catalyseur.
- ✚ fournit un chemin pour l'eau produite de la couche de catalyseur aux canaux d'écoulement.
- ✚ relie électriquement la couche de catalyseur à la plaque bipolaire, permettant aux électrons d'accomplir le circuit électrique.
- ✚ Sert également à transporter la chaleur produite par les réactions électrochimiques dans la couche de catalyseur à la plaque bipolaire, qui a des moyens pour l'évacuer.
- ✚ fournit un appui mécanique au cœur de la pile (les deux couches de catalyseur et la membrane), et empêche-le de fléchir dans les canaux d'écoulement.[15]

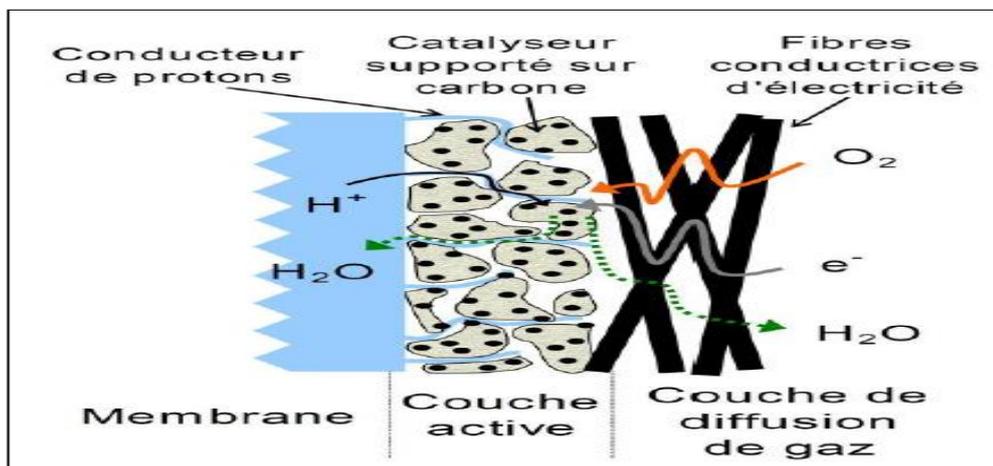


Fig I.2.7 Schéma d'une couche de diffusion. [7]

1.3.8.3 Plaque bipolaire

Les plaques bipolaires dirigent le carburant et l'oxydant des deux côtés opposés des assemblages membrane-électrodes. Chaque plaque contient des canaux de conception sinueuse qui maximise la répartition des gaz (**Fig.1.2.8**). La forme des canaux de gaz est un paramètre important pour la production

uniforme d'électricité, un fonctionnement stable des cellules et la gestion de l'eau. Des conceptions différentes des plaques bipolaires sont adaptées aux diverses applications de pile à combustible.

Chaque plaque doit être électriquement conductrice pour que le courant issu de la réaction électrochimique puisse passer d'une cellule à l'autre, et finalement aux bornes électriques. Les plaques sont typiquement faites de graphite les canaux étaient usinés ou pressés. Le graphite est le matériau préféré en raison de sa conductivité excellente, sa neutralité et son coût relativement bas.

Les plaques de refroidissement placées entre les cellules ou les groupe de cellules sont de conception similaire, les canaux de refroidissement étant conçus pour maximiser les échanges thermiques. Les plaques bipolaires de refroidissement comportent les entrées et sorties de fluides et assurent la liaison avec les plaques voisines. Des joints entre les plaques s'assurent que les flux de carburant, d'oxydant et de liquide de refroidissement ne se mélangent pas.[16]

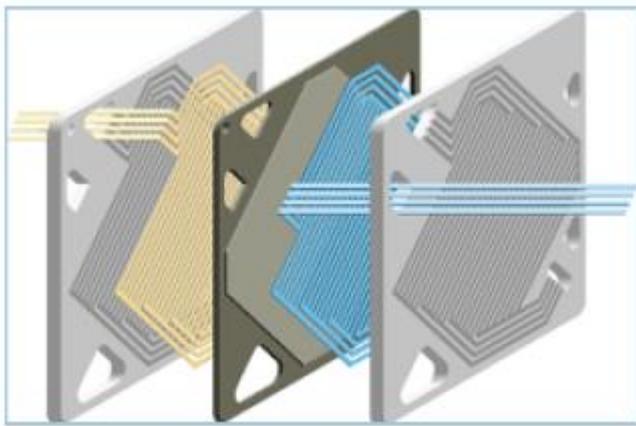


Fig I.2.8 : Plaques bipolaire de pile PEM [16]

1.3.8.4 Humidificateur

L'humidification des gaz réactifs est un aspect important du fonctionnement des piles PEM. Sans une bonne humidification de la membrane, la conduction des ions ne peut pas se produire et des dommages de la pile à combustible peuvent résulter. La quantité d'eau qu'un gaz peut absorber dépend fortement de la température d'humidification, en particulier à basse pression. Sur certains Stack , des humidificateurs sont intégrés au stack lui-même. Sur d'autres, les humidificateurs sont des composants externes.[16]

1.3.8.5 Electrolyseurs

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible. Il décompose l'eau en hydrogène et oxygène lorsqu'il est électriquement alimenté (**Fig I.2.9**) .

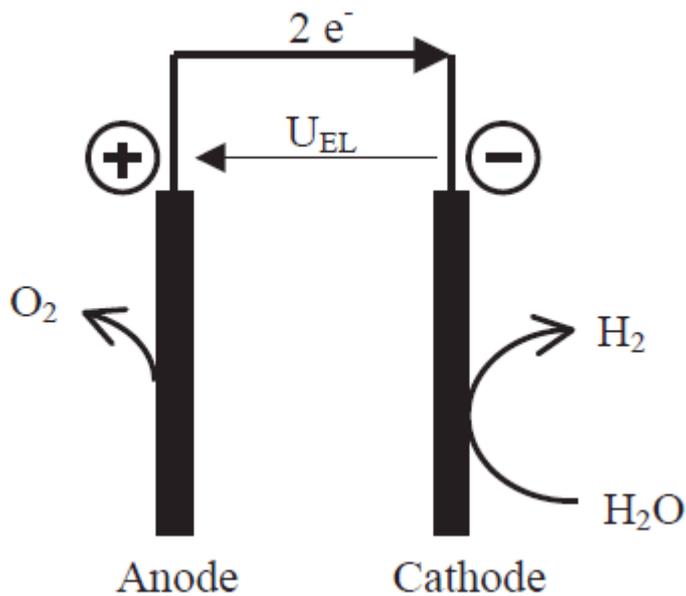


Fig I.2.9 Schéma de fonctionnement d'une cellule d'un électrolyseur.[16]

1.3.9 Les avantages et les inconvénients de PEMFC

Les avantages

- ✚ Un bon rendement électrique, même à charge partielle.
- ✚ Je Une faible émission de polluants (en fonction du combustible utilisé).
- ✚ Je Une architecture modulaire et compacte.
- ✚ Je De faibles émissions sonores.
- ✚ Je L'absence de pièce mobile.[6]

Les inconvénients sont

- ✚ Coût trop élevé de production et de maintenance.
- ✚ Durée de vie trop faible.
- ✚ Gestion thermique délicate.
- ✚ Disponibilité insuffisante de l'hydrogène.[6]

1.3.10 Conclusion

Les piles à combustible sont en passe d'évoluer du cap de la recherche et des projets pilotes vers des premières applications industrielles et ces performances doivent encore être améliorées. Dans ce chapitre, nous avons réalisé une description globale d'une pile à combustible de type PEMFC, de son fonctionnement et de son intégration dans un système pile à combustible. La complexité de ce dernier due aux auxiliaires.

Parmi ces auxiliaires, le circuit d'amenée d'air composé d'un compresseur, d'où un rappel théorique, comparaison entre les différents types et ses meilleurs choix avec la PàC ont été fait. [27]

1.4 Systèmes PV-H2 existants [29]

Les projets couplant un générateur renouvelable et un système de stockage par l'hydrogène sont étudiés depuis 1986. Equipés d'un parc de batteries assurant le stockage journalier de l'électricité, ces systèmes stockent l'énergie d'une saison à une autre grâce à l'hydrogène.

1.4.1 Présentation des projets

Le **Tableau I.2** répertorie les principaux projets réalisés. Le premier système a été réalisé en Allemagne en 1986. Les projets de taille très variée (de 150 W à 350 kW de génération d'hydrogène solaire ou éolien) ont été soit menés en laboratoire, soit intégrés à la société (FhG-ISE, PHOEBUS et SSHP) ou soit développés par des industriels (SWB).

De nombreux documents existent sur ces projets. Les références proposées au **Tableau I.2** correspondent aux documents les plus récents qui se reportent aux premiers articles de ces projets.

Nom du projet / année	Instituts / compagnies / lieux	Description de l'étude	Puissance installée
Solar Wasserstoff Bayern 1986 [12]	Compagnie d'électricité SWB, Bayernwerk, BMW, Linde et Siemens, Neunburg Vorn Wald, Allemagne	Projet de démonstration de production d'électricité et stockage. Utilisation de l'hydrogène à échelle industrielle.	370 kW _e
HYSOLAR 1986 [12]	DLR, Stuttgart, Allemagne	Identification des applications PV-H ₂ . Production d'hydrogène jusqu'en 1992. Utilisation H ₂ .	2 kW _e , 10 kW _e et 350 kW _e
NEMO 1989 [13]	Helsinki University of Technology, Espoo, Finlande	Démonstration de la possibilité technique d'un système PV-H ₂ 100% autonome.	1,3 kW _e
Oldenburg 1990 [14]	Renewable Energy Group, Oldenburg, Allemagne	Evaluation des systèmes H ₂ et problèmes techniques.	6,2 kW _e 5 kW WT 12 kW GD = 23,2 kW
INTA 1990 [15]	INTA Energy Laboratory, Mazagón, Espagne	Production d'hydrogène solaire, puis stockage dans un métal hydrure et utilisation d'une PAFC. Système non intégré.	7 kW _e
SSHHP 1991 [16]	Schatz Solar Hydrogen Project, Humbolt State University, Arcata, USA	Démonstration que l'hydrogène est un bon stockage pour l'énergie solaire et plus généralement que les PV-H ₂ systèmes sont des sources d'énergie sécurisées et fiables.	9,2 kW _e pompe d'aquarium
ATEL 1991 [17]	Aere-Tessin Electricity Supply Co. + Paul Scherrer Institute, Suisse	Banc d'essai : production d'hydrogène solaire et utilisation dans une pile à combustible. Système non intégré.	90 kW _e
PECS 1992 [18]	Photovoltaic Energy Conversion System, The Copper Union, New York, USA	Démonstration et évaluation.	150 W _e
FhG-ISE 1992 [19]	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Allemagne	Démonstration en site isolé. Maison solaire, isolée du réseau.	4,2 kW _e
PHOEBUS 1993 [20]	Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Allemagne	Développement et tests d'un système solaire-hydrogène autonome. Application réelle : Bibliothèque, isolée du réseau.	43 kW _e
SAPHYS (JOULE II) 1990 [21]	ENEA-energy area advanced energy technologies (It), Institut For Energy (No), KFA (FZJ, De) et CEE, Italie	Enquête et tests sur les technologies « hydrogène »	5,6 kW _e
HRI 2000 [22]	Institut de recherche sur l'hydrogène, Trois-Rivières, Québec	Tests expérimentaux pour déterminer les meilleures méthodes de dimensionnement et de stratégies de contrôle.	1 kW _e 10 kW WT =11 kW

Tableau I.2: Principaux projets sur les systèmes autonomes de production d'énergie couplant générateurs renouvelables et stockage d'hydrogène[29]

Nom du projet / année	PV	EL	ST (kWh/PCS)*	FC	Batteries	Architecture électrique	modélisation
SWB 1986	370 kW _e	2 x 100 kW alc. à Pa + 100 kW alc. à 30 bar	5 000 m ³ H ₂ + 500 m ³ O ₂ 30 bar (532 kWh H ₂)	6,5 kW alc. + 79,3 kW PA + 10 kW PEM	Raccordé au réseau (surplus PV)	Bus DC 300-453V	JULSIM (PHOEBUS) SIMWELLY
HYSOLAR 1986	10 kW _e	10 kW alc.		PEM			HYSOLAR
1991	350 kW _e	350 kW alc.	compressé	FC			HYSOLAR
NEMO 1989	1,3 kW _e	0,8 kW alc. 30 bar	8 m ³ - 25 bar (710 kWh)	0,5 PAFC	14 kWh	Bus DC 30V	H2PHOTO (Turbo Pascal)
Oldenburg 1990	6,2 kW _e PV + 5 kW WT + 12 kW DG	0,8 kW alc. - Pa	0,25 m ³ H ₂ - 120 bar (106 kWh)	0,6 kW alc.	104 cellules - 300 Ah - 62,4 kWh	Bus DC 190-250V DC/DC pour chaque appareil	INSEL
INTA 1990	7 kW _e	5,2 kW alc.	24 m ³ MH + 8,8 m ³ - 200 bar (6 250 kWh)	10 kW PA 2,5 kW PEM 5 kW PEM		Couplage direct PV-EL	
SSHP 1991	9,2 kW _e	5,76 kW alc. 7,9 bar	5,7 m ³ - 7,9 bar (160 kWh)	1,5 kW PEM	24 V - 220 Ah	Bus DC 20-30V	PVINTER
ATEL 1991	90 kW _e	90 kW PEM (ABB)		2 x 3 kW PEM			
PECS 1992	150 W _e PV	95,2 W PEM 7 bar	9 m ³ - 7 bar Metal Hydrure			Couplage direct PV-EL	PECS II
FhG-ISE 1992	4,2 kW _e	2 kW PEM	15 m ³ H ₂ 7,5 m ³ O ₂ 30 bar (1600 kWh)	0,5kW PEM - 12V	48V - 400 Ah = 19,2 kWh	Bus DC 48 V DC/DC FC	TRNSYS (Fortran)
PHOEBUS 1993	30 kW _e	26 kW alc. 7 bar	25 m ³ - 120 bar H ₂ , 20 m ³ - 70 bar O ₂ (~10 MWh)	5,6 kW PEM	220 V - 304 kWh	Bus DC 220V	SIMELINT
SAPHYS (JOULE II) 1994	5,6 kW _e	5 kW alc. 20 bar	15 m ³ 20 bar (106 kWh)	3 kW PEM 22-30 V	34 V - 1500 Ah - 53 kWh	Bus DC 36V DC/DC EL et FC	JULSIM (PHOEBUS) SIMWELLY
HRI 2000	10 kW WT +1 kW _e PV	5 kW alc. 7 bar	3,8 m ³ - 10 bar (125 kWh)	5 kW PEM (Ballard) 24 V	48 V	Bus DC 48V	

Tableau I.3: Caractéristiques des systèmes installés et présentés dans le tableau précédent.[29]

* Un volume d'hydrogène de 1 m³ dans les conditions normales (pression atmosphérique, température de 0 °C) correspond à 3,55 kWh (PCS).

Les abréviations utilisées sont précisées dans le glossaire.

Le but de ces études est de démontrer la possibilité technique de produire de l'hydrogène solaire et d'utiliser l'hydrogène pour alimenter une charge variable. Certaines études ont évalué les rendements de conversion et déterminé les problèmes techniques des appareils électrochimiques. D'autres études se sont concentrées sur l'optimisation des systèmes en terme de dimensionnement et de stratégie de contrôle. Enfin, la sécurité et la fiabilité de ces systèmes sont abordées dans de nombreux documents. Les résultats sont résumés dans les paragraphes suivants.

Le **Tableau I.3** décrit les principales caractéristiques des systèmes.

- ✚ Les générateurs utilisés sont parfois des panneaux photovoltaïques, des éoliennes voire des générateurs diesel.
- ✚ Les électrolyseurs utilisés sont de technologie alcaline ou à membrane. Les pressions de fonctionnement sont comprises entre 1 et 30 Bar.
- ✚ Les gaz sont stockés avec ou sans compression supplémentaire dans des bouteilles ou des containers, parfois dans des stockages d'hydrure permettant d'augmenter la densité volumique. Certaines installations (PHOEBUS ou SWB) stockent l'oxygène produit par l'électrolyseur.
- ✚ Les piles à combustible utilisées sont de différentes technologies : alcaline, acide phosphorique et PEM. SWB a testé ces 3 technologies. Les puissances varient entre 500 W et 10 kW.

Bien que ces systèmes soient très différents en terme de technologie et de puissance, ils ont la même architecture électrique : un bus DC basse ou haute tension sur lequel les composants sont connectés directement ou par l'intermédiaire d'un convertisseur de tension. Les batteries sont directement connectées sur ce bus DC. Elles permettent la stabilité de la tension du bus.

La dernière colonne du **Tableau I.3** décrit les travaux de modélisation réalisés au cours de ces études.

1.4.2 Architecture du système complet

Trois points doivent être étudiés minutieusement pour optimiser le système :

- ✚ Le dimensionnement du système permet de définir la puissance des composants et la taille du stockage afin de répondre à la demande électrique.
- ✚ Le choix de l'architecture électrique est très important en terme de rendement.
- ✚ Enfin, une bonne stratégie de gestion d'énergie au sein du système permet une utilisation rationnelle des différents composants.

1.4.3 Lois de dimensionnement [33]

Les lois de dimensionnement permettent de déterminer la puissance de chaque composant et la capacité des unités de stockage. Dans les systèmes PV-H₂, le dimensionnement permet aussi d'utiliser au maximum le stockage saisonnier de haut rendement (batteries) et au minimum le stockage saisonnier (hydrogène).

Vanhanen et Lund ont étudié l'influence de la latitude d'un site sur le dimensionnement d'un système Solaire-Hydrogène. La charge est une charge constante de 100 W. Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- ✚ La surface solaire est dimensionnée pour que le système soit autonome.
- ✚ Le stockage batterie correspond à 5 jours d'autonomie. Cette capacité permet limiter le temps d'utilisation de la pile à combustible.
- ✚ Le volume de stockage de gaz dépend du site, de la puissance solaire et de la capacité des batteries. Il est surtout sensible à la différence d'ensoleillement entre l'été et l'hiver.

- ✚ La puissance de l'électrolyseur est la différence entre la puissance du PV et la puissance minimale de la charge afin de convertir tout l'excédent de la production solaire.
- ✚ La puissance de la pile à combustible doit correspondre à la puissance maximale de la charge plus la puissance nécessaire à la recharge rapide des batteries.

1.4.4 Architecture électrique[30]

La configuration électrique des premières installations **Tableau I.3** est la connexion des composants, directe ou par l'intermédiaire d'un convertisseur de courant ou de tension, sur un bus DC sur lequel les batteries sont connectées directement assurant une tension stable du bus. Le niveau de tension est soit basse (36-50 V) soit élevée (190-453 V). SAPHYS conseille d'utiliser un haut niveau de tension afin de limiter le courant sur le bus (taille des câbles). Un onduleur permet ensuite de fournir un courant ondulé monophasé ou triphasé à l'utilisateur.

Couplage PV-EL : Production d'hydrogène solaire

Les études centrées sur la production d'hydrogène solaire ont permis de comparer le rendement des différents couplages d'un champ solaire et d'un électrolyseur.

Le couplage direct semble être la configuration la plus efficace car elle évite les pertes dans un convertisseur. La modularité des générateurs photovoltaïques (modules à connecter en série ou en parallèle) et des électrolyseurs (taille des membranes et nombre de cellules) permet une parfaite adaptation du couplage direct. La courbe caractéristique U-I d'un électrolyseur peut être très proche de celle du point de puissance maximale d'un champ solaire (**Fig I.3.1-a**). Pour un champ PV donné, et pour chaque taille de surface active d'un

EL, il existe un nombre optimal de cellules (**Fig I.3.1-b**) permettant la plus grande production d'hydrogène sur toute l'année (HYSOLAR). Dans le cas de la maison de Freiburg, le couplage direct atteint des rendements de plus de 95 %, pour des ensoleillements moyens à importants.

Cependant, l'étude HYSOLAR ne prend en compte que le couplage PV-EL. Lorsqu'une charge est fournie à un utilisateur, la puissance disponible pour l'électrolyse est diminuée. La détermination des points de fonctionnement des composants est très bien décrite par les travaux du projet NEMO. Pour optimiser le couplage PV-EL, il est alors nécessaire de connaître l'ensoleillement et la charge sur une année ainsi que la description précise du système permettant de prendre en compte les différentes pertes de tension.

La (**Fig I.3.1-b**) montre que le rendement du couplage direct est très sensible au dimensionnement (nombre de cellules d'électrolyse) alors que l'utilisation d'un MPPT4 ayant un haut rendement (ici de 96 %) permet d'obtenir un rendement constant quel que soit l'électrolyseur.

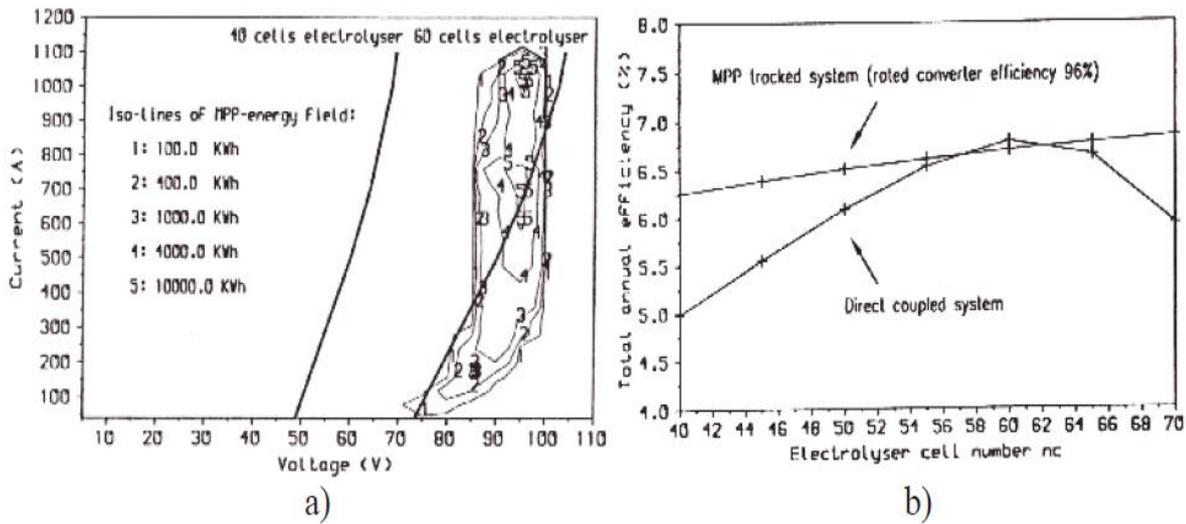


Fig I.3.1: a) Comparaison de la caractéristique électrique d'un électrolyseur avec le point de puissance maximale d'un champ solaire ;
 b) Influence du nombre de cellules d'électrolyse sur le rendement du couplage PV- EL soit direct soit par l'intermédiaire d'un MPPT .[30]

Le couplage direct des composants sur le bus DC est souvent conseillé par ces premières études pour des raisons de fiabilité, de rendement (perte dans le convertisseur), de disponibilité et de coût.

1.4.5 Algorithme de contrôle[28]

La gestion d'énergie permet d'optimiser le rendement global de l'installation. L'algorithme de gestion des systèmes Solaire-hydrogène permet d'utiliser au maximum le stockage journalier de haut rendement et au minimum le stockage d'hydrogène dont le rendement est beaucoup plus faible. Le contrôle est réalisé par rapport à l'état de charge de la batterie (SOC : State Of Charge).

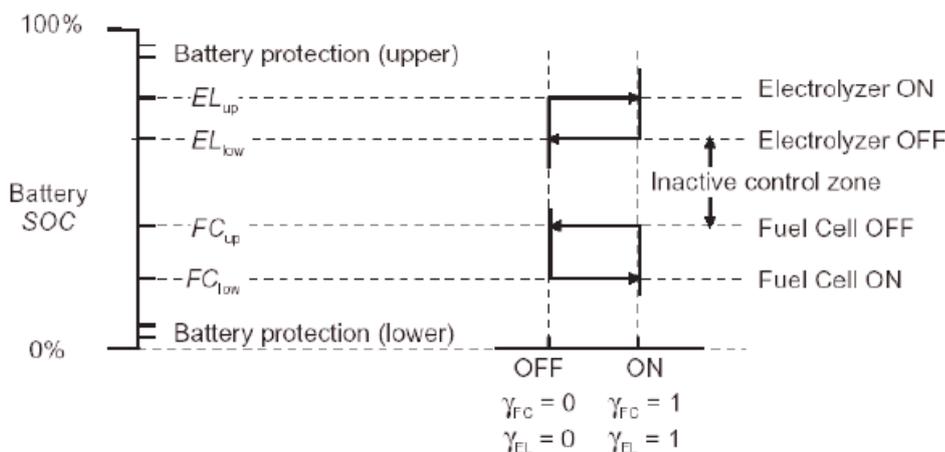


Fig I.3.2: Schéma de contrôle d'un système PV-H2, proposé par Ulleberg .[28]

Ulleberg, s'inspirant du contrôle de l'installation PHOEBUS, a décrit le mode d'opération sur le schéma ci-dessus (Fig I.3.2). L'électrolyseur ne peut fonctionner que si les batteries ont un haut niveau de charge. La pile est mise en route lorsque le SOC est bas. Entre ces 2 niveaux, la batterie peut aider le champ solaire à couvrir la charge ou bien être chargée par le PV s'il y a un excédent d'énergie solaire. On remarque aussi deux niveaux de protection des batteries : un niveau haut de recharge à partir duquel les batteries sont déconnectées et un niveau bas, niveau d'alarme entraînant la déconnexion de la charge.

Le contrôle développé en Finlande (NEMO) est identique. Cependant, le contrôle se fait à la fois en régulation du SOC et de la tension de la batterie. En effet, la stratégie de contrôle du système complet par rapport au niveau de charge des batteries est difficilement réalisable à cause du problème inhérent de mesure de l'état de charge.

Pour le système alimentant l'installation SSHP, le contrôle est différent. Le champ solaire peut être découplé en plusieurs branches : une partie du champ est couplée à la charge, une autre à la batterie si celle-ci n'a pas été chargée depuis longtemps et le reste à l'électrolyseur [32]. Lorsque le champ solaire ne suffit plus pour alimenter la charge, la pile est démarrée et le champ solaire est déconnecté. La pile est éteinte dès que le champ solaire suffit à la charge.

2 chapitre 2 : modélisation du système (PV-PàC)

2.1 Introduction

La modélisation d'un système physique donné, consiste à établir son modèle mathématique, afin de le simuler sous un logiciel mathématique (dans notre cas Matlab/Simulink/SimPowerSystem), comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement.

Les modélisations obtenues doivent être à la fois précises pour prendre compte des transferts énergétiques et suffisamment rapides pour permettre des simulations sur une longue période avec un temps de calcul raisonnable.

L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables, afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet.

2.2 modélisation d'un champ photovoltaïque:

2.2.1 la modélisation d'une cellule solaire:

a- Cas idéal:

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme:

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{II-1})$$

Avec

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{II-2})$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est:

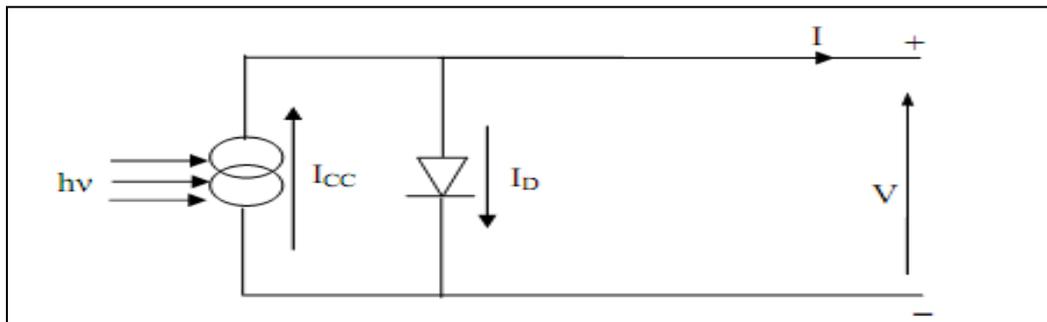


Fig.(II- 1) : Cellule solaire idéale[3]

I, V: Courant et tension fournis par la cellule.

ID: Courant de diode donnée par :

b-Cas réel:

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II - 2).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s)

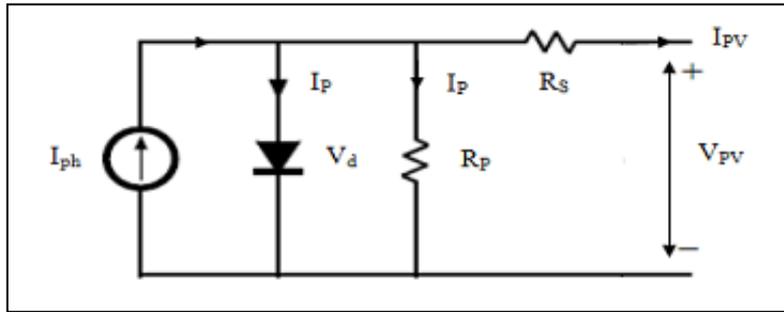


Fig.(II - 2) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

En notent :

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \text{ (II-3)}$$

Avec :

$$I_D = I_0 (e^{\frac{v+IR_S}{nV_T}} - 1) \text{ (II-4)}$$

$$I_P = \frac{v+IR_S}{R_P} \text{ (II-5)}$$

$$I_0 = I_{CC} / (e^{\frac{V_{CO}}{nV_T}} - 1) \text{ (II-6)}$$

$$I_{CC} = I_{CCr} \left(\frac{G}{1000} \right) \text{ (II-7)}$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \text{ (II-8)}$$

Où

I : Courant fourni par la cellule.

V : Tension aux bornes de la cellule

I_D : Courant de diode.

I_{ph} : Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_P : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température

I_{CC} : Le courant de court-circuit de référence

V_{CO} : La tension de circuit ouvert

V_T : La tension thermique

I_{CCr} : Courant de court-circuit de référence.

R_P : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant.

R_S : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

G: L'irradiation solaire en W/m²

q: Charge d'électron $q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

k: Constante de Boltzmann $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

n: Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T: La température effective de la cellule en kelvin.

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[e^{\frac{v+IR_S}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{v+IR_S}{R_P} \quad (\text{II-9})$$

La photopile réelle a une résistance série R_S dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle R_P ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure Fig.(II - 3) dépend de ses caractéristiques internes (R_S, R_P) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température.

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que $I_{Ph} = I_{CC}$ parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée.

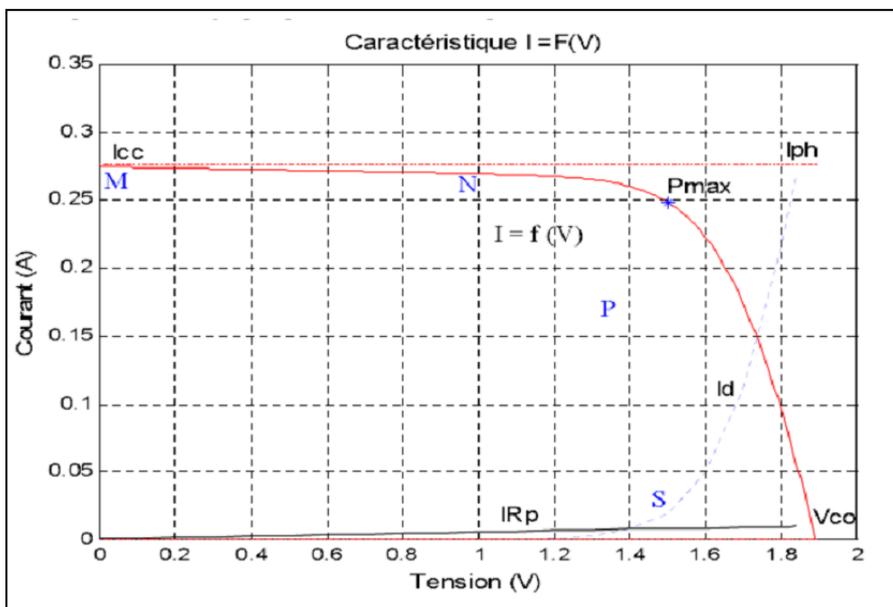


Fig.(II - 3) : La caractéristique (I-V)

Donc l'équation devient :

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[e^{\frac{v+IR_S}{nV_T}} - 1 \right] \quad (\text{II-10})$$

2.2.2 Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire

La caractéristique $I=f(V)$ représente la courbe de puissance, sachant que le courant généré est donné par la formule (II.9) et que la cellule fonctionne sous un éclairement fixe E et une température constante T .

Le fonctionnement du module est caractérisé essentiellement par trois zones :

- ✚ Zone MN : Le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de ICC). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.
- ✚ Zone PS : Région correspondante aux valeurs élevées de RC . La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert VCO . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- ✚ Zone NP : Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

2.3 Convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il sera appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif)[2].

Le convertisseur remplit les fonctions suivantes :

- ✚ Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- ✚ Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- ✚ Sécurité[4].

2.3.1 Convertisseur continu-continu (DC-DC) :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximale[4].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [5].

Dans une alimentation à découpage (Figure II.5), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [5].

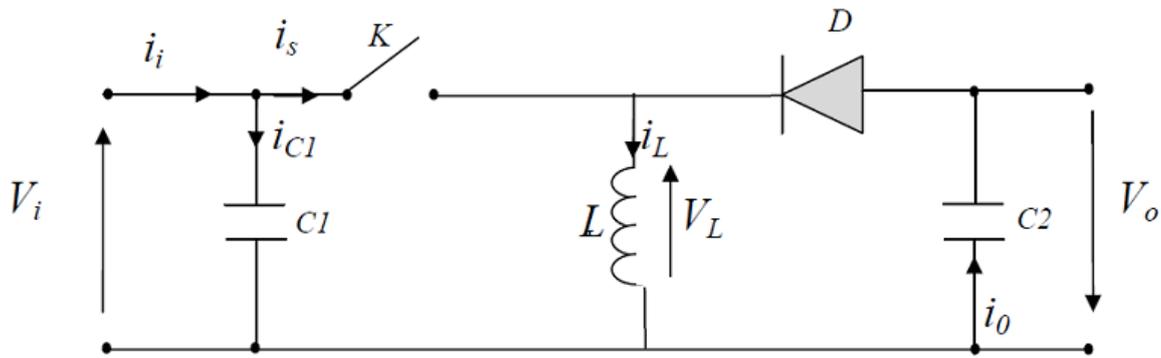
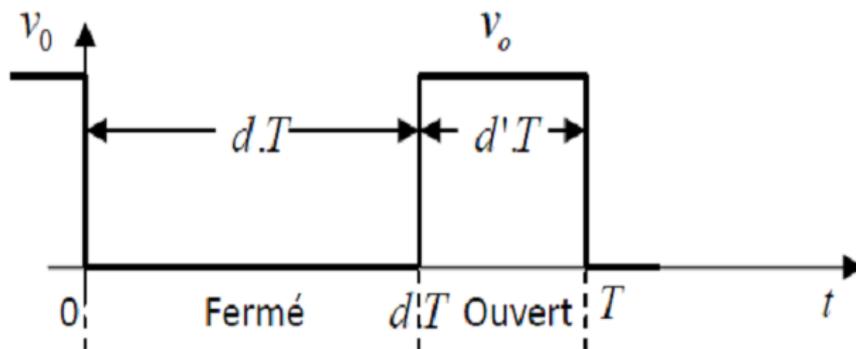


Fig (II.4) : Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage[5]

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure II.6). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [5].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence Constante f_s avec un temps de fermeture = T_{ds} et un temps d'ouverture = $(1-d) T_s$. Où :

- T_s est la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$.
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

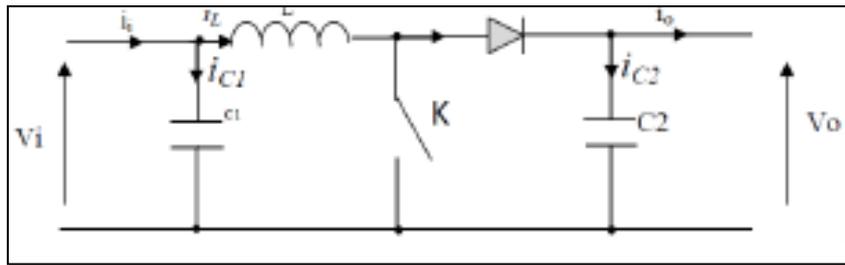


Fig(II.5) : périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.[5]

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges. [5]

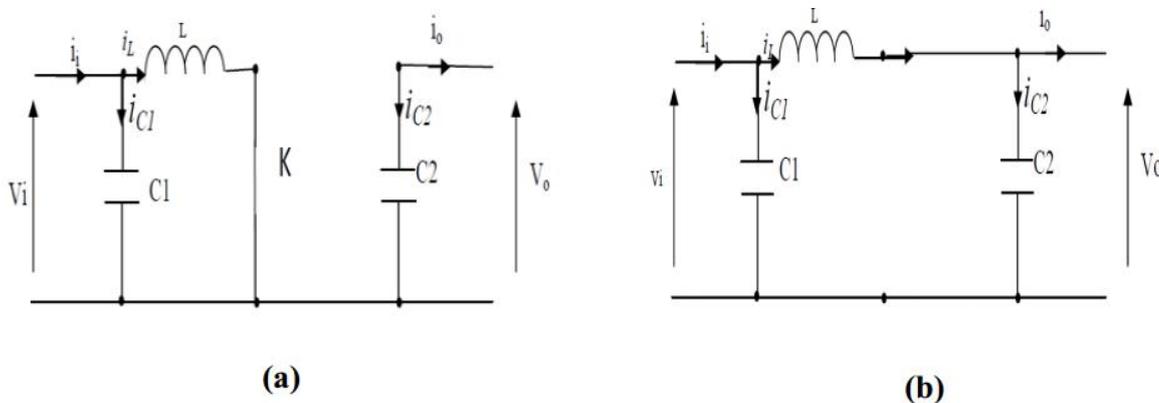
Hacheur survolteur :

Cedernierestunconvertisseursurvolteur,connuaussisouslenomde« boost» ou hacheurparallèle ;sonschémadepincipedebaseest celuidelafigure (II.8).Son applicationtypiqueestde convertir sa tensiond'entréeenune tensiondesortie supérieure[5]



Fig(II.6): Schémadepinciped'un convertisseursurvolteur[5]

En appliquantles lois de Kirchhoff sur les circuitséquivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.11) des deux phases de fonctionnement donne [5] :



Fig(II.7) : Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert[5]

- Pour la première période d.Ts :

$$\begin{cases} \dot{i}_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ \dot{i}_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (II.11)$$

- Pour la deuxième période (1-d)Ts :

$$\begin{cases} \dot{i}_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ \dot{i}_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (II.12)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période Ts, on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt} T_s + \frac{dx}{dt(1-D)T_s} (1-d)T_s \quad (\text{II.13})$$

En appliquant la relation (II.13) sur les systèmes d'équations (II.11) et (II.12), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [5]:

$$\begin{cases} i_L = i_i - c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - c_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

2.3.2 Commande MPPT d'un convertisseur DC/DC :

Le coût élevé du générateur photovoltaïque nous impose une utilisation optimale et rationnelle de ce dernier pour aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, nous devons utiliser le générateur PV dans la région où il délivre sa puissance maximale[1].

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stables, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV[4].

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC-DC comme représenté sur la figure (II.8)[9].

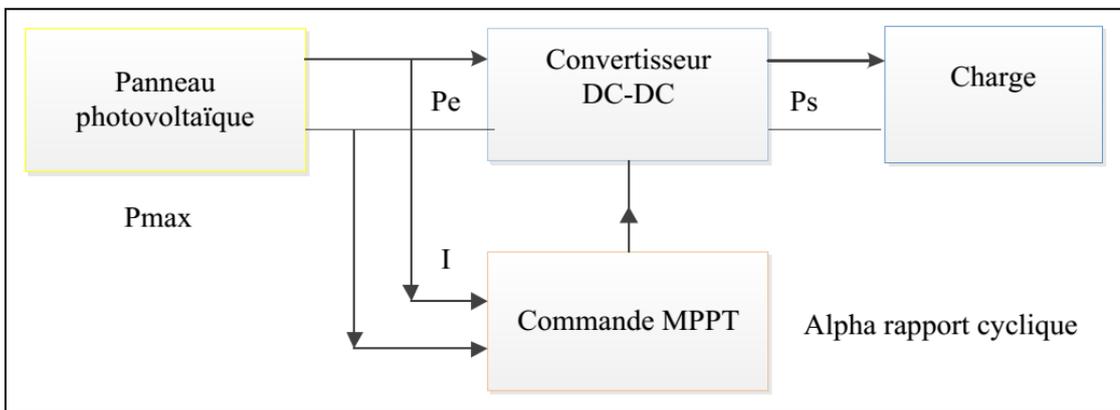


Fig (II.8) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.[9]

Il y a plusieurs types de commande MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ(P&O), l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones). On va expliquer deux méthodes p&o et logique floue[4]

2.3.2.1 Commande MPPT logique floue:

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification (Fig.9).[ayach]

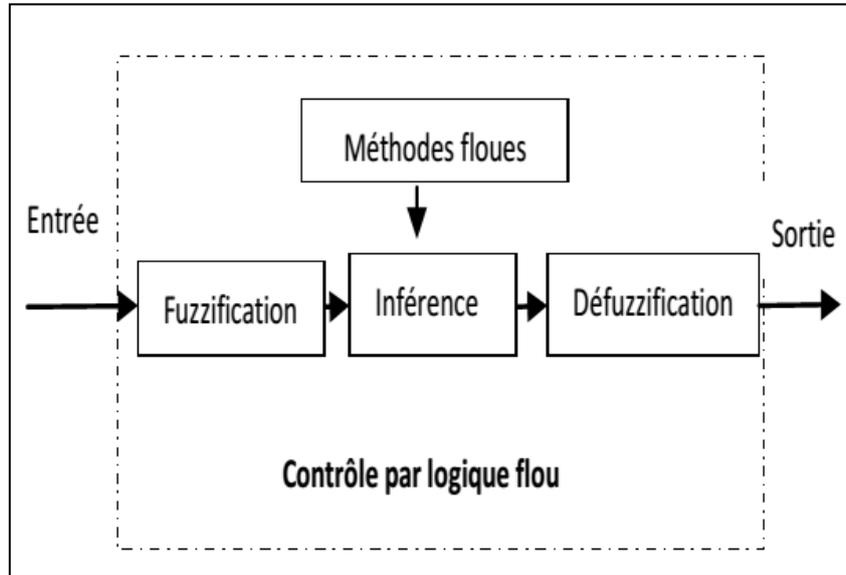


Fig.(II-9). Principe de la commande à logique flou

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur $E(k)$ et la variation d'erreur CE à l'instant k qui sont définis comme suit :[ayach]

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)} \quad (\text{II.15})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1)$$

Ainsi ses variables seront qualifiées Négatif Grand (NG), Négatif Petit (NP), Erreur nul ou bien zéro (EZ), Positif Petit (PP) et Positif Grand (PG) (Fig.14)

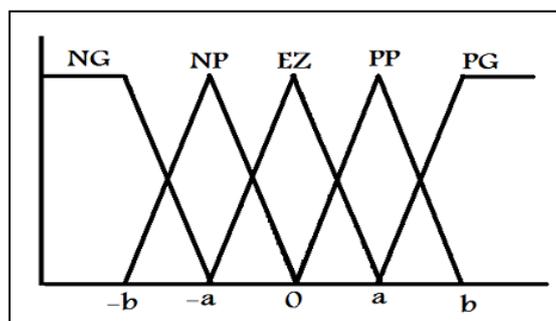


Fig (II-10) Degré d'appartenance des variables

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé.

2.3.2.2 Convertisseur continu-Alternatif (DC-AC)

Le choix d'un système de stockage à deux condensateurs avec un point milieu (C_{dc1}, C_{dc2}), Comme le montre la Figure (II.11), donne la possibilité de mesurer aux bornes des condensateurs une tension continue (U_{dc}) sans fluctuations. Afin d'assurer que l'onduleur dispose d'une tension maximale à sa sortie, il faut que les deux tensions continues ($\frac{U_{dc}}{2}$) soient maintenues dans une plage bien spécifiée. En effet, la valeur minimale des tensions continues détermine directement l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur.

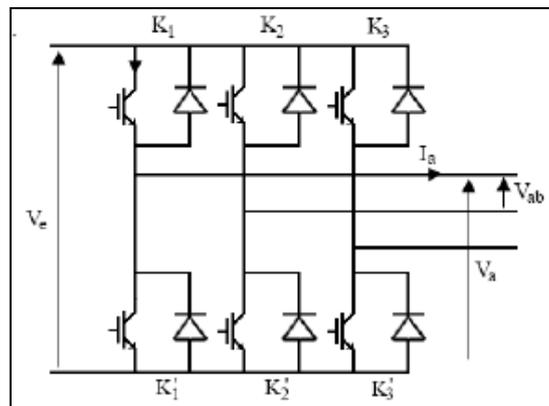


Fig (II.11) Circuit électrique équivalent de l'onduleur de tension [8]

Le rapport entre la tension de la partie continue (U_{dc}) et la partie alternative (V_{ABC}) dépend de l'état des interrupteurs de l'onduleur. Si on prend comme hypothèse que les interrupteurs sont parfaits (sans chutes de tension ni temps morts), dans le cas où le neutre est raccordé au point milieu du bus continu, le rapport est donnée par l'expression suivante [8] :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \frac{U_{dc}}{2} \quad (\text{II.16})$$

Si le neutre n'est pas raccordé, la tension de phase est [8]:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{6} \quad (\text{II.17})$$

Dans ces équations, U_k désigne la fonction de commutation qui prend la valeur (1) quand l'interrupteur supérieur du bras est fermé (T_1, T_2, T_3) et (-1) quand l'interrupteur inférieur est fermé (T'_1, T'_2, T'_3). Cette fonction de commutation est obtenue par comparaison de deux signaux (Figure (II.13)) la modulante (V_{sin}), qui est une onde de référence, représentation de la tension de sortie souhaitée, comprise entre (-1) et (1), et la porteuse (V_{tri}), qui est une onde triangulaire de fréquence (MLI) bien plus élevée que la fréquence de V_{sin} et qui détermine la fréquence de commutation de l'onduleur.

- **commande à MLI :**

La Figure (II.12) illustre le circuit d'un onduleur monophasé, et la Figure (II.13) donne le principe de la modulation de largeur d'impulsion.

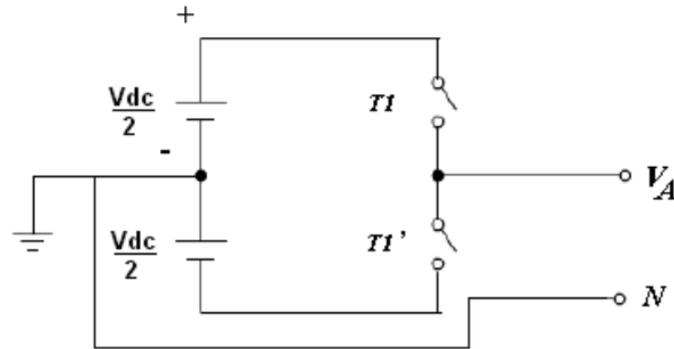


Fig (II.12) Schéma du circuit monophasé d'un onduleur de tension[8]

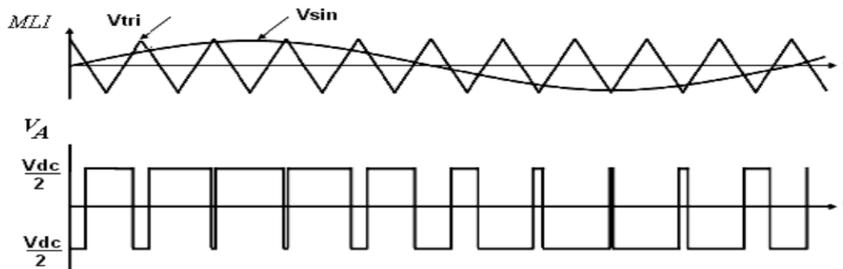


Fig (II.13) Schéma du signal de commande à MLI et la tension (V_A)de sortie d'un onduleur monophasé [8]

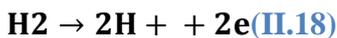
Comme représenté par la Figure (II.13), la tension délivrée par l'onduleur est déterminée dans ce qui suit :

Lorsque $V_{sin} > V_{tri}$, $V_A = \frac{V_{dc}}{2}$

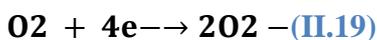
Lorsque $V_{sin} < V_{tri}$, $V_A = -\frac{V_{dc}}{2}$

2.3.3 Modélisation de la piles à combustible et Electrolyseurs

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction:



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinent avec les ions d'oxygène pour former de l'eau selon la réaction :



2.3.4 Modèle d'Amphlett et al

Le modèle doit permettre de tester différentes configurations ou choix des paramètres. Le modèle de stack de PàC retenu est celui présenté par (J.C.Amphlett et al .), ce modèle électrochimique semi-empirique simple et complet, peut être utilisé pour décrire le comportement dynamique d'un stack de PàC. . Il permet de prendre en compte différents paramètres dont leurs définitions sont essentielles pour un bon résultat, la régulation des performances du stack en fonction de l'intensité de courant, et par conséquent décrire un comportement proche de la réalité. Le modèle présenté par Amphlett et al . qui est largement cité dans la littérature, est basé sur les équations de Nernst et de Tafel.

les paramètres physiques du système pris en compte sont :

- + les pressions effectives de l'oxygène et de l'hydrogène
- + ,la température au bord, la concentration de l'oxygène
- + la concentration de l'hydrogène.

En utilisant les valeurs thermodynamiques du changement d'entropie à l'état standard, la tension est donnée en [Amph95] ; avec la température T exprimée en Kelvin, et, les pressions partielles P_{H_2} et P_{O_2} . La tension réelle aux bornes d'une cellule est inférieure à la tension en boucle ouverte à cause des différents types de pertes. Le potentiel thermodynamique est déni par une équation de Nernst sous forme développée comme :

$$E_{th} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times [\ln(P_{H_2}) + 1/2 \ln(P_{O_2})] \text{ (II.21)}$$

Où :

T désigne la température de la cellule et est égale à 328K.

P_{H_2} et P_{O_2} sont les pressions d'hydrogène et d'oxygène partielles (Atm).

La tension en boucle ouverte de la PàC est calculée à partir du bilan énergétique entre l'énergie chimique des gaz réactifs et l'énergie électrique. En mode de fonctionnement, trois types de pertes principales influencent la tension de sortie de la pile. La tension d'une cellule élémentaire de la PàC est alors, le potentiel réel de la PàC est diminué de son potentiel d'équilibre thermodynamique E_{th} à cause des pertes irréversibles. Quand le courant passe, une déviation du potentiel thermodynamique est due à des travaux d'électricité effectués par la cellule. L'écart de potentiel par rapport à la valeur d'équilibre est appelé \square_{ohmc} Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule unique est :

$$V = E_{th} - \square_{act} - \square_{ohmc} - \square_{diff} \text{ (II.22)}$$

E_{th} : est la tension théorique en boucle ouverte,

\square_{act} : représente les pertes d'activation,

\square_{ohmc} : les pertes ohmiques,

\square_{diff} : les pertes de concentration.

La PàC comporte plusieurs cellules élémentaires placées en série, alors la tension aux bornes de la pile est la somme des tensions de ces cellules individuelles. En supposant que les cellules sont identiques, la tension de la pile peut être calculée en multipliant la tension d'une cellule par le nombre total N de cellule composant la pile :

$$V_{st} = N.V \text{ (II. 23)}$$

2.3.4.1 Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues à la vitesse des réactions chimiques au niveau de la surface de réaction. Une partie de l'énergie est utilisée pour activer et accélérer les réactions chimiques, ce qui est à la base de cette chute de tension qui est fortement non linéaire. En d'autres termes, la polarisation d'activation est présente quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. Il existe aussi une autre raison de chute de tension qui est due aux courants de fuite.

L'expression simple proposée par J.C. Amphlett et al. pour toute la surtension d'activation est exprimée dans l'équation (II. 24).

$$\square_{act} = \xi_1 + \xi_2 I + \xi_3 T \ln((CO * 2)) + \xi_4 T \ln(I) \text{ (II. 24)}$$

I est le courant de fonctionnement de la pile (A)

ξ_1, ξ_2, ξ_3 et ξ_4 des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PàC dont un modèle bien développé dans [16], qui identifie les paramètres exactes utilisée pour notre système, qui sont donnés ci-dessous:

$$\xi_1 = -0.948$$

$$\xi_2 = k_{Cell} + 0.197 \times 10^{-3} \ln(A_{fc}) + 4.3 \times 10^{-5} \ln(CH) \text{ (II. 25)}$$

$$\xi_3 = 6.3 \times 10^{-5}$$

$$\xi_4 = 0.72 \times 10^{-4}$$

(CO*2) représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm^3) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry [17] :

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \times 10^6 e^{-(498/T)}} \quad (\text{II. 26})$$

A des basses densités de courant, la forme de la courbe est principalement déterminée par la polarisation d'activation de la cathode. La cathode est généralement l'électrode qui limite la performance d'exécution de la PEMFC, car la densité de courant d'échange de la réaction de réduction de l'oxygène est basse, elle est approximativement de l'ordre 5 à 6 fois inférieure à celle de la réaction au niveau de l'anode [18].

$$P_{O_2}^* = P_{\text{cath}} \cdot [1 - x_{H_2O}^{\text{sat}}] \quad (\text{II. 27})$$

P_{cath} est la pression de l'oxygène à la cathode, $x_{H_2O}^{\text{sat}}$ est la fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidité et supposée $\approx 50\%$, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = \frac{1}{2} \cdot P_{\text{cath}} \quad (\text{II. 28})$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone.

$$P_{H_2}^* = P_{\text{anode}} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot x_{H_2O}^{\text{sat}} \right] \quad (\text{II. 29})$$

P_{anode} est la pression de l'hydrogène à l'anode, et ($x_{H_2O}^{\text{sat}} = 0.5$), l'équation devient :

$$P_{H_2}^* = \frac{3}{4} \cdot P_{\text{anode}} \quad (\text{II. 30})$$

2.3.4.2 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes. Cependant, les pertes apparaissant au niveau de l'électrolyte sont les plus importantes et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique. L'électrolyte et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, il s'agit, dans la membrane électrolyte polymère, d'une conduction ionique. Or, les ions ayant une mobilité bien plus faible que les électrons, la résistance de la membrane est bien plus grande. On peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante :

$$V_{ohm} = I \cdot (R_m + R_c) \quad (\text{II. 31})$$

R_c est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons ,

R_m est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_m = \frac{r_M \cdot l}{A_{fc}} \quad (\text{II. 32})$$

Où l est l'épaisseur de la membrane (μm) ,

r_M est la résistance spécifique de la membrane (ohm.cm) [19], obtenue par la relation

suivante :

$$r_M = \frac{181.6 + \left[1 + 0.03 \left(\frac{I}{A_{fc}} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I}{A_{fc}} \right)^{2.5} \right]}{\left[\square_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3 \cdot \frac{I}{A_{fc}} \right] \cdot \exp \left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (\text{II. 33})$$

Le terme $[181.6 / \square_{H_2O/SO_3^-} - 0.634]$ représente la résistance spécifique de la membrane (ohm.cm) à $I = 0$ et à une température de $30^\circ C$ ($T = 303K$).

Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à $30^\circ C$.

\square_{H_2O/SO_3^-} est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22 [20] et [21] .

A_{fc} est la surface active de la pile (cm^2).

2.3.4.3 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 la polarisation 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. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{\text{con}} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{\text{max}}} \right) \quad (\text{II. 34})$$

Où

B est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement ,

J est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/ cm^2),

J_{max} est la densité de courant maximale.

2.3.4.4 Influence de la pression et de la température sur la caractéristique de la PàC

L'augmentation de la température influe positivement sur la tension de la pile, autrement dit si l'on augmente la température aux environs de 90°C, la tension augmente jusqu'à une valeur de 1 volt/cellule environ, ce qui entraîne l'augmentation de la puissance fournie par la pile, néanmoins limitée par la charge ; ce que nous pouvons voir sur la Fig II.3.1.4 .1. La température accélère d'une part, les réactions chimiques à l'intérieure de la pile et d'autre part, diminue les pertes d'activation et les pertes ohmiques, par conséquent les pertes de concentration sont constantes. Il faut signaler que pour les pertes ohmiques qui suivent une forme linéaire, la température agit directement sur la résistance spécifique de la membrane. Par contre, pour les pertes d'activation, en plus de la diminution de ces pertes, la température amortit sa non linéarité pour des valeurs élevées de densité de courant. La température de la pile doit rester limitée (< 100°C) pour qu'on puisse garder l'efficacité de la membrane et le fonctionnement normale des composants du cœur de la pile, donc on ne peut pas dépasser une certaine limite (T_{max} = 100°C) qui est nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte et maintenir l'eau à l'état liquide dans la membrane puisque au-delà de T_{max} l'évaporation de l'eau va sécher complètement la membrane, ce qui empêche la pénétration des protons H⁺ de l'anode vers la cathode diminuant ainsi la tension de la pile. La basse température (T_{min} = 25°C) permet l'évacuation aisée de la chaleur hors de la pile car la chaleur est dégagée avec de l'eau liquide sous forme d'eau chaude. Pour voir l'effet de la

pression sur la PEMFC, on a fixé la température à 55°C et on a varié les pressions d'oxygène et d'hydrogène. L'augmentation des pressions provoque l'augmentation de la tension et la puissance aux bornes de la pile. les pertes ohmiques et de concentration restent invariables et linéaires, ce qui veut dire que la variation de la pression ne fait aucun effet sur eux. Par contre, les pertes d'activation augmentent proportionnellement en fonction de cette pression mais d'une manière moins sévère que celle obtenue avec

la variation de température. On remarque que ξ_1 influe nettement la tension de circuit ouvert, tandis que, ξ_3 et ξ_4 sur la tension d'une manière non linéaire. Comme représenté sur la Fig II.3.1.4.3, le choix correct du

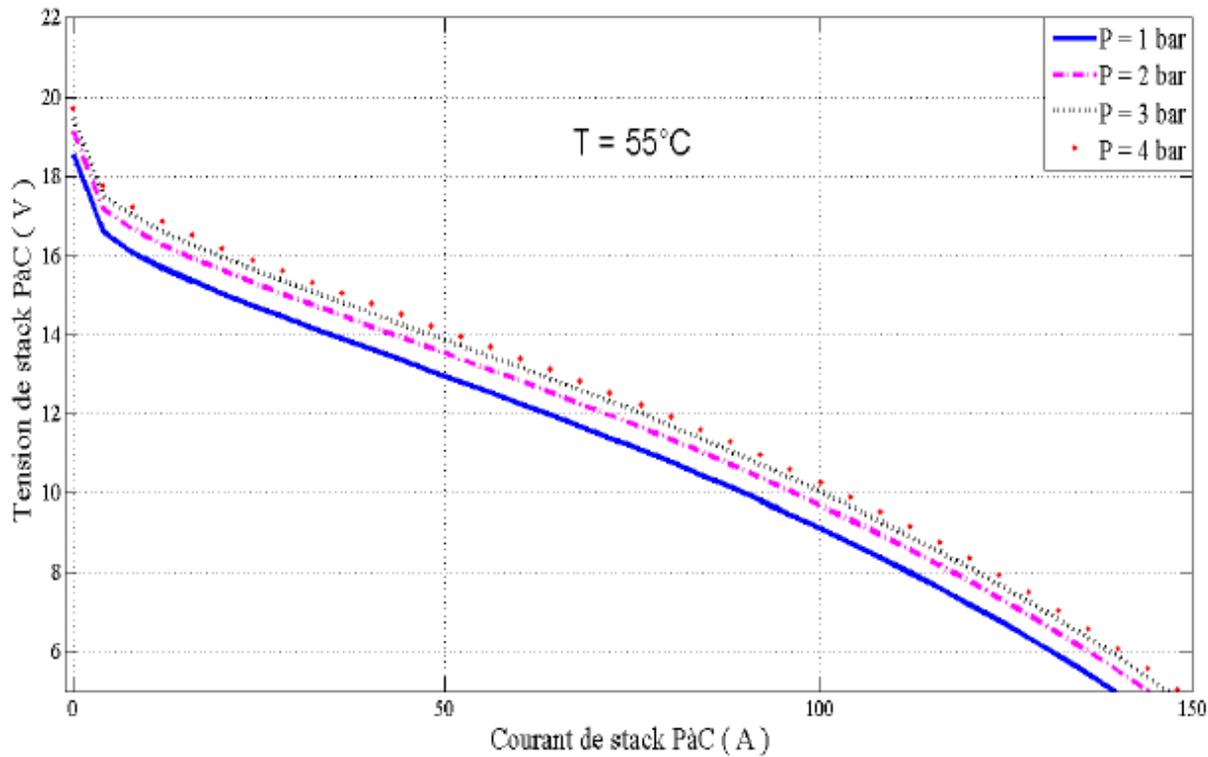
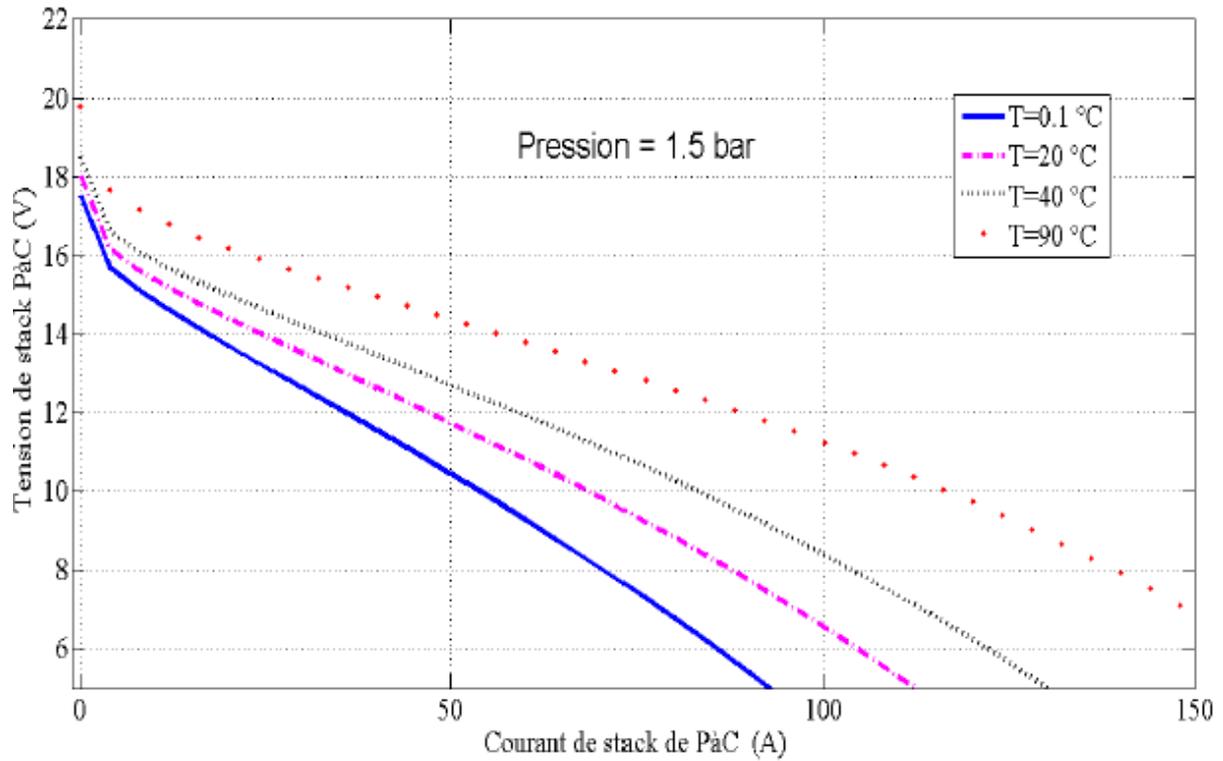


Fig II.3.1.4.1 L'effet de pression

ξ_4 permet de déterminer \square_{act} pour les deux puissances, quelle que soit la variation du courant. Le modèle Amphlett donne une grande précision dans la conception des PEMFC quelle que soit la valeur du courant. Il présente la caractéristique en deux zones principales : la première est la perte d'activation à partir de la tension en circuit ouvert, et la seconde est la perte ohmique. Cette dernière change en fonction de la variation de courant en utilisant l'état d'équilibre électrochimique généralisé du modèle (GSSEM), (Mann et al). Dans [23] on résume des travaux plus détaillé de la modélisation PaC. Toutefois, cette précision n'a pas été obtenue en utilisant l'équation de [21] et [22]. Pourtant, quatre équations de perte d'activation et trois pertes ohmiques ont été utilisées. La résistance de la membrane a été calculée en termes de courant et de température. Parmi les aspects négatifs



FigII.3.1.4.2L'effet de température

de ce modèle, il impose la prise en compte de nombreuses données physiques et géométriques provenant du PaC.

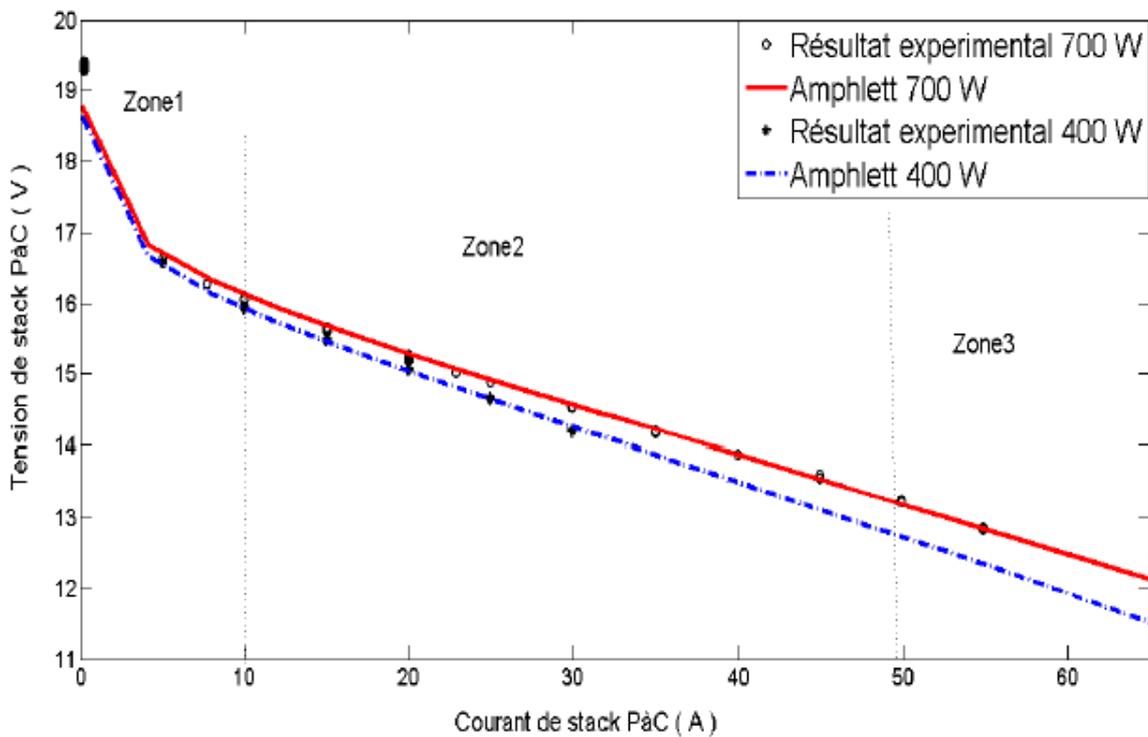


Fig II.3.1.4.3PaC caractéristique tension-courant, deux puissances (700W et 400W), à T = 55°C.[27]

2.3.5 Modèles électriques

Dans l'électrolyseur et la pile à combustible, se déroulent les mêmes réactions électrochimiques. Le modèle électrique de ces composants est identique.

Modèle de Kim [31]

Le modèle de Kim est actuellement un modèle de référence pour la modélisation des piles à combustible. Ce modèle est semi-empirique, c'est-à-dire basé sur des équations théoriques mais utilisant des paramètres pour ajuster le modèle aux données expérimentales.

$$V_{cn}(J) = E_0 - b \times \log(J) - R \times J - m \times \exp(n \times J) \quad (\text{II.35})$$

Avec

$$E_0 = E_r - b \times \log(J_0)$$

Où V_{cell} potentiel d'une cellule (V)

J densité de courant (A/m²)

E_r potentiel réversible de la cellule (V)

J_0 , b paramètres de Tafel pour la réduction de l'oxygène

R résistance ohmique (Ω.m²)

m , n paramètres liés à la diffusion (V, A⁻¹)

Les paramètres de cette équation dépendent de la température, de la pression et de la pression partielle en oxygène. Ce modèle permet de représenter toutes les parties d'une courbe de polarisation d'une pile, jusqu'à la zone de diffusion. Il conviendra aussi pour l'électrolyseur (paramètres de signe contraire, sauf E_0), mais il est malheureusement inutilisable pour de faible densité de courant, inférieure à la densité de courant d'échange J_0 , en raison du terme $-b \times \log\left(\frac{J}{J_0}\right)$

Modèle interne (N. Albrieux)

Le modèle électrique développé au laboratoire par N. Albrieux est empirique, non divergent en J_0 . Ce nouveau modèle permet une cohérence mathématique de l'équation utilisée par rapport à la forme de la courbe caractéristique expérimentale (tension, courant).

L'équation initiale est la suivante :

$$V_{cell}(J) = E + \frac{b}{\ln(d \times J)} - c \times J \quad (\text{II.36})$$

Le remplacement du terme $\log J$, utilisé dans le modèle de Kim, par le terme en $1/\log J$ permet la convergence de ce terme en 0 pour $J=0$.

Les hypothèses du modèle électrique sont résumées dans la **Fig II.3.2**.

- ✚ Cette fonction est prolongeable par continuité en 0.
- ✚ La tension en 0 est la tension de circuit ouvert ($V(0) = EOC$).
- ✚ La tangente de la courbe en 0 est verticale ($V'_{cell}(0) = -\infty$).

- ✚ La courbe possède un point d'inflexion en J_d ($V''_{cell}(J_d) = 0$).
- ✚ La pente de la tangente en ce point d'inflexion est $-\Delta$ (Δ est en fait la résistance ohmique de la pile).

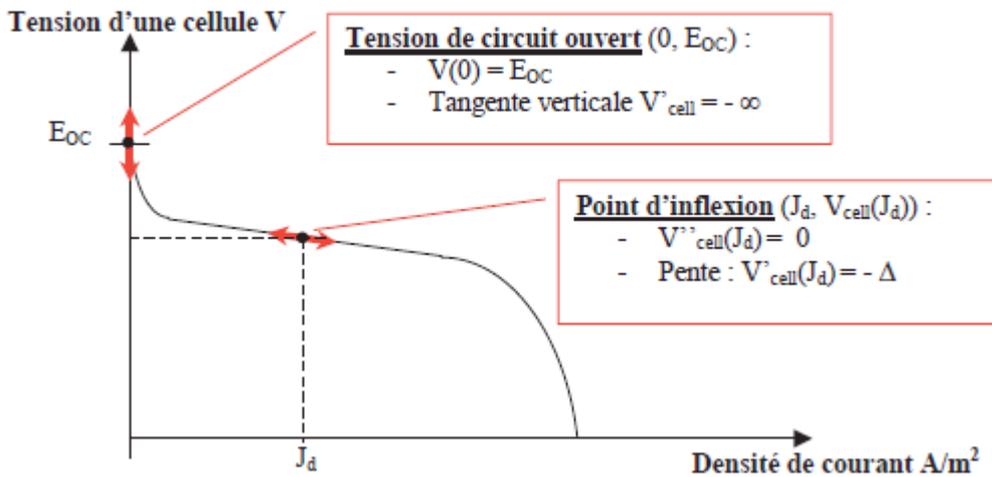


Fig II.3.2: Hypothèses du modèle électrique des composants électrochimiques.

L'équation obtenue est alors :

$$V_{ccl}(J) = E + \frac{b}{\ln\left(\frac{J}{J_d \times e^2}\right)} + \left(\frac{b}{4 \times J_d} - \Delta\right) \times J \quad (\text{II.37})$$

Où

V_{cell} potentiel d'une cellule (V)

J densité de courant (A.m-2)

EOC tension de circuit ouvert de la cellule (V)

J_d, b, Δ paramètres du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène

Cette équation prend en compte une partie des problèmes de diffusion qui existent pour de fortes densités de courant. Mais la zone où les problèmes de diffusion sont prépondérants, n'est pas modélisée par ce modèle.

Ces points de fonctionnement ne sont en fait jamais atteints dans nos expériences. En effet, cette zone est évitée afin de ne pas endommager les cellules.

4 constantes à déterminer :

Les 4 constantes EOC, b, J_d et Δ sont déterminées à partir de résultats expérimentaux. Ces paramètres dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène P_{O_2} . Chaque paramètre est dissocié en trois composantes (II.38). Ce choix permet de se rapprocher des équations théoriques du type Nernst et Butler Volmer.

$$\begin{bmatrix} E \\ J_d \\ b \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \\ J_{d1} & J_{d2} & J_{d3} \\ b & b_2 & b_3 \\ \Delta_1 \Delta_2 & \Delta_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ T \times \ln(P_2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Douze constantes doivent être déterminées. Cela nécessite un minimum de 4 couples (J-Vcell) pour 4 paires { **T**, **PO2** }. Ces constantes doivent être déterminés pour le mode pile et le mode électrolyseur. Ce modèle électrique a fait l'objet d'un article actuellement soumis au Journal of PowerSources . Les autres modèles présentés dans cet article sont décrits plus précisément ci-dessous.

2.3.6 Modèles thermiques

Les expériences thermiques de l'électrolyseur montre que l'électrolyseur est constitué de deux entités de comportement thermique différent, mais que l'échange entre ces deux entités est très important, permettant une homogénéisation rapide de la température dans le système. On peut donc imaginer qu'un modèle simple ne prenant en compte qu'une seule entité est suffisant. Ulleberg [28] propose un modèle simple pour un composant équipé d'un échangeur.

Premier modèle

Le premier modèle utilisé est très proche du modèle de Ulleberg.

$$C_p \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = R_h - \varphi_{\text{oxt}} - \varphi_{\text{cch}} - \varphi_{\text{gaz}} \quad (\text{II.39})$$

$$\theta = T - T_a \quad (\text{II.40})$$

$R_n = \pm N_s \times (U - U_m) \times I$: puissance thermique dégagée par la réaction

$\varphi_m = h \times \theta$: flux échangé avec l'extérieur

$\varphi_{\text{gax}} = \pm (C_{p(H_i)} \times F_{H_z}) + C_{p(O_i)} \times F_{(O_i)} \times \theta$: flux évacué par les gaz

(+ pour l'électrolyseur, - pour la pile à combustible)

Où C_p capacité thermique de l'appareil ($J \cdot K^{-1}$)

T température de l'électrolyte (K)

T_a température ambiante (K)

N_c nombre de cellules

U tension d'une cellule (V)

U_m tension thermoneutre d'une cellule (V) (= 1,48 V)

I intensité (I)

h coefficient d'échange ($W \cdot K^{-1}$)

φ_{ech} flux échangé dans un échangeur ($W \cdot K^{-1}$)

$C_p(i)$ capacité molaire calorifique du gaz i ($J, mol^{-1} \cdot K^{-1}$)

$F(i)$ flux molaire de gaz i ($mol \cdot s^{-1}$)

L'évolution de la température dépend de la capacité thermique du composant, de la puissance thermique produite par la réaction électrochimique et de la perte liée au contact avec l'extérieur et au passage dans un échangeur. On peut ajouter à ce modèle un terme lié au flux de gaz entrant ou sortant des périphériques.

Calcul du flux évacué dans un échangeur

L'Équation (II.41) montre les différentes façons de décrire le flux échangé entre deux fluides

traversant un échangeur contre-courant :

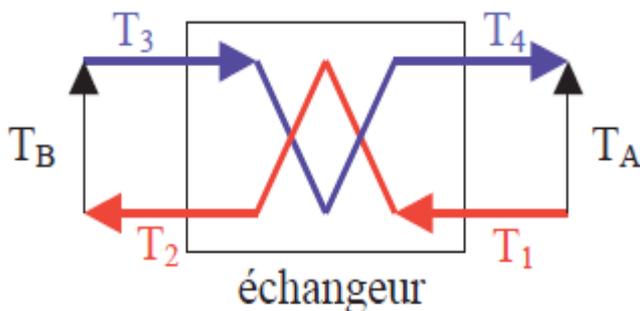
$$\varphi_{ech} = \rho_c \times C_{pc} \times F_c \times (T_2 - T_1)$$

$$\varphi_{ech} = \rho_f \times C_{pf} \times F_f \times (T_4 - T_3) \text{ (II.41)}$$

$$\varphi_{ech} = K \times A \times \Delta T_m$$

Avec

$$\Delta T_m = \frac{T_A - T_B}{\ln \frac{T_A}{T_B}} \text{ (II.42)}$$



Où

P masse volumique du fluide chaud (c) ou froid (f) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Cp capacité calorifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

F flux des fluides ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

K densité de puissance de l'échangeur ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

$T_{i,i=1,4}$ température aux entrées et sorties de l'échangeur (K) (schéma)

A surface d'échange (m^2)

Un échangeur est présent dans le périphérique de la pile à combustible. La circulation de l'eau de ville n'est permise que lorsque la température de la pile atteint la température de régulation

(Treg). Connaissant la température de l'eau de ville (T3), la température de la pile (T1), le débit de l'eau de refroidissement, ainsi que les caractéristiques de l'échangeur (K et A), on peut déterminer les températures aux sorties de l'échangeur (T2 et T4) ainsi que le flux échangé (φ_{ech}).

Le manque de données expérimentales pour la pile à combustible ne nous permet pas d'approfondir la simulation du comportement thermique de ce composant. Par contre, plusieurs modèles ont été évalués pour la modélisation thermique de l'électrolyseur.

Second modèle pour l'électrolyseur : Modification du coefficient d'échange

Dans un électrolyseur alcalin, l'électrolyte circule quand le composant est alimenté. Cette circulation est proportionnelle à l'intensité. Kauranen [32] a modélisé un électrolyseur alcalin.

Il a montré que le coefficient d'échange avec l'extérieur augmente avec l'intensité en raison d'une circulation plus rapide de l'électrolyte. Le premier modèle est donc juste modifié au niveau du coefficient d'échange avec l'extérieur (II.43).

$$h_{pt} = h_0 + a \times I \text{ (II.43)}$$

Avec

h_{ext} coefficient d'échange avec l'extérieur ($W \cdot K^{-1}$)

h_0 coefficient d'échange avec l'extérieur sans circulation ($W \cdot K^{-1}$)

a facteur de variation du coefficient d'échange avec l'intensité ($W/A^{-1}K^{-1}$)

Troisième modèle pour l'électrolyseur

Nous proposons un modèle pour l'électrolyseur, prenant en compte les deux entités, les cellules et l'électrolyte, de comportement thermique différent.

$$C_{pc} \times \frac{d\theta_c}{dt} = R_h - h_k \times \theta_e - h_{contact} \times (T_c - T_f) \text{ (II.44)}$$

$$C_M \times \frac{d\theta_f}{dt} = -h_f \times \theta_f - h_{contact} \times (T_f - T_c)$$

$$\theta = T - T_a$$

Avec

T_c température des cellules (K)

T_f température de l'électrolyte (K)

T_a température ambiante (K)

θ_e différence entre la température des cellules et la température ambiante (K)

θ_f différence entre la température de l'électrolyte et la température ambiante (K)

C_{pc} capacité calorifique des cellules ($J \cdot K^{-1}$)

h_c coefficient d'échange des cellules avec l'extérieur ($W \cdot K^{-1}$)

C_{pf} capacité calorifique du fluide ($J \cdot K^{-1}$)

h_f coefficient d'échange du fluide avec l'extérieur ($W \cdot K^{-1}$)

$h_{contact}$ coefficient d'échange entre le fluide et les cellules ($W \cdot K^{-1}$)

P_{th} puissance thermique (W)

On considère que seules les cellules sont chauffées par la réaction électrochimique. Pour le cœur électrochimique, la chaleur est échangée par convection vers l'extérieur mais aussi vers le fluide. Pour l'électrolyte, on considère seulement l'échange avec les cellules et l'extérieur.

Ce modèle a 5 paramètres : 2 capacités calorifiques, 2 coefficients d'échange avec le milieu extérieur et une résistance de contact entre les cellules et l'électrolyte.

2.3.7 Autres paramètres

Production et consommation des gaz

Nous rappelons que les débits d'hydrogène et d'oxygène consommés par une pile ou produits par un électrolyseur sont directement proportionnels à l'intensité et au rendement faradique de l'appareil.

Rendement faradique

Deux modèles existent dans la littérature [28] [33], décrivant le rendement faradique en fonction de l'intensité et de la température. Mais les résultats expérimentaux ne permettent pas de définir le rendement faradique en fonction de ces paramètres. Le rendement faradique est considéré constant quelque soit le point de fonctionnement : $\eta_F = 99\%$ pour l'électrolyseur côté hydrogène (93 % côté oxygène) et $\eta_F = 99\%$ pour la pile.

Evolution de la pression de l'électrolyseur

Pour la pile à combustible, la pression partielle en oxygène est fixée. Elle ne diminue qu'en phase de consommation des gaz. Cette phase n'a pas été simulée pour le moment.

Pour l'électrolyseur, la pression de fonctionnement peut être fixée à 10 bar. En effet, une fois montée en pression, l'appareil n'est dépressurisé qu'en cas d'alarme. Lorsque l'appareil n'est pas alimenté, le périphérique est clos. Des micro-fuites peuvent entraîner une chute de pression au cours d'une interruption longue. Dans notre électrolyseur, le temps de montée en pression est rapide et les micro-fuites sont négligeables. Le calcul de l'évolution de la pression sera intéressant pour les électrolyseurs haute pression. La résolution de ce problème est réalisée par le bilan des nombres de moles entrant et sortant du périphérique. Connaissant le volume de gaz et la température de l'électrolyseur, on en déduit la variation de la pression dans le périphérique **Fig II.3.3**.

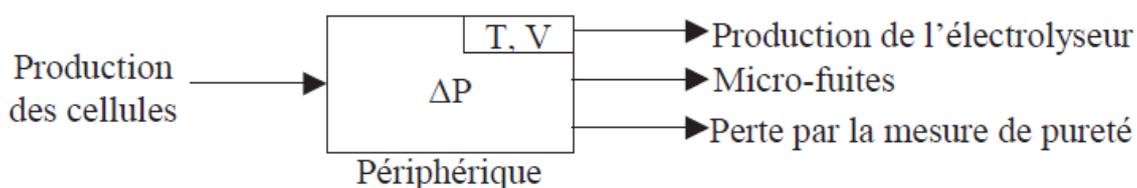


Fig II.3.3: Flux de gaz entrant et sortant du périphérique de l'électrolyseur.

La production de gaz des cellules dépend de l'intensité et du rendement faradique. La production de l'électrolyseur est fonction de la pression dans le périphérique par rapport à la pression maximale de fonctionnement. Au démarrage, l'appareil monte en pression, la production de l'électrolyseur est inférieure à la production des cellules. Le débit perdu par micro-fuites permet de prendre en compte une éventuelle perte de pression au cours d'une interruption longue de l'électrolyseur. Enfin, la mesure de pureté entraîne côté oxygène un débit constant de fuites supplémentaires. Ce dernier terme peut être éliminé en le prenant en compte dans le rendement faradique.

Le calcul de la pression est réalisé côté oxygène en raison de la fuite supplémentaire due à la mesure de pureté du gaz. On considère que les deux séparateurs sont isolés l'un de l'autre.

Pureté des gaz (électrolyseur)

Une partie du gaz qui traverse la membrane ne se recombine pas et contamine le gaz produit.

Lors des expériences, seule l'influence de l'intensité a été démontrée.

L'Équation II.45 décrit le seul modèle présent dans la littérature. La pureté du gaz dépend dans ce modèle de la température et de la densité de courant.

$$C_{H_2/O_2} = a(T) + b(T) \times \exp\left(\frac{c(T)}{J}\right) \quad (\text{II.45})$$

C_{H_2/O_2} concentration d'hydrogène dans l'oxygène (%)

J densité de courant ($A \cdot m^{-2}$)

T température de l'électrolyte ($^{\circ}C$)

a, b et c polynôme du second degré

Or, les expériences réalisées à Jülich ont montré que le flux traversant la membrane sans se recombinaire dépendait de la pression (et sûrement de la température) mais pas de l'intensité appliquée à l'électrolyseur.

Le modèle suivant est donc proposé pour modéliser la concentration d'hydrogène dans l'oxygène d'un électrolyseur.

$$C_{H_2/O_2} = \frac{F_{\text{Poison}}}{F_{O_2}} = \frac{a(T,P)}{I} \quad (\text{II.46})$$

Avec

C_{H_2/O_2} concentration d'hydrogène dans l'oxygène (%)

I intensité (A)

A fonction à déterminer dépendante de la pression et de la température ($\%A^{-1}$)

F_{Poison} flux d'hydrogène traversant la membrane sans se recombinaire ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$)

F_{O_2} flux d'oxygène produit par les cellules ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$)

D'après nos résultats expérimentaux, deux éléments sont à prendre en compte pour calculer l'évolution de la concentration du gaz du périphérique :

✚ la pureté du gaz en fonction de l'intensité et

✚ le temps de renouvellement du gaz dans le périphérique.

Pour déterminer l'évolution au cours du temps de la concentration de l'oxygène produit, on résout l'équation suivante, déduite du bilan de flux entrant et sortant du périphérique :

$$\frac{d^{0/0}}{dt} = \frac{F}{n} \times (\%_{\text{oinf}} - \%(\mathbf{t})) \quad (\text{II.47})$$

Avec

$\%(\mathbf{t})$ pureté du gaz produit par l'électrolyseur (%)

F débit produit ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$)

%_{inf} pureté du gaz produit par les cellules (%)

N nombre de moles contenues dans le périphérique (mol)

2.4 Modélisation de la batterie

2.4.1 Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur PV est plus grand que la charge ,les batteries sont à l'état de charge ,la capacité des batteries au temps t peut s'écrire par :

$$C_{Bat(t)} = C_{Bat(t)}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(P_{pv}(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{ond}} \right) \cdot \eta_{Bat} \quad (\text{II.48})$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance de générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t, η_{ond} et η_{Bat} sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est **0.65_0.85** selon le courant par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1.

2.4.2 Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut s'exprimer comme suit:

$$C_{Bat(t)} = C_{Bat(t)}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(\frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} - P_{pv}(t) \right) \quad (\text{II.49})$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est soumise aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat}^{min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat}^{max} \quad (\text{II.50})$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{Bat}^{max} = C_{Bat}^{min}$), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD).

$$C_{Bat}^{min} = DOD \cdot C_{Bat} \cdot N \quad (\text{II.51})$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par la maximum profondeur de décharge, $SOC_{min}=1-DOD$.

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%.

La tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge .Ce modèle basé sur le schéma électrique de la **Fig II 4.3** .

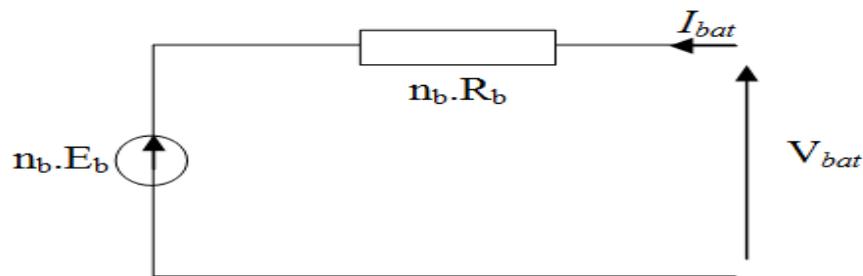


Fig II .4.3 : Schéma électrique équivalent de n_b élément de batterie en série[5]

2.5 Conclusion :

Les modèles sélectionnés sont empiriques. L'outil expérimental permet de déterminer les paramètres de notre application et d'évaluer l'erreur commise.

3 Chapitre 3 : simulation du système (PV-PàC)

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique tel que le générateur PV, le hacheur survolteur, l'onduleur et la charge.

Afin de maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée. Dans ce contexte, nous proposons un système de commande MPPT par une méthode classique P&O pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV.

3.2 Système hybride PV- pile à combustible proposé :

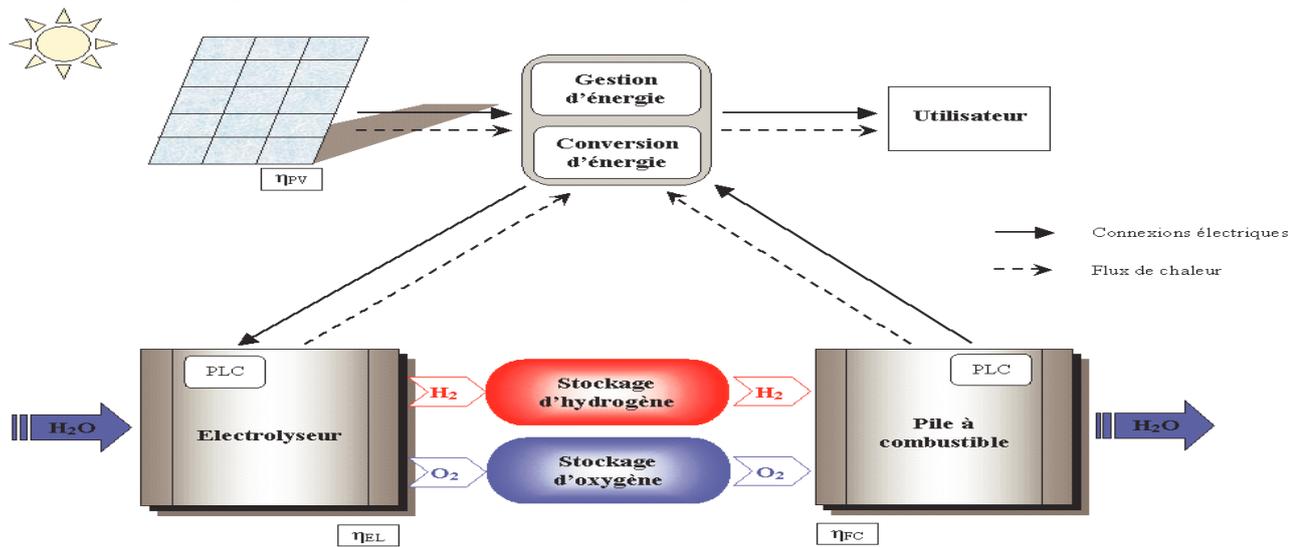


Fig III-1 : Description du système PV-FC.

3.3 Générateur PV SCH2MA SIMULINK

Caractéristiques I(V), P(V)

Influence de l'éclairement

Influence de la température

Influence simultanée de l'éclairement et la température

3.3.1 Commande MPPT:

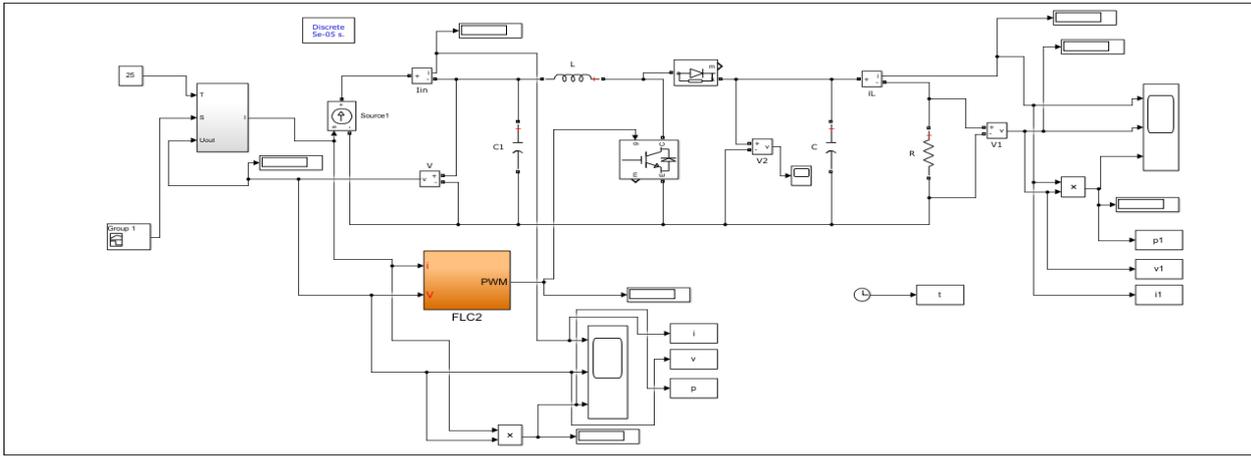


Fig III-2: schéma simulink de la commande MPPT logique flou sur Matlab

La figure précédente représente la simulation d'un système photovoltaïque consiste un panneau PV un convertisseur DC/DC de type boost et une charge résistive

le panneau à simulé est de 200W dans les conditions nominale de 25C° et de 100W/m2

On faire une simulation dans trois conditions d'éclairage 1000/400/800 W/m2 comme montré sur la figure suivante

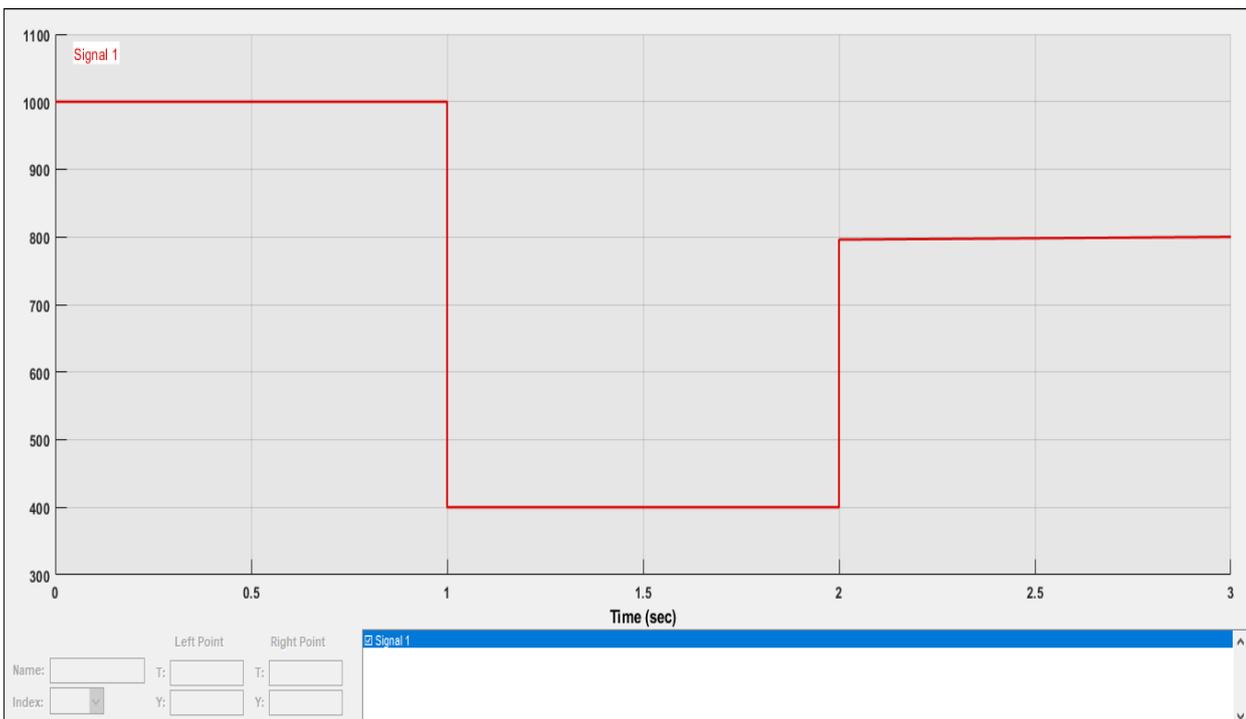


Fig III-3: courbe de l'éclairage

On utilise la technique MPPT de type logique floue pour la maximisation de puissance de panneau

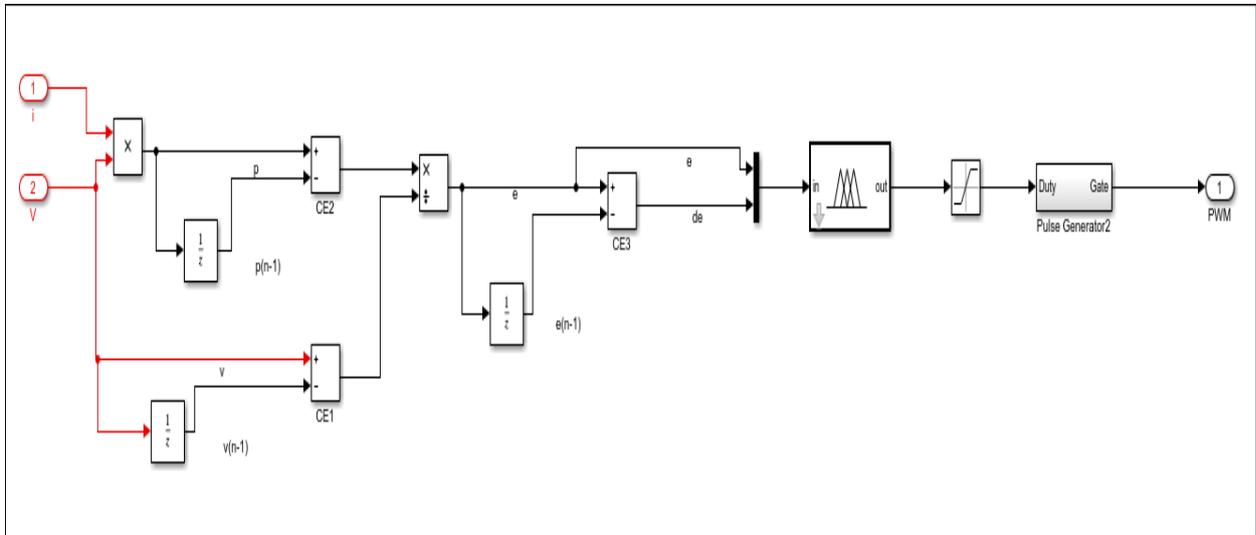
PV pour les différentes cas et on a deux grandeurs comme entrée dans le bloc fuzzy logique

La première grandeur est l'erreur (e) et la deuxième est la variation d'erreur (de)

L'erreur est la division de la puissance sur la tension du panneau PV mesurés pour un instant actuel (n) et un instant précédente (n-1)

La variation d'erreur est la différence d'erreur actuelle $e(n)$ et l'erreur précédent $e(n-1)$

La commande MPPT logique floue permet d'obtenir une valeur de référence dans la sortie de ce bloc qu'il représente le rapport cyclique et on faire la convention de ce rapport à des signaux PWM à l'aide de bloc pulse generator comme montré la figure suivante (bloc FLC2)



FigIII-4Modele simulink du controleur flou

On faire la simulation est on visualise la tension et le courant et la puissance de panneau PV (côté entrée) et la tension et le courant et la puissance de la charge (côté sortie)

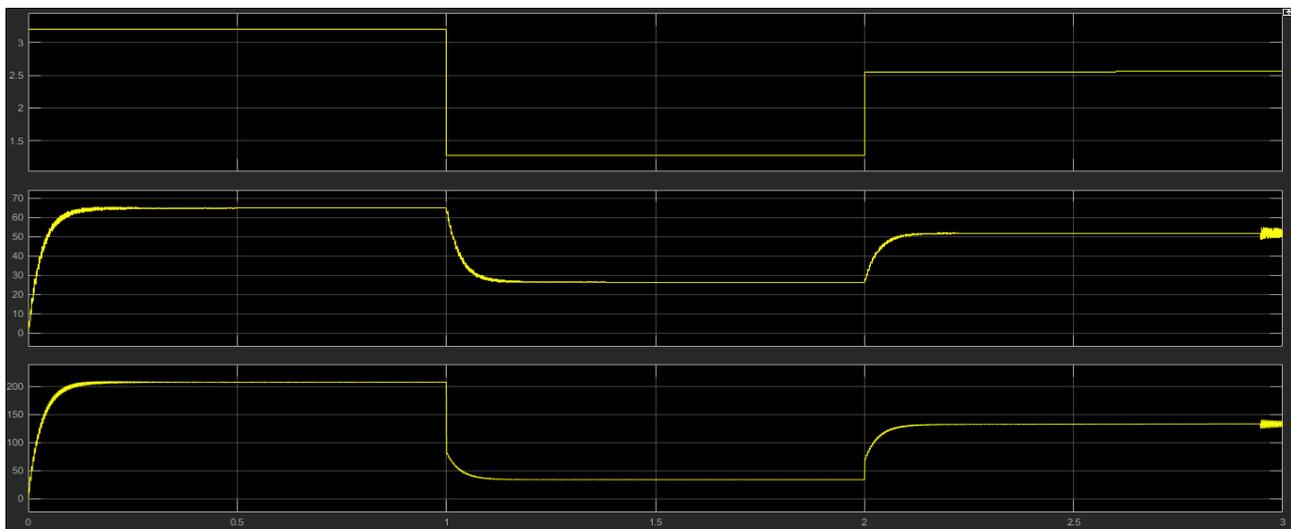


Fig III-5panneau PV (courant, tension, puissance (côté entrée))

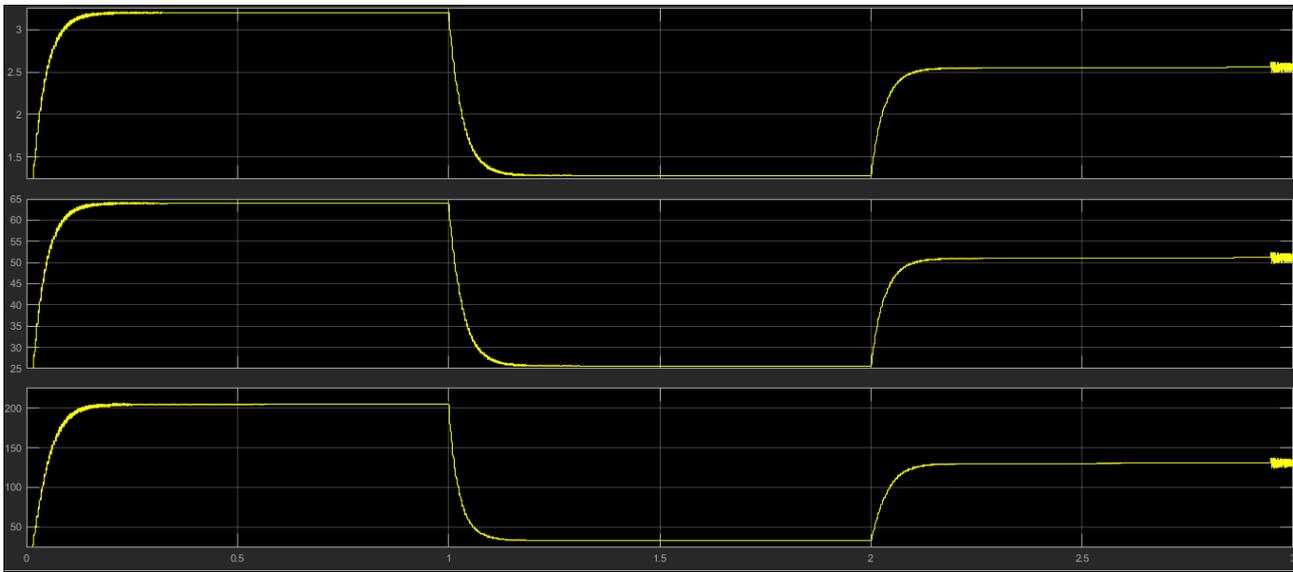


Fig III-6 panneau PV (courant, tension, puissance (côté sortie))

On dire que la puissance de panneau dans le premier cas (1s) est maximale de 200w pour éclairage de 1000w/m² et dans les deux parties la puissance diminuer selon le changement d'éclairage

Le figure précédente représente les mesures de côté charge et on remarque de la puissance de la charge est celle de panneau si on négliger les pertes de convertisseur DC/DC pour les trois cas d'éclairage et on remarque que la puissance est toujours maximale correspondant de chaque cas d'éclairage

On remarque que le temps de réponse de la tectonique floue est très petit et précis

3.4 Pile à combustible :

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.

3.4.1 Description de PEMFC :

Une PàC basse température à électrolyte polymère (PEMFC) est composée au minimum de 5 éléments pour un module élémentaire

- Les plaques bipolaires
- Les plaques distribuant les réactifs
- Ensemble Membrane Electrode (EME)
 - La membrane
 - Les couches de diffusion
 - Les électrodes

3.4.1.1 Modèle statique :

Modèle statique de Larminie et Dicks

$$v_{fc} = E - a \cdot \log\left(\frac{i_{fc} + i_n}{i_0}\right) - r_n \cdot (i_{fc} + i_n) + b \cdot \log\left(1 - \frac{i_{fc} + i_0}{i_l}\right)$$

- V_{fc} : la tension d'une cellule
- A : la pente de la droite de Tafel
- IL : le courant de limite

- B : la constante dans le terme de transfert de masse
- Rm : la résistance de membrane et de contact
- I0 : la densité courant d'échange
- In :le courant interne

1. En fait une simulation de ce modèle à partir de MATLAB/SIMULINK comme suit :

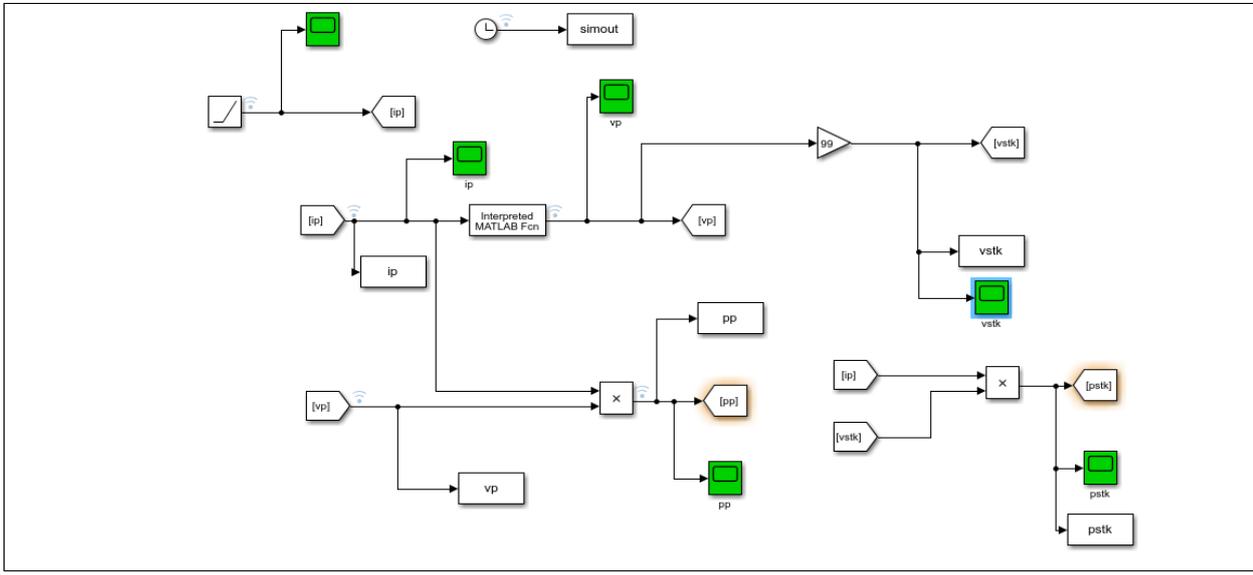


Fig III-7 simulation de la cellule

Les paramètres de la cellule sont :

E	0.98
A	0.05
B	0.205
I0	100
i0	0.36
in	0.5
Rn	0.001

2. On plote et visualise les caractéristiques VI et PI :

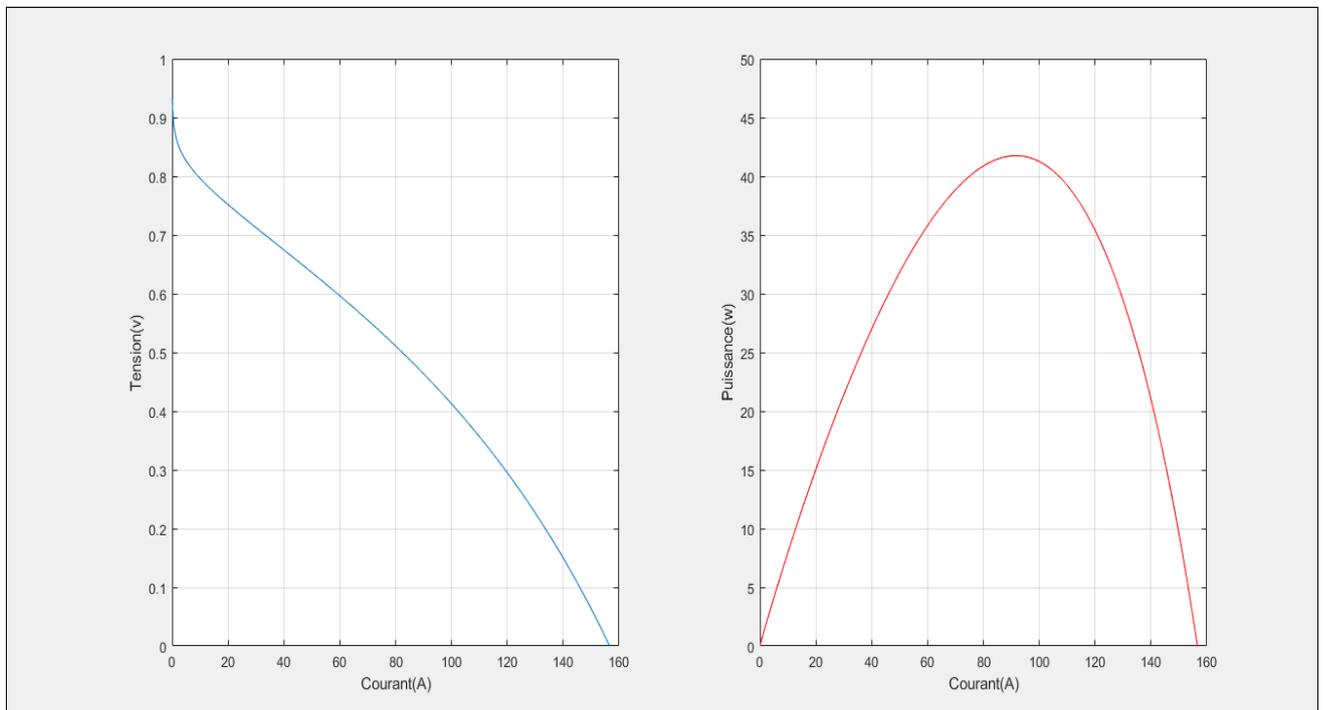


Fig III-8 Caractéristiques tension-densité de courant et puissance-densité de courant d'une cellule PEM.

La courbe obtenue représente la progression de la tension en fonction du courant et elle est divisé en trois régions :

✚ région d'activation :

la région de poing représente la chute de tension d'activation due à la lenteur des réactions chimiques se produisant sur les surfaces des électrodes en fonction de la température et de la pression de fonctionnement. type d'électrode .et catalyseur utilisé. cette région est plus ou moins large.

✚ région ohmique :

la seconde zone représente les pertes résistives dues à la résistance interne de la pile à combustible. Enfin, la troisième région représente les pertes de transport de masse résultant du changement de concentration des réactifs à mesure que le combustible est utilisé.

✚ région de transport de masse :

la troisième région aussi nommé la zone interdite représente les pertes de transport de masse résultant du changement de concentration des réactifs lorsque le combustible est utilisé.

La courbe si dessus représente une progression non linéaire de la puissance en fonction de la densité du courant car on remarque une augmentation considérable de la puissance avec le courant faible on revanche avec l'augmentation du courant supérieur A cause une régression accélérer de la puissance qul nous donne comme conclusion un courant optimale de fonctionnement.

3. Pour plus détails et analyses de la cellule en représente un autre modèle de la cellule qu'il contient la pression des gaz et la température De fonctionnement de la cellule.
4. On visualise les pertes ohmiques, d'activation et collectives

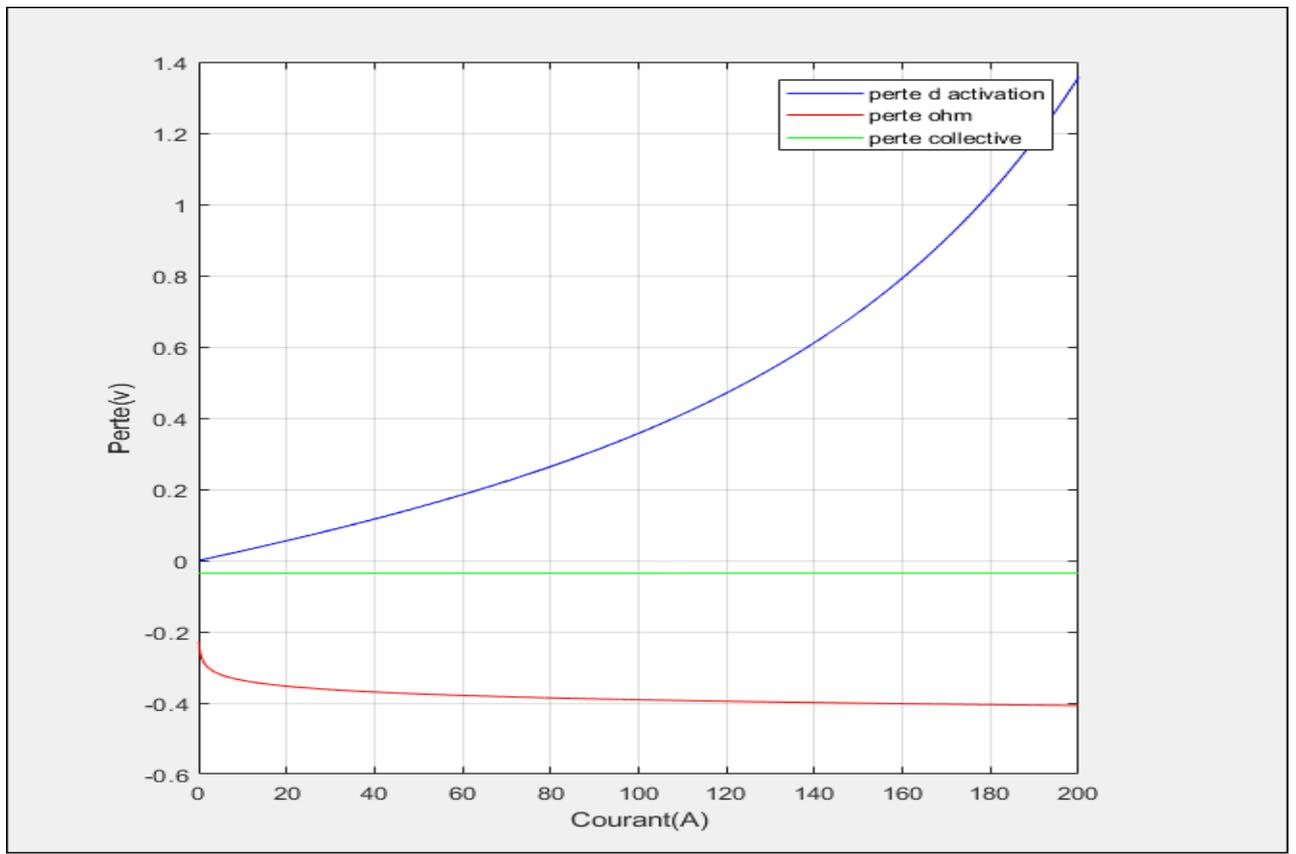


Fig III-9 Caractéristiques des pertes homiques

5. On visualise en étude l'effet des paramètres R_m

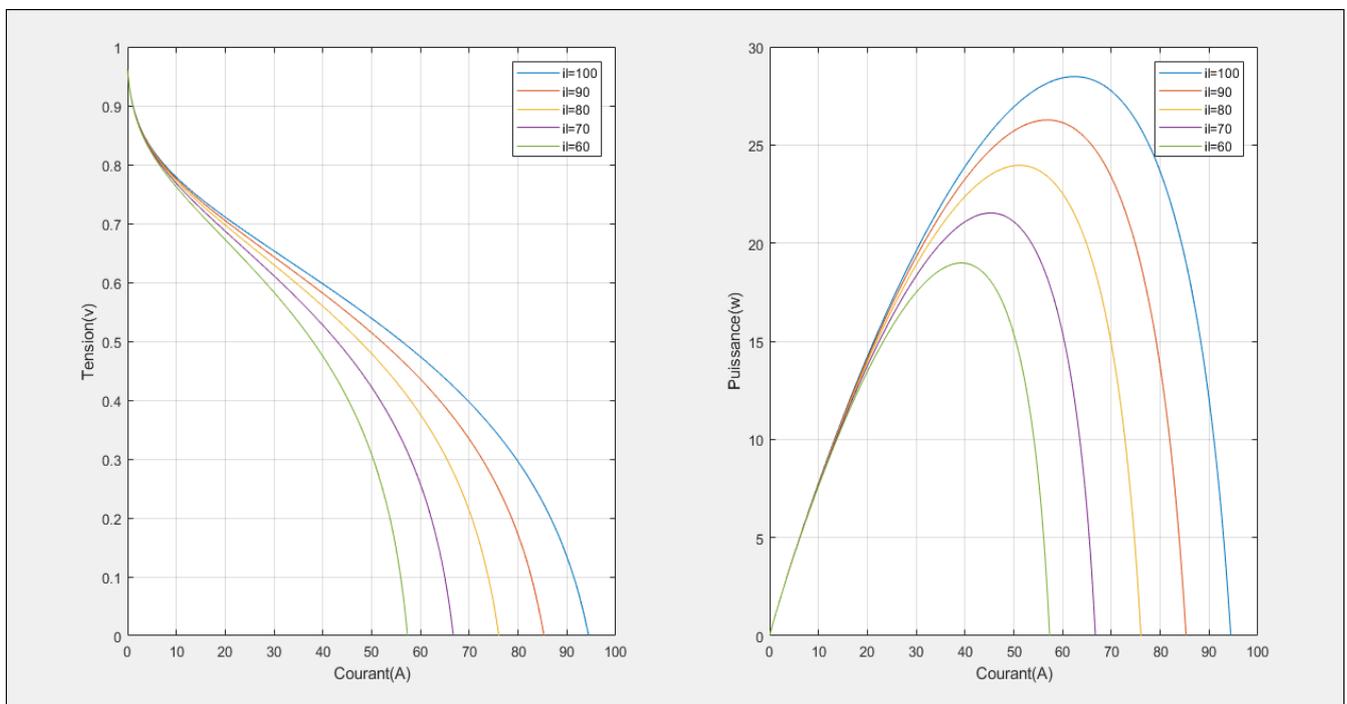


Fig III-10 L'effet de R_m

6. On visualise en étude l'effet des paramètres I_L

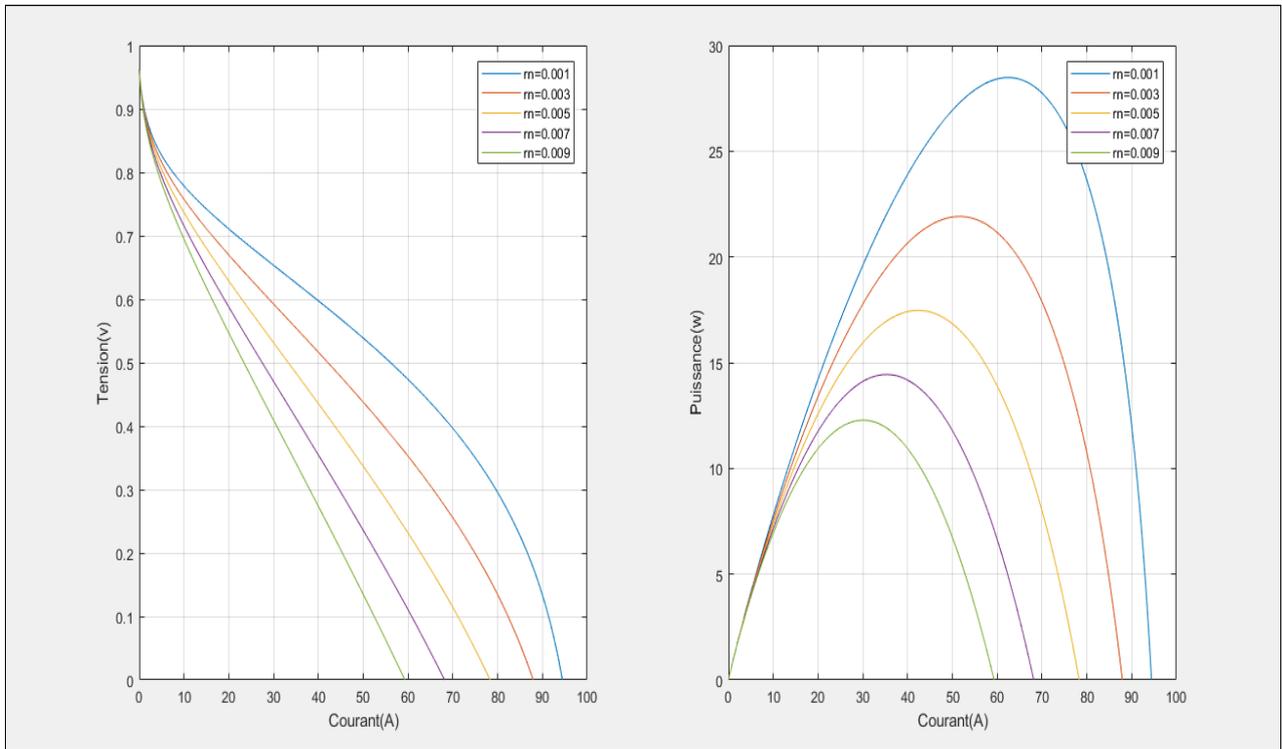


Fig III-11 L'effet IL

7. On visualise permet d'étudié l'effet de température sur la cellule :

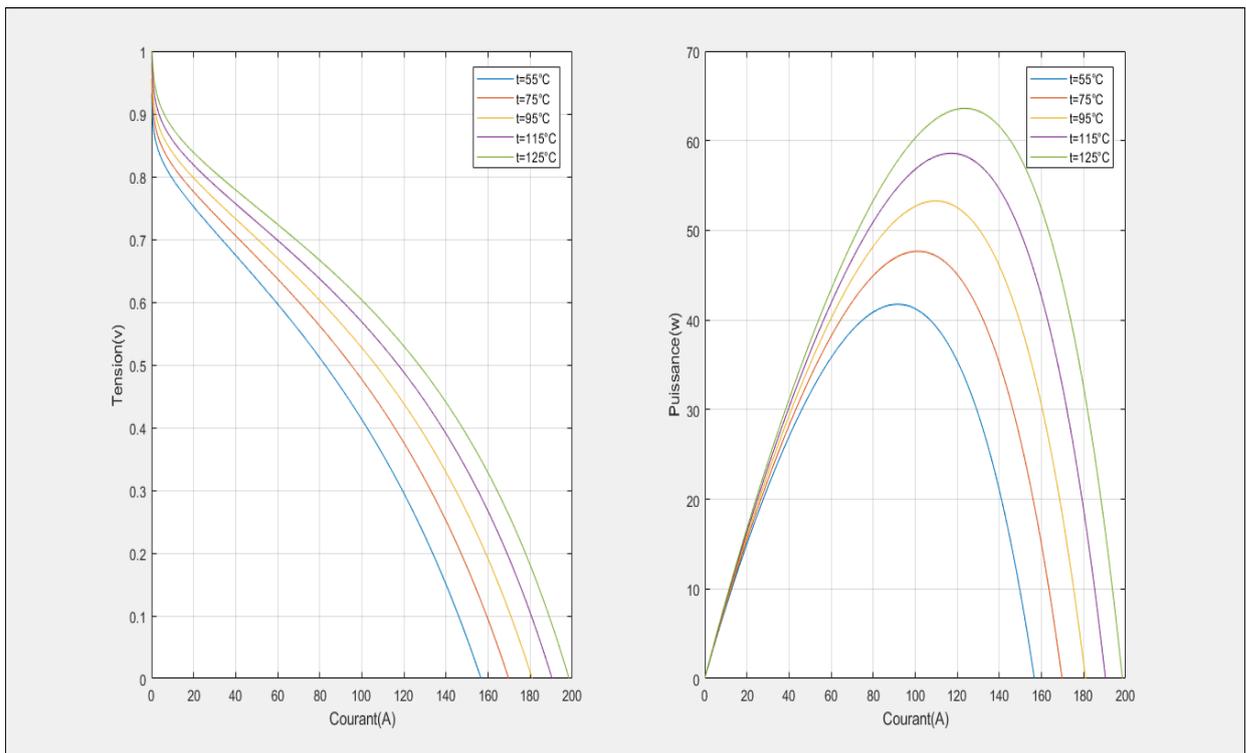


Fig III-12 Effet de la température de la cellule

On constate bien que l'augmentation de la température de la pile joue un rôle important sur la tension de cette dernière, ceci est expliqué par la forte conduction ionique de l'ensemble (électrodes, électrolyte).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, grâce aux équations mathématiques étudiées précédemment, les courbes sont dessinées et une simulation d'un bloc diagramme pour la logique floue et une pile à combustible est donnée avec les résultats obtenus dans Matlab.

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. De nombreuses recherches ont été réalisées dans les années 90, pour utiliser l'hydrogène comme stockage saisonnier dans des systèmes autonomes de génération d'énergie.

Ce stockage par l'hydrogène était très prometteur en dépit des performances relatives des électrolyseurs et des piles à combustible. Les progrès réalisés sur les composants électrochimiques sont très importants. Mais les performances du système de stockage par l'hydrogène n'avaient pas été réévaluées. De plus, l'utilisation journalière de ce stockage permettant d'augmenter la génération de chaleur n'avait jamais été abordée.

C'est dans ce cadre que nous avons décidé d'étudier afin d'évaluer le potentiel d'un système autonome de production d'énergie électrique et thermique, de faible puissance, couplant un champ photovoltaïque et un système de stockage par l'hydrogène constitué d'un électrolyseur, d'une unité de stockage des gaz et d'une pile à combustible à haute température .

L'objectif global est l'évaluation des performances en terme de rendement des systèmes PV-H₂-PAC. Pour atteindre cet objectif, un outil de simulation a été développé. Pour étudier et simuler le système, une étude bibliographique a permis de rassembler les informations nécessaires au dimensionnement et au choix du système et de ses composants. L'analyse de l'outil élaboré dans l'environnement Matlab/Simulink, du système développé a permis d'évaluer le rendement du système de stockage par l'hydrogène par la détermination des différentes énergies produites ou consommées au niveau chacun des composants

Finalement, ce travail a montré que les systèmes PV-H₂-PAC pourraient atteindre des performances très intéressantes. Cependant, les freins technologiques des systèmes PV-H₂- FC de faibles puissances sont la durée de vie de la pile à combustible et la limite possible des performances du système de stockage par l'hydrogène pour le fonctionnement sécurisé des composants électrochimiques.

- [1] : BENSACI Wafa < Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT > Université Kasdi Merbah–Ouargla (2011/2012)
- [2] : LAROUÏ Rachid < Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar > Université Ahmed Draya Adrar 2015
- [3] : TATI Fethallah BEN - LAMOUDI Oussama < Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue >> Université Kasdi Merbah–Ouargla (2017/2018)
- [4] : HELALI KAMELIA < Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative > UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2012
- [5] : BELKHIER Youcef AIT MAHDI M. Amine < Modélisation et Simulation D'un Système Photovoltaïque > Université de Bejaïa 2016/2017
- [6] : Mihai RADULESCU < Systèmes de cogénération d'électricité et de chaleur avec piles à combustible de type PEMFC ou SOFC et vapo reformage externe > Université Henri Poincaré, Nancy 1 Septembre 2006
- [7] : ABDERRAHIM Younes, BELBACHIR Rabab < Contribution à l'étude des phénomènes ayant lieu dans le catalyseur d'une pile à combustible de type PEMFC > UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM 2013-2014
- [8] : YOUCEFI Abdelhak, TELEMÇANI Belkacem < Modélisation d'une pile à combustible de type PEM > UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2016 /2017
- [9] : Élodie Lechartier < Contribution au pronostic de pile à combustible PEMFC basé sur modèle semi-analytique > Université de Franche-Comté 11 Déc. 2017
- [10] : Mounir SAHLI < étude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile a combustible > UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 17/10/2010
- [11] : Bouras Kheira , Moussouni Leila < Modélisation de systèmes réversible de types électrolyseurs et pile a hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïque > Université D r . Tahar Moulay de Saida 2016/2017
- [12] : FLORENT BRÈQUE < MODÉLISATION DU TRANSPORT DE MASSE DANS UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM ET ÉTUDE DE L'HUMIDIFICATION INTERNE DE LA PILE > UNIVERSITÉ DU QUÉBEC SEPTEMBRE 2008
- [13] : BENYAHIA N. < MODELISATION ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE (SOFC) > Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2011-2012
- [14] : Zhiming ZHANG < Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible > UNIVERSITÉ D'ÉVRY-VAL D'ESSONNE novembre 2010

- [15] : Mr TAMRABET MONSAF < INFLUENCE DES ECOULEMENTS DES GAZ DANS LES CANAUX SUR LA CONSOMMATION DES REACTIFS DANS UNE PILE À COMBUSTIBLE DE TYPE PEMFC > UNIVERSITE DE BATNA juillet 2010
- [16] : Phatiphat THOUNTHONG < CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS > INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE décembre 2005
- [17] : MOUHCINE CHAMI < MODÉLISATION ET SIMULATION DES SYSTÈMES MULTI PHYSIQUES À L'AIDE DES RÉSEAUX DYNAMIQUES HYBRIDES À COMPOSANTS : APPLICATION À LA CONVERSION D'ÉNERGIE ET AU TRANSPORT ÉLECTRIQUE TERRESTRE > Université de Franche-Comté et de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard Septembre 2005
- [18] : H. Abbes , H. Abid , K. Loukil , A. Toumi et M. Abid < 1- Laboratory of Computer and Embedded Systems, Lab-CES , 2- Laboratory of Sciences and Techniques of Automatic, Control & Computer Engineering, Lab-STA National School of Engineering of Sfax, University of Sfax PO Box, 1173, 3038 Sfax, Tunisia (reçu le 10 Février 2014 – accepté le 30 Septembre 2014)
- [19] R. Merahi¹ , R. Chenni² , M. Houbes <Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab > Département Electrotechnique, Université de Badji Mokhtar Annaba Université Mentouri de Constantine(UMC), Route d'Ain El Bey Constantine, Algérie , 2010
- [21] J. Amphlett, R. Baumert, R. Mann, B. Peppley et P. Roberge. Par- modélisation de la formance de l'électrolyte polymère solide Ballard-Mark-IV pile à combustible, I. Développement de modèles mécanistiques. Société électrochimique, Vol. 142, n ° 1, pp.1 8, 1995.
- [22] J. Amphlett, R. Baumert, R. Mann, B. Peppley, P. Roberge et A. Roderigues. Modélisation paramétrique des performances d'un proton de 5 kW pile à combustible à membrane d'échange. Journal of Power Sources, Vol. 49, No. 1-3, pp. 349 356, 1994. Proceedings of the Third Grove Fuel Cell
- [23] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley et P. R. Roberge. Développement et application d'un générique modèle électrochimique en régime permanent lisé pour une pile à combustible PEM. Journal of Power Sources, Vol. 86, n ° 1-2, pp. 173180, 2000. Symposium La science, l'ingénierie et la pratique des piles à combustible
- [24] [Wang05b] Y. Wang et C.-Y. Wang. Analyse transitoire de l'électrolyte polymère piles à combustible. Electrochimique Acta, vol. 50, n ° 6, pages 1307 1315, 2005.
- [25] K. Y. Chang, H. J. Lin et P. C. Chen. La performance optimale estimation pour un PEMFC inconnu basée sur la méthode de Taguchi et un modèle numérique générique PEMFC. Journal international de l'hydrogène Energie, Vol. 34, n ° 4, pp. 1990 1998, 2009.
- [26] G. X. Tatsuhiro Okada et M. Meeg. Simulation pour la gestion de l'eau dans les membranes pour piles à combustible à électrolyte polymère. Electrochimique Acta, vol. 43, n ° 14-15, pages 2141 2155, 1998
- [27] SAADI. A <Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC> Université Mohamed Khider – Biskra . 2013-2014

- [28] O. Ulleberg, «Systèmes électriques autonomes pour l'avenir: conception, fonctionnement et contrôle des systèmes d'énergie solaire-hydrogène », thèse de doctorat, Université norvégienne of Science and Technologie , Trondheim, 12/1998
- [29] Séverine busquet<étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile a combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation> école des mines de paris 15 décembre 2003
- [28] J. Kim et coll. & C.E. Chamberlain, «Modélisation de la membrane des piles à combustible à échange de protons avec une équation empirique», Journal of Electrochemical Society, Vol. 142, n ° 8, p. 2670-2674, 1995.
- [30] P.S. Kauranen, P.D. Lund, J.P. Vanhanen, «Développement d'un système solaire autonome système énergétique de l'hydrogène », International Journal of Hydrogène Energie, Vol.19, N ° 1, pp. 99-106, 1994.
- [31] A. Siegel, T. Schott, «Optimisation de la production d'hydrogène photovoltaïque», International Journal of Hydrogen Energy, Vol.13, N ° 11, pp. 21-33, 1988.
- [32] P.A. Lehman & al., «Expériences d'exploitation avec l'énergie photovoltaïque-hydrogène system », International Journal of Hydrogen Energy, Vol.22, N ° 5, pp. 465-470, 1997.
- [33] J.P. Vanhanen, P.D. Lund, «Lignes directrices pour le dimensionnement des composants photovoltaïques et de stockage des systèmes solaires à hydrogène », Proc. 13e énergie solaire photovoltaïque européenne Conférence et exposition, Nice, France, pp.1854-1857, 1995.