

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



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Électrotechnique
Option : Énergies renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME HYBRIDE (PHOTOVOLTAÏQUE, PILE À COMBUSTIBLE)

Présenté par :

- HAFFAD Miloud
- NEHARI Boudouaia
- BERAINIS Khalid

Soutenu le : 30/06/2022 devant le Jury :

<i>M. SEKKAL Mohammed</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. TAIBI Ibrahim</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. BENMOHAMED Fayssal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciements

*Je tiens tout d'abord, à remercier et assurer mes sincères reconnaissances, mon plus grand respect et ma totale gratitude à mon cher Encadreur Monsieur **TAIBI Ibrahim**, pour m'avoir fait l'honneur d'être promoteur de ce mémoire et qui a été présent à tout instant, pour ses commentaires, conseils et corrections.*

Je remercie tous mes collègues et toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces années de recherche.

Mes sincères gratitude s'adressent à ma famille ; sans leurs encouragements permanents et leur soutien moral je ne serais parvenue là où je suis.

Dédicaces

A mes chers parents

A ma grande famille

A toutes mes amis

A toutes les personnes qui me

Sont très chères. ...

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Table des matières

Liste des figures

Nomenclature

Introduction Générale 10

CHAPITRE I : les Systems photovoltaïques et stockage

I.1. Introduction 12

I.2. Energie solaires 12

I.3. les Systems photovoltaïques 13

I.3.1. Différents types des systèmes mes photovoltaïques 14

I.4. les Systems de stockage 16

I.4.1. Les batteries photovoltaïques 16

I.4.2. Les pile à combustibles 17

I.4.2. Conclusion 18

CHAPITRE II : Modélisation de système photovoltaïque et la pile à combustible.

II.1. Introduction:.....	19
II.2. Modélisation de système photovoltaïque	19
II.2.1.Schéma électrique équivalent de cellule solaire	:19
II.3. Convertisseur statique (DC/DC)	22
II.3. 1. Hacheur parallèle (Boost).....	22
II.4. Modalisation pile à combustible PEMFC.....	25
III.5. Conclusion.....	29

CHAPITRE III : Modélisation de onduleur et Moteur synchrone à aiment permanent

III.1. Introduction	31
III.2. Les onduleurs.....	31
III.2.1. Modélisation et commande de l'onduleur de tension MLI	32
III.3. Les moteurs synchrones à aiment permanent.....	34
III.3.1. Principe de fonctionnement:.....	35
III.3.2. Modélisation de machine synchrone à aiment permanent:	36
III.3.3. Transformation de Park.....	37
III.3. Conclusion	39

CHAPITRE IV: Simulation des résultats et discussion

IV.1. Introduction	40
IV.2. Générateur Photovoltaïque:.....	41
IV.3. Hacheur élévateur commandé.....	43
IV.4. La pile combustible PEMFC	44
IV.5. convertisseur (DC-AC):	45
IV.6. Machine synchrone à aimant permanent (MSAP)	47
IV.3. Conclusion :	51

C onclusion Générale	52
-----------------------------------	----

Références Bibliographiques.

Annexes.

Liste des figures

Figure 1.1: la production d'énergie.....	13
Figure 1.2: Structure électronique des semi-conducteurs.....	13
Figure 1.3 : Structure de la jonction PN.....	14
Figure 1.4 : Structure de Système photovoltaïque.....	14
Figure 1.5 : Structure de Système hybride.....	15
Figure 1.6 : Structure de Système photovoltaïque connectés au réseau.....	15
Figure 1.7: Schéma de la cellule de batteries.....	16
Figure 1.8 : Schéma de la cellule pile à combustible	17
Figure 2.1: Schéma électrique équivalent de cellule solaire.....	20
Figure 2.2 : l'organigramme d'identification des paramètres photovoltaïque par la méthode newton raphsen.....	21
Figure 2.3 : Convertisseur DC/DC	22
Figure 2.4: Hacheur survolteur.....	22

Figure 2.5: circuit équivalent.....	23
Figure .2.6: le fonctionnement d'une pile PEMFC.....	25
Figure .3.1 Circuit d'un onduleur triphasé.....	32
Figure .3.2: machine synchrone.....	34
Figure .3.3: stator de machine synchrone.....	34
Figure .3.4: Rotor de machine synchrone.....	35
Figure .3.5: circuit équivalent d'une moteur à aimant permanent.....	35
Figure .4.1: l'environnement de Matlab.....	40
Figure .4.2: la structure globale de la chaine étudiée.....	41
Figure 4.3 : Schéma Simulink de générateur photovoltaïque.....	42
Figure 4.4: Caractéristique I(V) d'un module pour éclairement solaires variable.....	42
Figure .4.5: Caractéristique I(V) d'un module pour température variable.....	43
Figure .4.6: Schéma Simulink de convertisseur (DC-DC).....	43
Figure .4.7: Tension de sortie de hacheur	44
Figure.4.8: Schéma Simulink de la pile PEMFC.....	45
Figure.4.9: Schéma Simulink de convertisseur (DC-AC)	46

Figure.4.10: signal de référence et signal de porteuse	46
Figure.4.11: Schéma de la machine MSAP.....	47
Figure.4.12: Similink sous Maltab la chaine hybride globale.....	48
Figure 4-13: le courant Id de MSAP.....	49
Figure 4-14: le courant Iq de MSAP.....	49
Figure 4-15: la vitesse w de MSAP.....	50
Figure 4-15: le couple électromagnétique Ce de MSAP.....	50

Liste des Tableaux

Tableaux 4.1 : les paramètres de la machine MSAP.....	47
--	-----------

Nomenclature général

Symboles

photo- courant	I_{ph}
Courant traversant la diode.	I_d
le courant de saturation	I_0
Charge d'électron	q
L'éclairement	E
La constante de Boltzmann	K_b
Coefficient de la température du courant de court-circuit	K_1
Tension thermique	V_T
Tension aux bornes de la diode	V
Température de référence de la cellule	T_{ref}
Energie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule	E_g
La résistance séries	R_s
La résistance parallèle	R_{sh}
Nombre de module en série.	N_s
Nombre de module en parallèle	N_p
tension à la sortie du générateur PV	V_{pv}
Courant à la sortie du générateur PV	I_{pv}
L'amplitude de la porteuse	V_m
Tension continue appliquée à l'onduleur	V_{dc}
Courant Continu	DC
Courant Alternatif	AC

Introduction générale

L'énergie photovoltaïque joué un rôle majeur et nécessaire dans divers application. La production de cette énergie devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, pour les applications sur des sites isolés comme le pompage solaire. L'évolution de l'électronique de puissance dans le domaine aimants permanents, produire des nouvelles machines telles que la Machine Synchrone à Aimant Permanent qui a l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique.

Ces énergies ont le mérite d'être inépuisables quelle que soit la consommation. De nombreux travaux de recherche sont effectués dans le cadre d'une optimisation énergétique pour améliorer leur rendement. L'énergie photovoltaïque, être le plus souvent hybridée à d'autres sources d'énergies. Son hybridation à la filière

Dans cet esprit nous avons entrepris une étude d'un système hybride pour alimenté une machine synchrone à aiment permanent.

Le plan de ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

La trame du premier chapitre est une généralité sur les systèmes photovoltaïques et les composantes de stockage

Le deuxième chapitre est consacré à la formulation mathématique principaux composants du système hybride solaire hydrogène.

Le troisième chapitre c'est la suite de la modélisation de convertisseur statique (DC-AC) et la modélisation des équations électriques et mécaniques qui gouvernant le fonctionnement de la machine Synchrone à Aimant Permanent MSAP.

Dans le quatrième chapitre, on va valider notre procédure de simulation et après une présentation de l'essentiel des résultats obtenus pour chaque élément de la chaîne étudiée et nous présentons leurs interprétations

En conclusion, nous résumons les principaux résultats obtenus.

Les systèmes photovoltaïques et stockage

I.1. Introduction:

Le besoin croissant d'énergie a conduit à l'émergence de sources d'énergie nouvelles et non polluantes, et cette caractéristique a poussé la science et les scientifiques à chercher à la développer de plus en plus et parmi ces énergies non polluantes se trouve l'énergie solaire, qui est considérée comme une énergie qui n'est pas épuisé, renouvelable et disponible partout dans le monde. Bien qu'il y ait des reflets et des diminutions des rayons du soleil, la quantité qui atteint la terre est suffisante pour produire de l'énergie électrique ou thermique. La plupart des pays du monde, y compris l'Algérie, ont une demande croissante d'énergie électrique propre et renouvelable, en particulier dans les zones reculées et désertiques, pour fournir de l'eau et de l'éclairage, y compris l'utilisation de l'énergie solaire disponible aux heures du jour et non disponible dans la nuit, ce qui nécessite de stocker cette énergie dans des pac de batterie et piles à combustible pour la consommer la nuit et quand l'ensoleillement ne sera pas suffisant pour alimenter vos consommateurs électriques. Dans ce chapitre on va donner des généralités sur les systèmes photovoltaïques et les systèmes de stockage

I.2. Production d'énergie :

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables à connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre un grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

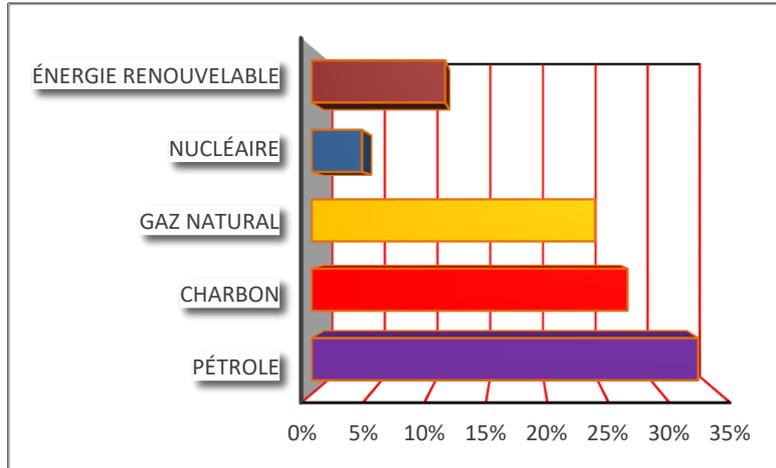


Figure 1.1 : la production d'énergie.

La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2019 selon Bp de 584.9 ex joule en progression de 12.1% de puis 2009. [1] .

I.3. les Systems photovoltaïques

Le mot (Photovoltaïque) est la combinaison de deux mots : **Photo** : mot d'origine grecque qui signifie lumière. **Voltaïque** : qui vient de (volt) et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique. Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé, en physique de l'état solide, à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur Figure (1.2) possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des trous qu'ils laissent dans la bande de valence [2].

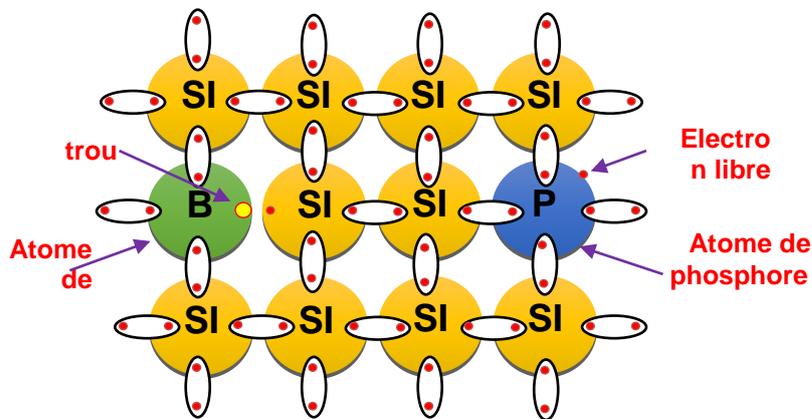
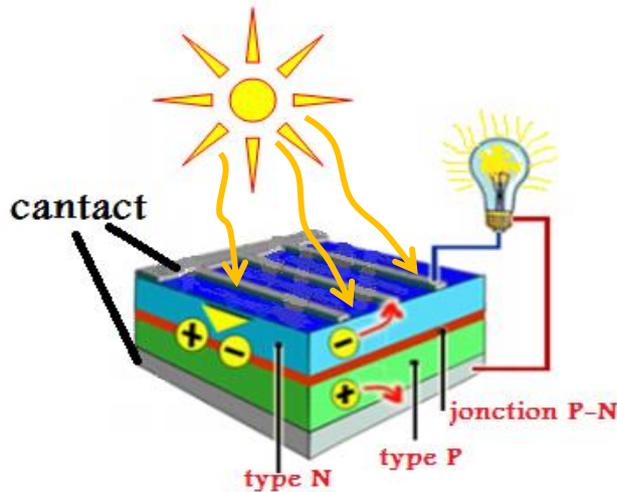


Figure 1.2 : Structure électronique des semi-conducteurs.



Les constitutions du système photovoltaïque basé sur les éléments suivant (Le générateur PV, Les batteries, Convertisseur et systèmes de régulation

I.3. 1. Les différentes structures de système photovoltaïque

les ssystèmes auonomme On peut classer les systèmes photovoltaïques en trois classes : Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (1.3) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique [3].

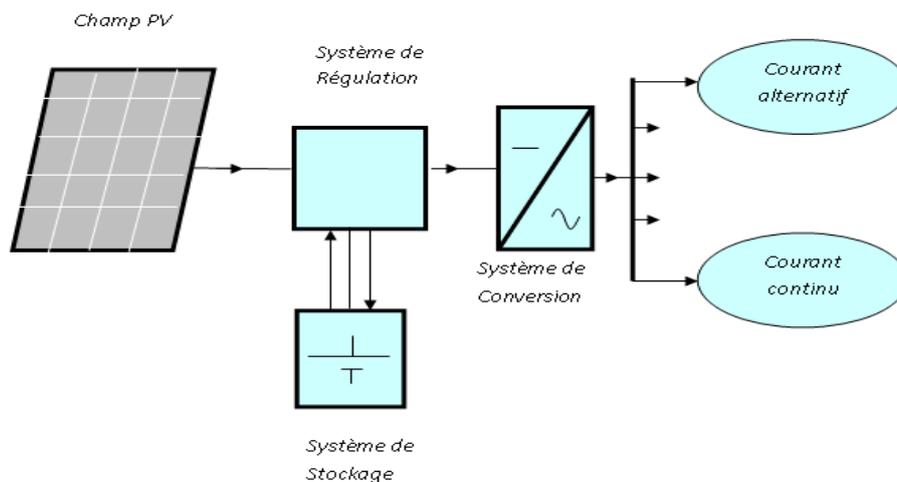


Figure 1.4 : Structure de Système photovoltaïque.

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi un ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue

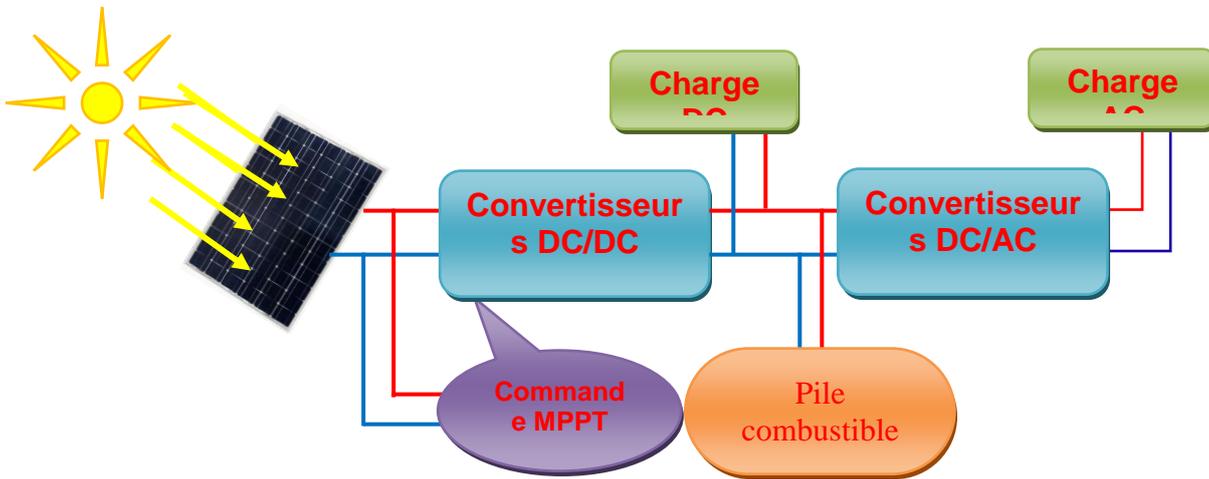


Figure 1.5 : Structure de Système hybride.

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau figure (1.6) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [3].

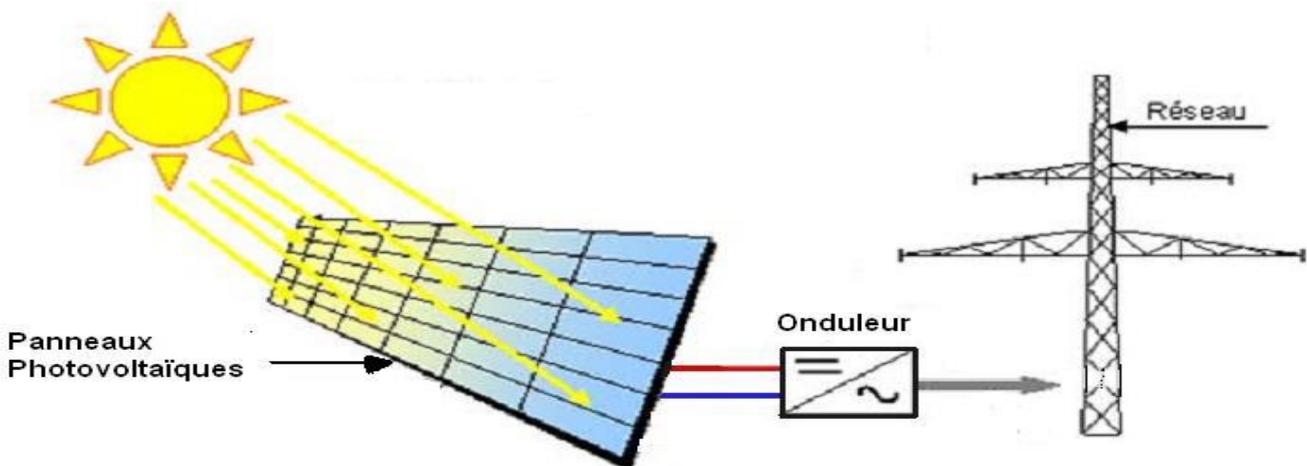


Figure 1.6: Structure de Système photovoltaïque connectés au réseau

I.4. les Systems de stockage :

Pour des raisons de sécurité, de qualité de service, de nombreux domaines souhaitent ou doivent se prémunir contre toute coupure énergétique, en ayant à leur disposition une source d'énergie indépendante et fiable (une énergie de secours). Parmi les choix possibles, les batteries sont des solutions de stockage particulièrement séduisant.

I.4.1. Les batteries :

La batterie est un dispositif de stockage qui répond à nos attentes. Elle est utilisée dans de nombreux domaines et prospère. Grâce à cela, de nombreux efforts ont été déployés pour améliorer leurs performances. [4] Une batterie est constituée d'un ensemble de cellules électrochimiques, capables de stocker de l'énergie électrique sous Forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes. Le courant est produit par la circulation d'électrons entre 2 plaques ou électrodes :

- Une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons.
- Une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.
- Un électrolyte. [5].

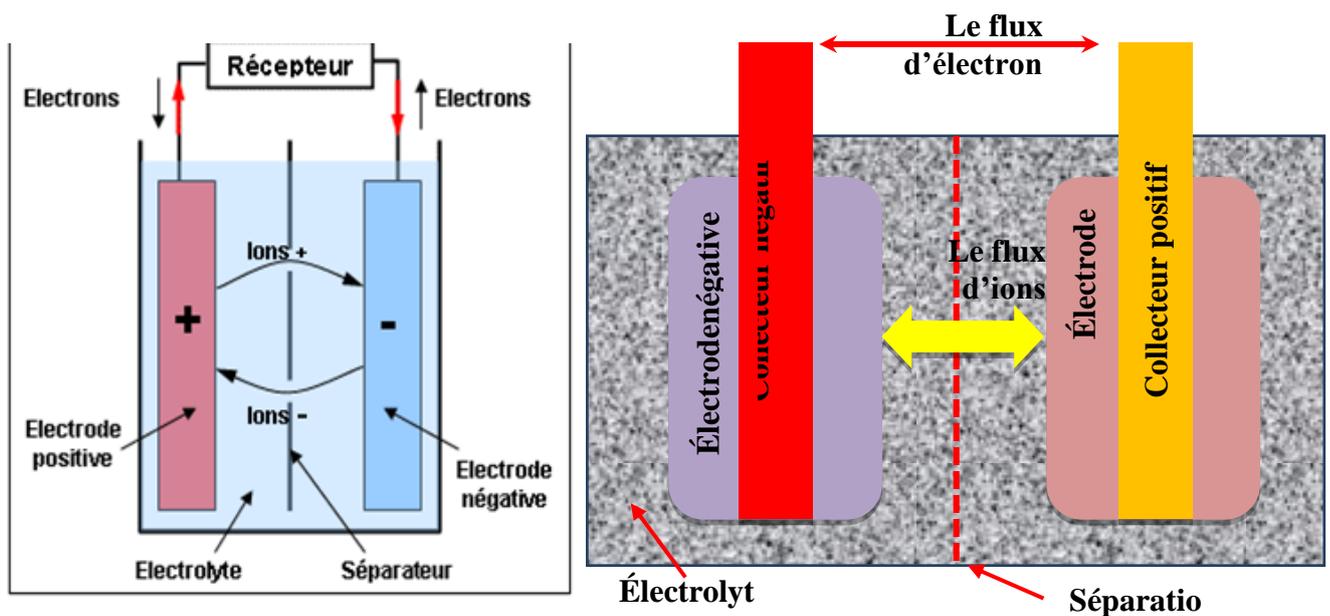


Figure 1.7: Schéma de la cellule de batteries.

I.4.2. Les pile à combustibles:

C'est un peu avant 1840 que William GROVE avocat britannique passionné de la physique, décrit la première pile à combustible (appelée fuel cell dans la littérature anglo-saxonne). Elle utilise de l'hydrogène et d'oxygène, fonctionne à basse température, possède des électrodes de platine et emploie de l'acide sulfurique comme électrolyte [6].

Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui convertit en continu l'énergie chimique d'un combustible et d'un comburant en énergie électrique. [7]. Le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quelle que soit leur technologie, repose sur le même principe, à savoir qu'elles sont alimentées en hydrogène et en oxygène, et par l'interaction à l'intérieur de la cellule, elles dégagent de la chaleur, de l'eau et de l'électricité. L'hydrogène n'existe pas à l'état pur l'atome hydrogène est toujours combiné avec d'autre élément comme le Carbone, l'oxygène, l'azote La production de l'hydrogène pur aux le dihydrogène crase à électrolyseur de l'eau, dans ce cas en à besoin d'une source d'énergie électrique (batterie) et une source d'hydrogène (l'eau H₂O).Electrolyse si cassé la molécule d'eau avec un courant électrique en trouve 2 atomes hydrogène et 1 atome oxygène pour former le dihydrogène pour cela en utilise l'électrolyseur. L'électrolyseur et forme de plusieurs cellule chaque cellule et compose d Cathode - anode - membrane - 2 plaque bipolaire [7].

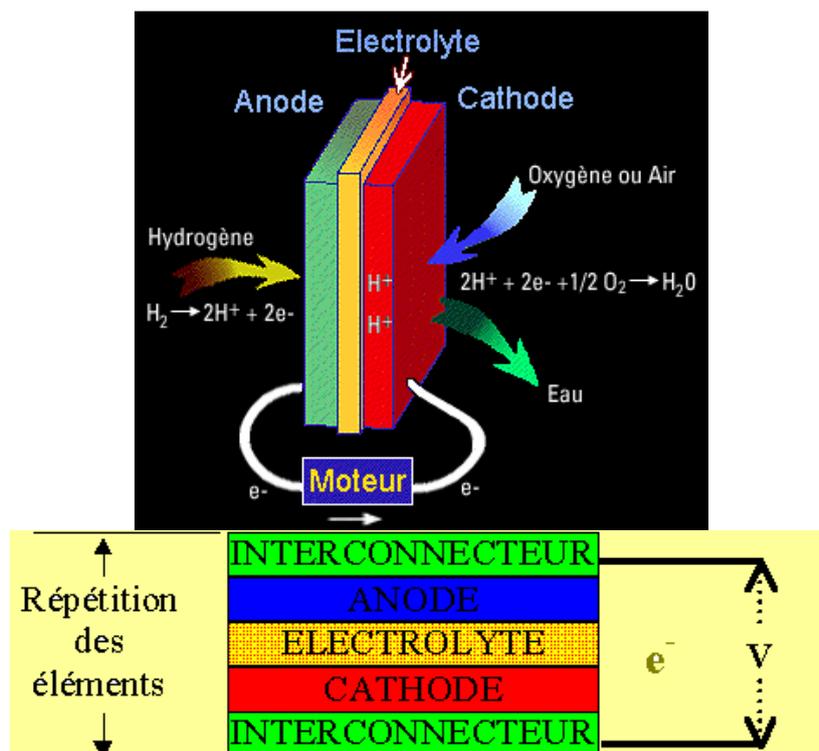


Figure 1.8: Schéma de la cellule pile à combustible.

I.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présentés les différentes structures des systèmes photovoltaïques et aussi les systèmes de stockage. nous avons constaté que l'avantage principal de l'utilisation des sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut aider à résoudre plusieurs problèmes qui apparaissent au niveau de l'impact de l'utilisation des ressources classiques sur l'environnement et plus précisément comme une émission de gaz à effet de serre.

Modélisation de système photovoltaïque et la pile à combustible

II.1. Introduction:

Pour étudier une chaîne d'énergie renouvelable hybride il faut déterminer le type d'énergie d'entrer. Dans ce chapitre, on va exposer les modèles qui simulent les deux sources d'énergie comme les panneaux solaire et la pile à combustible.

II.2. Modélisation de système photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. il repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [8] :

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

II.2. 1. Schéma électrique équivalent de cellule solaire :

Dans la cellule réelle, on inclut l'effet de la résistance série, shunt et l'effet de la recombinaison représenté par le facteur d'idéalité n . figure (2.1) [9].

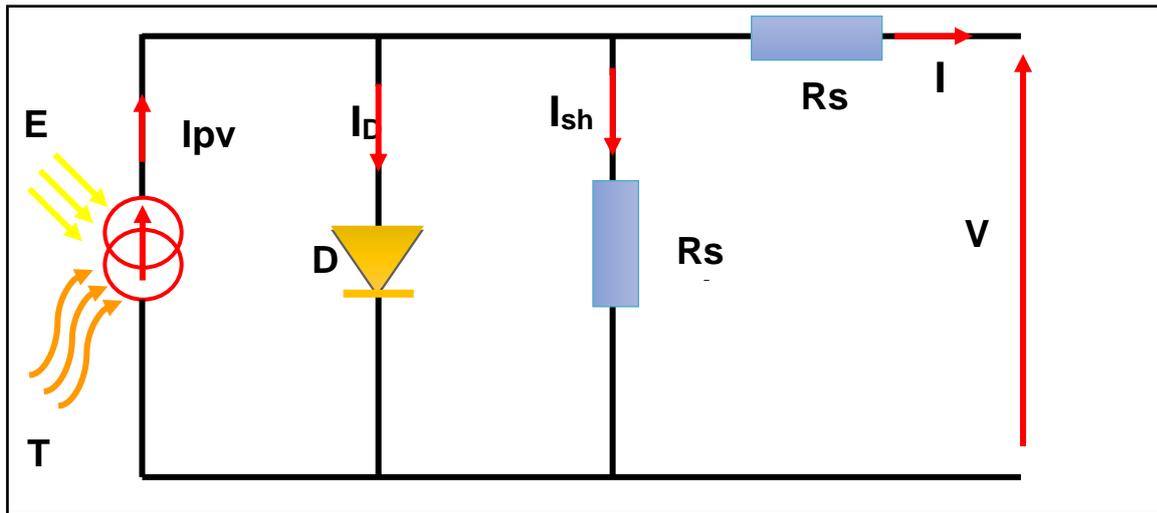


Figure 2.1 : Schéma électrique équivalent de cellule solaire

D'après la loi de nœud de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{2.1}$$

I : courant généré par cellule

I_{ph} : le photon courant.

I_{sh} : le courant circulant dans la

I_d : le courant circulant dans la diode.

Le courant circulant dans la diode est donné par:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left\{ \frac{V_d}{V_t} \right\} - 1 \right] \tag{2.2}$$

A partir de la loi de maille :

$$V = V_d - R_s * I \tag{2.3}$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \tag{2.4}$$

Donc:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{(V+R_s I)}{V_t} \right\} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \tag{2.5}$$

- I : Courant généré par la cellule [A].
- V : Tension à la borne de la cellule [V].
- I_{ph} : photo-courant [A]
- R_s : Résistance série [Ohm].
- R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ohm].
- V_t : tension thermique
- q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C] .
- K : constant de Boltzmann..
- T : température de cellule [k].

$$I_d = I_o \left[\exp \left\{ \frac{q(V+R_s I)}{nKT N_s} \right\} - 1 \right] \tag{2.6}$$

On peut présenter le modèle de cellule solaire par l'équation (2.6) comporte cinq inconnues (I_{ph} , I_0 , V_T , R_s , R_{sh}) qui doivent être identifier pour cela on va appliquée une méthode identifications des paramètres utilise l'algorithme la méthode Nnwoteen raphseen figure (2.2), plus détail dans l'annexe (A).

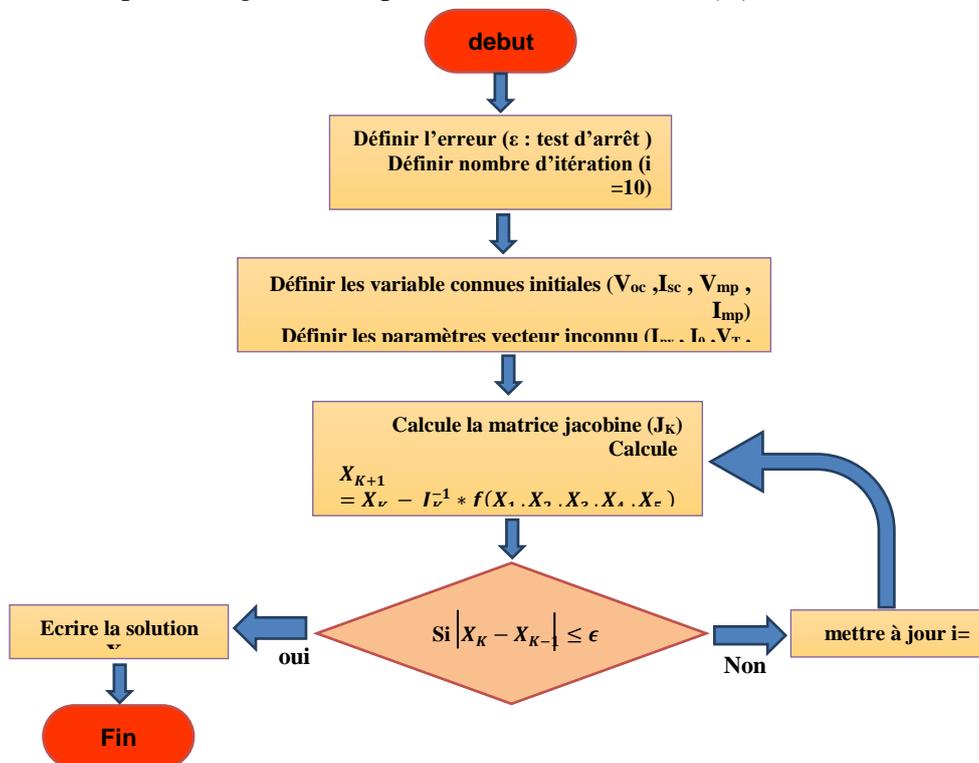


Figure 2.2 :l'organigramme d'identification des paramètres photovoltaïque par la méthode newton raphsen

II.3. Convertisseur statique (DC/DC) :

Un convertisseur à courant continu c'est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques à fonctionnement périodique, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés, dans le cadre d'un système photovoltaïque pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV (source continue) avec différentes charges pour effectuer le transfert de la puissance maximale [10].

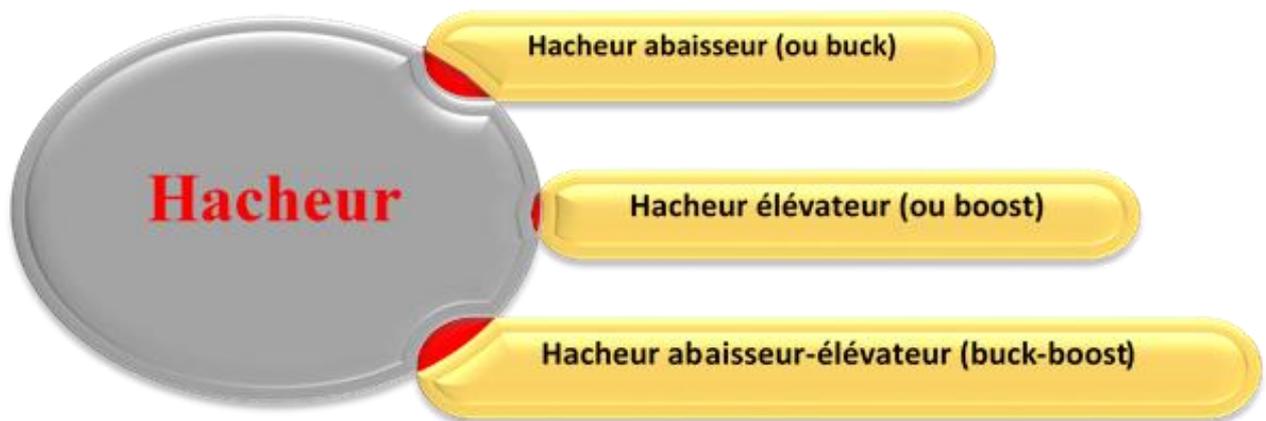


Figure 2.3 : Convertisseur DC/DC

II.3. 1. Hacheur parallèle (Boost) :

Pour une puissance incidente, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini. Ce modèle de hacheur Boost ou Hacheur survolteur, est utilisé pour augmenter la tension de sortie, par rapport à la source. Sa forme la plus simple est présentée comme suit

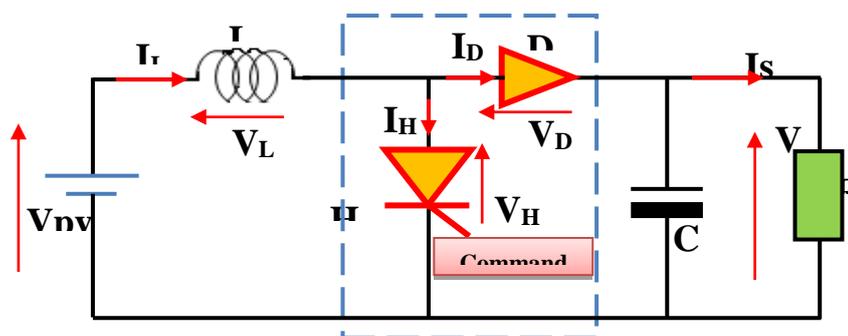


Figure 2.4 : Hacheur survolteur

Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D l'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découplage fixe T_d et de rapport cyclique variable a . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à aT_d et ouvert de aT_d à T_d . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure III.3 donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode [11].

D'après la deuxième loi de Kirchhoff (loi des mailles)

$$V_H = V_s + V_D \quad \text{et} \quad V_{pv} = V_H + V_L \tag{2.6}$$

K est fermé ($0 < t < aT_d$), le circuit du convertisseur devient :

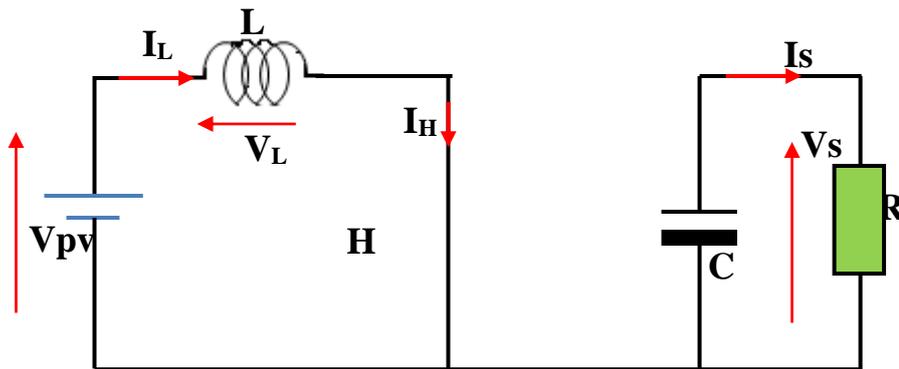


Figure 2.5 : circuit équivalent

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \tag{2.7}$$

$$V_H = 0, \quad I_L = I_H, \quad I_D = 0, \quad V_D = -V_s$$

$$\frac{V_{pv}}{L} = \frac{dI_L}{dt} \Rightarrow \frac{V_{pv}}{L} dt = dI_L \Rightarrow I_L = \frac{V_{pv}}{L} t + I_{min} \tag{2.8}$$

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad (2.9)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert $\alpha T_d < t < T_d$ le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure (3.6) [11] .

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c - V_s \quad (2.10)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c - V_s \quad (2.11)$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (2.12)$$

l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (2.13)$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (2.11) et (2.14), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s ,

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (2.14)$$

II.4. Modalisation pile à combustible PEMFC :

Dans le cœur d'une pile à hydrogène du type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), à membrane solide acide, deux réactions électrochimiques se produisent successivement pour la production d'électricité [12].

- ✓ **à l'anode** : oxydation catalytique, en présence de platine, de l'hydrogène qui se dissocie de ses électrons :

$$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$$
- ✓ **à la cathode** : réduction catalytique, en présence de platine, de l'oxygène qui capture les ions H^+ qui ont traversé la membrane électrolyte et les électrons arrivant du circuit extérieur. La réaction produit de la chaleur et de l'eau :

$$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Q (chaleur)}$$

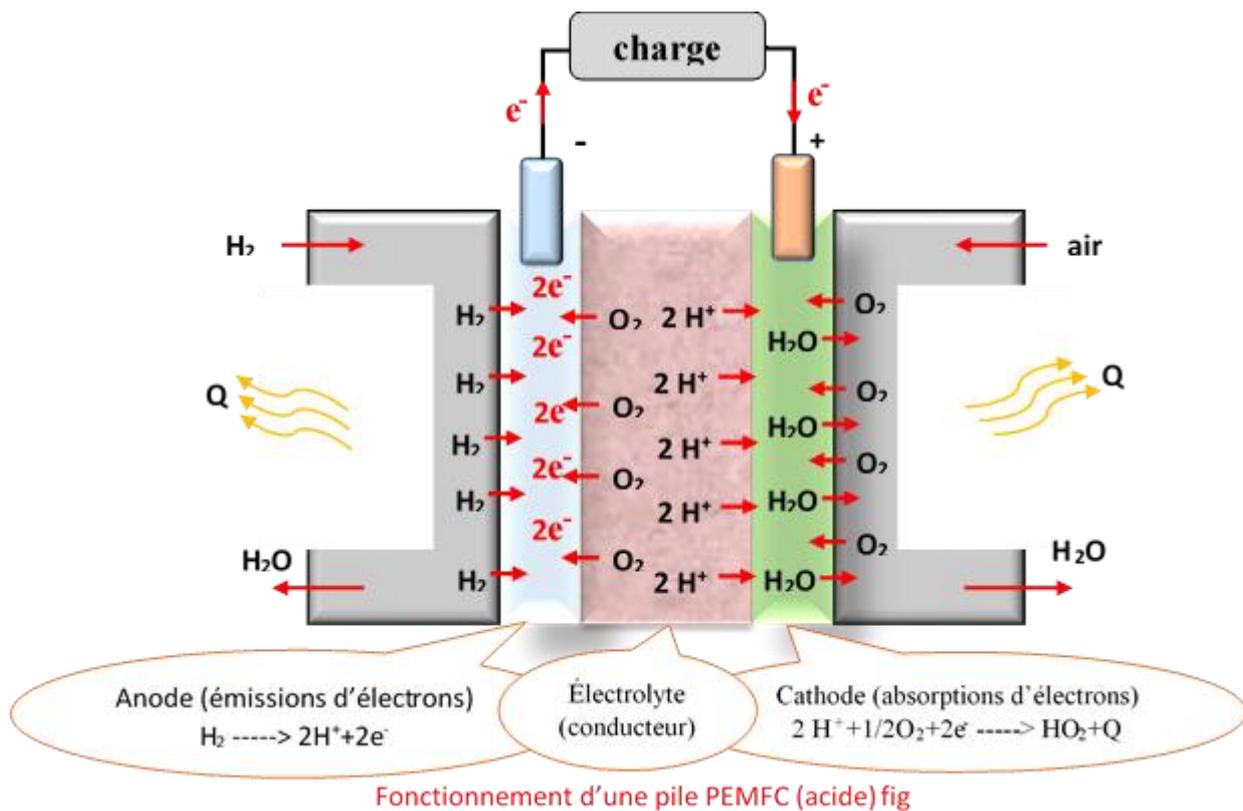


Figure 2.6 : le fonctionnement d'une pile PEMFC

Réaction globale : $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Cette réaction produit une quantité importante d'énergie stockée dans la molécule d'hydrogène, qui est l'énergie de référence pour évaluer le rendement de la pile à combustible.

Aussi la réaction chimique se traduit par une chaleur égale à la différence de réaction thermique des éléments de la formation

Comme toute réaction chimique dans la formation de l'eau dans des conditions naturelles, elle l'accompagne, une quantité d'énergie appelée énergie Gibbs (ΔG), exprimée comme suit:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.15)$$

- ✓ ΔH : l'enthalpie standard de la réaction.
- ✓ ΔS : l'entropie standard de la réaction .
- ✓ T : la température de la réaction.

La tension aux bornes de la cellule est :[16]

la force électromotrice entre l'anode et le cathode $E_0 = E_a - E_c$

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{FV_e} \quad (2.16)$$

- V_e :le nombre d'électrons $V_e=2$
- F : constante de faraday $F=96500C/mol$
- $E_0 = 1.23v$ si l'eau sous forme liquide a une température 298K

$E_0 = 1.18v$ si l'eau sous forme gazeuse a une température 298K Pour une pression de 1 bar et une température de 25 °C, $\Delta G = -237,1 \text{ kJ. mol}^{-1}$. La tension à vide obtenue donner par l'équation (2.17).

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{FV_e} \quad (2.17)$$

pour une pile à combustible sera donc :

$$E_0 = \frac{-237,1 \times 10^{-3}}{2 \times 96500} 1,229 V$$

Indépendamment de l'état de l'eau (liquide ou vapeur), pour une pression de 1 bar et une température de 80 °C,

$$\Delta G = -228,6 \text{ kJ. mol}^{-1}$$

$$E_0 = 1,185 V$$

Le rendement théorique η_{th} de la pile est donné par le rapport de l'enthalpie libre de réaction à l'enthalpie de réaction :

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{FE_0V_e}{\Delta H} \quad (2.18)$$

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H}$$

Rendement théorique du cycle de Carnot défini par l'équation suivante :

$$\eta_{th(carnot)} = \frac{T_u - T_1}{T_u} \quad (2.19)$$

- ✓ T_u et hautes températures du cycle et variable
- ✓ T_1 et basses températures du cycle, égale à 373 K.

Il existe un grand nombre de modèles de piles à combustible, qui ont généralement chacun leurs spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés. La tension de sortie de la cellule est déterminée par la combinaison de l'effet thermodynamique, transport de masse, la cinétique et la résistance ohmique, elle est donnée comme suit :

$$V_{cell} = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (2.20)$$

: Tension d'une cellule. Volt

η_{act} : Polarisation d'activation de l'anode et de la cathode, Volt

$$\eta_{act} = B \ln(CI)$$

η_{ohmic} : Polarisation ohmique de l'anode et de la cathode, Volt

$$\eta_{ohmic} = R^{int} I$$

❖ Potentiel thermodynamique :

La tension réversible dépend en pratique des pressions et de la température de fonctionnement. Il s'agit de la loi de Nernst:

$$E_{Nernst} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad (2.21)$$

E_0 : est la tension standard, calculé à partir de l'enthalpie libre standard définie pour 25°C et à 1 bar et sont respectivement les pressions relatives (bars) des gaz oxygène et hydrogène P_{H_2} , P_{O_2}

F : est la constante de Faraday (96485 C/mol).

R : constante des gaz parfaits. (8,314J/K/mol).

P : Pression en atmosphérique.

T : température de fonctionnement du composant (K)

La pression de l'hydrogène:

La quantité d'hydrogène consommée dans la pile à combustible cette pression est donnée par:

$$(2.22) \frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = K_{H_2} \Rightarrow P_{H_2} = \frac{q_{H_2}}{K_{H_2}}$$

Pression d'oxygène **P_{O2}** :

La quantité de l'oxygène consommée dans la pile à combustible cette pression est donnée par :

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{1 + \tau_{O_2} p} (q_{O_2} - K_r) \quad (2.23)$$

$$(2.24) q_{O_2} = \frac{q_{H_2}}{r_{H-O}}$$

la pression de l'eau est donnée par l'équation suivante :

$$(2.25) P_{H_2O} = \frac{1}{1 + \tau_{H_2O} P} (2K_r)$$

K_r : la constante de modélisation.

$$K_r = \frac{N_0}{4F}$$

$$V_{cell} = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohmic}$$

$$E_{Nernst} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right]$$

$$\eta_{ohmic} = R^{int} I$$

$$\eta_{act} = B \ln(CI)$$

Électrolyseur :

Le modèle utilisé d'électrolyseur est développé par l'équation suivante :

$$(2.26) \eta_{H_2} = \frac{\eta_F \eta_c i_e}{2F}$$

l'efficacité de Faraday qui est le rapport entre le taux réel et théorique de production d'hydrogène en L'électrolyseur. Il s'exprime par :

$$(2.27) \eta_F = 96.5 \exp \left(\frac{0.09}{i_e} - \frac{75.5}{i_e^2} \right)$$

II.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présentés la modélisation de les deux sources d'énergie utilisable dans notre travail, par la suite de chapitre 03 on va modéliser la machine synchrone MSAP.

Modélisation de onduleur et Moteur synchrone à aimant permanent

III.1. Introduction

Le générateur solaire produit une l'énergie électrique continue, tandis que certains appareils électriques nécessitent une énergie alternative monophasée ou triphasée à savoir les moteurs synchrones, pour cette raison on doit utiliser un onduleur de tension appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, robustes et rapides, et, d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI). Dans ce chapitre, on va exposer les modélisations de les deux éléments convertisseurs ((DC-Ac) avec la commande (MLI) et les moteurs synchrones à aimant permanent

III.2. Les onduleurs :

L'onduleur utilise des éléments électroniques semi-conducteurs sous la forme d'un pont (pont de Graetz) qui fonctionne en commutation, comme les transistors et les thyristors qui est contrôlé par un circuit externe à l'aide d'impulsions qui sont ajustées pour que nous obtenions un signale alternative [13]

On peut classer les onduleurs en deux types :

- ❖ onduleur autonome : délivre une tension avec des fréquences fixes ou variables selon les besoins
- ❖ onduleur non autonome : Dépend en commutation naturelle sur le réseau auquel il est connecté

III.2.1. Modélisation et commande de l'onduleur de tension MLI :

L'onduleur triphasé dit onduleur a deux niveaux est représenté par son circuit de puissance, Figure (3.1)

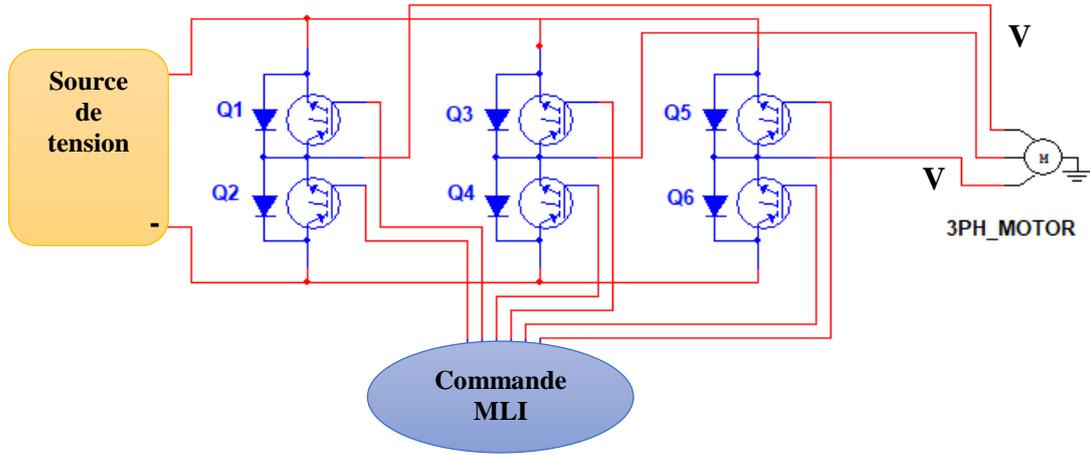


Figure 3.1 : Circuit d'un onduleur triphasé .

Les tensions aux bornes de l'onduleur

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} = V_{co} + V_{ao} \end{cases} \quad (3.1)$$

Les tensions, V_{aN} , V_{bN} , V_{cN} forment un système de tension triphasé équilibré, donc :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} - V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} - V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \rightarrow V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 3V_{on} + V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = 0 \quad (3.3)$$

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (3.4)$$

Donc selon l'équation (2.32) et (2.33) ,on obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Dans une branche d'onduleur, un interrupteur statique (k) peut prendre la valeur 1 ou 0 selon les conditions suivantes :

$$V_{aref} \geq V_p \rightarrow S_a = 1 \quad \text{Sinon} \quad S_a = 0$$

$$V_{bref} \geq V_p \rightarrow S_b = 1 \quad \text{Sinon} \quad S_b = 0$$

$$V_{cref} \geq V_p \rightarrow S_c = 1 \quad \text{Sinon} \quad S_c = 0$$

Avec :

$V_{aref}, V_{bref}, V_{cref}$ les amplitudes de référence

V_p : amplitude de porteuse.

les branches peuvent être exprimées en fonction des switches par

$$V_{QO} = S_{Qn} \left(\frac{E}{2} \right) \quad \text{avec} \quad n = (1,2,3) \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

III.3. les moteurs synchrones à aimant permanent :

Une machine synchrone est une machine tournante qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique tournante dans le cas d'un moteur, ou inversement. Elle convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique appelée alternateur [14].



Figure 3.2 : machine synchrone

Stator :

La machine synchrone est dérivée de la machine à courant continu, et c'est l'induction à courant continu pour produire un champ magnétique dans le rotor au moyen de balais de contact et de bagues collectrices. Le champ magnétique peut être produit par un aimant permanent (moteur synchrone à aimant permanent).

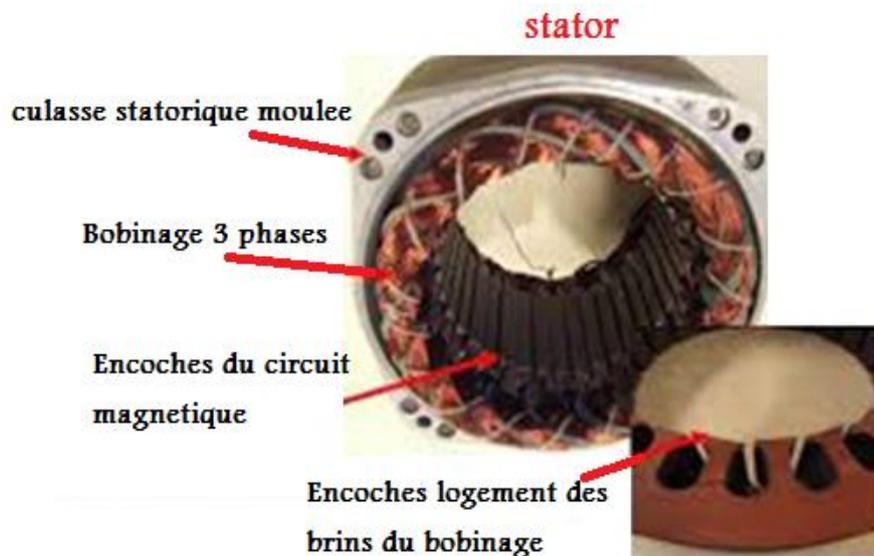


Figure 3.3: Stator de machine synchrone

Rotor :

C'est tout simplement un aimant permanent qui produit un champ magnétique et n'a aucun contact avec l'extérieur, qui est fermé sur lui-même



Figure 3.4 : Rotor de machine synchrone

III.3.1. Principe de fonctionnement:

Lorsque le moteur synchrone est alimenté par une alimentation triphasée déphasé de 120° , un champ magnétique tournant est produit dans les enroulements du stator à une vitesse synchrone, ce qui entraîne la rotation du rotor (aimant permanent) en raison de la répulsion et de l'attraction à la même vitesse que le champ magnétique tournant du stator, d'où le nom de machine synchrone.

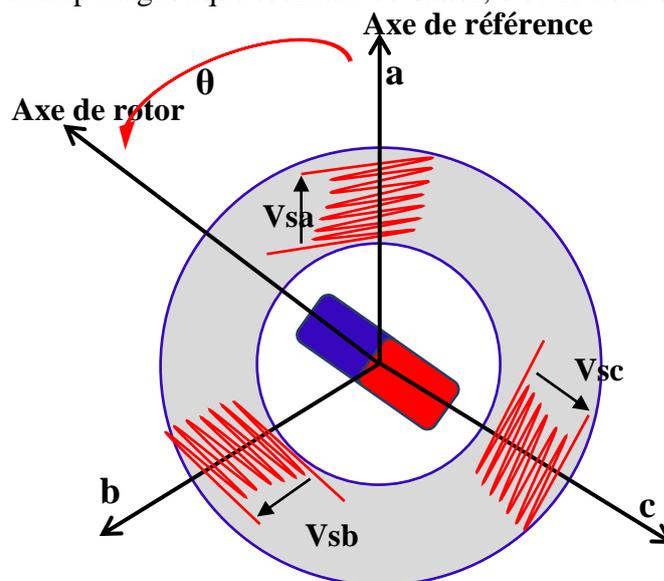


Figure 3.5 : circuit équivalent d'une moteur à aimant permanent

III.3.2. Modélisation de machine synchrone à aimant permanent :

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses à savoir que

- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer, est supposée sinusoïdale.
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.
- L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistance ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux [15] [16].

La représentation schématique de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique est donnée sur la figure (3.5).

Equation électrique

Les équations électriques dans un repère fixe lié au stator s'expriment de la façon suivante:

$$[V_{abc}] = [R] + [I_{abc}] + \frac{d[\Psi_{abc}]}{dt} \quad (3.8)$$

$$[\Psi_{abc}] = [L_s] + [I_{abc}] + [\Psi_{eabc}]$$

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad [I_{abc}] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad [\Psi_{abc}] = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

V_{abc} , I_{abc} , Ψ_{abc} : Représentent respectivement les tensions statorique, les courants statorique et les flux totaux produit par les courants statorique. pour simplifier le système d'équations on applique un changement de repère, pour cette raison on doit appliquer la transformation de park .

III.3.2.1. Transformation de Park:

C'est une transformation du repère triphasé fixe (a,b,c) par rapport au stator a un repère biphasé (d,q) Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor , les deux axe (d,q) l'axe direct (d) et l'axe de quadrature arrière (q), forme un angle θ (appelé l'angle transformation de Park , La matrice de passage direct de Park donner par [17]

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

La transformé de park inverse est :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1} [X_{abc}] \quad (3.11)$$

Après développement et simplification on trouve :

❖ Equation Electrique :

$$\begin{aligned} [V_d] &= R.I_d + \frac{d[\Psi_d]}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Psi_q \\ [V_q] &= R.I_q + \frac{d[\Psi_q]}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \Psi_d \\ [V_0] &= R.I_0 + \frac{d[\Psi_0]}{dt} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dans le cas où le système est couplé en étoile équilibrée la MSAP est étudiée dans le repère (dq) lié au rotor, sa représentation est comme suit :

$$\begin{aligned} [V_d] &= R.I_d + \frac{d[\Psi_d]}{dt} - \omega\Psi_q \\ [V_q] &= R.I_q + \frac{d[\Psi_q]}{dt} + \omega\Psi_d \end{aligned} \quad (3.13)$$

❖ Equation magnétiques :

Les équations des flux statoriques écrivent dans le repère de Park comme suit :

$$\begin{aligned} [\Psi_d] &= L_d.I_d + [\Psi_e] \\ [\Psi_q] &= L_q.I_q \end{aligned} \quad (3.14)$$

Donc le modèle différentiel de la MSAP est :

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} [V_d - R.I_d + \omega L_q I_q] \\ \frac{dI_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} [V_q - R.I_q + \omega(L_d I_d + \Psi_e)] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Expression du couple électromagnétique est comme suit :

$$C_e = \frac{3}{2}.p. [(L_d - L_q).I_d.I_q + \Psi_e.I_q] \quad (3.16)$$

Equation mécanique :

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est donnée par la relation suivante [18].

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{j} [C_e - C_r - f_r.\Omega] \quad (3.17)$$

III.3. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons commencé par la modélisation de la partie d'alimentation (onduleur de tension a trois niveaux) et sa commande, ensuite on a abordé la modélisation de la MSAP en se basant sur les équations électriques et mécaniques qui régissent le comportement de la machine. Dans le chapitre suivant on va simuler la chaîne hybride globale.

La figure (4.2) représente un détail de structure globale d'un Système hybride (PV- pile à combustible). Pour commencer notre étude, on se doit tout d'abord entamer chaque ces éléments de base sont :

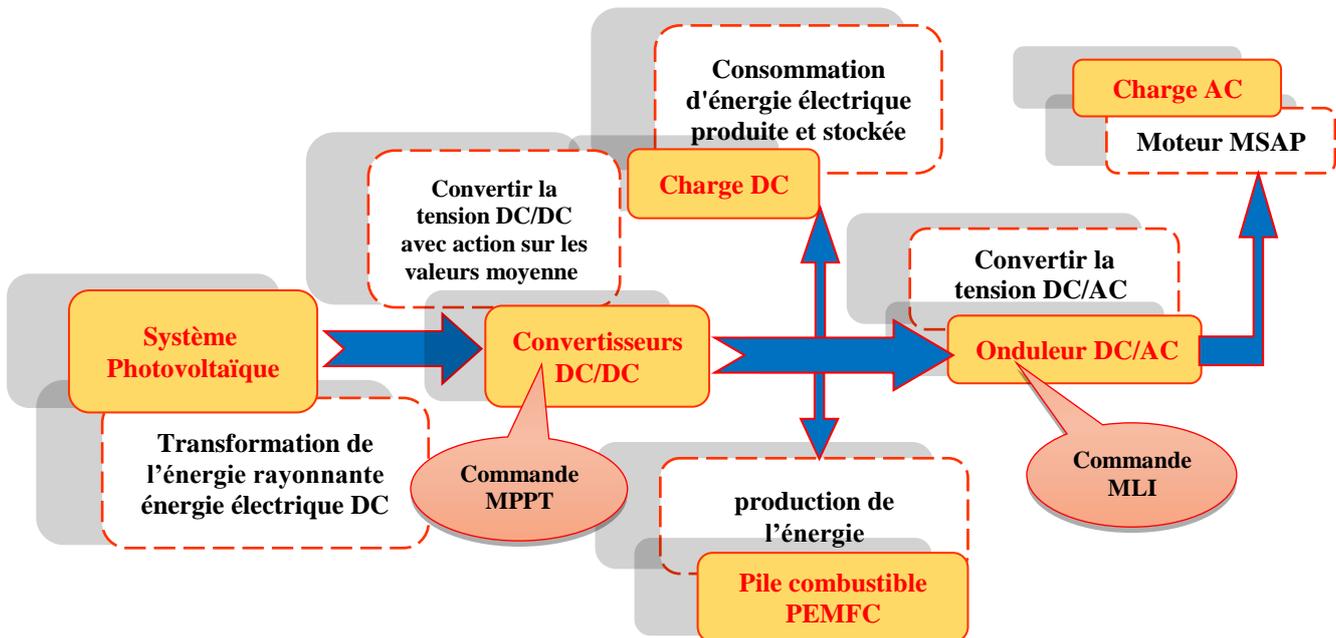


Figure 4.2 : la structure globale de la chaîne étudiée.

IV.2 Générateur Photovoltaïque:

Le générateur photovoltaïque choisi (**Bp MSX 120 W**), constitué (72) cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et une chaîne en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la caractéristique courant tension et la puissance. Sur la base du modèle mathématique de la cellule solaire développé dans chapitre 2, on obtient le bloc schématique de SIMULINK montré sur La figure (4.3).

Pour vérifier la fiabilité de notre source photovoltaïque on va traiter l'influence de l'irradiation figure (4.4) et l'influence de température figure (4.5) sur la caractéristique courant tension. Selon L'évolution de la caractéristique $I(V)$ en fonction de la température on peut constater que le courant augmente lorsque la température s'élève et engendre une décroissance pour la tension de circuit ouvert. On peut remarquer aussi le même comportement pour caractéristique $P(V)$. L'augmentation de l'ensoleillement, peut engendrer l'augmentation de l'intensité du courant et par la suite produire une puissance électrique plus importante.

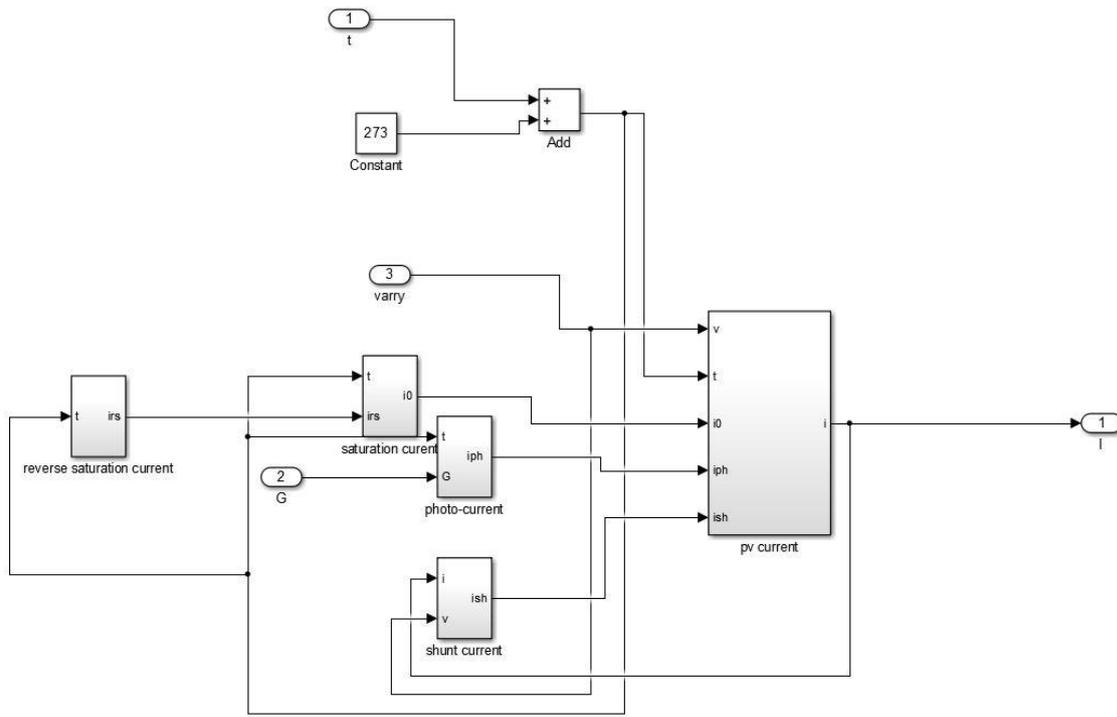


Figure 4.3 :Schéma Similink de générateur photovoltaïque.

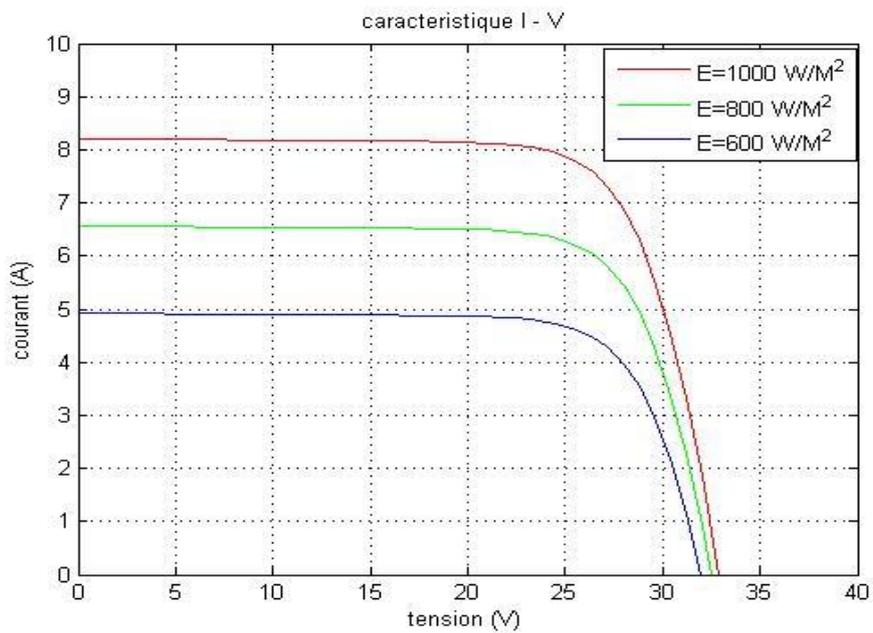


Figure 4.4 : Caractéristique I(V) d'un module pour éclairement solaires variable.

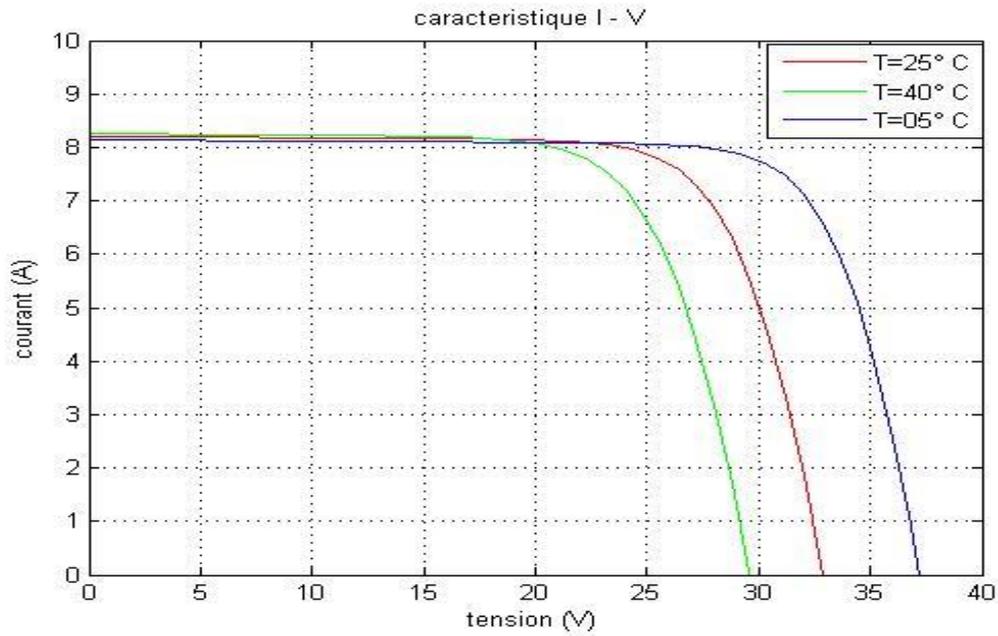


Figure 4.5 : Caractéristique $I(V)$ d'un module pour température variable.

IV.3. Hacheur élévateur commandé:

La déstabilisation des performance de sortie de GPV due à La perturbations des conditions climatique (G,T) nous pousser de prendre comme une solution un convertisseur (Boost) pour élever et stabiliser la tension de sortie. Le schéma de simulation du hacheur dans l'environnement Matlab/Simulink est illustré dans la figure ci-dessous.

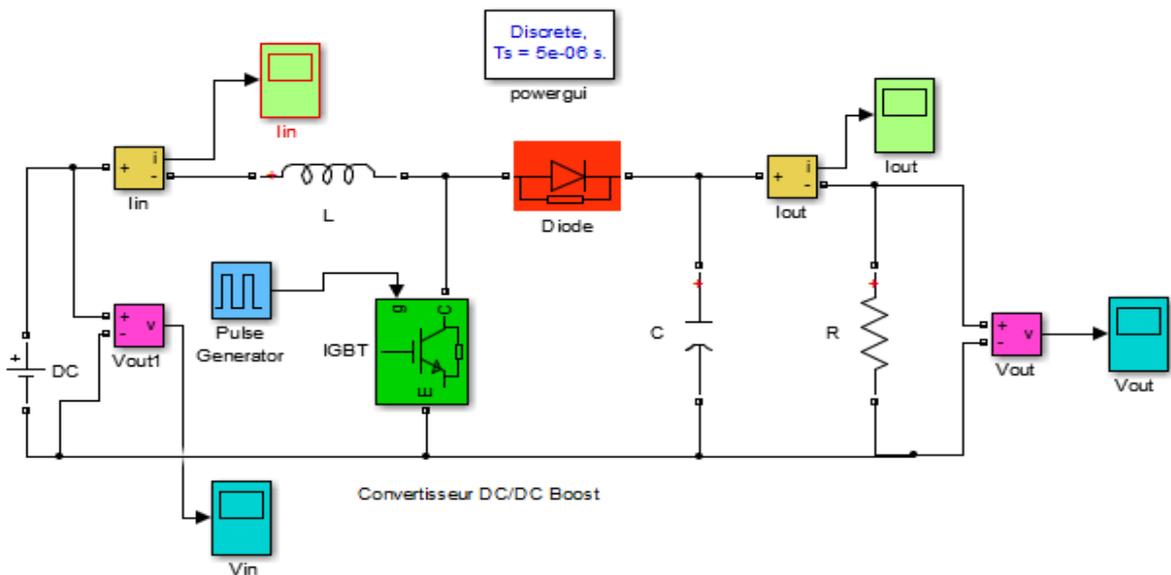


Figure 4.6 : Schéma Simulink de convertisseur (DC-DC).

Pour un éclairement de 1000 W/m^2 , une, la tension à la sortie de hacheur autour de la valeur de 130W (figure 4.7).

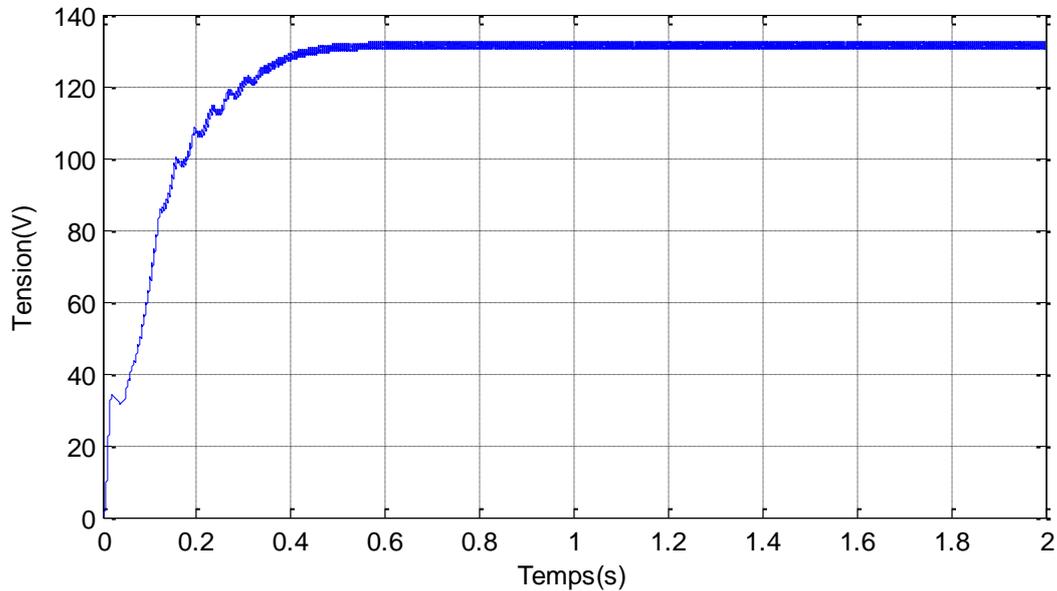


Figure 4.7 : Tension de sortie de hacheur.

IV.3. La pile combustible PEMFC :

La deuxième source proposé de notre travail est une pile de type PEMC le fonctionnement de ce diapositive besoin une source de hydrogène d'une réaction chimique au sein de l'électrolyseur Le schéma de simulation du la pile PEMFC dans l'environnement Matlab/Simulink est illustré dans la figure ci-dessous

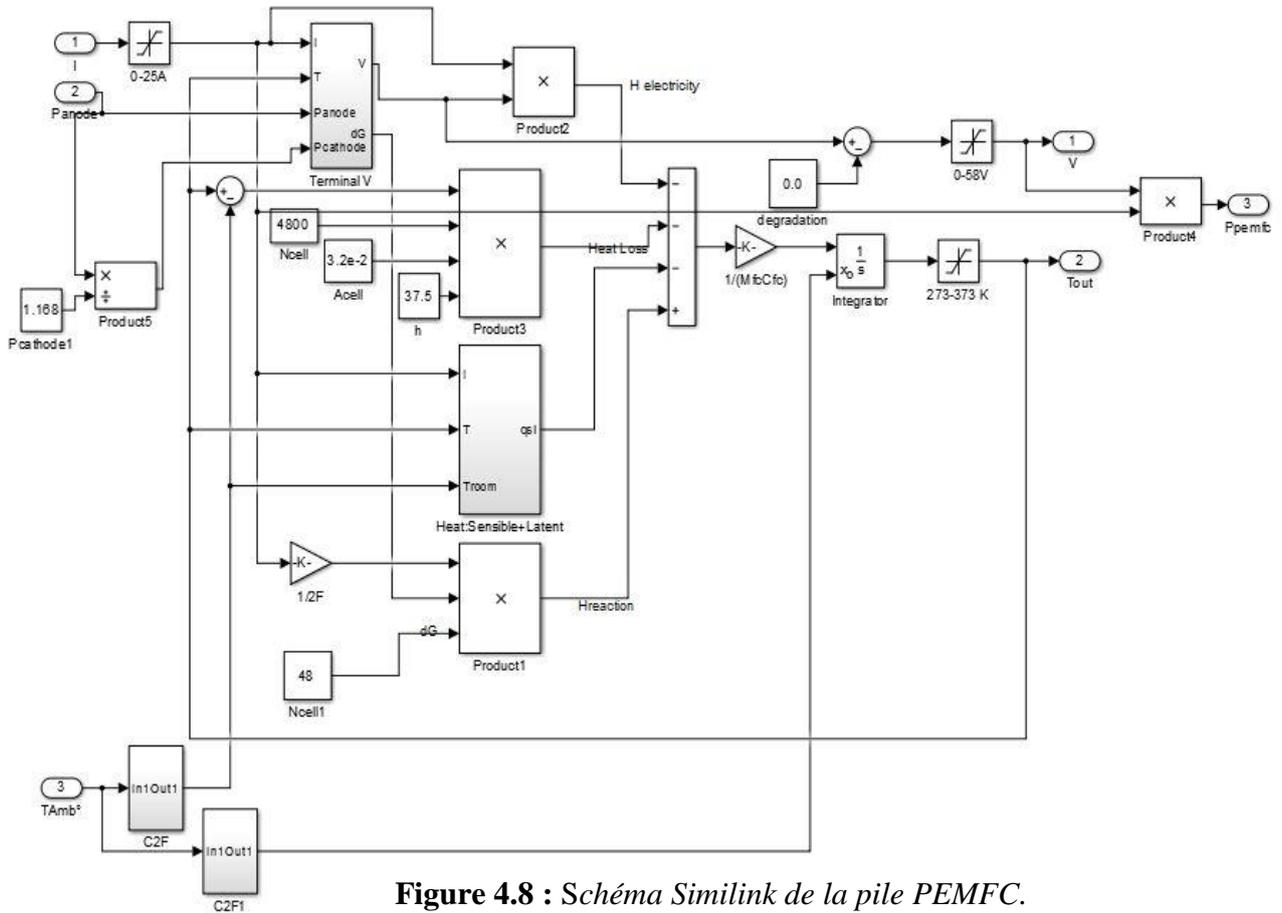


Figure 4.8 : Schéma Simulink de la pile PEMFC.

IV.1.4. convertisseur (DC-AC) :

La conjection des éléments de source (GPV,Pile PeMFC) et la charge faite par un convertisseur (DC-AC) qui est un onduleur de tris phase illustrer commander par une technique (MLI) figure (4.17) générée par une porteuse sous forme de dent de scie, La technique MLI appelée modulation large impulsion (Pulse With Modulation PWM), elle est utilisée pour générer un signal qui contrôle les interrupteurs, , la MLI délivre un signal de commande en créneaux, il est générer par l’intersection de deux signaux :

- signal de référence, généralement sinusoïdale qui est de basse fréquence.
- signal de porteuse qui est de haute fréquence de forme généralement triangulaire.

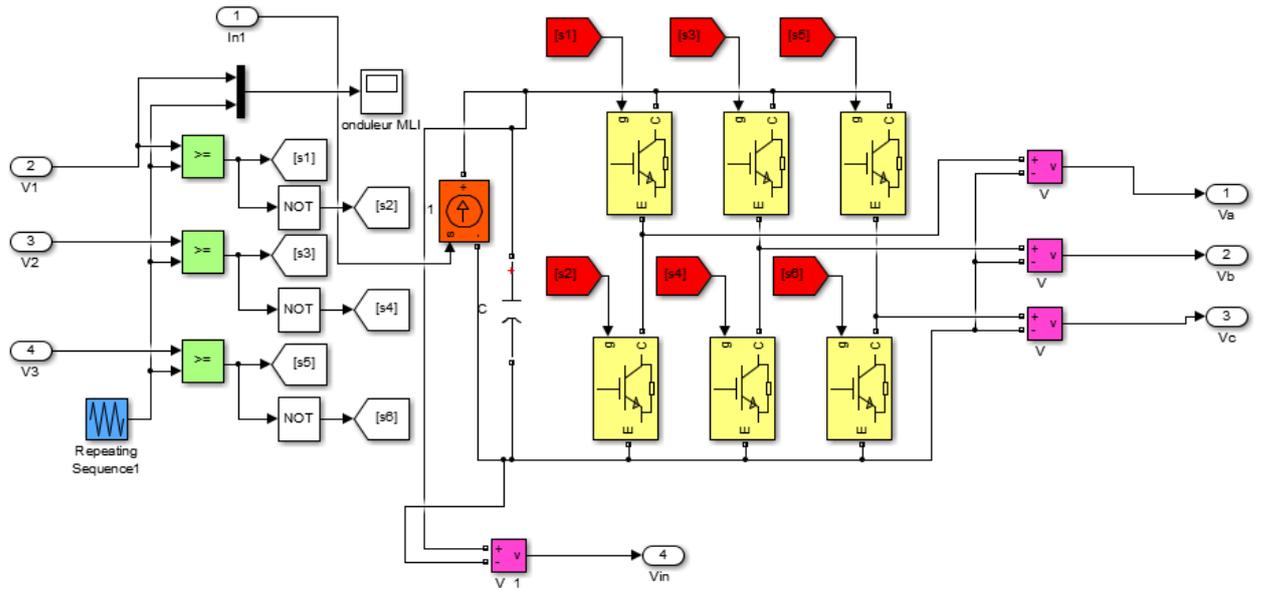


Figure 4.9 : Schéma Simulink de convertisseur (DC-AC).

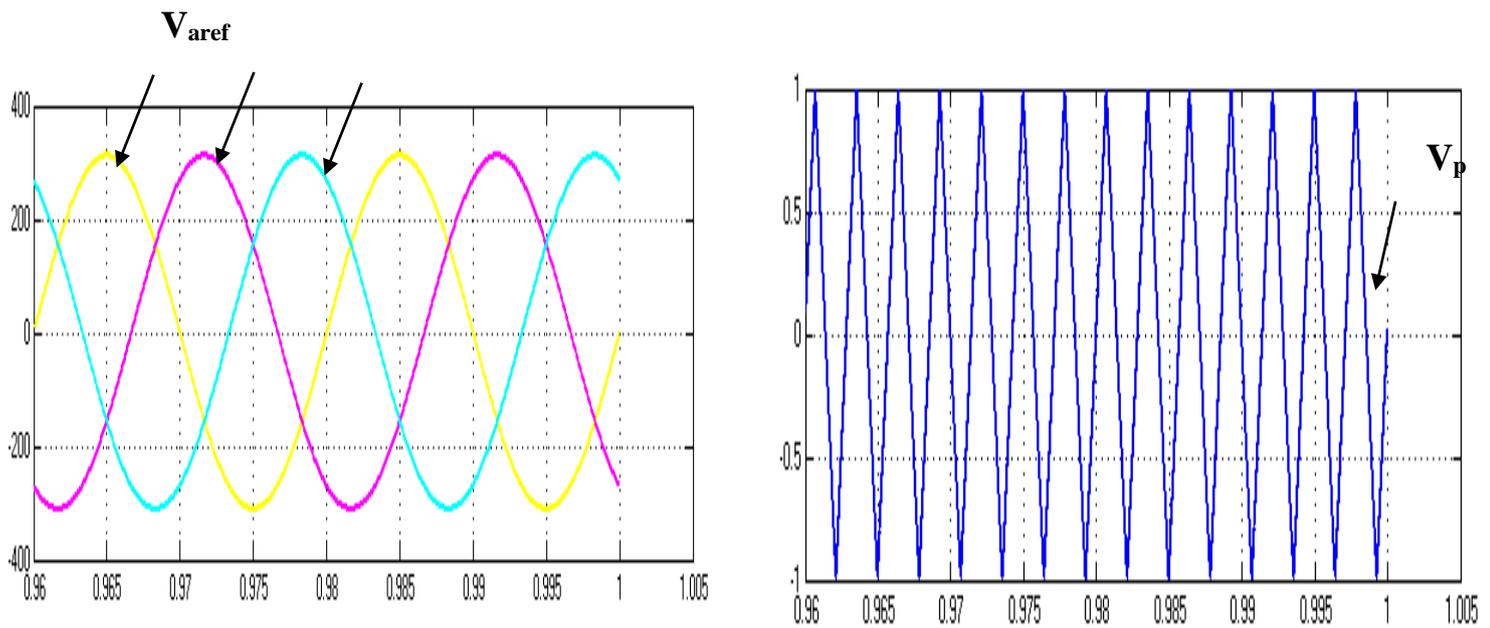


Figure 4.10 : signal de référence et signal de porteuse.

IV.5. Machine synchrone à aimant permanent (MSAP) :

Dans notre travail on concéder que la charge c'est une machine synchrone à aimant permanent les caractéristique de cette machine est illustrer dans le tableau (4.1). A partir du modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent développé dans chapitre 3, on peut construire le bloc schématique de SIMULINK sur La figure (4.3).

Les Caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent sont représentée sur le tableaux suivant

fréquence	f	50	HZ
Résistance d'une phase statorique	R_s	1,4	Ω
Inductance directe	L_d	0,0066	H
Inductances en quadrature	L_q	0,0058	H
le moment d'inertie	J	0,02	Kg/m^2
Nombre de pôles	P	2
flux des aimants	ϕ	0,1564	Wb
Coefficient de frottement visqueux	f_v	0,0003881	$\text{Nm} / (\text{rad} / \text{s})$

Tableaux 4.1 : les paramètres de la machine MSAP

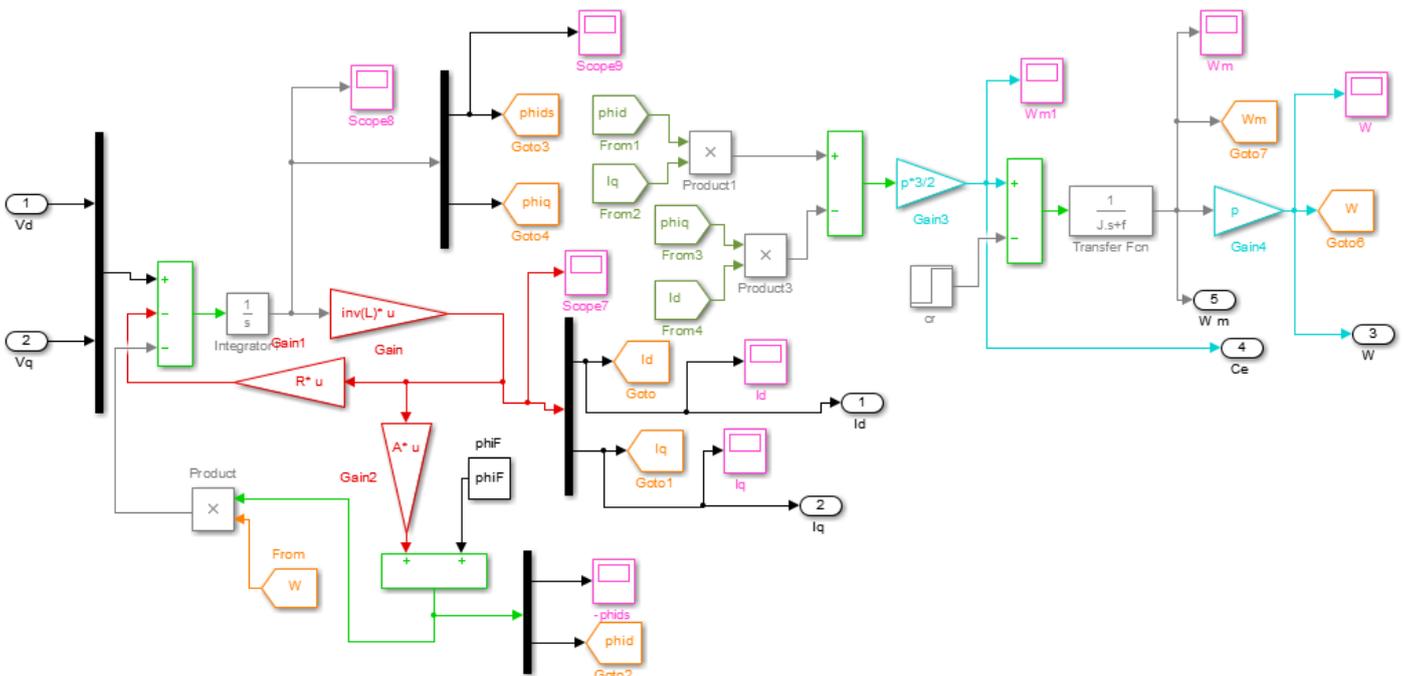


Figure 4.11 : Schéma de la machine MSAP

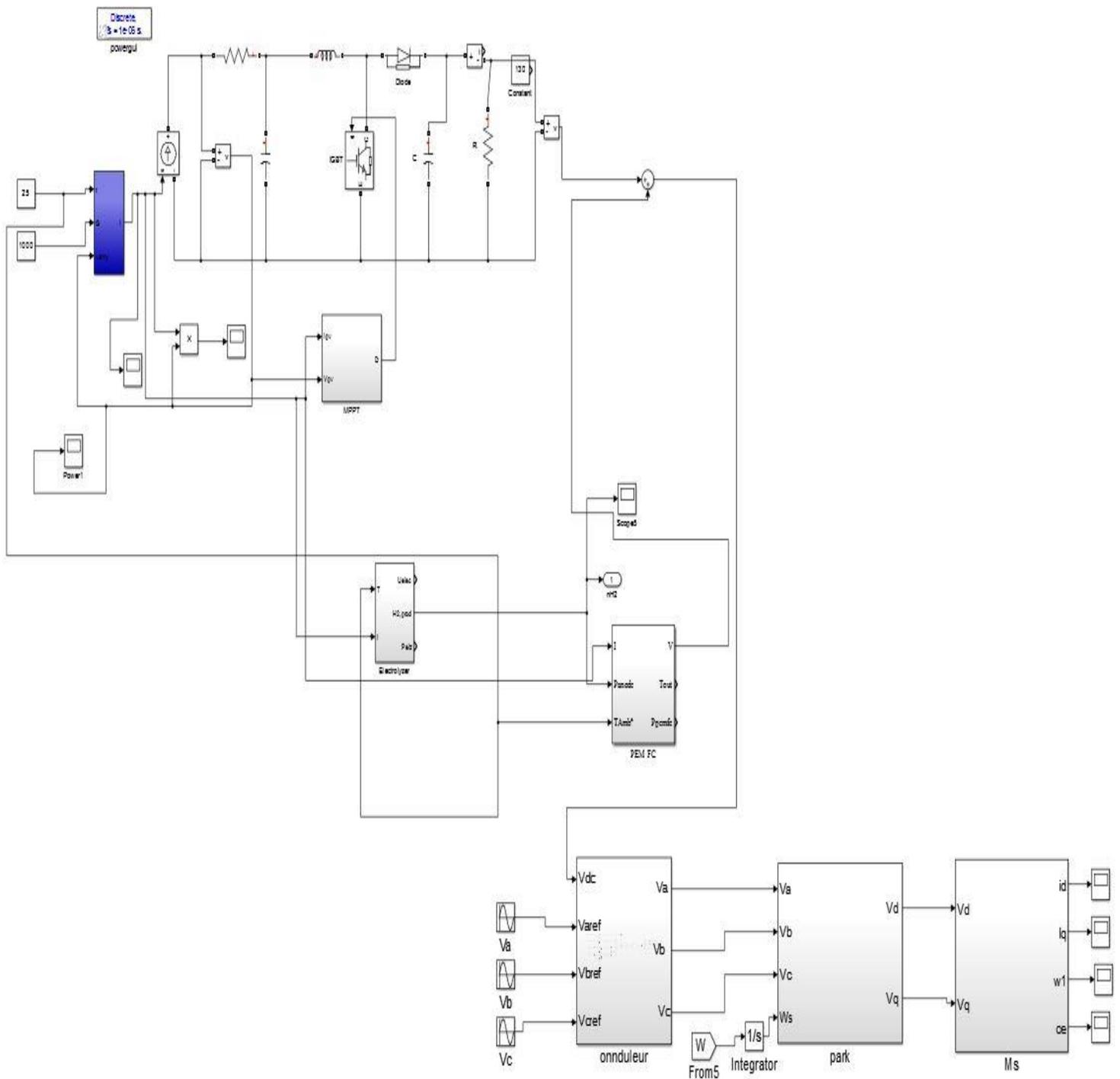


Figure 4.12 : Simulink sous Matlab la chaine hybride globale

A fin de représenté les éléments de base de la construction globale du système hybride constitué deux source énergie pour alimenté une machine synchrone à aiment permanant a vide avec l'intermédiaire de deux convertisseur avec leur rôle, on peut regrouper tous les éléments, La figure (4.12) montre la chine globale dans l'environnement Matlab/Simulink

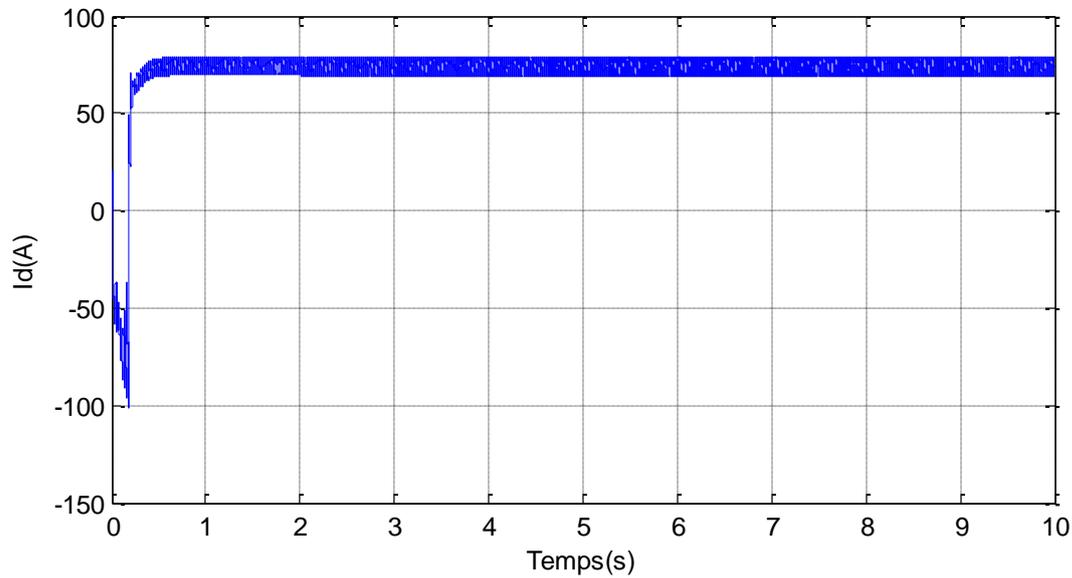


Figure 4.13 : *le courant I_d de MSAP*

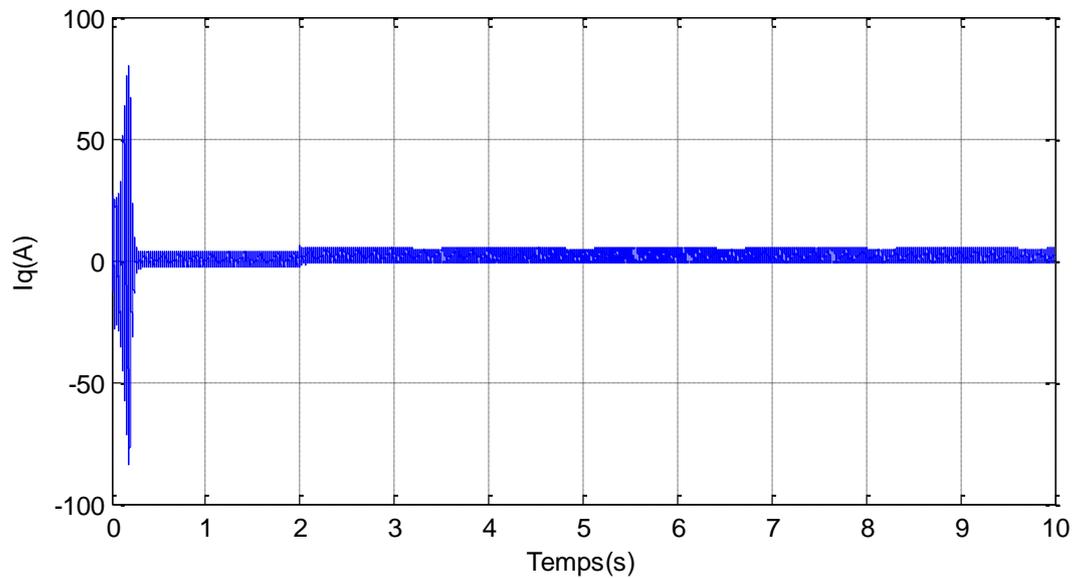


Figure 4.14: *le courant I_q de MSAP*

Les résultats de simulation illustrés par Les figures (4.13) , (4.14) (4.15), (4.16) concernent le moteur synchrone (MSAP) alimenté par un GPV fonctionnant en régime statique, c.à.d. il y a pas une variation de l'éclairage, avec la commande MPPT.

Le courants direct (I_d) à l'instant début de démarrage $t=0.18s$ assez important puis atteint une valeur de $68A$ en régime permanent Figures (4.12). La composantes de courant quadrature (I_q) présente un pic très important au démarrage ($68A$) puis s'annule (pas de couple de charge).

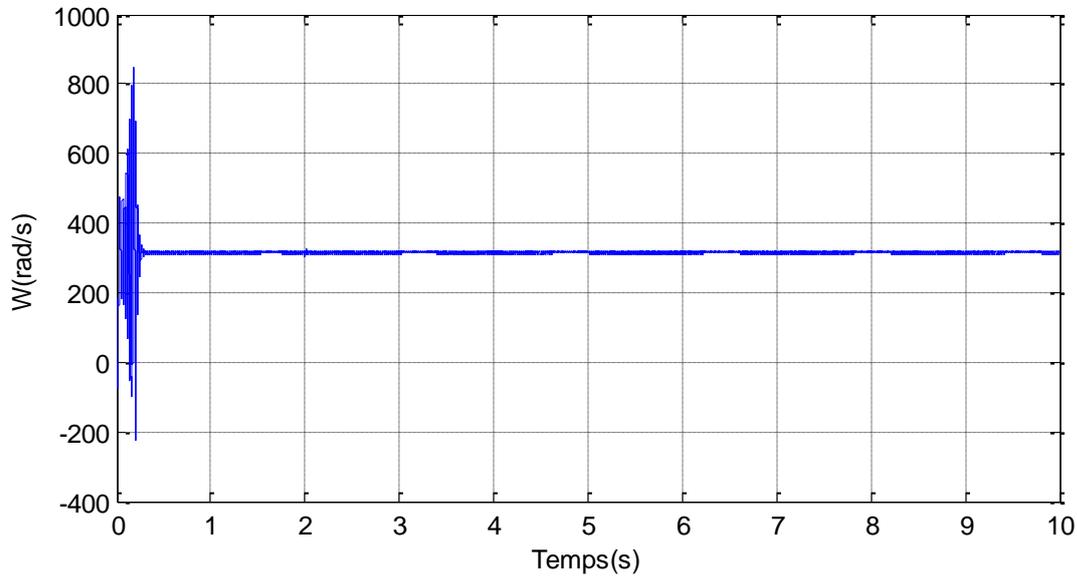


Figure 4.15 : la vitesse w de MSAP

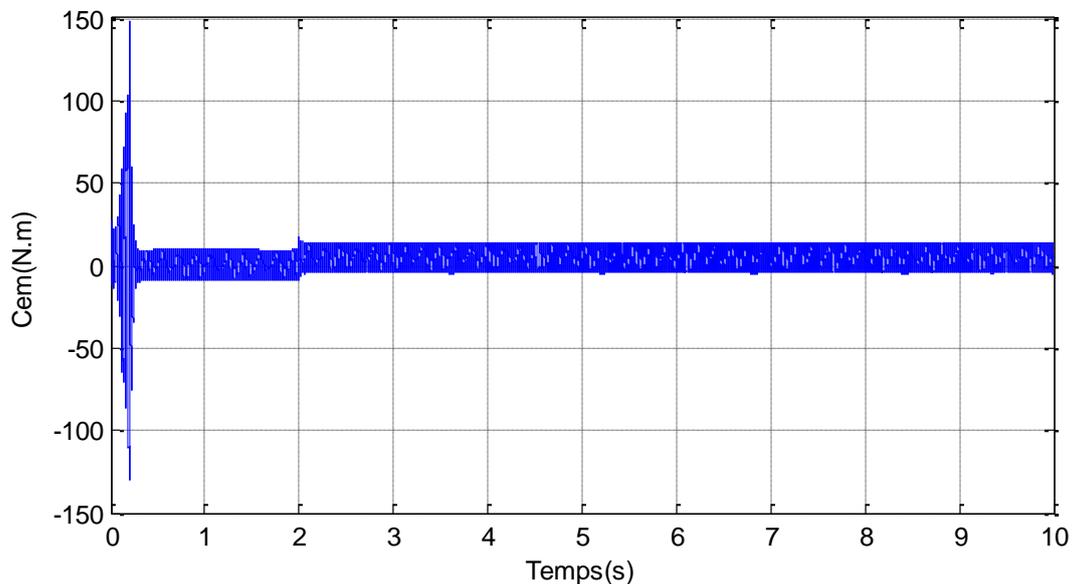


Figure 4.16 : le couple électromagnétique C_e de MSAP

On peut constater aussi que l'allure de vitesse présente des oscillations pendant le régime transitoire Figure (4.13), sous l'effet de contre réaction des masses tournantes qui tendent à ramener le moteur au repos fait l'apparition des valeurs négatives très faible et de courte durée $0.17s$, puis cette vitesse atteint sa valeur nominale de 314 rad/s pour le couple nul (régime permanent).

Le même comportement pour le couple électromagnétique (C_e) figure (4.14) à l'instant de démarrage on remarque des battements importants dans un intervalle de temps court avec un pic de 150 N.m puis s'annule.

IV.6. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié un système hybride composé de générateur photovoltaïque-hacheur- pile PEMFC- onduleur-charge (machine synchrone (MSAP) afin de définir les caractéristiques de GPV notamment vis à-vis la variation des conditions climatiques (l'éclairement et La température). Puis on a présentées les différents résultats de sortie de la machine synchrone à aimant permanent.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude d'une chaîne hybride globale. La configuration étudiée est une machine synchrone à aimant permanent alimenté par deux sources photovoltaïque et une tension de pile à combustible.

L'objectif de notre travail était de modéliser chaque composant de la chaîne globale et faire une simulation à l'aide MATLAB/SIMILNK

L résultats obtenus dans cette étude, peuvent être synthétisés comme suit :

Les moyens de production tels que la PAC, le photovoltaïque, etc. présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le stockage d'énergie via l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau associé aux sources d'énergie renouvelables répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique.

Les machines synchrones à aimant permanent apportent une solution intéressante pour la réalisation des systèmes de pompage photovoltaïques. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines asynchrones ou à courant continu, à savoir une durée de vie élevée, un rendement élevé.

Comme perspective Nous pouvons proposer un .

Références bibliographiques

[1] **S. Krour**, " Optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques", Mémoire de magistère instrumentation, Université de Sétif, 2014.

[2] **ANA MARIA BIANCHI;YVES FAUTRELLE;JAQUELINES ETAY**, "transferts thermique agence universitaire de la francophonie"

[3] **M.N. Mchalih et CH. Hamada**. " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau " Mémoire de Master Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.

[4] **CH. ABDELHAFID**. " conception et réalisation d'un chargeur de batterie plomb-acide dans un micro- réseau " thèse, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2019.

[5] **S.NUGUES**. " mesure de l'état de charge d'une batterie par oculomotrice corrigée par impédance métrique ". Thèse de doctorat, 1996.

[6] **T. AZIB**, "A contribution à l'étude d'électro-générateur à pile à combustible " thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-SUD XI Faculté des Sciences d'Orsay, 2010.

- [7] **M. CECILE PERA.** "composants électrochimique « électrolyseur, pile à combustible, supercondansateur, accumulateur, ouvrage ". Ouvrage, 2013.
- [8] **A. Méroin.** " étude comparative entre différents modèles électriques photovoltaïque". Thèse de Magister, 2012.
- [9] **A.Borni.** " Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire ". Thèse de Magister Université de Constantine ,2009.
- [10] **T.Tariq H. Nouh.** " Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque ". Master Académique, université de M'SILA ,2019.
- [11] **G. Noureddine,** "Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque", université de Oum El Bouaghi 2017.
- [12] **C. Hamid,** "Gestion Intelligente d'un système à pile à combustible" Master Académique, université SAAD Dahlab Blida, 2016.
- [13] **E. K. Lakhal, M. Hasnaoui, E. Bilgen and P. Vasseur,** Natural Convection in Inclined Rectangular Enclosures with Perfectly Conducting Fins Attached on the Heated Wall, Heat MassTransfer, 32, 365–373 (1997).
- [14] **X. Shi and J. M. Khodadadi,** Laminar Natural Convection Heat Transfer in a Differentially Heated Square Cavity Due to a Thin Fin on the Hot Wall., J. Heat Transfer, 624-125 (2003).
- [15] **G. Grellet, G.Clerc** «actionneurs électriques principe/commande/modèle», Editions Eyrolles 1997.

[16] **J. P .Caron et J. P. Hautier** « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Editions Technip Paris 1995.

[17] **Z. Rouabah** «Modélisation et commande vectorielle d'une machine à induction avec prise en compte et minimisation des pertes »Thèse de magister, Université de Batna 2001.

[18] **A. Saadi** «Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », Thèse de magister, Université de Biskra 2001.

Annexes

la méthode Newton-Raphson c'est une méthode permet d'approches par itération la valeur X, ou moyenne de la relation,

$$f(X_{n+1}) = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}$$

$$(X_{n+1}) = X_n - J_n^{-1} f(X_n)$$

Le principe de la méthode et de trouves la valeur de X tell que $f(X) = 0$

X_n et la solution si $|X_n - X_{n-1}| \leq \epsilon$ avec ϵ : l'errures d'approximation

$$X = \begin{bmatrix} I_{pv} \\ I_0 \\ V_T \\ R_S \\ R_{Sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix}$$

$$X_{K+1} = X_K - J_K^{-1} * f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$$

$$F \left\{ \begin{array}{l} f_1 = I_{sc} - X_1 + X_2 \left(\exp \left(\frac{(X_4 \cdot I_{sc})}{X_3} \right) - 1 \right) + \frac{X_4 \cdot I_{sc}}{X_5} \dots \dots \dots (1) \\ f_2 = -X_1 + X_2 \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{X_3} \right) - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{X_5} \dots \dots \dots (2) \\ f_3 = I_{mp} - X_1 + X_2 \left(\exp \left(\frac{(V_{mp} + X_4 \cdot I_{mp})}{X_3} \right) - 1 \right) + \frac{V_{mp} + X_4 \cdot I_{mp}}{X_5} \dots \dots (3) \\ f_4 = I_{mp} - (V_{mp} + X_4 \cdot I_{mp}) \left[\frac{X_2}{X_3} \left(\exp \left(\frac{(V_{mp} + X_4 \cdot I_{mp})}{X_3} \right) - \frac{1}{X_5} \right) \dots \dots (4) \right. \\ \left. f_5 = \frac{X_4}{X_5} - \frac{X_2}{X_3} \left(\exp \left(\frac{(X_4 \cdot I_{sc})}{X_3} \right) \right) - (X_5 - X_4) \dots \dots \dots (5) \right. \end{array} \right.$$

La matrice jackopienne

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1}{\partial X_2} & \frac{\partial f_1}{\partial X_3} & \frac{\partial f_1}{\partial X_4} & \frac{\partial f_1}{\partial X_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial X_1} & \frac{\partial f_2}{\partial X_2} & \frac{\partial f_2}{\partial X_3} & \frac{\partial f_2}{\partial X_4} & \frac{\partial f_2}{\partial X_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial X_1} & \frac{\partial f_3}{\partial X_2} & \frac{\partial f_3}{\partial X_3} & \frac{\partial f_3}{\partial X_4} & \frac{\partial f_3}{\partial X_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial X_1} & \frac{\partial f_4}{\partial X_2} & \frac{\partial f_4}{\partial X_3} & \frac{\partial f_4}{\partial X_4} & \frac{\partial f_4}{\partial X_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial X_1} & \frac{\partial f_5}{\partial X_2} & \frac{\partial f_5}{\partial X_3} & \frac{\partial f_5}{\partial X_4} & \frac{\partial f_5}{\partial X_5} \end{bmatrix}$$

```
clearall ;
```

```
clc
```

```
% Les paramètres de vecteur initiale
```

```
x=[3.8722;1.3*10^-8;1.1713;0.6634;589.834]
```

```
%Caractéristique électrique Bp MSX120
```

```
Vmp=33.7;
```

```
Imp=3.56;
```

```
Isc=3.87;
```

```
Voc=42.1;
```

```
for k=1:5
```

```
F=[Isc-x(1)+x(2)*(exp((x(4)*Isc)/x(3))-1)+(x(4)*Isc)/x(5);-x(1)+x(2)*(exp(Voc/x(3))-1)+(Voc/x(5));Imp-x(1)+x(2)*(exp((Vmp+x(4)*Imp)/x(3))-1)+(Vmp+x(4)*Imp)/x(5);Imp-(Vmp+x(4)*Imp)*((x(4)/x(3))*exp((Vmp+x(4)*Imp)/x(3)))-1/x(3);(x(4)/x(5))-(x(2)/x(3))*(exp((x(4)*Isc)/x(3)))-(x(5)-x(4))];
```

```
% La Matrice Jacobienne:
```

```
df1_dx1=-1;
```

```
df1_dx2=exp((387*x(4))/(100*x(3)))-1;
```

```
df1_dx3=-(387*x(2)*x(4)*exp((387*x(4))/(100*x(3)))/(100*x(4)^2);
```

```
df1_dx4=387/(100*x(5))+387*x(2)*exp((387*x(4))/(100*x(3)))/(100*x(3));
```

```
df1_dx5=-(387*x(5))/(100*x(5)^2);
```

```
df2_dx1=-1;
```

```
df2_dx2=exp(421/(10*x(3)))-1;
```

```
df2_dx3=-(421*x(2)*exp(421/(10*x(3)))/(10*x(3)^2);
```

```
df2_dx4=0;
```

```
df2_dx5=-421/(10*x(5)^2);
```

```

df3_dx1=-1;
df3_dx2=exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))-1;
df3_dx3=-(x(2)*exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))*((89*x(4))/25+337/10))/x(3)^2;
df3_dx4=89/(25*x(5))+89*x(2)*exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))/(25*x(3));
df3_dx5=-((89*x(4))/25+337/10)/x(5)^2;
df4_dx1=0;
df4_dx2=0;
df4_dx3=1/x(3)^2+(x(4)*exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))*((89*x(4))/25+337/10))/x(3)^2+(x(4)*
exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))*((89*x(4))/25+337/10)^2)/x(3)^3;
df4_dx4=-((89*x(4)*exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3)))/(25*x(3))-
(exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))*((89*x(4))/25+337/10))/x(3)-
(89*x(4)*exp(((89*x(4))/25+337/10)/x(3))*((89*x(4))/25+337/10))/(25*x(3)^2);
df4_dx5=0;
df5_dx1=0;
df5_dx2=-exp((387*x(4))/(100*x(3)))/x(3);
df5_dx3=(x(2)*exp((387*x(4))/(100*x(3)))/x(3)^2+(387*x(2)*x(4)*exp((387*x(4))/(100*x(3))))/
(100*x(3)^3);
df5_dx4=1/x(5)-(387*x(2)*exp((387*x(4))/(100*x(3)))/(100*x(3)^2)+1;
df5_dx5=-x(4)/x(5)^2-1;
J=[df1_dx1 df1_dx2 df1_dx3 df1_dx4 df1_dx5;df2_dx1 df2_dx2 df2_dx3 df2_dx4
df2_dx5;df3_dx1 df3_dx2 df3_dx3 df3_dx4 df3_dx5;
df4_dx1 df4_dx2 df4_dx3 df4_dx4 df4_dx5;df5_dx1 df5_dx2 df5_dx3 df5_dx4 df5_dx5]
C=inv(J)
dx=C*F
x=x-dx
k=k+1
end
F
J
C
dx
x

```
