



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abbes Lechrour Khenchela

**Faculté Des Sciences et de Technologies
Département De Génie Industriel**

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention
Du diplôme de Master**

Spécialité : Automatique et informatique industriel

Thème

**Etude et simulation d'un moteur asynchrone
associé à un générateur photovoltaïque**

Présenté par :

Melle : Bakhouche Asma

Mr : Boussahia Mourad

Encadreur :

Mr. Boumaaraf Abdallali

Année universitaire : 2021/2022

Résumé :

L'énergie est l'un des éléments les plus fondamentaux et nécessaires à la vie, en raison de l'augmentation continue de la demande d'énergie, il est devenu nécessaire de rechercher des sources alternatives de production d'énergies renouvelables, les plus importantes utilisant l'énergie solaire en raison de nombreux avantages, et de préservation de l'environnement ou de continuité de production.

Dans ce mémoire, nous attirons l'attention sur la façon dont l'énergie solaire convertit l'électricité par des panneaux photovoltaïques, pour un fonctionnement optimale du système, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque quelque soit les conditions climatiques. L'étude et la simulation des éléments de cette chaine ont montré que l'élément principal de la chaine, le générateur photovoltaïque GPV, ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Ainsi, afin de poursuivre le point de puissance maximale, l'insertion d'un étage d'adaptation, entre le GPV et la charge est nécessaire. Cet étage a été réalisé dans notre cas en utilisant un convertisseur DC/DC Buck et l'algorithme MPPT (P&O) et un onduleur commandée par MLI (triangulo-sinusoïdale multiple). La simulation du système sous l'environnement Matlab/Simulink et les résultats obtenus prouvent la robustesse de la commande utilisée.

Mots Clés : générateur photovoltaïque, MPPT, hacheur Boost, onduleur, commande MLI, machine asynchrone.

Abstract:

Energy is one of the most fundamental and necessary elements of life, due to the continuous increase in the demand for energy, it has become necessary to seek alternative sources of renewable energy production, the most companies using solar energy due to many advantages, and environmental preservation or continuity of production.

Energy is one of the most fundamental and necessary elements of life, due to the continuous increase in the demand for energy, it has become necessary to seek alternative sources of renewable energy production, the most companies using solar energy due to many advantages, and environmental preservation or continuity of production.

In this thesis, we draw attention to how solar energy through photovoltaic panels, for optimal operation of the system, we must ensure operation at maximum power of the photovoltaic generator whatever the climatic conditions. The study and simulation of the elements of this chain have shown that the main element of the chain, the PVG can only deliver maximum power for specific values of current and voltage. Thus, in order to continue the point of maximum power, the insertion of an adaptation stage between the PVG and the load is necessary. This stage was realized in our case using a DC/DC Buck converter and the MPPT (P&O) algorithm and an inverter controlled by PWM (Multiple Triangular-Sinusoidal). The simulation of the system under the Matlab/Simulink environment and the results obtained prove the robustness of the command used.

Keywords: photovoltaic generator PVG, MPPT, Boost chopper, inverter, PWM, asynchronous machine.

ملخص

تعتبر الطاقة من أهم مقومات الحياة الأساسية وضرورية ، وذلك بسبب الزيادة المستمرة في الطلب على الطاقة ، فقد أصبح من الضروري البحث عن مصادر بديلة لإنتاج الطاقات المتجددة ، ومعظم الشركات الكبرى التي تستخدم الطاقة الشمسية لما لها من مزايا عديدة والمحافظة على البيئة أو استمرارية الإنتاج.

في هذه الرسالة ، نلفت الانتباه إلى الطريقة التي تحول بها الطاقة الشمسية الكهرباء عن طريق الألواح الكهروضوئية ، من أجل التشغيل الأمثل للنظام ، يجب ضمان التشغيل بأقصى طاقة للمولد الكهروضوئي مهما كانت الظروف المناخية. أظهرت دراسة ومحاكاة عناصر هذه السلسلة أن العنصر الرئيسي للسلسلة ، المولد الكهروضوئي GPV ، يمكنه فقط توفير أقصى طاقة لقيم محددة للتيار والجهد. وبالتالي ، من أجل متابعة أقصى نقطة طاقة ، فإن إدخال مرحلة التكيف بين GPV والحمل ضروري. تم تنفيذ هذه المرحلة في حالتنا باستخدام محول DC / DC Buck وخوارزمية (P O&MPPT) وعاكس يتحكم فيه PWM (متعدد ثلاثي الجيوب الأنفية). تثبت محاكاة النظام في بيئة Matlab / Simulink والنتائج التي تم الحصول عليها قوة الأمر المستخدم.

الكلمات الرئيسية: مولد الطاقة الكهروضوئية ، MPPT ، المروحية التعزيزية ، العاكس ، التحكم في PWM ، آلة غير متزامنة

Remerciement

Tout d'abord, Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de cette mémoire.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et témoigner ma profonde gratitude à Dr. A. Boumaaraf, qui m' honoré de son encadrement et pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé. Je lui exprime également ma profonde reconnaissance pour son dévouement d'avoir bien voulu me faire profiter pleinement de ses compétences scientifiques et encore de ses idées par les quelles il m'a orienté pour l'accomplissement de ce travail.

Notre respect et notre gratitude vont également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail et qui par leur disponibilité, leurs observations et leurs rapports nous ont permis d'enrichir notre travail.

Nous remercions également de tout notre cœur tous les enseignants qui ont contribué à notre apprentissage depuis notre jeune âge à ce jour.

Enfin, je ne peux oublier de remercier ma famille, mes amies, amés collègues des départements de génie industriel, enseignants, techniciens, agents administratifs. Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin.

Dédicace

Je tiens à remercier Allah de m'avoir donné le courage, la santé, et la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience. A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

A ma très chère mère, source de tendresse

A mon très cher père, qui m'encourage

A mes très chers frères : Achraf et Amdjed

A mes très chers sœur : Amani

*Et à ma grande famille **Bakhouche** .*

*Sans oublier Et mon binôme « **B.Mourad** »*

*A tous mes amis : **Hadjer Rahali, Imane Rahali , Imane Boualleg, Dounia Salmi , Dounia Tallous, Siham Amraoui , Hizia , Ala ,Choaib , Hamza , Adel .***

*A tous les personnes de promotion **Master Automatique** qui me donnent le courage.*

A tous ceux et celles qui m'ont aidé de loin de près, Je dédie ce modeste travail.

A.Bakhouche

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ceux que sont Les plus chers
À mon cœur, mes parents qui m'ont encouragé au cours de ma formation.*

A mon petit enfant AYANIS

A ma femme AMIRA et sa famille

A mon très chers frères et mes sœurs

Tous ceux qui m'aiment et ceux qui j'aime

M.Boussahia

Table de matière :

Abréviations et symboles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Rappel sur l'énergie solaire	3
2-1-Définition de l'énergie solaire	4
2-2-Types de l'énergie solaire.....	4
2-2-1 -L'énergie solaire photovoltaïque.....	5
2-2-2- l'énergie solaire thermique	5
2-2-3-l'énergie solaire passive	6
I.3 Système photovoltaïque	6
3-1-Définition de système photovoltaïque	7
3-2-Différents types des systèmes photovoltaïques	7
3-2-1- Systèmes autonomes	8
3-2-2-Systèmes hybrides	8
3-2-3-Systèmes fonctionnant au fil du soleil (pompage photovoltaïque...)	8
I.4 Energie photovoltaïque.....	9
4-1-Définition de l'énergie photovoltaïque	9
4-2-Historique de l'énergie photovoltaïque	9
4-3-Rayonnement solaire	10
4-4-Types de rayonnement solaire	11
4-4-1- Rayonnement direct	11
4-4-2- Rayonnement diffus	11
4-4-3- Rayonnement réfléchi	11
4-4-4- Rayonnement global	11
I.5 Effet photovoltaïque	12
I.6 Principe de conversion photovoltaïque.....	12
I.7 Cellule photovoltaïque	13
7-1-Définition d'une cellule	13
7-2-Différents types de cellule photovoltaïque	13
7-2-1-Cellules inorganiques	14
-Les cellules Monocristallines.....	14
-les cellules Poly cristallines	14
-Les cellules Amorphes	14
-Cellules en couches minces.....	15

7-2-2- Cellules de Grätzel	15
7-2-3- Cellules organiques	16
7-2-4- Cellules hybrides	16
7-3- Structure de cellule photovoltaïque	16
7-4-Technologies des cellules photovoltaïques	17
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	18
8-1-Avantages de l'énergie solaire	18
8-2-Inconvénients de l'énergie solaire	19
I.9 Conclusion.....	20
CHAPITRE II : Générateur photovoltaïque	
II.1 Introduction.....	21
II.2 Présentation du système.....	21
2-1-Générateur photovoltaïque.....	21
2-2-Hacheur Boost	21
2-3 Onduleur.....	21
2-4-Moteur asynchrone	21
II.3 Module photovoltaïque	22
3-1-Caractéristiques de module photovoltaïque	22
3-1-1-La puissance de crête	23
3-1-2-Rendement	23
3-1-3-Facteur de forme	23
3-1-4-Caractéristique courant-tension (I-V)	24
3-1-5-Caractéristique puissance-tension (P-V)	24
3-2-Protection de module photovoltaïque	25
3-3-Modélisation du module photovoltaïque	25
II.4 Panneaux photovoltaïques.....	25
II.5 Générateur photovoltaïque	26
5-1-Définition de générateur photovoltaïque	26
5-2-Principe de fonctionnement	27
5-3-Développement mathématique d'un module	27
5-4-Installation photovoltaïque.....	28
5-5-Zones de fonctionnement du module solaire.....	28
5-6- Influence des différents paramètres sur un générateur photovoltaïque	
5.6.1. Influence de la température	29
5.6.2. Influence de l'éclairement	29
5.6.3. Influence de la résistance série	30
5.6.4. Influence du facteur de qualité	30
5-7-Constitution d'un module photovoltaïque	31
5.7.1. Mise en série	31
5.7.2. Mise en parallèle	32
5-8-Commande du générateur photovoltaïque.....	32
5-9- Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	32

5-9-a- Modèle d'une cellule solaire idéale.....	33
5-9-b. Modèle d'une cellule solaire réelle.....	33
-Résistance parallèle.....	34
- La résistance série.....	34
II.6 Conclusion	35
Chapitre 03 : Différentes chaînes de conversion photovoltaïque et leurs évolutions	
III.1 Introduction	37
III.2 La commande (MPPT)	37
2-1-Définition de commande MPPT	37
2-2-Philosophie du MPPT.....	38
2-3-Quelques types d'algorithmes de tracking	39
2-3-1-Méthode « Perturbation et Observation.....	40
2-3-2-Algorithmes tension constante (CV-MPPT).....	41
2-3-3-Algorithmes courant constant (CC-MPPT).....	41
2-3-4-Algorithmes de capacité parasite (P.C-MPPT).....	42
2-3-5-. L'incrément de conductance.....	43
2-4-Avantage de la commande MLI.....	43
III.3 Convertisseur DC/DC (Hacheur)	44
3-1-Définition de hacheur	44
3-2-Types de hacheur	45
3-2-1- Le hacheur Buck	45
3-2-2-Hacheur (Parallèle-élevateur), type BOOST	46
3-3-Technique de commande d'un hacheur	47
3-3- Circuit de commande du hacheur par MLI	47
*Lancer les ordres de commutation de GTO	48
*Réguler la tension Vds de sortie du hacheur.....	48
III. 4 Convertisseur DC/AC (Onduleur)	49
4-1-Définition d'onduleur	49
4-2-Principe de fonctionnement.....	50
4.3. Structure de l'onduleur triphasé.....	51
4.4. Fonctionnement de l'onduleur triphasé	51
III. 5 Conclusion	52
Chapitre 04 : Moteur asynchrone	
VI.1 Introduction	54
VI. Machine asynchrone.....	54
2-1-Définition de la machine asynchrone	54
2-2- Différentes parties de la machine.....	55
Le stator (la partie fixe)	55
Le rotor (la partie mobile)	56
a)Rotor bobiné (a bague)	56

b) Rotor a cage	57
2-3-Principe de fonctionnement	57
2-4-Modélisation de la machine asynchrone	58
VI. 3. Hypothèses simplificatrices.....	59
VI. 4 Equations de la machine asynchrone en régime quelconque.....	60
4. 1. Equations des tensions.....	60
4. 2. Equations des flux.....	61
4. 3. Equations mécaniques de la machine asynchrone.....	61
VI. 5 Transformation de Park.....	63
VI. 6 Equations de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	
6. 1. Equations de tension.....	64
6.2. Equations du flux.....	64
VI. 7 Choix de référentiel.....	65
7-1- Référentiel lié au stator.....	66
7-2- Référentiel lié au rotor	66
7-3- Référentiel lié au champ tournant.....	66
VI. 8 Mise sous forme d'équation d'état.....	66
VI. 9 Conclusion	67
Chapitre 05 : Simulation et résultats	
V.1 Introduction	69
V.2 Simulation de la Machine Asynchrone.....	70
2-1 Fonctionnement à vide ($C_r=0$ N.m)	71
2-2Fonctionnement en charge	71
V.3 Simulation du Générateur photovoltaïque GPV.....	73
a- Le courant I_0	74
b- Le courant $I_m=I_{pv}$	74
c- Le courant I_{ph}	74
d- Le courant I_{pv}	75
3-1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle...	76
3-2Influence de la température et de l'éclairement.....	77
a- L'influence de l'éclairement.....	
c- Influence de la température	
V.4 Simulation du convertisseur Boost(Hacheur survolteur).....	78
Bloc PWM (MLI).....	78
V.5 Simulations du MPPT.....	80
V.6 Simulation du Convertisseur continu- alternatif (onduleur).....	81
Bloc PWM (la MLI sinus-triangle)	81
V.7 Modèle global du système.....	85
V.8 Interprétation des résultats	86

V.9 Conclusion	87
Conclusion générale	89
Références bibliographique	90

Abréviation et symboles

Abréviation :

PV: Photovoltaïque

SPV : Système photovoltaïque

DC: Courant Continu (Direct Current)

AC: Courant Alternatif (Alternating Current)

EPV : Energie photovoltaïque

AM : Air Mass

CPV : Cellule photovoltaïque

GPV: Générateur photovoltaïque

PPM : Point de Puissance Maximale

MPPT: Maximum Power Point Tracking

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion

P&O: Perturbation et Observation (Perturb & Observ)

PWM : Pulse Width modulation

MAS : Moteur asynchrone

FTBO : Fonction de transfert en boucle ouverte

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermée

Symboles :

K : Constant de Boltzmann

K_{wc}/m² : Kilowatt crete par metre carré

ℰ : Albédo

η : Rendement

FF : Facteur de forme

I_{cc} : Courant en court-circuit

PC : Puissance crête

PO : Puissance optimale

P_m : Puissance maximale

V_{co} : Tension circuit ouvert

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance shunt

I_{ph} : Courant photonique de la diode

T_{ref} : Temperature de reference (°C).

Ψ : Eclairage absorbé par cellule

P_{pv} : Puissance photovoltaïque (W).

I_{pv} : Courant photovoltaïque (A).

V_{pv} : Tension continue donnée par une cellule photovoltaïque (V).

P_{max} : Puissance maximale fournie par le générateur (W).

V_{mpp} : Tension au point de Puissance maximale (V).

I_{mpp} : Courant au point de Puissance maximale (A).

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques de la machine asynchrone (H).

Liste des Figures et tableaux

Listes des figures :

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

Figure 1.1 : L'énergie solaire photovoltaïque

Figure 1.2 : L'énergie solaire thermique

Figure 1.3 : L'énergie solaire passive

Figure 1.4 : Structure d'un système PV

Figure 1-5 : Le système autonome

Figure 1-6: Systèmes hybrides

Figure 1-7: Eléments d'une installation de pompage photovoltaïque

Figure 1-8 : analyse spectrale du rayonnement solaire

Figure 1-9: Composantes du rayonnement solaire: extraterrestre, global = direct + diffus + albédo

Figure 1-10 : Différents type de cellule

Figure 1-11: Cellules en couches minces

Figure 1-12: Cellules de Grätzel

Figure 1-13: Cellules organiques

Figure 1-14: Des cellules photovoltaïques

Figure 1-15: Structure d'une cellule photovoltaïque

Figure 1-16 : Tendances de la fabrication des cellules solaire

Figure 1-17: Intensité du rayonnement du soleil en un jour

CHAPITRE II : Générateur photovoltaïque

Figure 2-18: Module photovoltaïque

Figure 2-19: Ruban métallique d'une cellule

Figure 2-20 : Encapsulation des cellules

Figure 2-21 : Boite de dérivation

Figure 2-22 : Boite de jonction

Figure 2-23: Schéma équivalent d'une cellule solaire PV

Figure 2-24 : Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque pour ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$).

Figure 2-25 : Caractéristique $P(V)$ d'un module pour ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$).

Figure 2-26 : vue du panneau photovoltaïque.

Figure 2-27 : Générateur photovoltaïque

Figure 2-28 : Principe de fonctionnement d'une cellule

Figure 2-29: Zone de fonctionnement d'une cellule.

Figure 2-30: a-Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeurs de température.

b- Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeurs de température.

Figure 2-31: a- Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.

b- Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.

Figure 2-32: Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeurs de résistance série.

Figure 2-33: Caractéristique $I(V)$ d'un module pour divers facteurs de qualité.

Figure 2-34 : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.

Figure 2-35 : Schéma réelle d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre 03 : Différentes chaînes de conversion photovoltaïque et leurs évolutions

Figure 3-36 : Les différents types de convertisseurs statiques

Figure 3-37 : Commande MPPT

Figure 3-38 : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation".

Figure 3-39 : Schéma de converge vers le PPM

Figure 3-40: Algorithme de l'incrément de conductance

Figure 3-41 : Schéma de principe du hacheur.

Figure 3-42 : Schéma électrique d'un hacheur boost

Figure 3-43 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

Figure 3-44 : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé

Figure 3-45 : Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert

Figure 3-46 : Signal de commande de l'interrupteur T

Figure 3-47: Boucle de régulation de tension.

Figure 3-48 : Schéma de principe de la conversion continu- Alternative (DC-AC)

Figure 3-49 : Principe de fonctionnement d'un onduleur

Figure 3-50 : Structure d'un onduleur triphasée

Chapitre 04 : Moteur asynchrone

Figure 4-51 : vue d'une machine asynchrone.

Figure 4-52: stator d'une machine asynchrone.

Figure 4-53: rotor d'une machine asynchrone.

Figure 4-54: Moteur asynchrone triphasé rotor bobiné

Figure 4-55 : Moteur asynchrone triphasé rotor à cage

Figure 4-56: Représentation schématique d'une machine

Figure 4-57: Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

Figure 4-58 : Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.

Figure 4-59 : Repérage angulaire des systèmes d'axe.

Chapitre 05 : Simulation et résultats

Figure 5-60: Chaîne élémentaire de conversion Photovoltaïque

Figure 5-61: Schéma bloc Simulink de la machine asynchrone

Figure 5-62: Résultat de simulation de la machine asynchrone triphasée à vide.

Figure 5-63 : Résultat de simulation de la machine asynchrone triphasée en charge

Figure 5-64 : Modèle de simulation d'un générateur PV

Figure 5-65 : Caractéristique (courant-tension) et (puissance-tension) du panneau

Figure 5-66: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$

Figure 5-67 : Influence de la température sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$

Figure 5-68 : schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

Figure 5-69 : Tension de source et Tension de charge (résistif) du hacheur survolteur

Figure 5-70: Courant de charge (résistif) du hacheur survolteur

Figure 5-71: schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

Figure 5-72 : Tension de source et Tension de charge (résistif) du hacheur survolteur

Figure 5-73 : Schéma bloc de l'algorithme MPPT.

Figure 5-74: schéma bloc de simulation de l'onduleur

Figure 5-75: Schéma de simulation de la commande MLI sinus-triangle.

Figure 5-76 : Modulantés sinusoïdales triphasées et porteuse triangule-commande MLI.

Figure 5-77 : Les tensions de sortie de l'onduleur

Figure 5-78 : Les courants de sortie de l'onduleur

Figure 5-79: Schéma de simulation de l'onduleur avec filtre de sortie.

Figure 5-80 : Les tensions de sortie de l'onduleur (phase (a), phase (b), phase (c)).

Figure 5-81 : Bloc de simulation du modèle global

Figure 5-82: Résultat de simulation du Modèle global du système

Liste des Tableaux

Tableau 1-1- Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

Tableau 2-1 : Paramètre de module SPR315E

Tableau 3-1: Rendement du MPPT en (%)

Tableau 5-1 : Paramètres de la machine asynchrone

Tableau 5-2 : Caractéristiques du module photovoltaïque

Tableau 5-3 : paramètres de simulation du hacheur boost

Introduction générale

Introduction générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [86].

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

A ce sujet, Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables.

Si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de **145000km²** (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [86].

Le générateur photovoltaïque est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique, et offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Leurs développements constituent de ce fait, un enjeu majeur dans la perspective d'un approvisionnement énergétique compatible avec la contrainte d'environnement local et global. Le champ d'utilisation des systèmes photovoltaïques est large avec beaucoup de configurations autonomes et reliées au réseau de distribution. Les applications de l'énergie solaire incluent le pompage d'eau, réfrigération, climatisation, sources lumineuses, véhicules

électriques, centrales photovoltaïques, utilisation militaire, domaine spatial, et dans les systèmes hybrides [87].

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connus, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie, on doit extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. Cela nécessite un mécanisme de poursuite de ce point afin que la puissance maximale soit générée en permanence. Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, une attention particulièrement a été portée sur la méthode des perturbations et observations. [87]

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque GPV, et d'un convertisseur DC/DC commandé par la commande MPPT. Ce dernier alimente une machine asynchrone à partir d'un onduleur commandé par la commande MLI type sinus-triangle.

Ce travail comporte quatre chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion, Le premier chapitre représente une généralité sur le système photovoltaïque en donnant un aperçu sur l'effet PV et la cellule qui est le cœur du panneau solaire afin de définir le champ et le générateur photovoltaïques. Et la mise au point d'un modèle mathématique du panneau photovoltaïque permettant de déterminer la caractéristique tension courant et l'influence des paramètres (température, ensoleillement) sur cette caractéristique.

Nous avons présenté dans le 2^{ème} chapitre les modèles mathématiques de chaque convertisseur de la chaîne du pompage photovoltaïque (PV, Hacheur, Onduleur).

Le deuxième chapitre concerne la modélisation de chaque élément de chaînes de conversion photovoltaïque. Pour le convertisseur DC/DC, on a choisi le hacheur Boost commandé par la stratégie MPPT afin d'extraire la puissance maximale du GPV. Cette dernière a été faite par la méthode P&O. Un onduleur commandé par la commande MLI type sinus-triangle

Le troisième chapitre est concerné à la modélisation du Moteur Asynchrone

Dans le quatrième chapitre et le dernier chapitre est destiné à la simulation du système photovoltaïque. On a simulé chaque élément séparément afin d'évaluer leurs performances avant de faire la simulation de tout le système photovoltaïque SPV.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

1-Introduction :

Dans les dernières années, l'utilisation des sources d'énergies renouvelables pour produire de l'énergie électrique est visible partout dans le monde. L'énergie renouvelable est un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins en électricité [1]. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. [2]

Ce chapitre on présentera des généralités sur la conversion de l'énergie photovoltaïque ainsi le constituants d'un système photovoltaïque.

2-Rappel sur l'énergie solaire :

2-1-Définition de l'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [3].

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre, le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. L'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m², de 1100 kWh à 2300 kWh/an (au total 720.105 kWh/an) [4].

2-2-Types de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

2-2-1 -L'énergie solaire photovoltaïque :

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans des nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas des ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

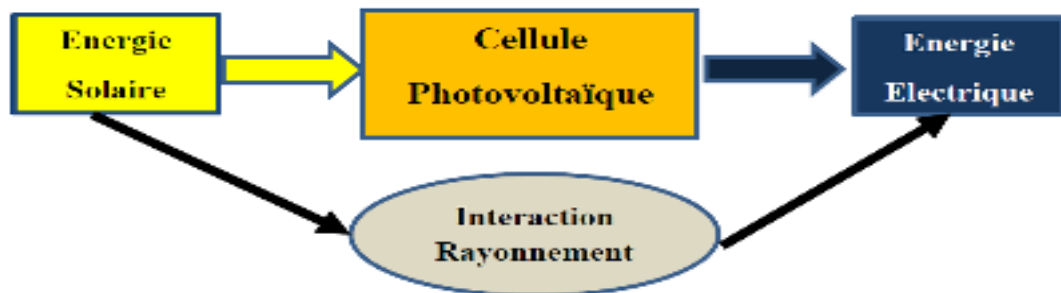


Figure 1-1 : L'énergie solaire photovoltaïque [5]

3-2-2- l'énergie solaire thermique :

Qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

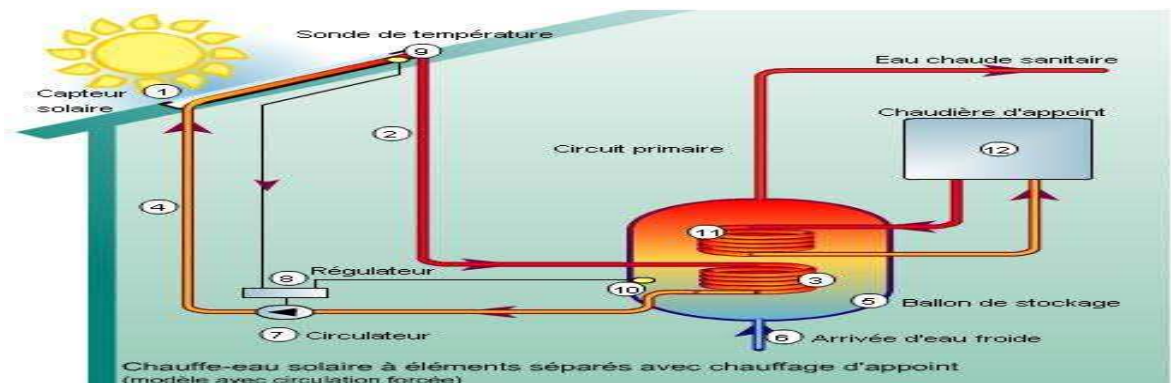


Figure 1-2 : L'énergie solaire thermique [51]

3-2-3-l'énergie solaire passive:

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage. [6]

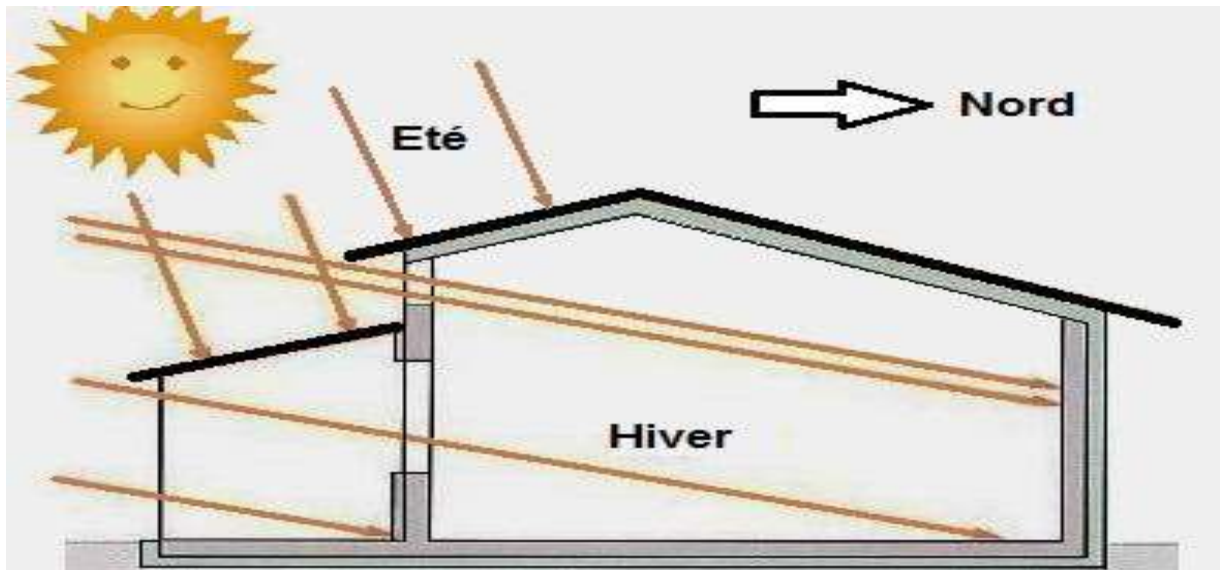


Figure 1-3 : L'énergie solaire passive [51]

3-Système photovoltaïque :

3-1-Définition de système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [5].

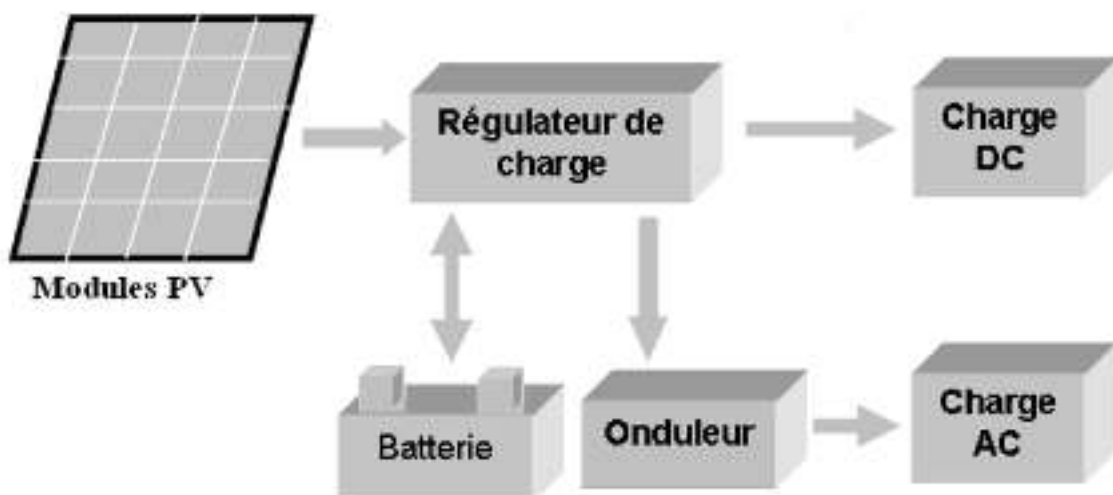


Figure 1-4 : Structure d'un système PV [2]

2-2-Différents types des systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont: autonomes, reliés au réseau, hybrides et pompage photovoltaïque :

2-2-1- Systèmes autonomes :

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant des autres sources d'énergie électriques alimentant l'utilisateur en électricité, sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [9].

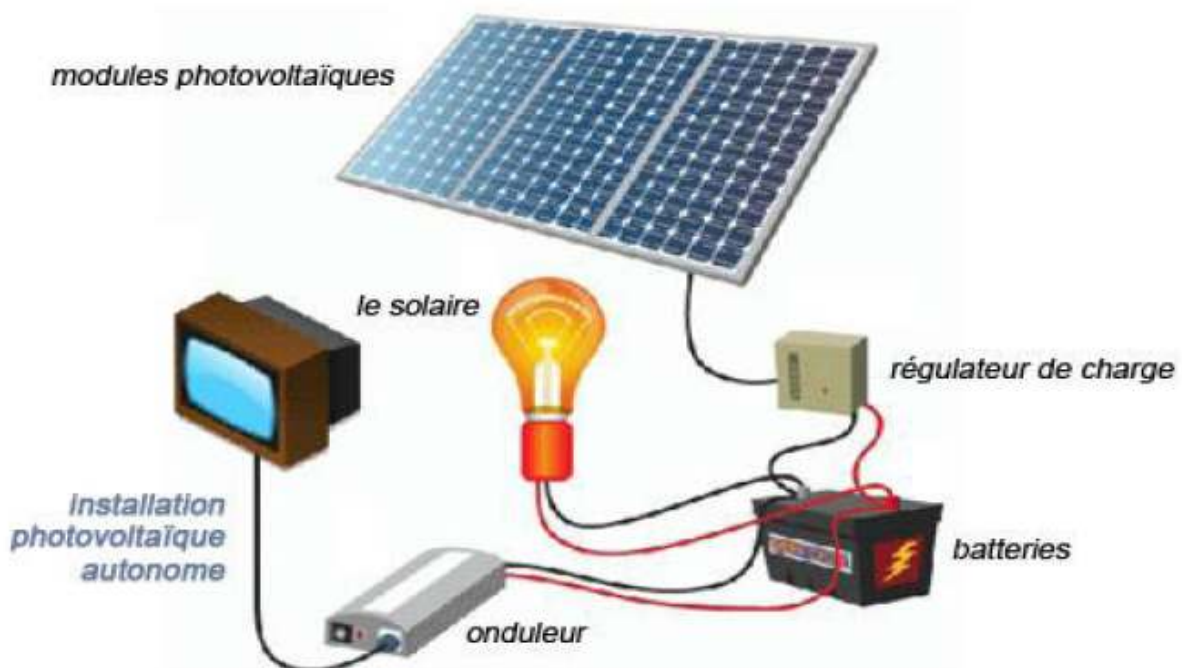


Figure 1-5 : Le système autonome [9].

Il y a deux types de système autonome :

Système autonome avec batterie :

La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire. [7]

Systeme autonome sans batterie :

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu. [10]

2-3-Systemes hybrides

Les systèmes hybrides consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y'a du vent). [6]

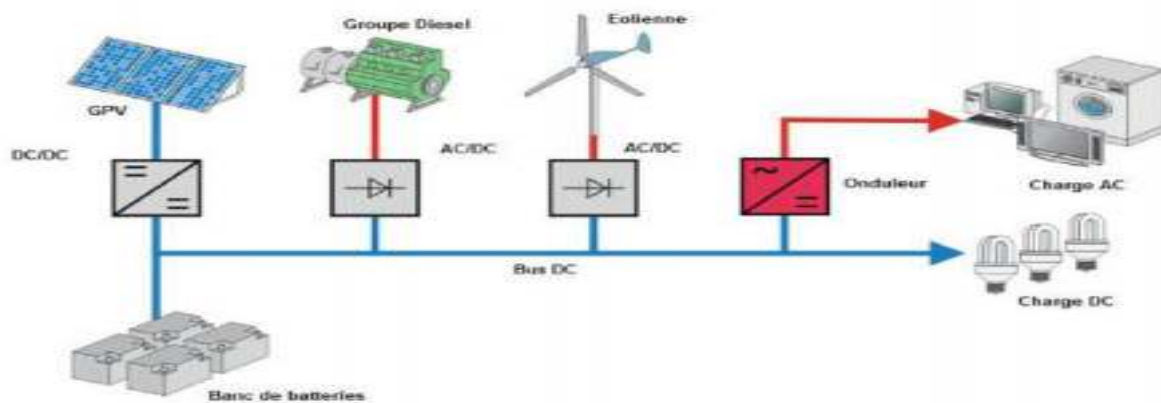


Figure 1-6: Systemes hybrides. [6]

3-2-3-Systemes fonctionnant au fil du soleil (pompage photovoltaïque) :

Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC ou un convertisseur DC/DC [6]

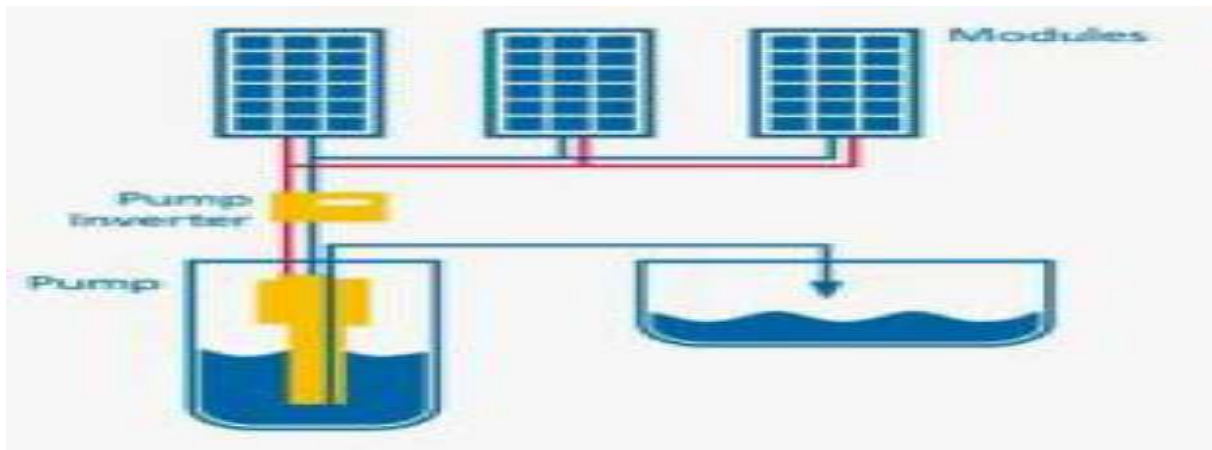


Figure 1-7: Eléments d'une installation de pompage photovoltaïque [6]

4-Energie photovoltaïque :

4-1-Définition :

L'énergie photovoltaïque EPV résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. [7].

4-2-Historique de l'énergie photovoltaïque :

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur L'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

Années 80: Exploitation des systèmes PV pour l'électrification et le pompage d'eau dans les zones isolées.

Fin des années 90: Exploitation du PV pour la production de l'électricité injectée au réseau dans plusieurs pays développés (Japon, Allemagne).

Années 2000: Mise en place des politiques favorables pour le PV et la réalisation des centrales PV ayant des puissances de dizaines de MW. [6]

2009 : Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1% à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB,USA) cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4% à base de PBDTTT-CF et PC70BM(Solamer Energy Inc,University of California,University of Chicago,USA) . [11]

De 2010 à 2016 : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW) [6].

4-3-Rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 μ m à 10 μ m (entre l'ultraviolet et l'infrarouge). La Figure 1-8 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. [12]

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Afin de pouvoir prendre en compte la distance traversée par les rayons solaires, il est impératif d'introduire la notion « Air Mass » (AM), qui correspond à la longueur relative du parcours du rayon solaire direct à travers l'atmosphère terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- *9% dans la bande des ultraviolets (< à 0.4 μ m)
- *47% dans la bande visible (0,4 à 0.8 μ m).
- * 44 % dans la bande des infrarouges (> à 0.8 μ m). [13]

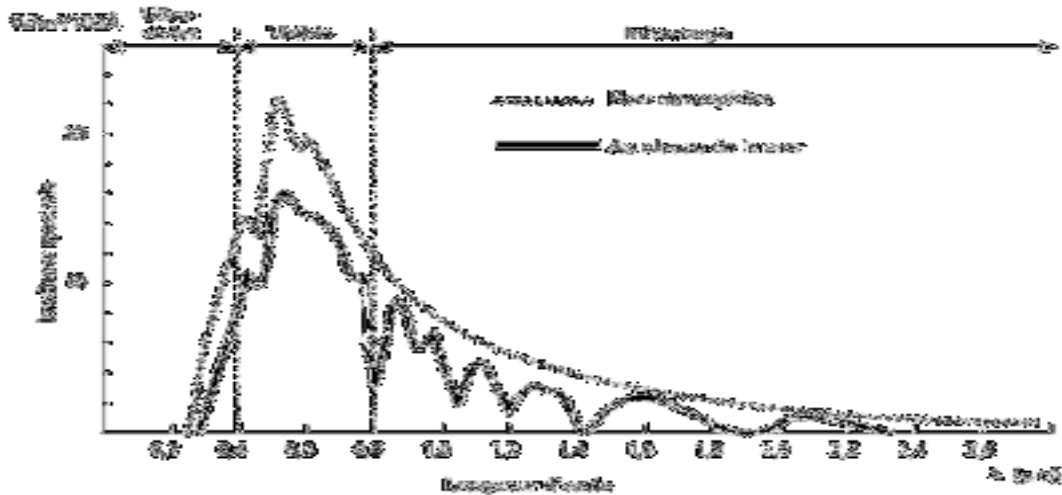


Figure 1-8: analyse spectrale du rayonnement solaire. [13]

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 Kilowatt au mètre carré (kW/m²), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m².

4-4-Types de rayonnement solaire :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffuse au sol, on distingue plusieurs composantes :

4-4-1- Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme des rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

4-4-2- Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

4-4-3- Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.

4-4-4- Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct diffus et réfléchi. [15]

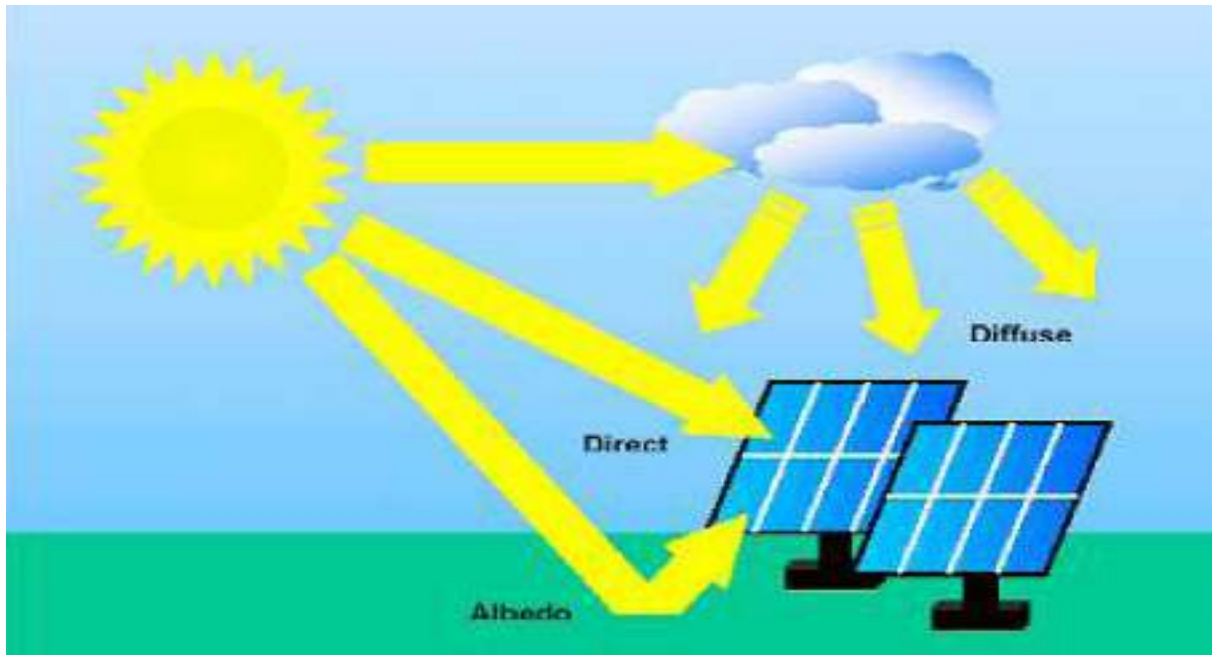


Figure 1-9: Composantes du rayonnement solaire: extraterrestre, global = direct + diffus + albédo [16].

5-Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel. C'est seulement environ un siècle plus tard, en 1916, que Robert Millikan sera le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Mais cette découverte n'est à l'époque qu'anecdotique au vu du rendement énergétique pour transformer la lumière du soleil en énergie. C'est l'industrie spatiale que remettra ce phénomène au-devant de la scène, dans les années 50. [17]

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé : Effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappant une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi-conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaire de la lumière, libère des « électrons » chargés négativement et des « trous » chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire. [18]

6-Cellule photovoltaïque :**6-1-Définition d'une cellule :**

La cellule photovoltaïque PV (photopile) est le plus petit élément d'installation photovoltaïque [22]. Elle composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. [23]

6-2-Différents types de cellule photovoltaïque :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques CPV. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

6-2-1-Cellules inorganiques :**-Les cellules Monocristallines :**

Sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, elles ont un rendement de 15 à 22 % (Voir Figure 1.11.a).

-les cellules Poly cristallines :

Sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines (Voir Figure 11.b).

-Les cellules Amorphes :

Sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposée une fine couche de silicium, leur rendement est faible, compris entre 5 et 9% (Voir Figure 11.c). [23]

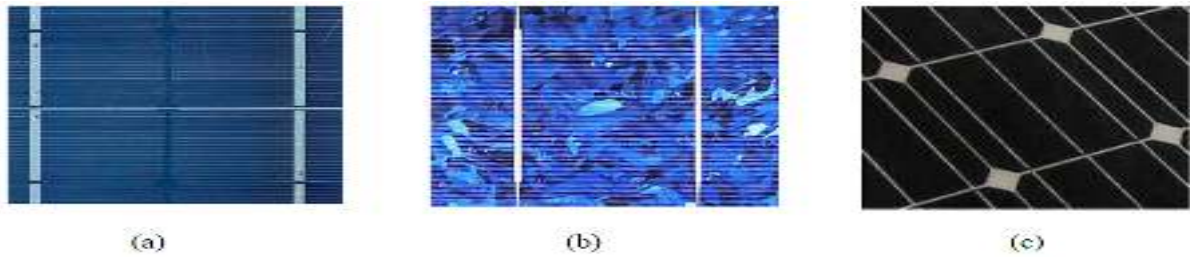


Figure 1-10 : Différents type de cellule [5]

-Cellules en couches minces:

Les cellules de seconde génération dites cellule en couches minces, elles composent en couches minces de matériaux inorganiques. Les matériaux photo actifs les plus utilisés en couche. L'avantage principal de ces cellules est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais [24].

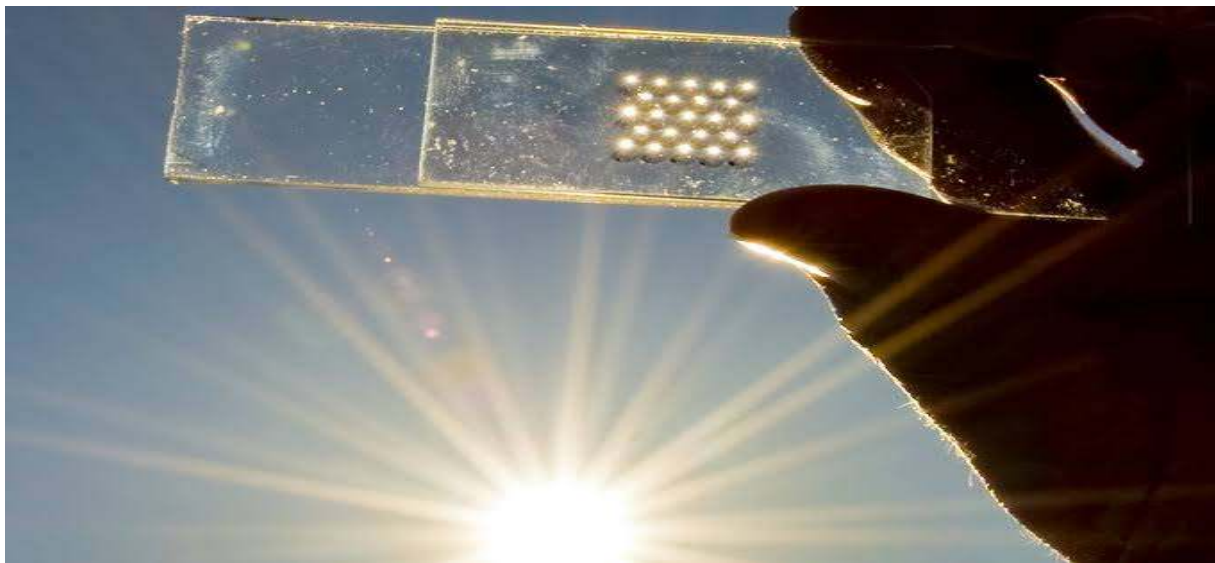


Figure 1-11 : Cellules en couches minces [51]

6-2-2- Cellules de Grätzel :

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de nano-cristallites d'oxyde métallique semi-conducteur (TiO_2 , ZnO , SnO_2 , Nb_2O_5) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthénium ou de ditetrabutyl l'ammonium). Ces cellules ont un coût de production un peu plus élevé que les cellules photovoltaïques tout polymère mais les rendements de conversion photoélectriques avoisinent les 10%. [25]

forme et des qualités des matériaux inorganiques comme les mobilités élevées des charges électriques [25].



Figure 1-14: Des cellules photovoltaïques. [2]

6-3- Structure de cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques CPV sont composées des matériaux semi-conducteurs qui produisent un courant électrique sous l'effet de photons lumineux. L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque dépend des caractéristiques du type de rayonnement: répartition spectrale (réponse spectrale), quantité d'énergie, température, surface, surface de la cellule et de ses caractéristiques dimensionnelles, forme de la cellule et condition ambiantes de fonctionnement de la cellule (température extérieure, vitesse du vent, etc.). La cellule PV élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles [27].

Les cellules photovoltaïques sont raccordées entre elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15 % de l'énergie solaire reçue [19].

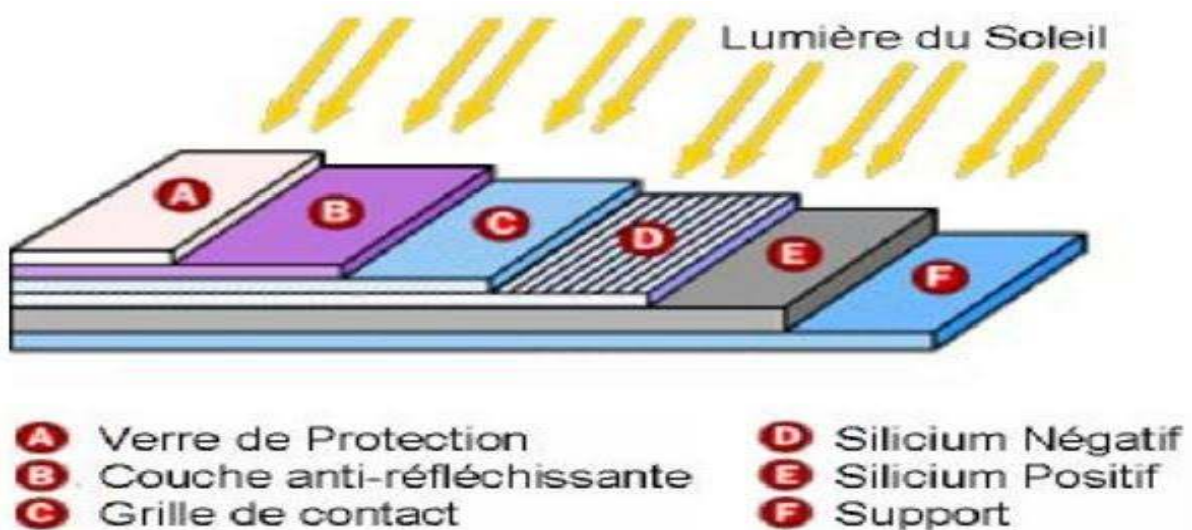


Figure 1-15 : Structure de cellule photovoltaïque [51]

6-4-Technologies des cellules photovoltaïques :

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

*** la première technologie :**

Photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.

*** La deuxième technologie :**

Fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

***la troisième technologie**

Fait appel à d'autre matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium(CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base D'arséniure de Gallium (GaAs), cette technologies des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (d'après Total énergie1 revue du 9 Juillet 2006) [11]

Type des cellules	Rendement des cellules			Domaine d'application
	théorique	En labo	Disponible	
Silicium monocristallin	27	24 ,7	14-16	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19,8	12-14	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre, de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)

Tableau 1-1 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [11]

7-Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :[6]

8-1-Avantages de l'énergie solaire :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- I.** Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz nulle déché toxique par son utilisation.
- II.** Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
- III.** Une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- IV.** Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- V.** Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- VI.** La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grande dimension.
- VII.** Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:
 - * Ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
 - * Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

 - * Ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.

 - * Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

*Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

8-2-Inconvénients de l'énergie solaire :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients:

***Prix:** les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. Cependant, le prix diminue considérablement par rapport à la puissance maximale en Watt, depuis les années 70, comme montré sur la Figure (I.17) [].

***Rayonnement du soleil:** l'intensité irradiante du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte. La Figure (I.18) [] est un exemple de l'irradiation du mauvais temps. L'irradiation commence autour de 6 heures et augmente à la valeur maximale (se rapproche de 900 W/m²) à 12 AM après que 11 AM, l'irradiation flotte parce que le ciel est plus tardif, nuageux et pluvieux. Ensuite l'intensité d'ensoleillement diminue graduellement. Autour de 18 h l'ensoleillement est nul. Le rayonnement du soleil est une source principale pour le système photovoltaïque, ainsi l'exécution du système photovoltaïque dépend de l'intensité d'ensoleillement Rendement: le rendement de la cellule solaire est relativement bas, 15 % [] pour le silicium monocristallin et 12 % pour le silicium poly-cristal. En conséquence, pour obtenir la grande capacité « **Energie du soleil** » du générateur solaire, le grand secteur de la cellule solaire et les endroits sont nécessaires. De nouveaux matériels et processus sont recherchés pour remplacer le silicium qui est le matériel principal pour la cellule en silicium mais reste toujours à prix élevé et rendement bas.

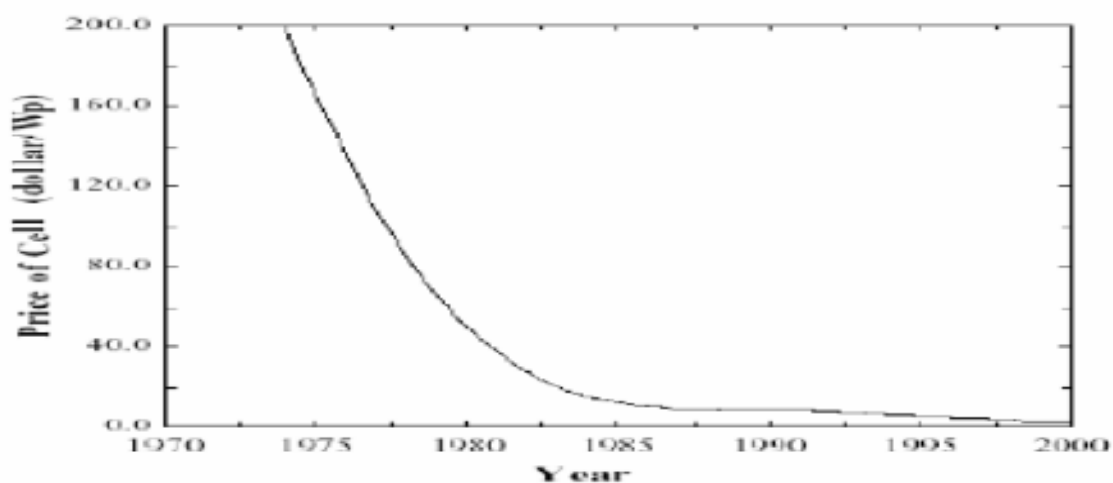


Figure 1-16 : Tendances de la fabrication des cellules solaire

*la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

* le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).

*les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

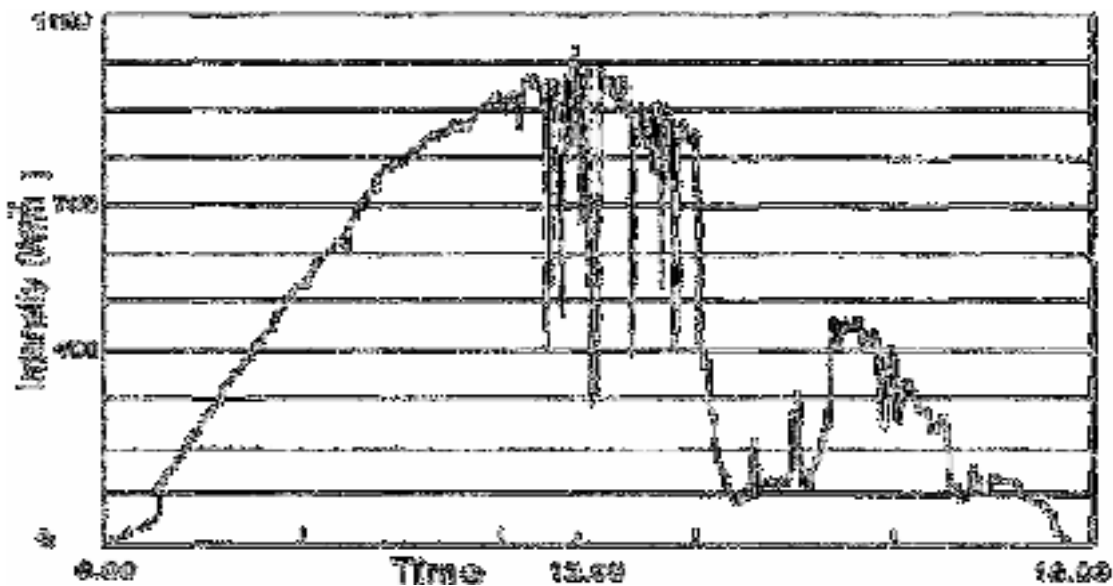


Figure 1-17: Intensité du rayonnement du soleil en un jour [28].

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait un aperçu général sur le système photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur l'énergie solaire le rayonnement solaire et le principe de conversion de l'énergie photovoltaïque.

Nous avons commencé par une présentation d'un état d'art sur l'énergie solaire photovoltaïque basée sur le rayonnement solaire et l'estimation de l'énergie disponible. Ensuite, nous avons présenté la structure d'une cellule photovoltaïque et ses différents types.

Enfin, Nous avons élaboré une synthèse sur les différents types des systèmes photovoltaïques existants ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque. [6]

Chapitre 2 : Générateur photovoltaïque

1-Introduction :

Initialement, la technologie s'est développée avec la volonté des entreprises des télécommunications par l'installation des systèmes fonctionnant dans des endroits éloignés des centres urbains (et donc des réseaux électriques). La cellule solaire reste le meilleur moyen (à moindre coût et le poids) de fournir la quantité d'énergie requise pendant des longues périodes de séjour dans l'espace. [6]

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension $I-V$ non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). [11]

L'énergie produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé. [6]

2- Module photovoltaïque :

Les cellules sont assemblées pour former un module [figure 2-19.a]. Une association série de plusieurs cellules donne un module solaire (appelé aussi panneau photovoltaïque), et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un champ photovoltaïque. [37]

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement de 0,5 Volt. Alors pour produire plus de puissance.

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène – vinylic – acétate) (figure 2-19.b) sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène.

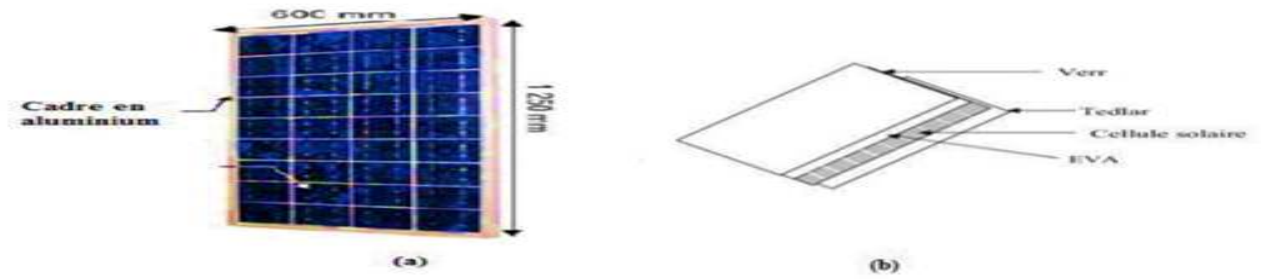


Figure 2-18 : Module photovoltaïque [37]

Les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) (Figure (2-20)).

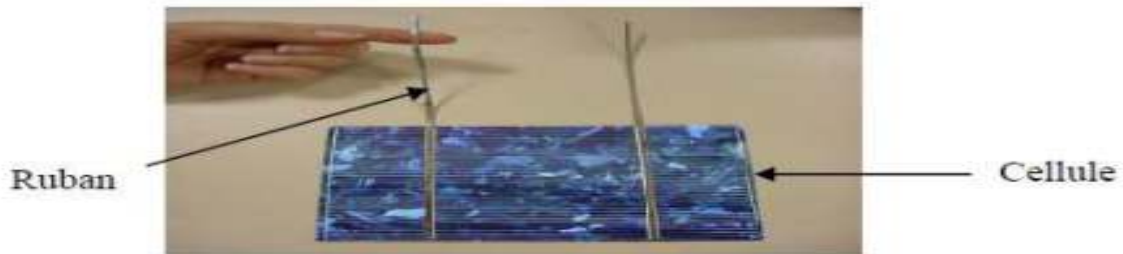


Figure 2-19: Ruban métallique d'une cellule [56].

Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents (EVA: Éthylène Acétate de Vinyle). Le plus souvent, il y a 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 TEDLER [39].

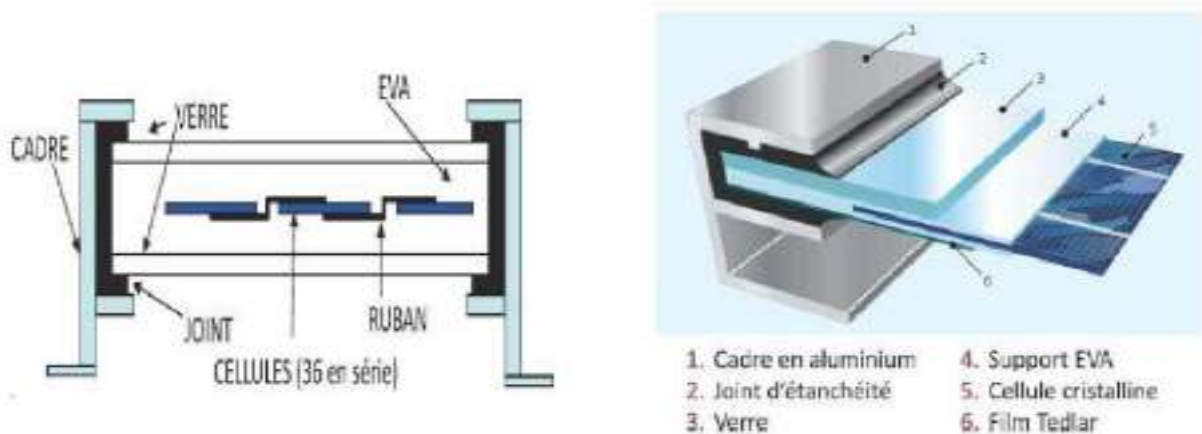


Figure 2-20 : Encapsulation des cellules [39].

Pour chaque champ on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, comme l'illustre la **Figure (2-21)**, alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

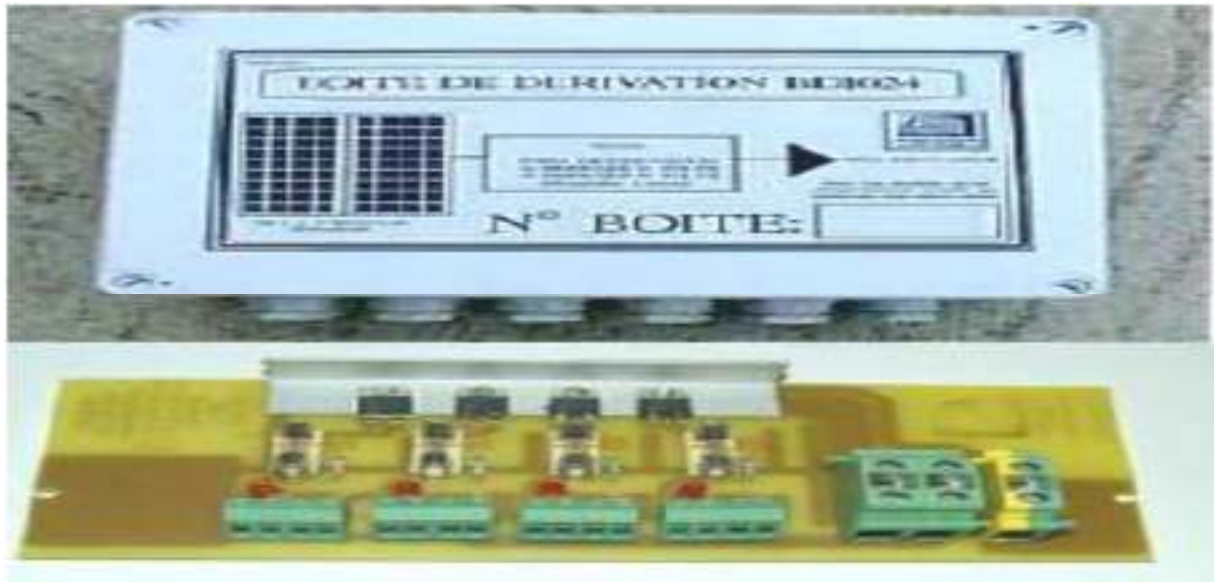


Figure 2-21 : Boîte de dérivation [39].

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles **figure (2-22)** .ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [38]



Figure 2-22 : Boîte de jonction [38]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- *Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- *Protection mécanique et support
- *Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

2-1-Caractéristiques de module photovoltaïque :[35]

a. La puissance de crête (PC):

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête s'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m² et pour une température de jonction de la cellule de 25°C .La puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir.

b. Rendement :

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i} FF$$

c. Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale **P_o** et la puissance maximale **P_m** que peut avoir la cellule : V_{co} , I_{cc} .

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

d. Caractéristique courant-tension (I-V) :

La caractéristique courant-tension c'est une caractéristique fondamentale du module solaire définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décale le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement [40].

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de cellule, le modèle est complété par deux résistances série (**R_s**) et shunt (**R_{sh}**) comme le montre le schéma équivalent de la figure (2-23) La résistance (**R_s**) est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est

profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule. [31]

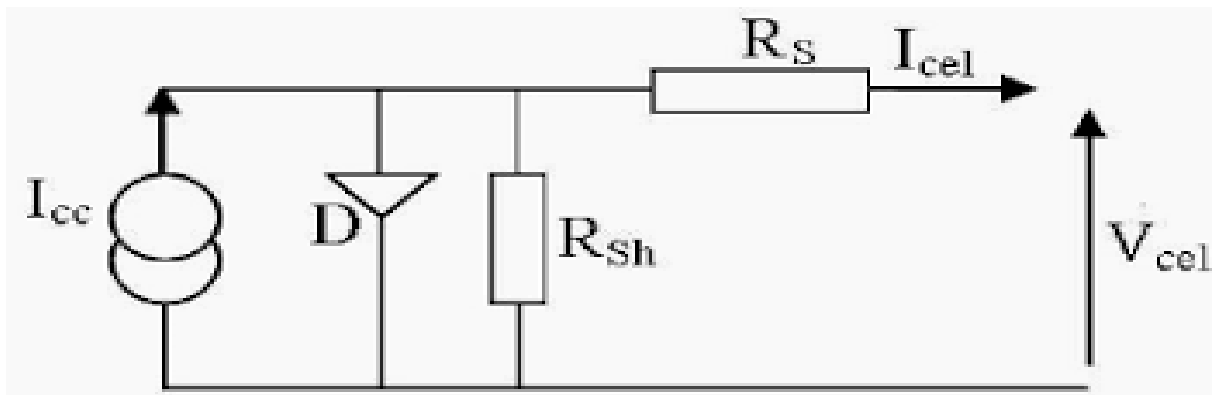


Figure 2-23: Schéma équivalent d'une cellule solaire PV [35]

Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante (Figure 2-24).

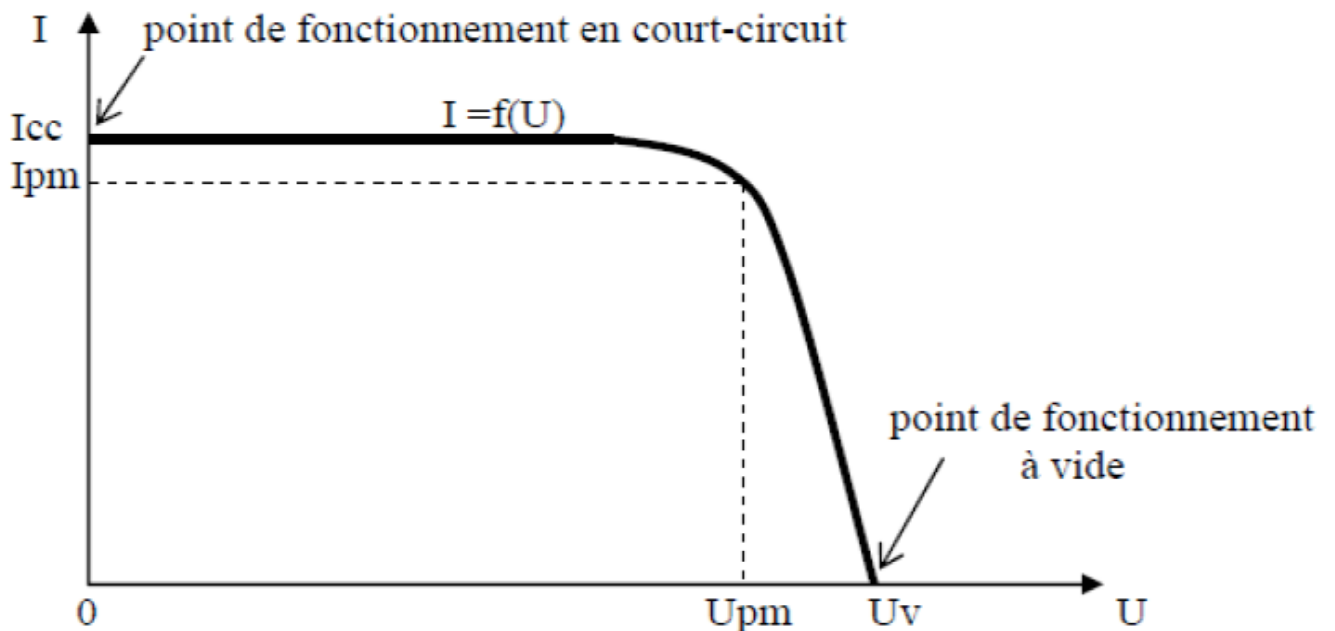


Figure 2-24 : Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque pour ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$). [33]

Sur cette courbe, on repère :

- * le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0 \text{ A}$
- * le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0\text{V}$

e. Caractéristique puissance-tension (P-V) :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$. Cette courbe a l'allure suivante :

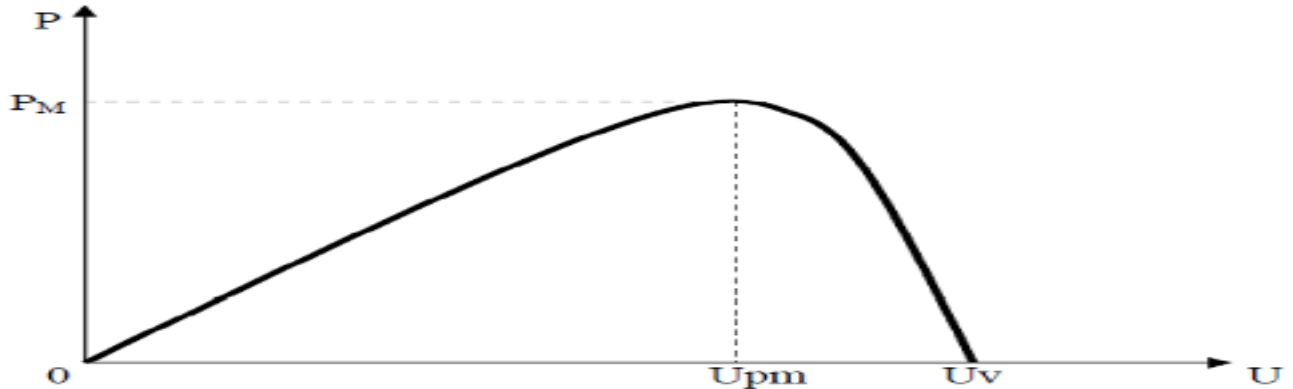


Figure 2-25 : Caractéristique P (V) d'un module pour ($G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$). [33]

La Figure 2-24 montre bien qu'un module PV ne peut être assimilé à aucun générateur classique, un panneau PV est considéré comme une source de puissance. [35]

2-3-Modélisation du module photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. Le générateur photovoltaïque est un ensemble de modules connectés série/parallèle afin d'obtenir une puissance et une tension désirées. L'élément de base est la cellule solaire (rappelons que le modèle en une seule exponentielle est non linéaire et implicite), donc une solution itérative sera déterminée par la méthode de Newton-Raphson., ainsi la connaissance des données fournies par le constructeur sont nécessaires. [54], [55].

Le circuit est composé d'un courant photodiode, une résistance série R_s plus faible et une diode (**Fig. 2- 23**).

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont données par les relations suivantes :

La relation entre la tension V et le courant I est donnée par la relation suivante :

Appliquons la première loi de Kirschoff :

$$I = I_{ph} - ID \quad (2-1)$$

Avec ph , I_d , I le courant photonique, le courant de la diode et le courant de fonctionnement, qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules.

$$\begin{cases} I_D = I_0 \times [e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{nKT}} - 1] & (2-2) \\ I = I_{ph} - I_0 \times [e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1] & (2-3) \end{cases}$$

Avec :

q: charge de l'électron $e = 1.6 \times 10^{-19}$ coulomb.
 T : température de la cellule (Kelvin).
 Rs : résistance série de la cellule (Ω).
 K : constante de Boltzmann ($K = 1.3854 \times 10^{-23}$ J/K).
 A : facteur de qualité de la diode.
 I_{ph} : courant photonique de la diode qui est donnée par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) [1 + K_0 \times (T - T_0)] \quad (2-4)$$

Avec : $I_{ph}(T_i) = E E_{ref} \times I_{sc}(T_1) \quad (2-5)$

et : $K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2-6)$

I_0 : courant de saturation de la diode (A), donné par la relation suivante :

$$I_0 = I_0(T_1) \times \left(\frac{T}{T_1}\right)^3 / n \times \left(e^{-\frac{q \cdot V_g}{A \cdot K \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}}\right) \quad (2-7)$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{cc}(T_1)}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}(T_1)}{A \cdot K \cdot T_1} - 1}} \quad (2-8)$$

V_{oc} est la tension du circuit ouvert de la cellule et V_g est la tension de seuil de la diode ($1.12 eV$). La résistance série se calcule de la façon suivante :

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_0 \times (e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1) \\ dI = 0 - I_0 \cdot q \cdot \left(\frac{dV + R_s \cdot dI}{A \cdot K \cdot T}\right) \cdot e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{A \cdot K \cdot T}} \end{cases} \quad (2-9)$$

3-Panneaux photovoltaïques:

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en

parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules [22]



Figure 2-26 : vue du panneau photovoltaïque. [3]

4-Générateur photovoltaïque :

4-1-Définition :

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque représente la source de l'énergie électrique actionnant le moteur pompe. Un générateur photovoltaïque est un système complet (ensemble d'équipements mis en place) assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques. [43], les modules utilisés sont de type poly cristallin (BP 83), dont les caractéristiques sont données dans le chapitre 1.

Il est composé de 36 cellules en silicium monocristallin connectées en série ayant une puissance maximale de 80 W.

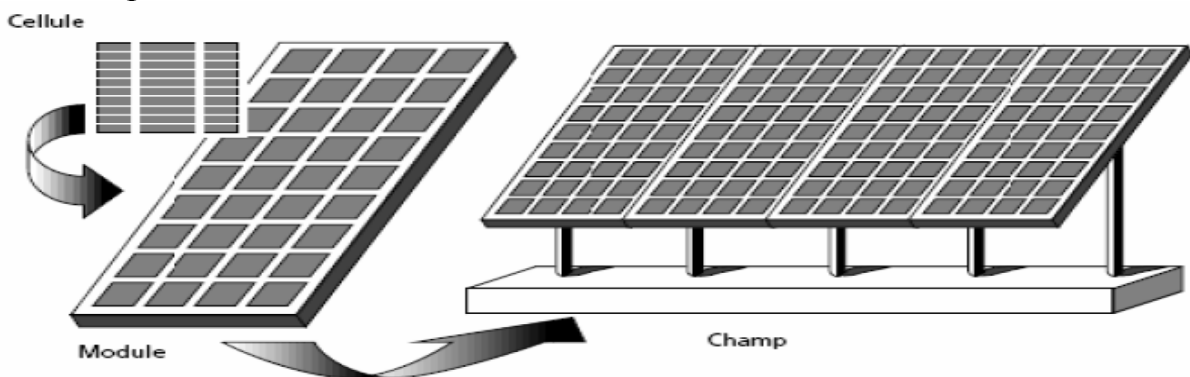


Figure 2-27 : Générateur photovoltaïque [5]

4-2-Développement mathématique d'un module :

Les principales équations utilisées dans le modèle mathématique du module sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I_m = N_p * I} \\ \mathbf{I_{ccM} = N_p * I_{cc}} \\ \mathbf{V_m = N_s * V} \\ \mathbf{V_{com} = N_s * V_{co}} \\ \mathbf{I_{sm} = N_p * I_s} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M : indice affecté au module} \\ \mathbf{N_s : nombre de cellules en série} \\ \mathbf{N_p : nombre de cellules en parallèle.} \end{array} \right.$$

Ce qui donne pour un module :

$$\mathbf{I_M = I_{ccM} - I_{sM} \left[e^{\frac{(V_M + I_M * R_{sM})}{N_s N V t}} - 1 \right]} \quad (2.11)$$

Avec

$$\mathbf{R_{sM} = (N_s / N_p)}$$

R_s : résistance série du module.

En circuit ouvert et ($T = T_{ref}$) à partir de l'équation (1.2) le courant

I_{sM} peut s'écrire pour un module comme suit :

$$\mathbf{I_{sM} = I_{ccrM} / (V_{coM}) / e^{(N_s * V_{tref} - 1)}} \quad (2.12)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I_{sM} : courant de saturation référence du module} \\ \mathbf{I_{ccrM} : Courant de court circuit référence du module} \end{array} \right.$$

Pour généraliser la modélisation pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

La nouvelle valeur du courant de court circuit du module I_{ccM} pour une irradiation G et une température T données est calculée selon l'équation suivante :

$$I_{ccM}(G,T)=I_{ccrM}*(G/1000)*[1+a(T-T_{ref})]$$

Le courant de saturation dépend I_{sM} de la température. Sa valeur pour une température T donnée est calculée par :

$$I_{sM}(T)=I_{srM}(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{n}} e^{\left(\frac{-qEg}{Nk}\right)\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (2.13)$$

4-2-Principe de fonctionnement :

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes [34]:

- *Absorbation des photons de la lumière solaire.
- *Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- * Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [21]. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique [45]. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Bequerelle 1889).

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode ainsi, lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance et on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V .

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons [46]. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur 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 par sérigraphie sur les deux couches de semi conducteur (Figure (2-29) [47, 45, 48]. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux.

Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [47].

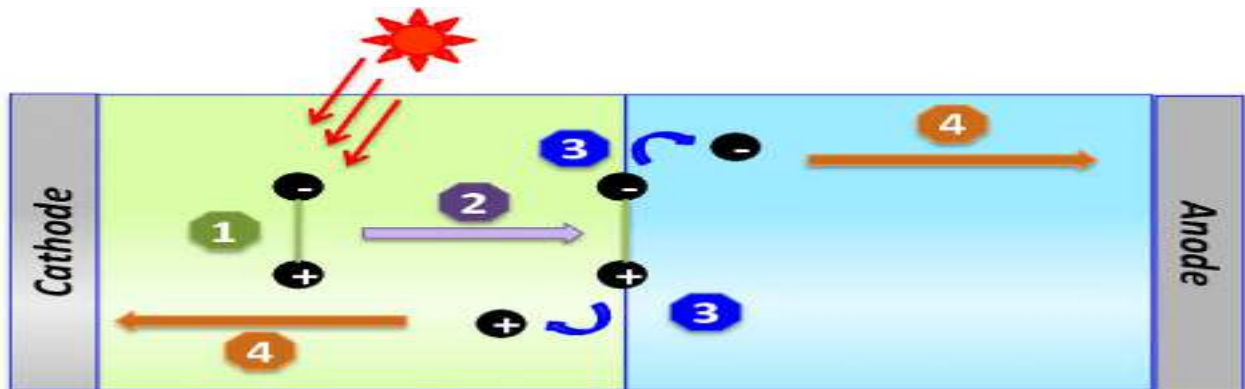


Figure 2-28 : Principe de fonctionnement d'une cellule [51]

4-5-Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque

La figure (2-30) représente trois zones essentielles [52]

- a- La zone (1) :** ou le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région le générateur photovoltaïque fonctionne comme générateur de courant «**la zone AB**»
- b- La zone (2) :** correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (Caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé «**zones (AB, CD)**»
- c- La zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension «**zone CD**»

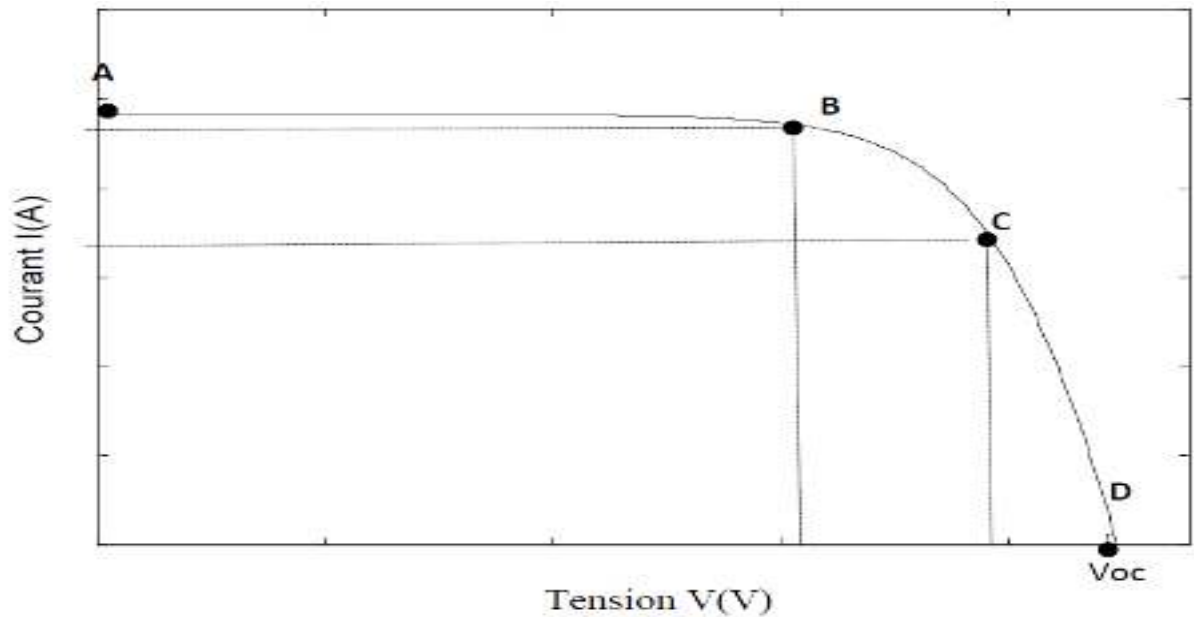


Figure 2-29: Zone de fonctionnement d'une cellule. [52]

4-6- Influence des différents paramètres sur un générateur photovoltaïque :

4.6.1. Influence de la température :

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer.

La Figure (2-30 a, 2-30 b) décrit le comportement du module sous un éclairage fixe de 1W/m^2 , et à des températures comprises entre 0°C et 45°C . Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

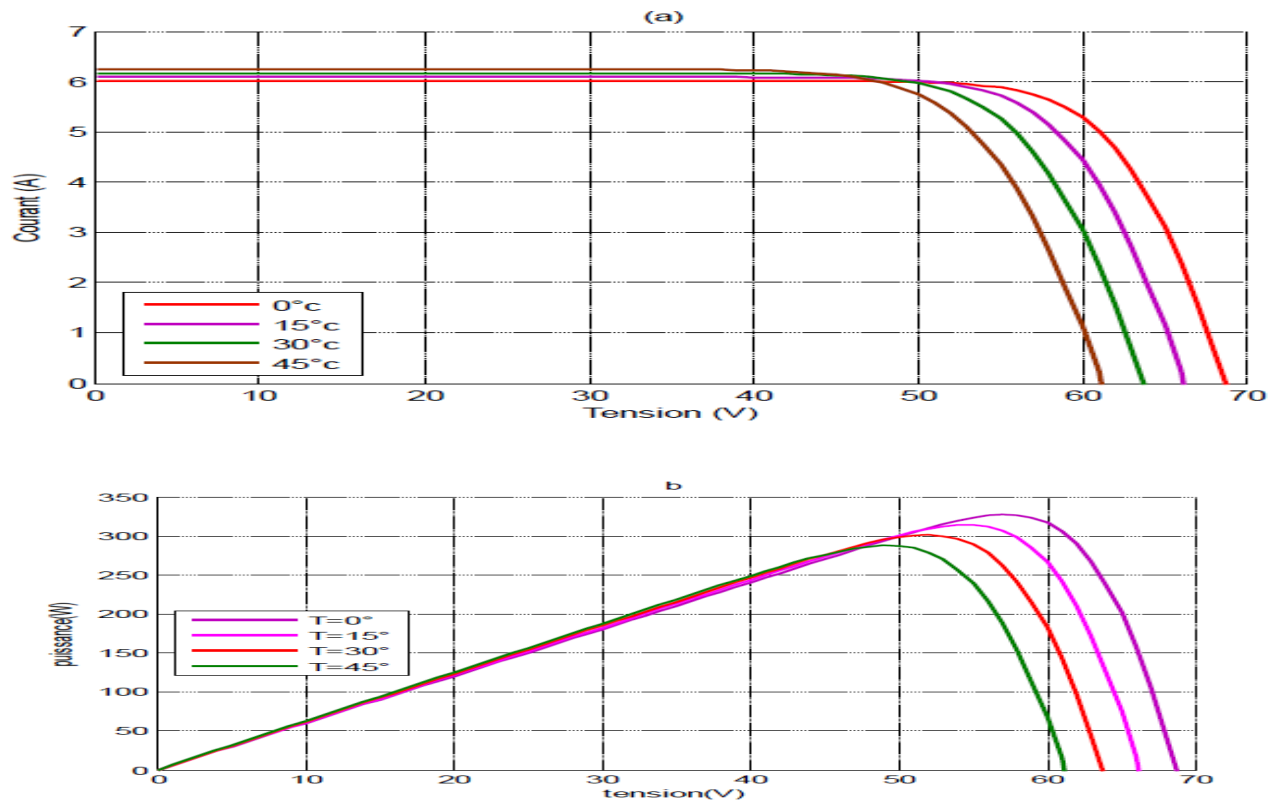


Figure 2-30: a- Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température.

b- Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température. [9]

4.6.2. Influence de l'éclairement :

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m^2 . La nuit, il est nul ($0 W/m^2$), et il varie au cours de la journée entre 0 et $1000 W/m^2$ (valeur maximum), en fonction de la saison.

L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de l' I_{cc} . Lorsqu'il double, I_{cc} double aussi. Il a très peu d'incidence sur la tension à vide V_{co} .

Dans la Figure (2-31 a, 2-31 b), nous représentons les résultats concernant les caractéristiques **I(V)** et **P(V)** du panneau à 25° obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement.

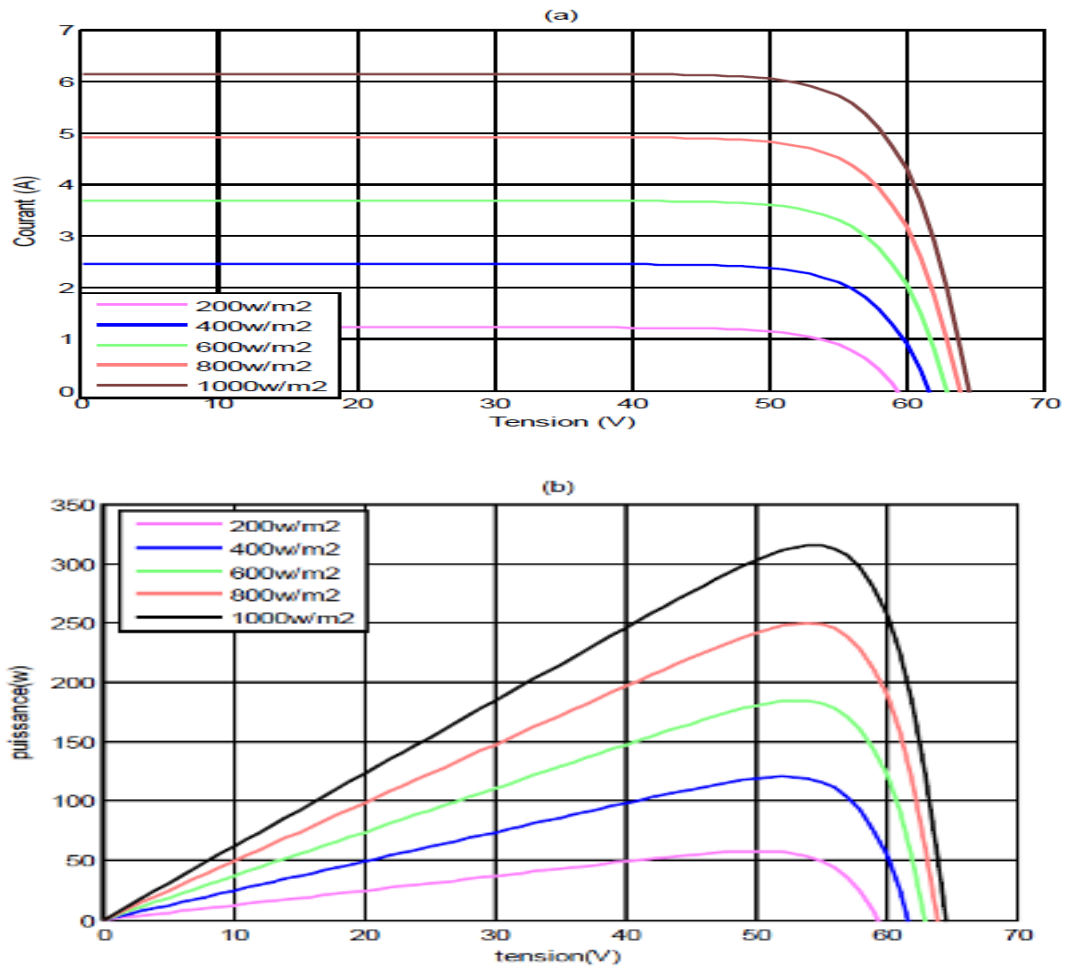


Figure 2-31: a- Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement.

b- Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement. [9]

4.6.3. Influence de la résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit Figure (2-32).

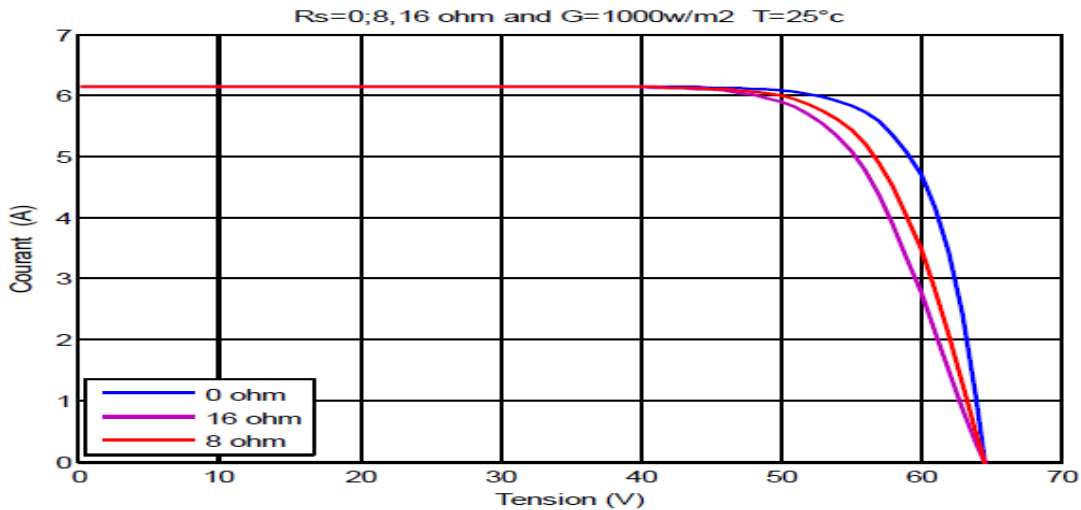


Figure 2-32: Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de résistance série. [9]

4.6.4. Influence du facteur de qualité :

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la zone ou le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

Une valeur de 1,3 est suggérée comme valeur typique en fonctionnement normal et peut être utilisé au départ.

Jusqu' à une valeur plus précise et estimée plus tard par ajustement de courbe, l'effet de la variation du facteur d'idéalité peut être vu dans le modèle SPR315.

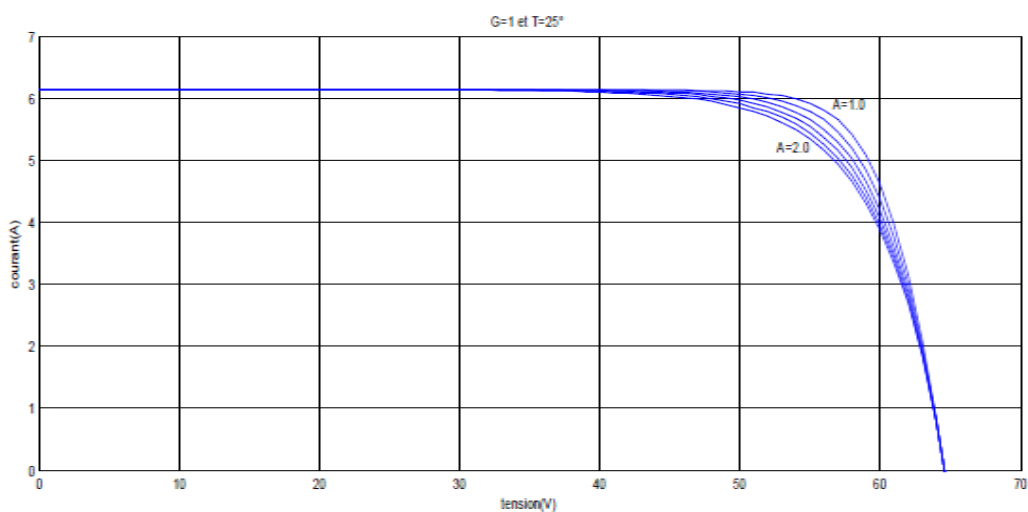


Figure 2-33: Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité. [9]

4-7-Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Parmi ces modèles on peut citer :

4-7-a- Modèle d'une cellule solaire idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la Figure (2.24), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

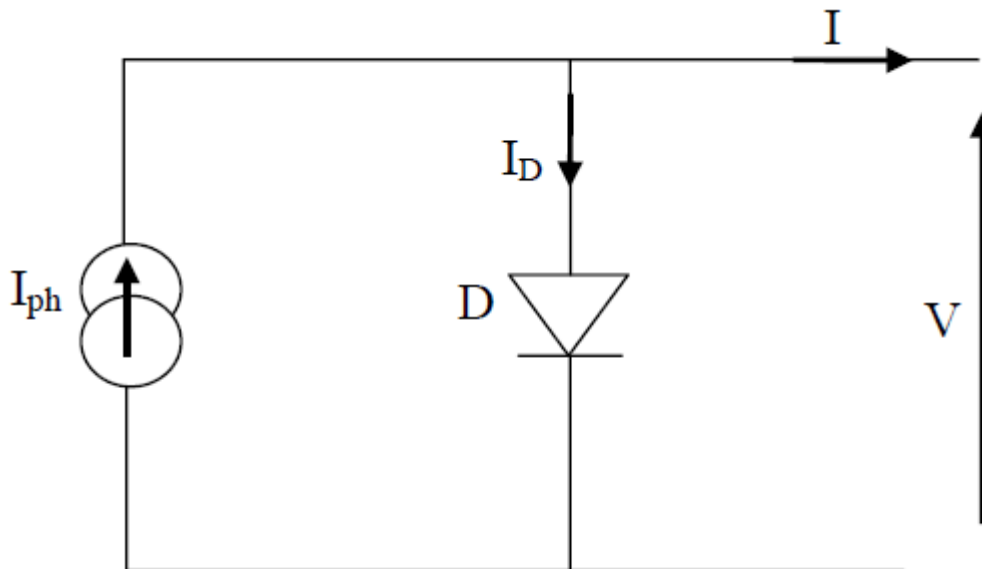


Figure2-34 : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (2-16)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{\Psi}{\Psi_{ref}} \quad (2-17)$$

ψ : L'éclairement absorbé par la cellule
 $\psi_{réf}$: L'éclairement de référence (1000w/m²)

$$I_d = I_0 (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (2-18)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$V_t = \frac{AKT}{q} \quad (2-19)$$

V_t : Tension thermique
 A : Facteur d'idéalité de la photopile
 K : Constant de Boltzmann (1,38 10⁻²³J/K)
 q : Charge de l'électron (1,6 10⁻¹⁹ C)

4-7-b. Modèle d'une cellule solaire réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la Figure (2-36). 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 à (R_s) [18,28,29], on néglige par ce que elle est très fiable par rapport a Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (I_{pv} - V_p) de la photopile. $pRsR$

La résistance série :

En pratique, la cellule PV, contient des résistances dans le matériel qui constitue des semi-conducteurs, et contacts, et autobus courant de rassemblement. Son effet devient très remarquable en module composé de plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance est multipliée par le nombre de cellules.

Résistance parallèle

Également, la résistance shunt, représente une partie des pertes liées à une petite fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque comparé à la résistance série. Qui devient seulement apparent quand un certain nombre de cellules sont reliées en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque [9]

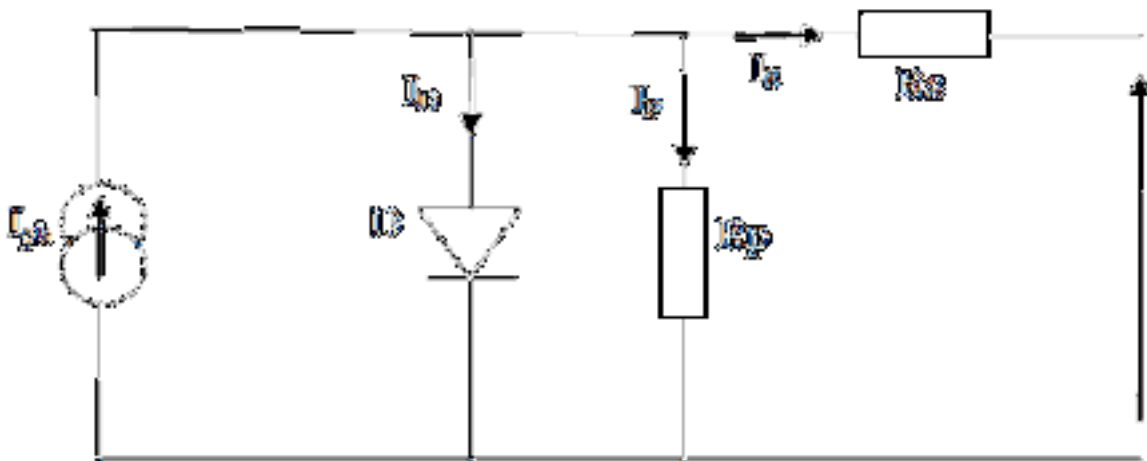


Figure 2-35: Schéma réelle d’une cellule photovoltaïque.

La loi de Kirchhoff nous permet d’écrire la relation suivante, le courant I fourni par la cellule (Figure (2-25)) est la différence entre le courant **I_{ph}** et le courant direct de la diode **I_d** [63]:

$$I = I_{ph} - I_d \tag{2-20}$$

Ou:

- [I est le courant fourni par la cellule
- [**I_{ph}** est le photo-courant, proportionnel à l’éclairement ψ , il correspond également au courant de court-circuit I_{cc} défini comme suit:

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) \tag{2-21}$$

ID représente le courant de polarisation d'une diode, il est donné par [29]:

$$ID=I(e^{\frac{V+R_s I}{V_t}} - 1) \quad (2-22)$$

Avec:

$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I_s} : \text{dépendant de la température} \\ \mathbf{T} \text{ et des paramètres électriques technologiques de la jonction.} \\ \mathbf{V_T} : \text{potentiel thermodynamique} \end{array} \right.$

V_T définit par :

$$V_t = \frac{AKT}{q} \quad (2-23)$$

T: température effective de la cellule en Kelvin.

A partir de relation (2-20), on obtient l'expression de la caractéristique $I(V)$ du modèle choisi :

$$I = I_c \left(\frac{\Psi}{1000} \right) - I_s (e^{\frac{V+R_s I}{V_t}} - 1) \quad (2-24)$$

- La tension à vide V_{co} : c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'il ne débite aucun courant.

- Le courant de court-circuit I_{cc} : c'est le courant généré par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée.

Conclusion :

Vue la nécessité de la caractérisation du modèle de la photopile, nous avons abordé l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$. Nous avons aussi présenté une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement en montrant les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

*Chapitre 3 : Différentes chaînes de
conversion photovoltaïque et leurs évolutions*

1- Introduction

Un convertisseur statique est un dispositif à base de semi-conducteur permettant à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue ou une tension alternative.

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc.

Ainsi, un système de conversion PV est constitué d'un GPV, d'un algorithme MPPT, d'un convertisseur **DC/DC (hacheur)** et d'un convertisseur **DC/AC (onduleur)**. Par conséquent, la modélisation du système de conversion photovoltaïque suppose la modélisation du générateur photovoltaïque (cf. Chapitre II), de l'ensemble hacheur système de commande, permettant d'extraire la puissance maximale, et de l'onduleur. [6]

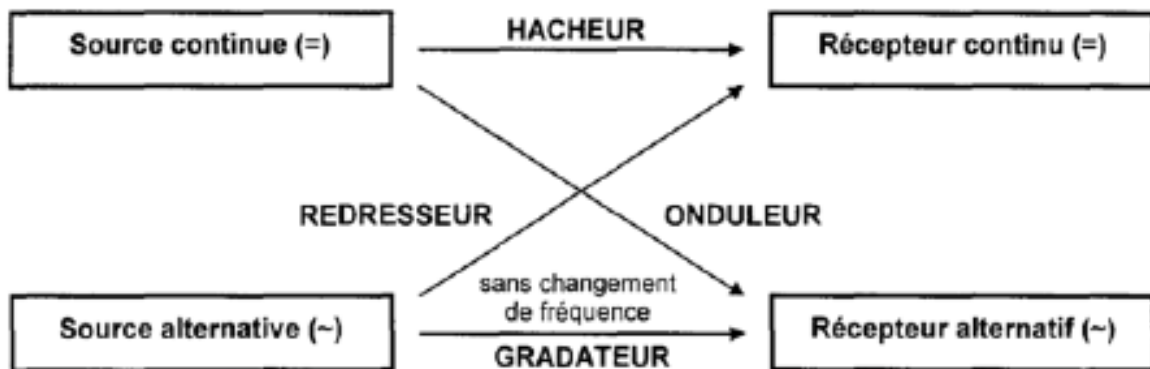


Figure 3-36 : Les différents types de convertisseurs statiques [5]

2-La commande (MPPT) :

2-1-Définition de commande MPPT :

Un MPPT (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs PV. La poursuite du point maximum de puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes PV.

Par définitions, une commande MPPT associé à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire

en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (Température et éclairage). [52]

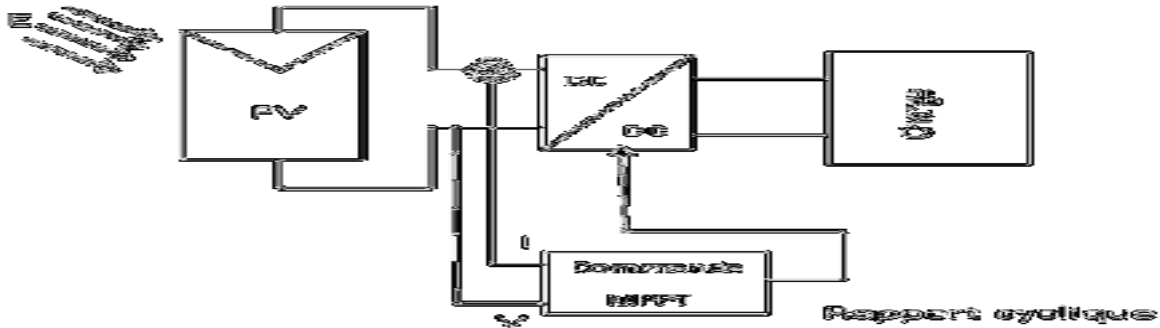


Figure 3-37 : Commande MPPT. [52]

2-2-Philosophie du MPPT :

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracker) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant tension des cellules. Nous avons vu dans la présentation des cellules la caractéristique d'une cellule, et l'évolution de cette caractéristique en fonction de l'éclairage ou de la température.

Le terme MPPT ou Maximum Power Point Tracking ou Poursuite du Point de Puissance Maximale. Il s'agit, par un moyen (à trouver), de venir se placer sur le point maximum de la caractéristique en puissance et de pouvoir y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre. Pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968, ces genres de contrôleurs forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP) induisant une amélioration du rendement du système. [5]

Le rendement d'un module MPPT est défini par [53] ; [54]:

$$\eta_{mppt} = \frac{\int_0^t P_m(t) \cdot dt}{\int_0^t P_{max}(t) \cdot dt} \quad (3-1)$$

Avec :

$\left\{ \begin{array}{l} P_m : \text{Puissance mesurée produite par le panneau PV sous le contrôle MPPT.} \\ P_{max} : \text{Puissance maximale qu'ils pouvaient produire sous la même température et le même ensoleillement} \end{array} \right.$

Le tableau qui suit donne les rendements des différents algorithmes :

P & O	INC	CV	PC
85	88	73	-
81.5	89.9	-	-
-	-	-	99.8

Tableau 3-1: Rendement du MPPT en (%). [11]

2-3-Quelques types d'algorithmes de tracking :

Dans la littérature plusieurs méthodes de Tracking ont été proposées, mais on cite les plus utilisées et qui coûtent moins chères [53]:

- algorithmes Perturber et Observer (P & O).
- algorithmes Accroissement de la Conductibilité (INC : Incremental Conductance).
- algorithmes Tension constante (CV : constant Voltage).
- algorithmes Capacité Parasite (PC : Parasite Capacitance).

2-3-1-Méthode « Perturbation et Observation » :

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires [58,59]. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes du panneau est augmentée du fait de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.

La Figure (3-39) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation

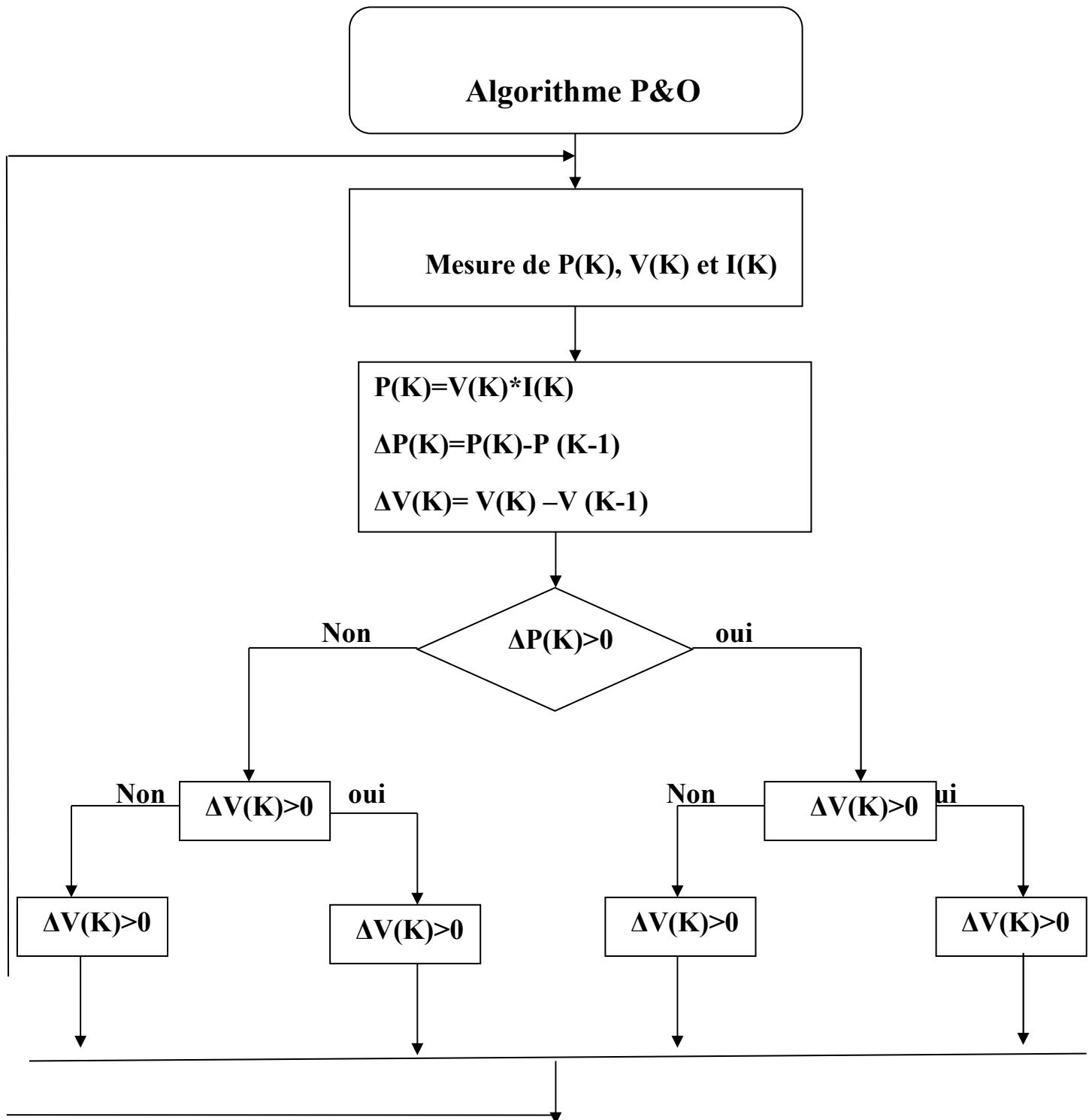


Figure 3-38 : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation". [3]

2-3-2- Algorithme de capacité parasite (P.C-MPPT) :

Cette méthode a été développée par Branbrilla et autres [56], elle est similaire à celle de l'incrément de conductance (INC-MPPT), la seule différence est que la capacité parasite soit incluse, en ajustant cette capacité à notre modèle on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} I = I_{ph} - I_0 \cdot [e^{\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{AKT}} - 1] + C_p \frac{dV}{dt} \quad (3-2) \\ I = F(V) + C_p \frac{dV}{dt} \quad (3-3) \end{array} \right.$$

L'équation (3-5) montre les deux composantes de I la première et une fonction de la tension $F(V)$ et la seconde est due au courant dans la tension parasite C_p .

En multipliant l'équation (3-5) par la tension V du panneau on obtient la puissance électrique

$$V \cdot I = F(V) + V \cdot C_p \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3-4)$$

Le dérivé de la puissance de sortie du PV par rapport à la tension V du PV au point de puissance maximale (MPP) sera obtenu et exprimé par [30].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(Iv)}{dV} = \frac{dF(V)}{dV} + \frac{F(v)}{V} + C_p \left(\frac{dV}{V} + \frac{d^2v}{V} \right) \quad (3-5)$$

Si (C_p) est égale à zéro, l'équation (3-7) se simplifie et devient celle utilisée pour l'algorithme d'accroissement de la conductibilité.

2-3-3-. L'incrément de conductance :

Cette méthode a été proposée par Hussein et al. [24] comme une alternative à la méthode P&O. Son principe est basé sur l'annulation de la dérivée de la puissance par rapport à la tension par les équations suivantes :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (3.6)$$

D'où :

$$-\frac{I_{pv}}{V_{pv}} = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (3.7)$$

Au MPP ces 2 membre doivent être égale, si le point de fonctionnement n'est pas sur le MPP alors une inégalité apparaît sur l'équation (3-7) qui indique

que la tension de fonctionnement est au dessus ou au dessous de la tension optimale comme le montre la figure ci-dessous :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

[A gauche de MPPT]

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

[A droite de MPPT]

Si le changement de la tension n'est pas nulle les équations peuvent être employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changés afin d'atteindre le MPP.

- Si $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est à gauche de MPP, donc il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP.

-Si $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est à droite de MPP, donc il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP.

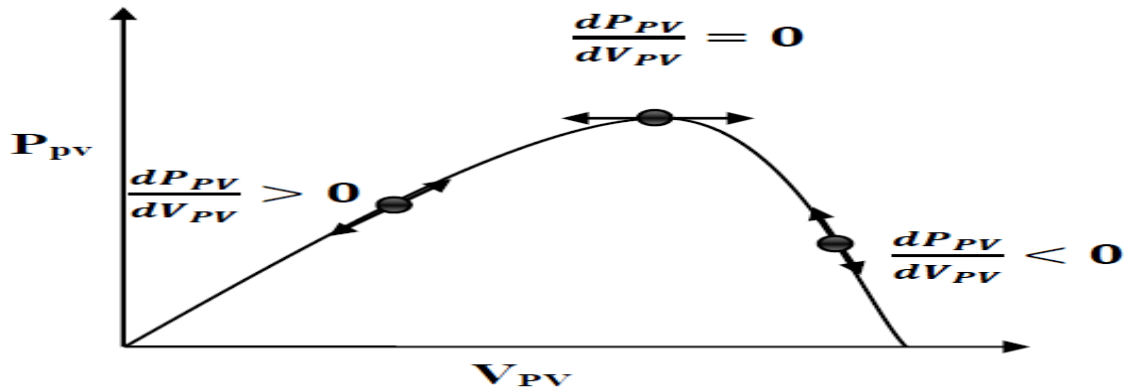


Figure 3-39 : Schéma de converge vers le PPM [36].

La Figure (3-40) présente le diagramme de l'algorithme de l'incrément de conductance

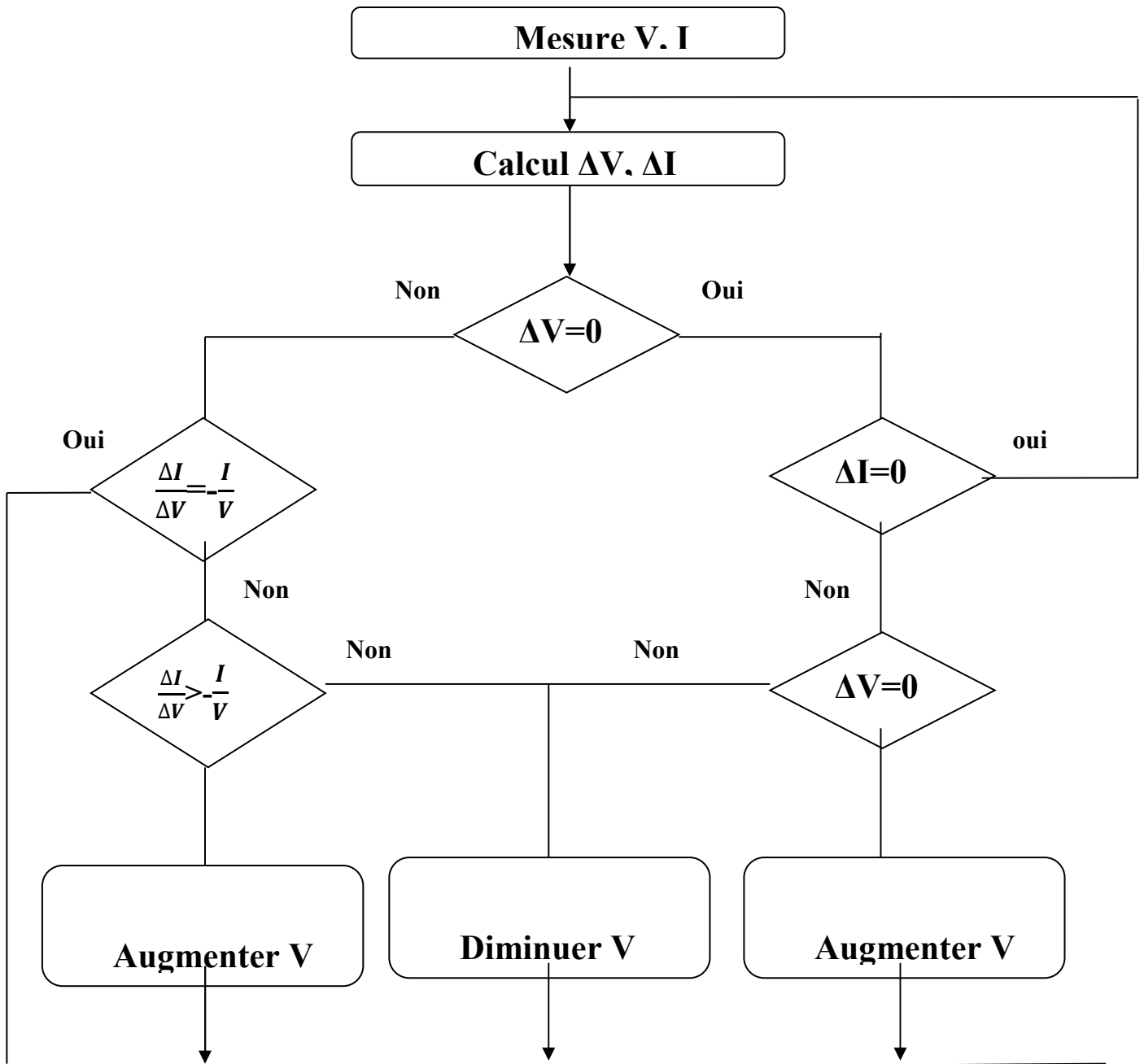


Figure 3-40: Algorithme de l'incrément de conductance [60].

3-Convertisseur DC/DC (Hacheur) :

3-1-Définition de hacheur :

Le hacheur est un convertisseur continu-continu statique utilisant essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnelles, des éléments passifs (inductances ; condensateurs), et des diodes. [68] et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Le signal de commande de fonctionnement du convertisseur DC/DC est élaboré en passant

par la commande MLI (Modulation Largeur d'Impulsion). Sa fréquence est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{T} \quad (3-8)$$

f : Fréquence qui est de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz ou même plus et correspondant à la période T.

L'hacheur possède deux propriétés essentielles :

- Il joue, en continu, le rôle qui jouait le transformateur en courant alternatif.
- Ila, tout comme le transformateur, un rendement très élevé.

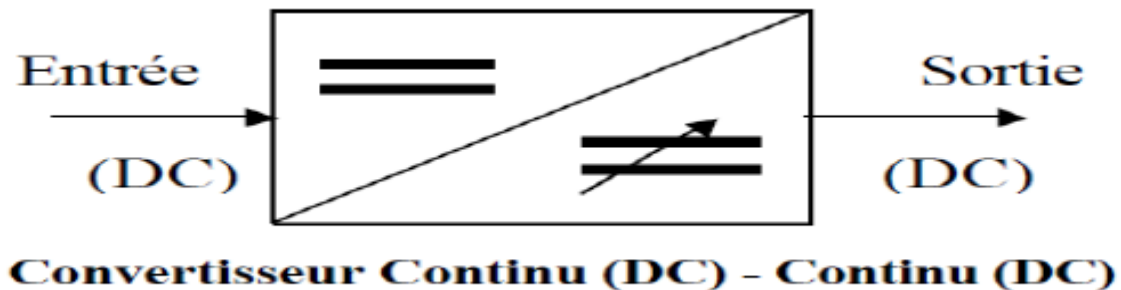


Figure 3-41 : Schéma de principe du hacheur. [5]

On distingue trois familles de convertisseurs statiques (hacheurs) :

- Hacheur abaisseur (série ou buck).**
- Hacheur élévateur (parallèle ou boost).**
- Hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).**

3-2-Types de Hacheur :

3-2-Hacheur (Parallèle-élévateur), type BOOST :

La tension de sortie peut être variée de la tension de la source d'alimentation jusqu'à plusieurs fois la valeur de celle-ci. La self L est utilisée pour lisser le courant d'entre.

L'interrupteur unidirectionnel T_p , met la source en court-circuit pendant la durée T_f ou le courant augmente, ainsi que le flux dans L. Quand l'interrupteur est ouvert, d'après la continuité du courant dans l'inductance L, le courant circule dans la charge, bien V_s soit supérieur. Pendant la durée de fermeture suivante, la bobine récupère l'énergie magnétique qui avait été perdue pendant

la circulation du courant dans la charge. Le montage de base est donné à la figure (3-42) [17].

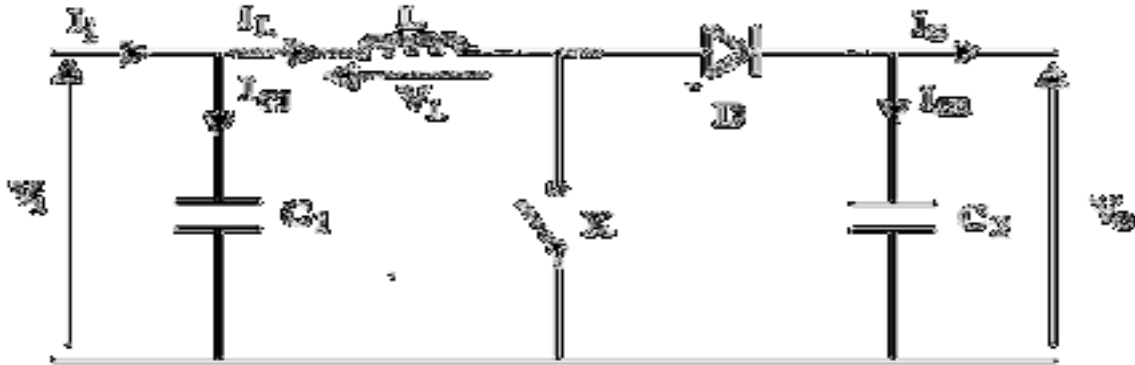


Figure 3-42 : Schéma électrique d'un hacheur boost

a) Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K :

✓ L'état passant :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée α , le courant dans l'inductance croît linéairement et la tension aux bornes de K est nulle. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

✓ L'état bloqué :

Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a $V_k = V_0$ alors En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_0 (1-\alpha) = V_i \quad (3-9)$$

En supposant que les composants sont tous parfaits, les formes d'ondes sont données dans la figure suivante :

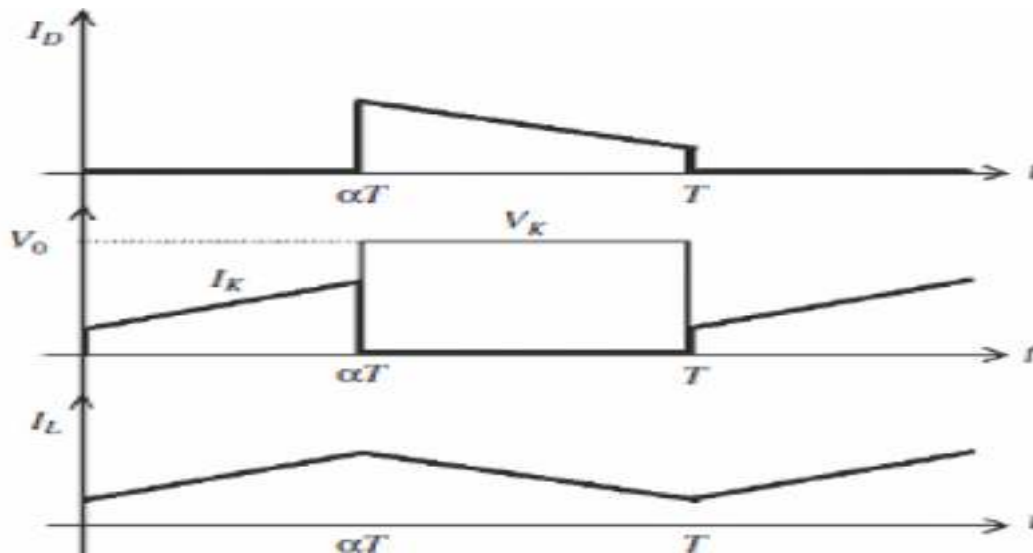


Figure 3-43 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost. [6]

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (3-44), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. entre $[0, \alpha T]$. [15]

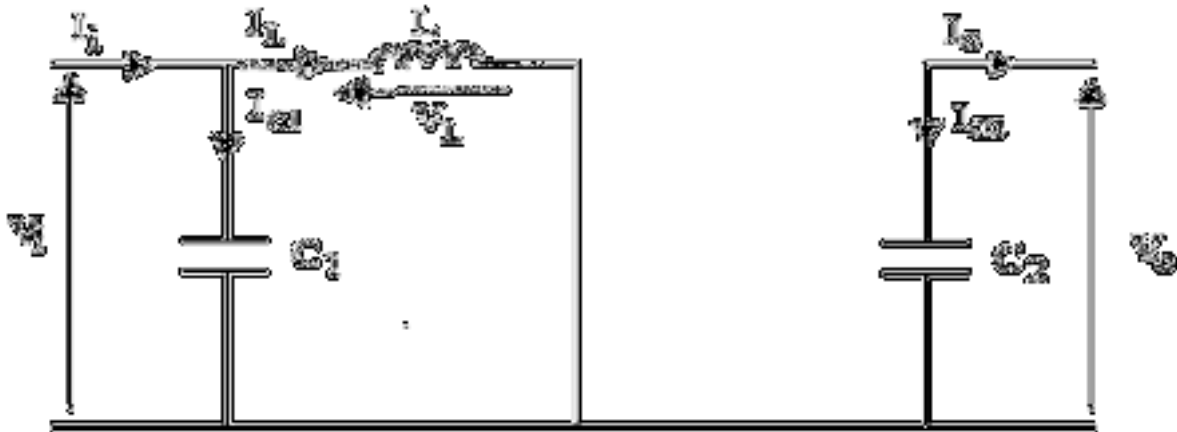


Figure 3-44 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé [15]

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \end{array} \right. \quad (3-10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c2}(t) = C2 \frac{dV_0(t)}{dt} = - I_0(t) \end{array} \right. \quad (3-11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{array} \right. \quad (3-12)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :



Figure 3-45 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert. [15]

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (3-13) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (3-14) \\ V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (3-15) \end{array} \right.$$

3-2-Technique de commande d'un hacheur :

3-2- Circuit de commande du hacheur par MLI :

Le circuit de commande du hacheur étudié est constitué des éléments principaux nécessaire pour assurer la commande de l'interrupteur, la commande utilisée de type MLI intersective.

Le but du circuit de commande est double :

❖ **Lancer les ordres de commutation de GTO :**

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs sont réalisées à l'aide de la commande classique MLI qui consiste à comparer le signal sinusoïdal de commande à un signal triangulaire à fréquence élevée que la fréquence du signal modulant, pour une bonne performance de la régulation

$$f_p > 20 * f.$$

Il a été empiriquement montré que les **kp** et **ki** calculés par les équations (3.11) et (3.12) donnent une bonne performance dynamique indifféremment sous des conditions transitoires ou permanentes [64,65].

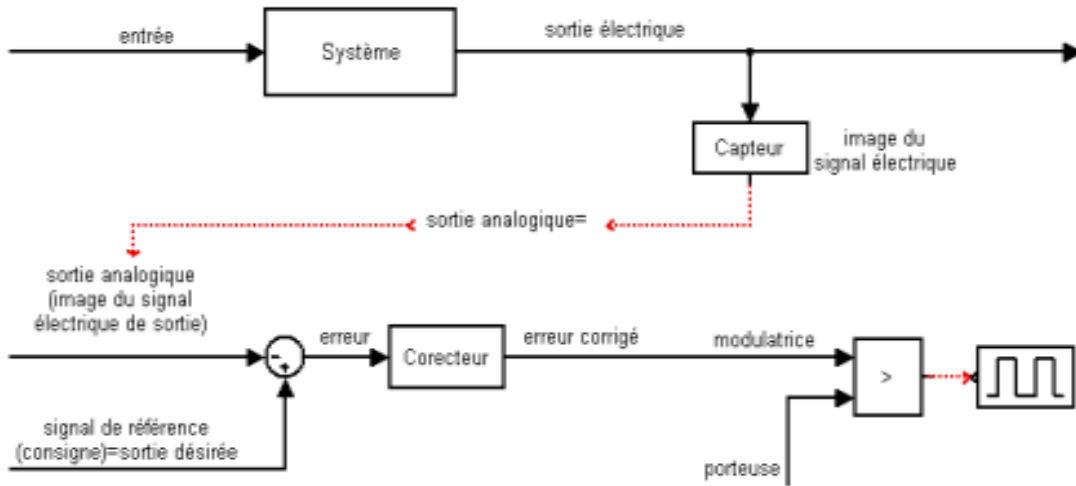


Figure 3-46 : Signal de commande de l'interrupteur T [65]

❖ Réguler la tension Vds de sortie du hacheur

Elle est donc une technique utilisée pour la conversion de l'énergie électrique. Sous MATLAB/SIMULINK, le modèle du circuit de commande est réalisé comme indique dans la Figure (3-47) :

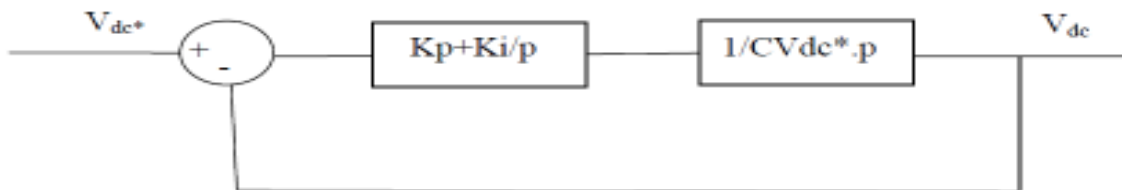


Figure 3-47: Boucle de régulation de tension. [6]

Détermination des paramètres du hacheur

$$\left\{ \begin{array}{l} L \geq \frac{Vs}{4f\Delta Is} \end{array} \right. \quad (3-16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C \geq \frac{Vs\alpha \max}{Rf\Delta Vs} \end{array} \right. \quad (3-17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R \approx \frac{Vs}{Is} \approx \frac{Vpv}{Ipv(1-\alpha)^2} \end{array} \right. \quad (3-18)$$

Détermination de k_i et k_p :

♣ La fonction de transfert en boucle ouverte **FTBO** est donnée par:

$$FTBO(p) = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{1}{\frac{CV_{dc}}{p}} \quad (3-19)$$

Par conséquent:

$$p + \frac{K_i}{K_p} = p \quad (3-20)$$

Et la **FTBO** devient:

$$FTBO(p) = \frac{K_p}{pCV_{dc}} \quad (3-21)$$

♣ En boucle fermée, la fonction de transfert **FTBF** est définie par:

$$FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)} \quad (3-22)$$

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (3-23)$$

Alors:

$$K_p = \frac{CV_{dc}}{\tau_{rep}} \quad (3-24)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_{syst}} \quad (3-25)$$

Avec :

$$\tau_{rep} < \tau_{syst} = R.C \quad (3-26)$$

On a utilisé l'équation suivante et implanté sur Simulink :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -(1 - u)V_s + VE \\ C \frac{dv_s}{dt} = (1 - u)i_L + \frac{V_s}{R} \end{cases}$$

4-Convertisseur DC/AC (Onduleur) :

4-1-Définition d'onduleur :

L'onduleur est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et pour permettre un contrôle parfait du fonctionnement. [6]

La tension de sortie d'un onduleur doit être plus proche d'une sinusoïdale (l'allure sinusoïdale) c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée. [70]

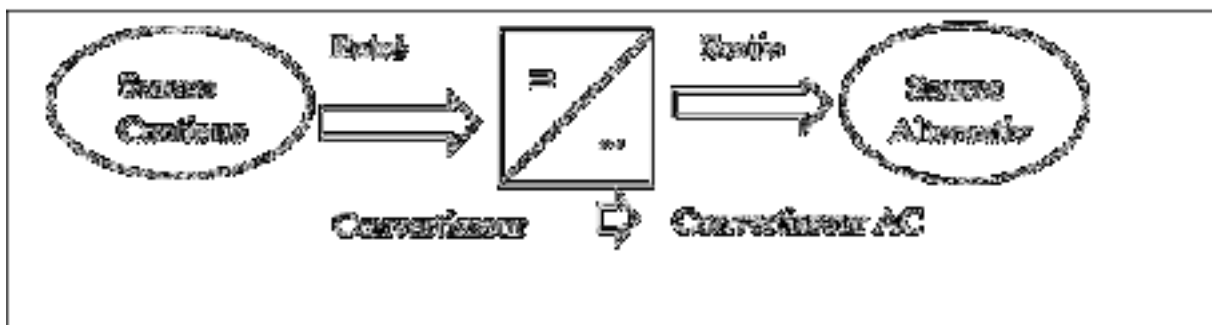


Figure 3-48 : Schéma de principe de la conversion continu- Alternative (DC-AC) [6]

On distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tensions, alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courants, alimentés par une source de courant continue [18].

4-2-Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure (3-50).

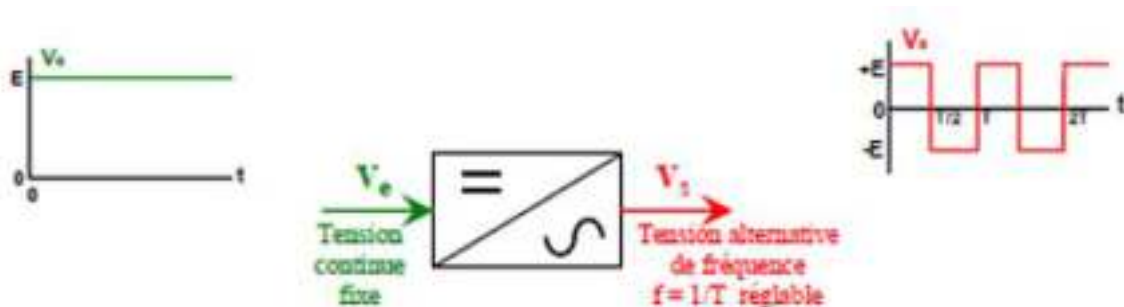


Figure 3-49 : Principe de fonctionnement d'un onduleur

4.3. Structure de l'onduleur triphasé

On considère le schéma de principe de l'onduleur représenté par la Figure (3-51). On distingue, d'une part les tensions de branches u_{10} , u_{20} , u_{30} mesurées par rapport à la borne (-) de la tension U_E et d'autre part, les tensions de phases u_1 , u_2 , u_3 mesurées par rapport à un neutre flottant N. On suppose la charge triphasée symétrique mais d'une manière générale, étant donné que l'onduleur fonctionne de manière autonome, la configuration de la charge est un problème auxiliaire [69].

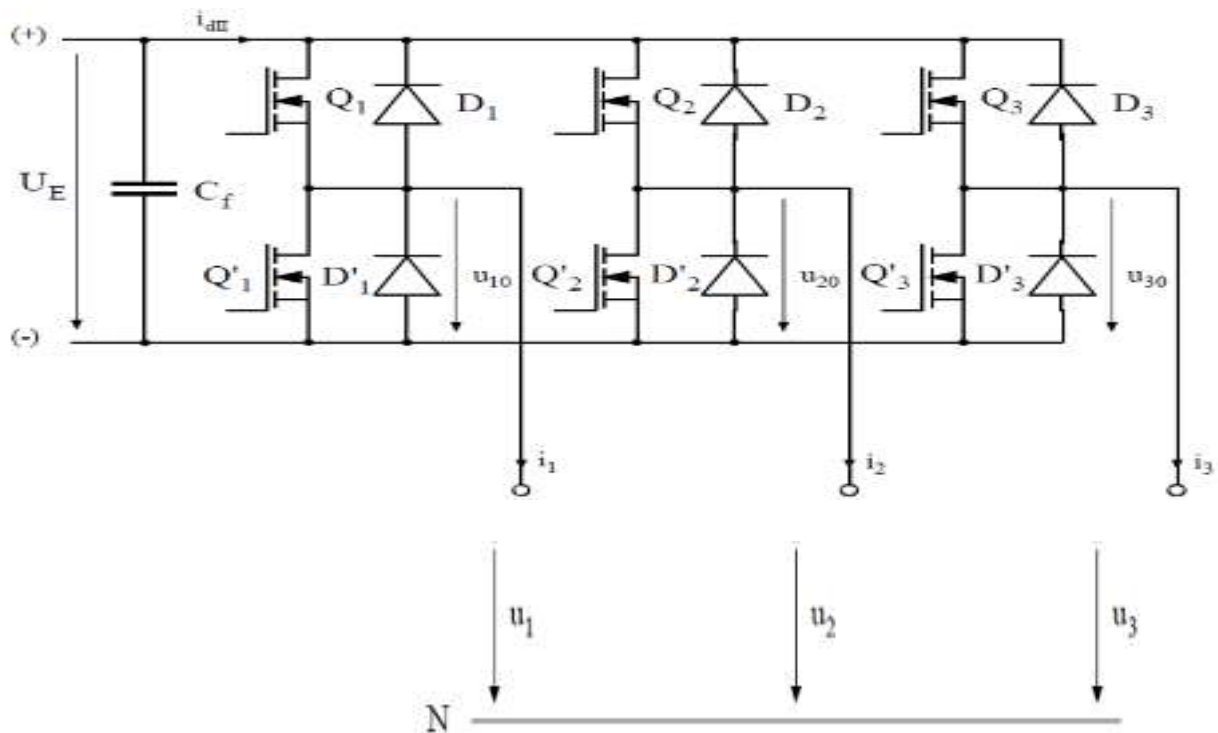


Figure 3-50 : Structure d'un onduleur triphasée [69].

Les tensions de branches u_{k0} (avec $k=1, 2$ et 3) peuvent être imposées par une commande appropriée des commutateurs électroniques (contacteurs statiques). On peut alors déterminer les tensions u_{k0} à la sortie de l'onduleur.

On a:

$$\begin{cases} -u_{10}+u_1-u_2+u_{20}=0 \\ -u_{10}+u_1-u_3+u_{30}=0 \end{cases} \quad (3-27)$$

Dans une charge triphasée symétrique (sans composante homopolaire) avec point neutre flottant, on a :

$$\begin{cases} u_1+u_2+u_3=0 \\ i_1+i_2+i_3=0 \end{cases} \quad (3-28)$$

À l'aide des relations (3-34) et (3-35) on obtient :

$$\begin{cases} u_1=\frac{1}{3}(2u_{10}-u_{20}-u_{30}) & (3-29) \\ u_2=\frac{1}{3}(2u_{20}-u_{10}-u_{30}) & (3-30) \\ u_3=\frac{1}{3}(2u_{30}-u_{10}-u_{20}) & (3-31) \end{cases}$$

4-4-Stratégie des commandes des convertisseurs statique :

Il existe différents types de systèmes onduleurs utilisant différents méthodes de commande, de commutation et de modulation. La commande des onduleurs peuvent être classés de plusieurs manières.

4-4-1- Stratégie de modulation de largeur d'impulsion :

La Modulation en Largeur d'Impulsion **MLI** (en anglo-saxon Pulse Width Modulation **PWM**) est une technique de pilotage pour les convertisseurs statiques servant d'interface entre une charge (machine électrique.....) et son dispositif d'alimentation (Onduleur triphasé,.....)

La **MLI** consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable.

Le principe de base de la **MLI** est le découpage d'une pleine onde rectangulaire .Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. [69]

Ces dernières années, différents techniques de **MLI** ont été développées. Dans ce chapitre on base sur la stratégie de commande **MLI Sinus-Triangle**.

4-4-2- Stratégie de MLI Sinus-Triangle:

La technologie la plus répandue pour la reproduction d'un signal **MLI** est de comparer un signal triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelé **porteuse (Vp)** à un signal de référence d'amplitude variable et de fréquence f appelé **modulatrice (V ref)** et qui constitue l'énergie du signal

recueilli à la sortie de l'onduleur .L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. [69]

La technique de la **MLI** se caractérisé par deux grandeurs :

- ✓ Le coefficient de réglage appelé taux de modulation **r** qui est l'amplitude de l'onde modulante (**V ref**) à celle de la valeur crête de la porteuse (**Vp**) il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{V\ ref}}{\mathbf{V\ p}}$$

- ✓ L'indice de modulation **m**, il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde modulante :

$$\mathbf{m} = \frac{\mathbf{f\ p}}{\mathbf{f\ ref}}$$

- ✓ La fréquence **fp** du signal de porteuse triangulaire est généralement considérablement supérieure à la fréquence **f ref** du signal de modulation.
- ✓ Le rapport **m** est un paramètre très important de l'efficacité de la modulation.

Le principe de cette stratégie à deux niveaux peut être résumé par l'algorithme suivant :

Avec :

- Vref** désigne la référence
- Vp** la porteuse
- S(t)** signal **MLI** à deux niveaux résultant de la comparaison.

Dans les onduleurs triphasés, la commande **MLI Sinus-Triangle** est basée sur la comparaison de trois ondes modulantes (trois signaux sinusoïdaux de référence égaux et déphasés entre eux de 120°) avec un signal porteur triangulaire. [69]

La valeur efficace d'harmonique fondamentale de tension composée **Vab** dans la région linéaire de l'onduleur ($0 \leq r \leq 1$) est donnée par :

$$\mathbf{Vab} = \mathbf{r} \frac{\sqrt{3}E}{2\sqrt{2}}$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un dispositif de recherche de la puissance maximale en choisissant **la méthode P&O (perturbation and observation)** pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau **PV (MPPT)**. Nous avons aussi exposé les différents types de convertisseurs entre les générateurs PV et le réseau (**DC/DC et DC/AC**), ainsi que les stratégies de commande **MLI [6]** .

Chapitre 04 : Moteur A synchrone

1. Introduction

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellent fiabilité.

2. Machine asynchrone**2-1-Définition de la machine asynchrone :**

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique et un dispositif mécanique.

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur », dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.



Figure 4-51 : vue d'une machine asynchrone. [2]

2-2- Différentes parties de la machine :

La machine asynchrone se comporte comme un transformateur à couplage par champ tournant (qui est créé par les courants qui traversent les bobinages du stator) et à secondaire en court-circuit. Donc il porte un circuit magnétique (le rotor en mouvement par rapport au stator). [67]

Le stator (la partie fixe)

Il se compose d'une carcasse en acier au silicium laminé à chaud reformant un empilement de tôles ferromagnétiques identiques, fines et découpées qui constituent un cylindre vide pour réduire les pertes créées par le courant de Foucault. Ces tôles sont percées de trous à leurs périphériques intérieurs. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquels on loge un bobinage triphasé. Figure 4- 52



Figure 4-52: stator d'une machine asynchrone. [6]

Le rotor (la partie mobile)

Il se comporte d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer court de l'ordre de 0.4 à 2 mm en général. Il existe deux types de rotors :

- le rotor à cage d'écureuil.
- le rotor bobiné.

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches; Ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent et qui permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre.

Ce type de réalisation ne permet pas véritablement d'obtenir une distribution sinusoïdale de courant à sa surface, il est par contre extrêmement robuste, peu coûteux, donc très répandu.



Figure 4-53: rotor d'une machine asynchrone.

Il y a deux types de rotor

a) Rotor bobiné (a bague) :

C'est un rotor qui comporte dans ses encoches un enroulement identique à celui du stator.

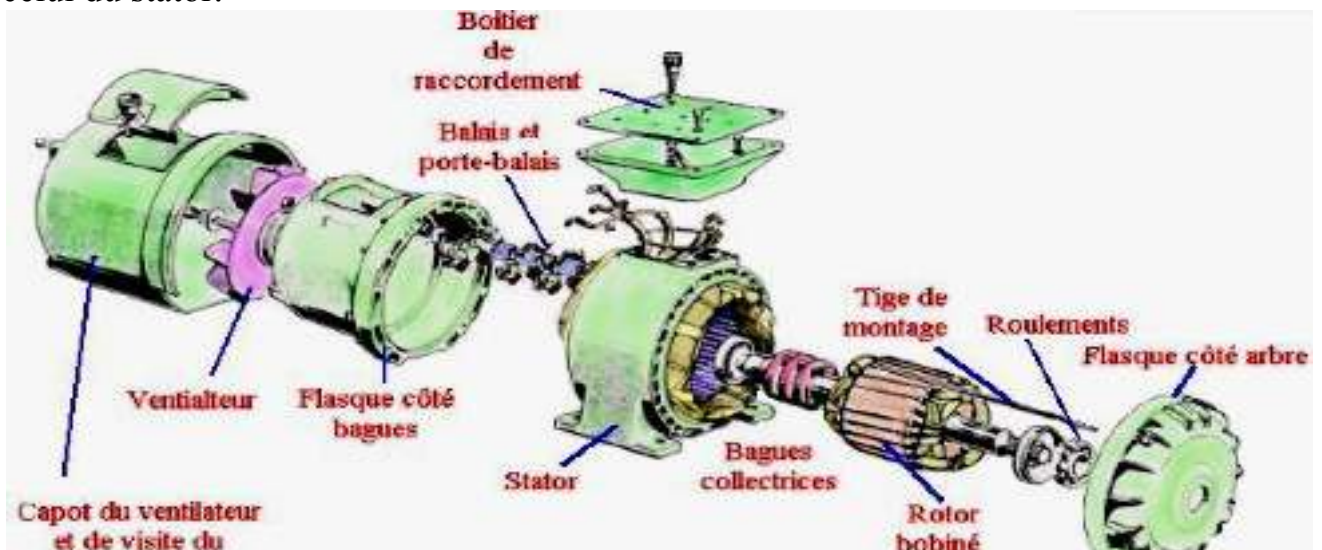


Figure 4-54 : Moteur asynchrone triphasé rotor bobiné [9].

b) Rotor a cage :

L'enroulement triphasé est remplacé par des barres conductrices en cuivre ou en aluminium réunies à leurs extrémités par des anneaux conducteurs forment ainsi une cage d'écureuil.

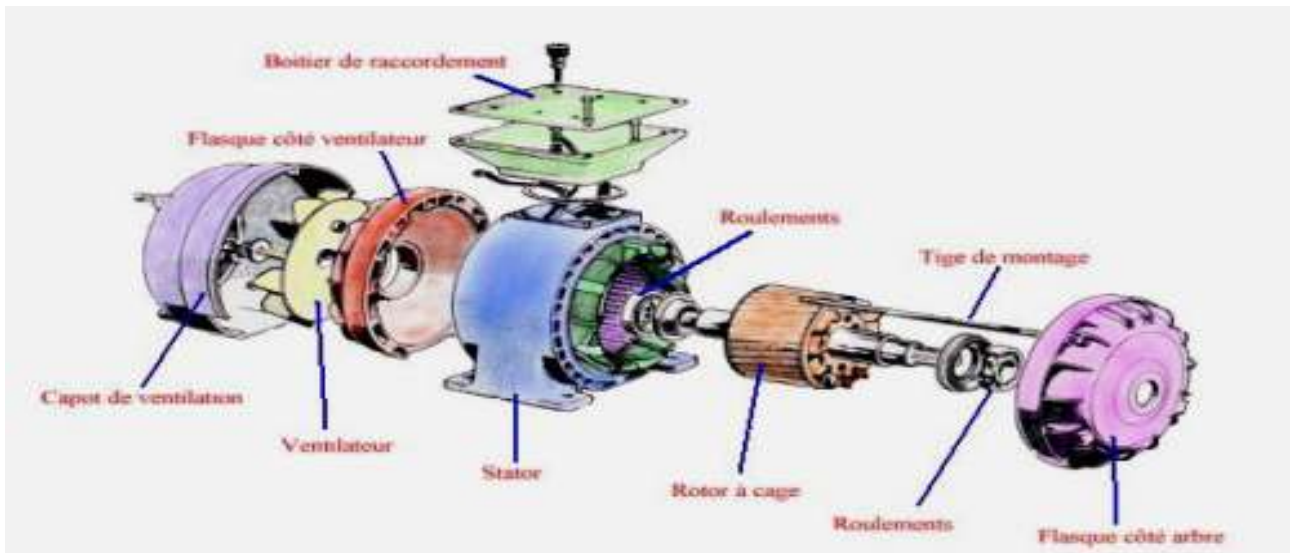


Figure 4-55 : Moteur asynchrone triphasé rotor à cage [9].

2-3-Principe de fonctionnement :

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator ce qu'il va en résulter (le théorème de Ferrari) la création du champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statoriques. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique, les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statoriques est appelée vitesse de glissement. [2]

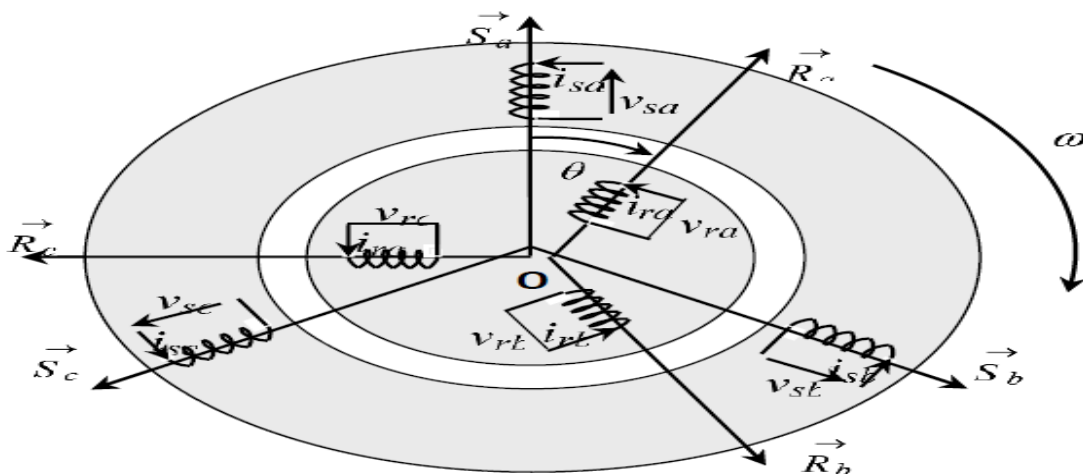


Figure 4-56: Représentation schématique d'une machine [26]

2-4-Modélisation de la machine asynchrone :

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué sur la figure (4-57) Les phases rotoriques sont courtés circuits sur elles mêmes. θ Est l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et la phase a rotorique.

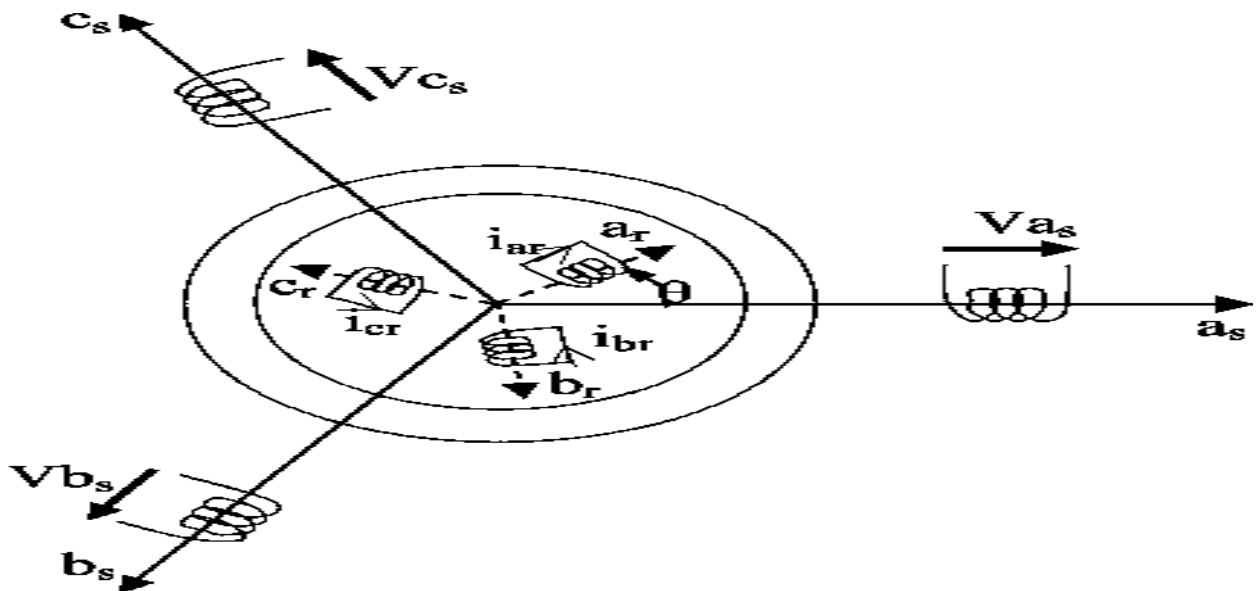


Figure 4-57: Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

3. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, alors il est nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes : [72]

- ✓ on suppose les circuits magnétiques non saturés et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont donc linéaires.
- ✓ On considère une densité uniforme de courant dans les sections des conducteurs élémentaires. L'effet de peau est négligé.

- ✓ La force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- ✓ L'entrefer uniforme (effets d'encoches négligés).

Les deux dernière hypothèses citées ci dessus conduisent à des expressions très simples des inductances de la machine asynchrone. [73, 74, 75]

4. Equations de la machine asynchrone en régime quelconque

4. 1. Equations des tensions

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt}.$$

En tenant compte de la représentation de la Figure(4.1) et des hypothèses simplificatrices citées auparavant, les équations des tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} \phi_s. \\ V_r = R_r I_r + \frac{d}{dt} \phi_r. \end{cases} \quad (4. 1)$$

L'indice *s* représente respectivement les grandeurs relatives au stator et au rotor.

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [I_S] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [\phi_S] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

4.2. Equations des flux

Les flux totaux de la machine sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \phi_s = (L_{ss})(I_s) + (M_{sr})(I_r) \\ \phi_r = (L_{rr})(I_r) + (M_{rs})(I_s) \end{cases} \quad (4.2)$$

Les quatre matrices d'inductances sont données par les relations suivantes :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Les différentes inductances utilisées dans ces relations désignent :

- ✓ L_s : inductance propre d'une phase statorique.
- ✓ L_r : inductance propre d'une phase rotorique.
- ✓ M_s : inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
- ✓ M_r : inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

- ✓ M : inductance entre deux phases statoriques et rotoriques lorsque ces deux coïncident.
- ✓ θ : écart angulaire entre stator et rotor.

En remplaçant l'équation (I.2) dans l'équation (I.1), et en désignant par \mathbf{P} l'opérateur $\frac{d}{dt}$,

Les équations des tensions au stator et au rotor s'écrivent [2] :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + p \{ [L_{ss}][I_s] \} + p \{ [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] &= [R_r][I_r] + p \{ [L_{rr}][I_r] \} + p \{ [M_{rs}][I_s] \} \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.3. Equations mécaniques de la machine asynchrone

L'expression du couple électromagnétique peut être obtenue à partir de la dérivée de la co énergie par rapport à l'angle θ [3].

Le couple électromagnétique développé s'écrit :

$$C_e = p [I_s]^t \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} [I_r]. \quad (4.5)$$

L'expression du couple électromagnétique et celle du mouvement pour une machine asynchrone multipolaire s'écrit comme suite :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \\ C_{em} &= p (\phi_{qr} i_{dr} - \phi_{dr} i_{qr}) \\ C_{em} &= pM (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ C_{em} &= \frac{pM}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \end{aligned}$$

L'équation mécanique de la machine est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - K_f \Omega. \quad (4.6)$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad d\Omega = \frac{1}{p} \frac{d\omega}{dt}$$

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

Ω : Vitesse mécanique du moteur.

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple de charge.

K_f : Coefficient de frottement visqueux.

La résolution analytique de ces équations dans ce repère est très difficile, car le system d'équation est à coefficients variables en fonction de l'angle θ .

5. Transformation de Park

Lors de l'élaboration des équations électriques de la machine asynchrone, on s'est rendu compte que les grandeurs statoriques sont liées aux grandeurs rotoriques à travers l'angle θ , alors on a procédé a simplifier ces équations en appliquant des transformations orthogonales.

La transformation de Park est une transformation triphasée-biphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq .Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe au repère abc , par contre le repère dq est mobile [4].

Cette transformation a pour effet de rendre les inductances mutuelles du modèle de la machine indépendante de la rotation, c'est à dire de l'angle θ . ,

La transformation triphasé-biphasé est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}; C_{32} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}.$$

$k = \sqrt{\frac{2}{3}}$: utilisé pour les transformations conservant la puissance (**concordai**).

$k = \frac{2}{3}$: utilisé pour les transformations conservant l'amplitude (**Clark**).

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

La transformation de *PARK* est définie par sa matrice de transformation $[P(\theta_e)]$. Elle s'exprime comme suit:

$$[P(\theta_e)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Le changement de variables est défini par l'expression suivante :

$$[X_{d,q,0}] = [P][X_{a,b,c}] \quad (4.8)$$

Pour le stator : $\theta_e = \theta_s$ et pour le rotor : $\theta_e = \theta_r$.

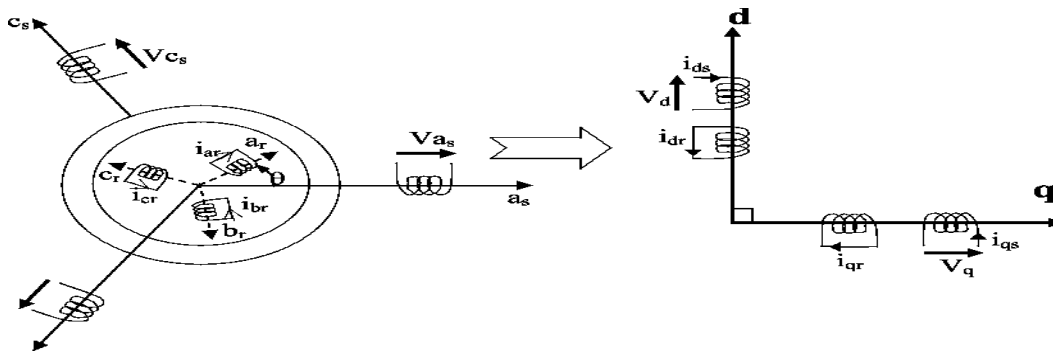


Figure 5-58 : Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.

6. Equations de la machine asynchrone dans le repère de Park

On applique la transformation de Park aux courants, tensions et flux. Un changement de variables fait intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q.

Si l'on note par θ_s l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques et par θ_r , celui des grandeurs rotoriques, il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final.

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celles des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation suivante :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (4.9)$$

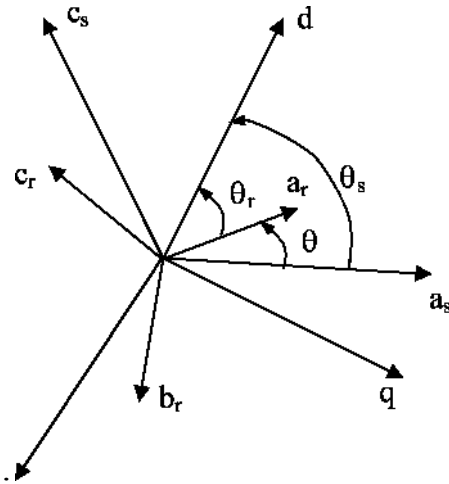


Figure 5-59 : Repérage angulaire des systèmes d'axe.

6. 1. Equations de tension

Dans le repère de Park tournant à la vitesse ω_a par rapport au stator, les équations de tensions s'écrivent après l'application de la transformation de Park aux grandeurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_a \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} - \omega_a \phi_{ds} \end{cases} \quad (4. 10)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (4- 11)$$

ω_a et ω_m désignent respectivement la vitesse du repère dq et la vitesse du rotor par rapport au stator.

6.2. Equations du flux

Les différentes expressions des flux statoriques et rotoriques s'écrivent dans le modèle de Park sous la forme qui suit :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (4.12)$$

L_s , L_r et L_m sont des inductances cycliques et ont pour expression :

$L_s = I_s - m_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r - m_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_m = \frac{3}{2} m_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

7. Choix de référentiel

Trois types de référentiel sont intéressants en pratique [2]:

- ✓ Référentielle au stator.
- ✓ Référentielle au rotor.
- ✓ Référentiel lié au champ tournant.

7. 1. Référentiel lié au stator: est le mieux adopté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

$$\frac{d}{dt} \theta_s = 0 \quad \frac{d}{dt} \theta_r = -\omega_m$$

7. 2. Référentiel lié au rotor : dans ce repère $\theta_s = \theta$, donc :

$$\frac{d}{dt} \theta_r = 0 \quad \frac{d}{dt} \theta_s = \omega_m$$

7. 3. Référentiel lié au champ tournant : dans ce cas la vitesse ω_s est la vitesse du champ tournant, les équations relatives au modèle de la machine asynchrone dans ce repère sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (4.13)$$

Avec :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \Phi_{dm} = L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \Phi_{qm} = L_m (i_{qs} + i_{qr}) \end{cases} \quad (4.14)$$

8. Mise sous forme d'équation d'état

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone sous forme d'équation d'état, et en manipulant les équations électriques (I.13) et (I.14), on aboutit à la forme d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = F_x (X, U, t) \\ Y = F_y (X, U, t) \end{cases}$$

Avec :

X : vecteur d'état

U : vecteur d'entrée

Y : vecteur de sortie

On peut choisir indifféremment les composantes du vecteur « X ». Tel que :

$$X = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{ds}, i_{qs}, \Omega)^t$$

On aura ainsi le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = AX_1 + BU \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_e - C_r - K_f \Omega) \end{cases}$$

Avec :

$$X_1 = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{ds}, i_{qs})^t \quad ; \quad \Omega = \frac{\omega}{p}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & -R_s & 0 \\ -\omega_s & 0 & 0 & -R_s \\ \frac{1}{\sigma T_r L_s} & \frac{\omega}{\sigma L_s} & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) & (\omega_s - \omega) \\ -\frac{\omega}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma T_r L_s} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1}{T_s} \right) \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix} ; U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}.$$

- $T_r = L_r / R_r$: Constante de temps rotorique.
- $T_s = L_s / R_s$: Constante de temps statotrique.
- $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$: Coefficient de fuites totales.

Conclusion :

Le moteur asynchrone nécessite une commande pour régler le bus continu pour cela on a utilisé la commande MLI après avoir implanté les programmes sur MATLAB Simulink.

Chapitre 05 : Simulation et Résultats

Introduction

Ce chapitre concerne la simulation du SPH composé d'un GPV qui alimente un moteur asynchrone MAS, par le biais d'un hacheur commandé par la méthode P&O au but d'atteindre le point maximum de la puissance quel que soit l'ensoleillement et la température. Un onduleur à base d'un transistor type MOSFET a commandé par MLI sinus-triangle.

La simulation de ce système a été faite à base du logiciel MATLAB SIMULINK.

L'objectif de ce travail est de voir la performance du GVP et du système PV lors de la variation de l'ensoleillement et de la température. Pour cela, on a fait la simulation de chaque élément séparément afin d'assurer le bon fonctionnement du système PV.

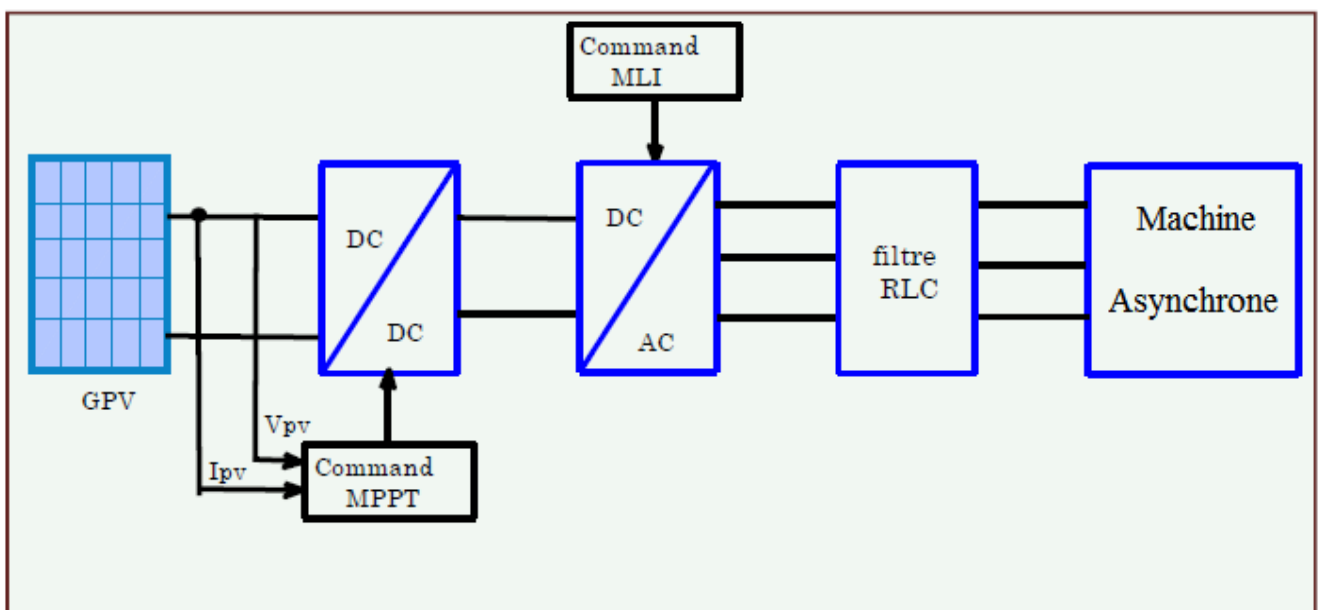


Figure 5-60: Chaîne élémentaire de conversion Photovoltaïque

2- Simulation de la Machine Asynchrone :

Les paramètres de la machine asynchrone que nous avons utilisés dans la simulation sont illustrés ci-dessous :

Puissance nominale	1.5KW
Tension nominale	220V
Rendement nominal	0.78
Facteur de puissance nominal	0.8
Fréquence nominale	50 Hz
Courant nominal	6.31A
Résistance statorique	4.85 Ω
Résistance rotorique	3.805 Ω
Inductance cyclique statorique	0.274H
Inductance cyclique rotorique	0.274H
Inductance mutuelle	0.258H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	0.031 Kg/m ²
Coefficient de frottement	0.008N.m.s/rad

Tableau (5.1) : Paramètres de la machine asynchrone

Voici le schéma bloc du moteur asynchrone en utilisant la transformation de Park:

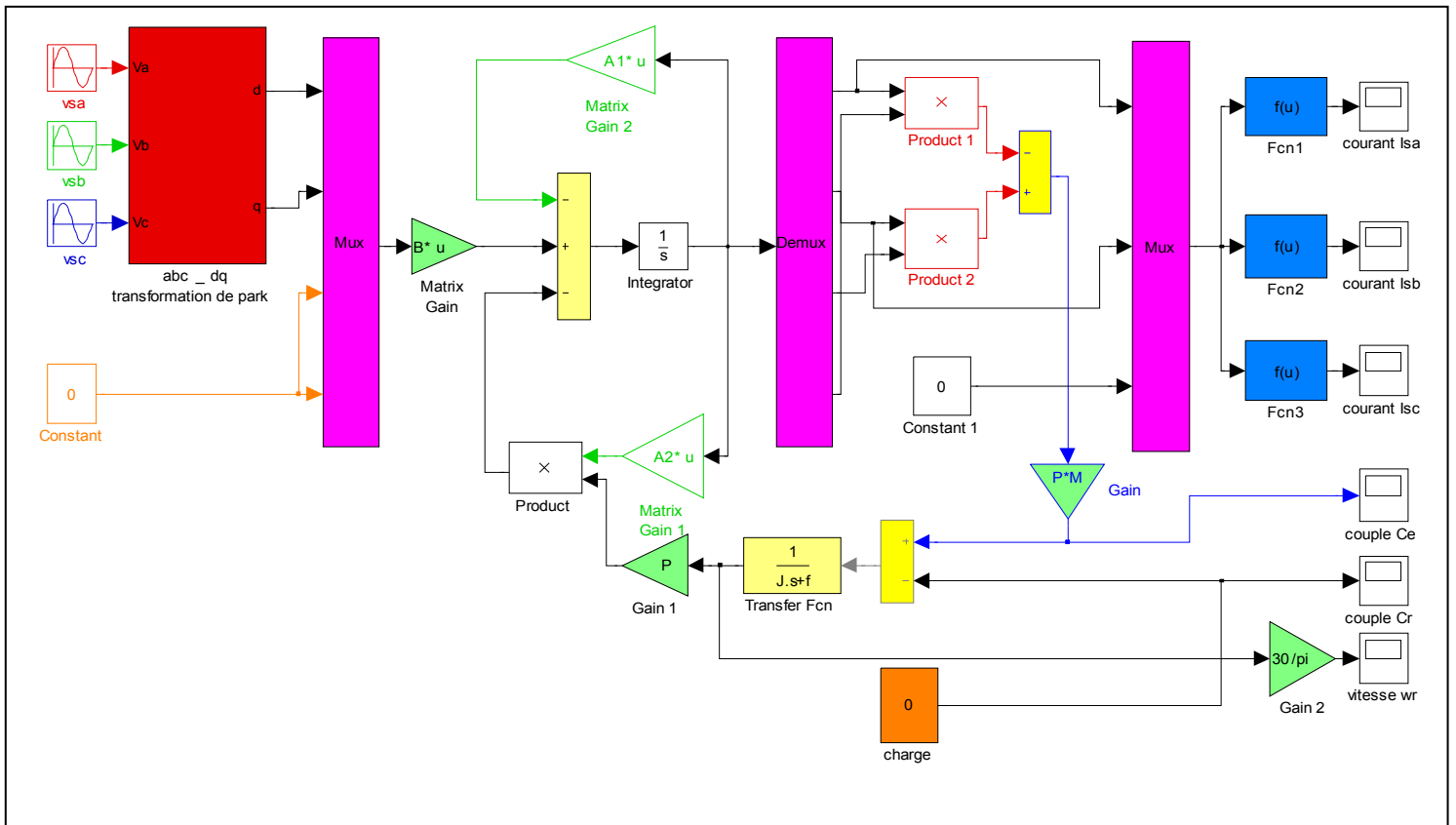


Figure 5-61 : Schéma bloc Simulink de la machine asynchrone

2.1. Fonctionnement à vide (Cr=0 N.m)

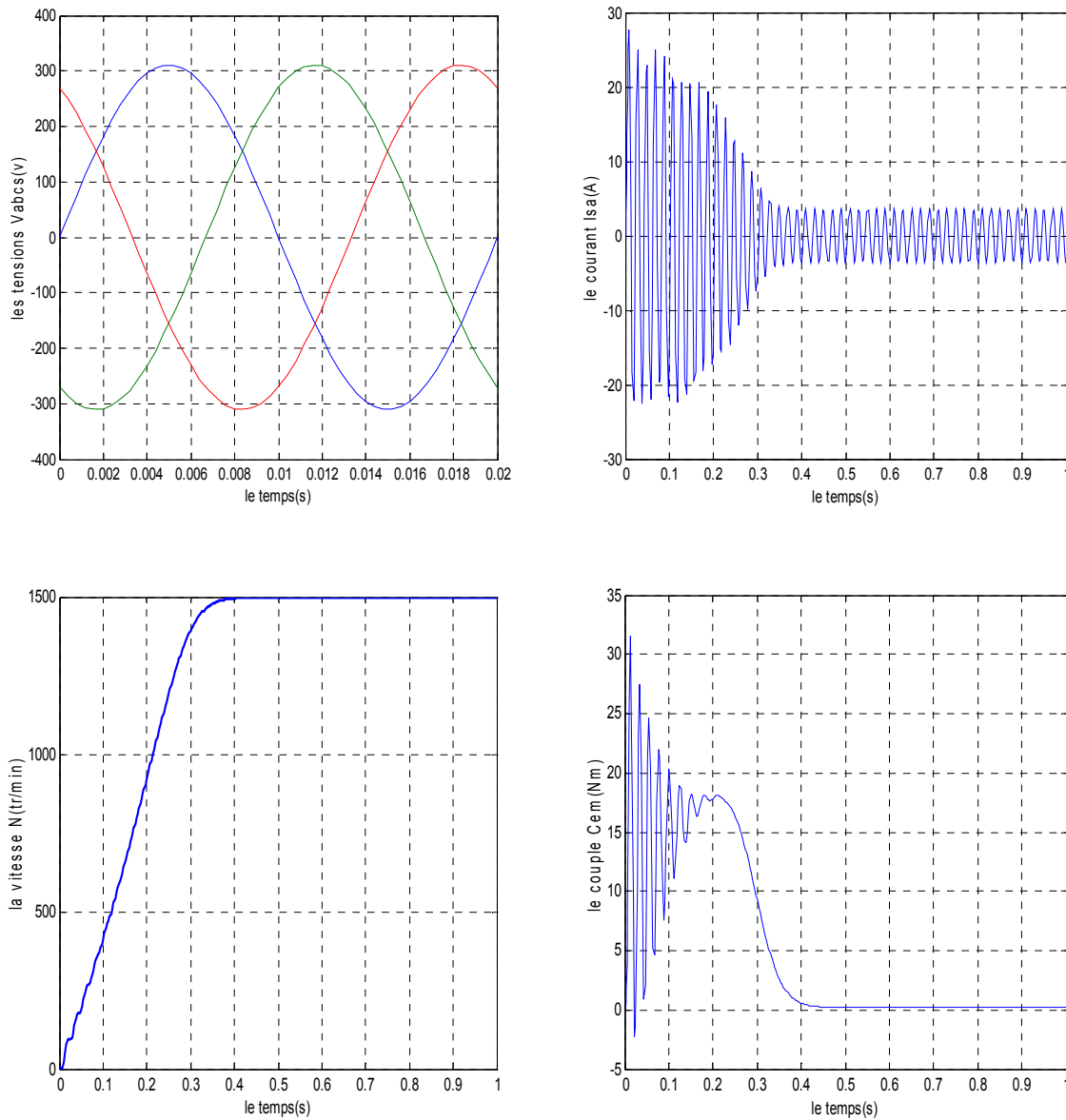


Figure 5-62: Résultat de simulation de la machine asynchrone triphasée à vide.

2.2. Fonctionnement en charge :

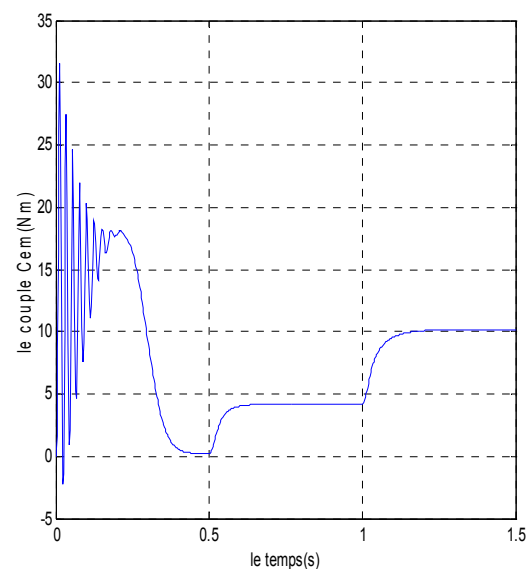
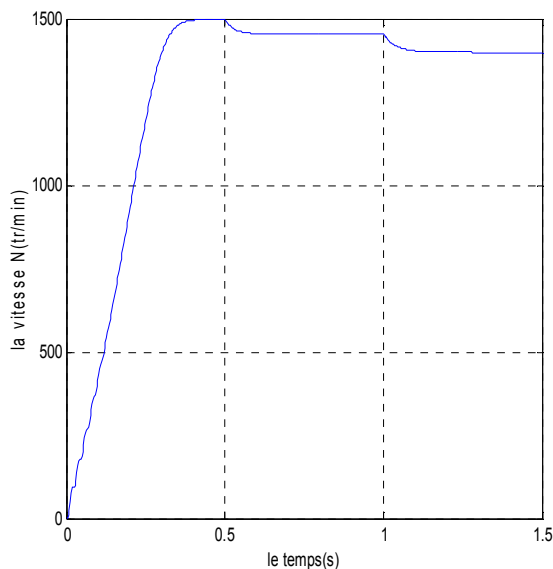
Après avoir simulé le démarrage de la machine asynchrone à vide, on va maintenant lui imposer des perturbations au régime permanent à

l'aide des couples résistants ($C_{r1} = 4 \text{ N.m}$ et $C_{r2} = 6 \text{ N.m}$), ce qui nous permettra de visualiser les résultats de simulation en charge.

En imposant un couple résistant $C_{r1} = 4 \text{ N.m}$ on constate que la vitesse chute et elle se stabilise à 1453 tr/min . Puis, le phénomène se reproduit de la même manière en imposant un couple résistant $C_{r2} = 9 \text{ N.m}$ après 0.5 s de l'application de C_{r1} et la vitesse maintenant se stabilise à 1366 tr/min .

Par contre le couple électromagnétique C_{em} augmente à 4.18 N.m puis à 10.18 N.m après l'application respective des couples résistants C_{r1} et C_{r2} à 0.5 s d'intervalle et cela est dû à la compensation des perturbations engendrées par les couples résistants.

De même le courant statorique augmente et oscille en sinusoïde avec une valeur crête de 4 A puis 6.8 A . Alors de l'application des couples résistants C_{r1} et C_{r2} , cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation de l'appel de la machine en fonction du couple résistant appliqué afin de subvenir au besoin de la charge imposée.



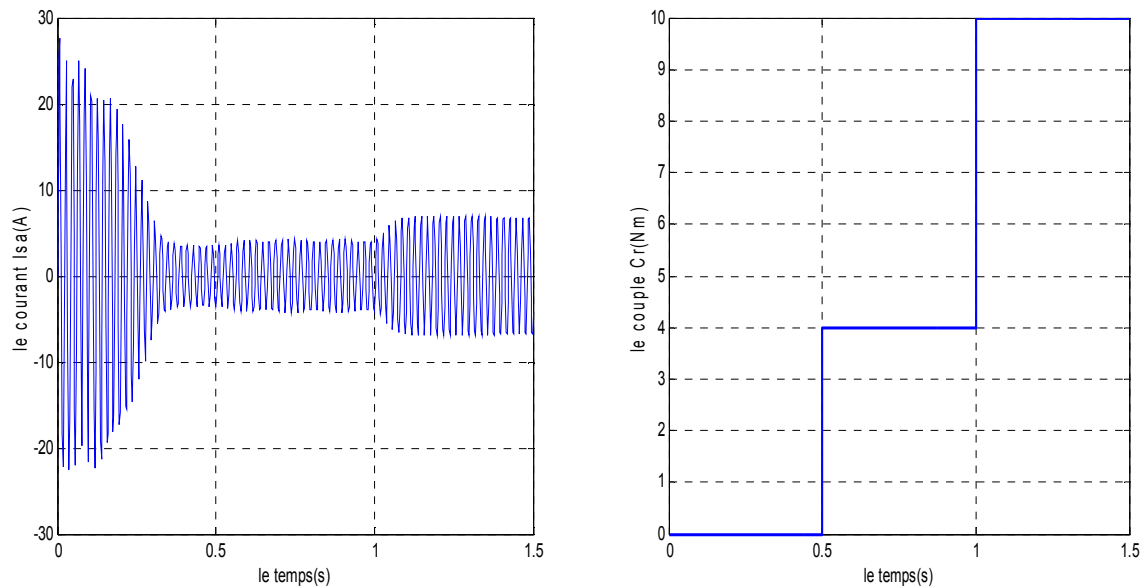


Figure 5-63 : Résultat de simulation de la machine asynchrone triphasée en charge

(Application de deux couples résistants $C_{r1}=4\text{N.m}$ et $C_{r2}=6\text{N.m}$).

3. Simulation du Générateur photovoltaïque GPV :

Le module photovoltaïque (**MSX-60**) est choisi pour la simulation. Il contient (54) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 60 W. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Courant de court-circuit	$I_{sc} = 4.95 \text{ (A)}$
Tension en circuit ouvert	$V_{oc} = 21.9 \text{ (V)}$
Courant au point MPPT	$I_{mp} = 4.57 \text{ (A)}$
Tension au point MPPT	$V_{mp} = 17.54 \text{ (V)}$
Puissance maximale	$P_{max} = 80 \text{ (W)}$
Nombre de cellules en série	$N_s = 36$
Coefficient de température de I_{sc}	$K_i = 0.0002 \text{ (A/C)}$
Coefficient de température de V_{oc}	$K_v = -0.0034 \text{ (V/C)}$
Facteur d'édilité de la jonction	$a = 1.2$
Résistance série	$R_s = 0.27 \text{ } (\Omega)$
Résistance parallèle	$R_p = 198 \text{ } (\Omega)$
Température nominale	$T_n = 25 \text{ (C}^\circ\text{)}$
Irradiation nominale	$G_n = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$

Tableau (5.2) : Caractéristiques du module photovoltaïque

Le schéma de générateur photovoltaïque dans l'environnement Matlab-Simulink est représenté par la **figure (5-64)**:

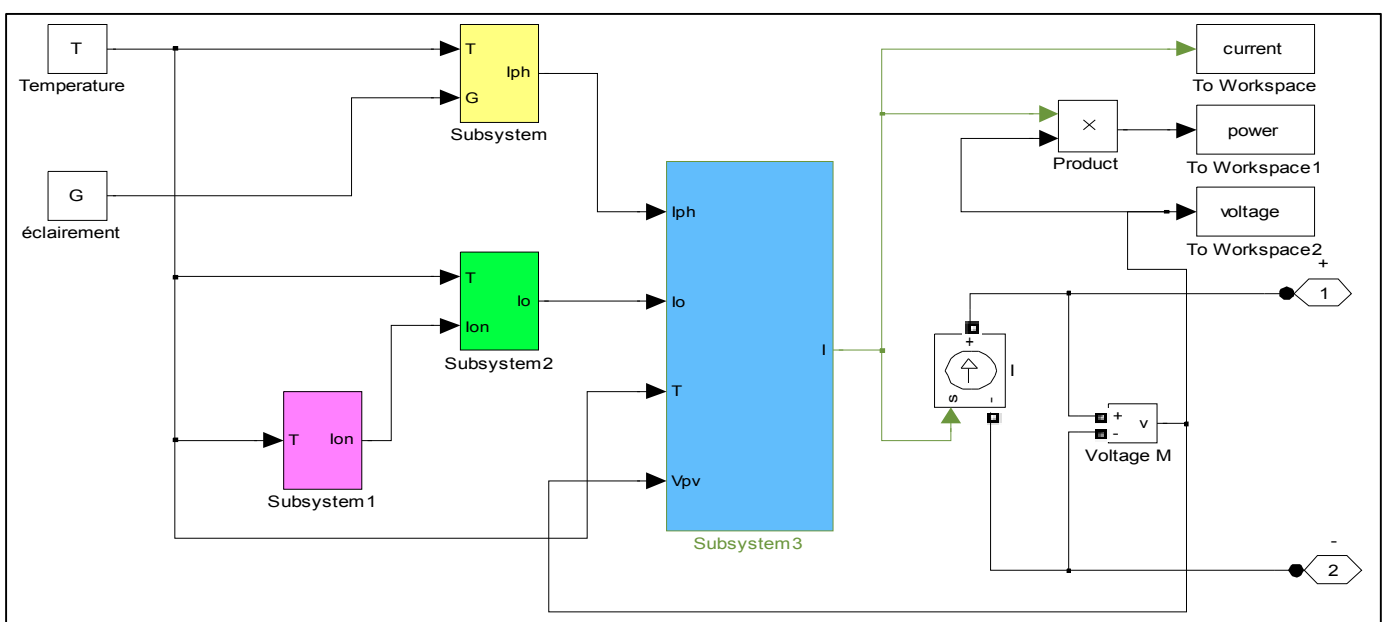
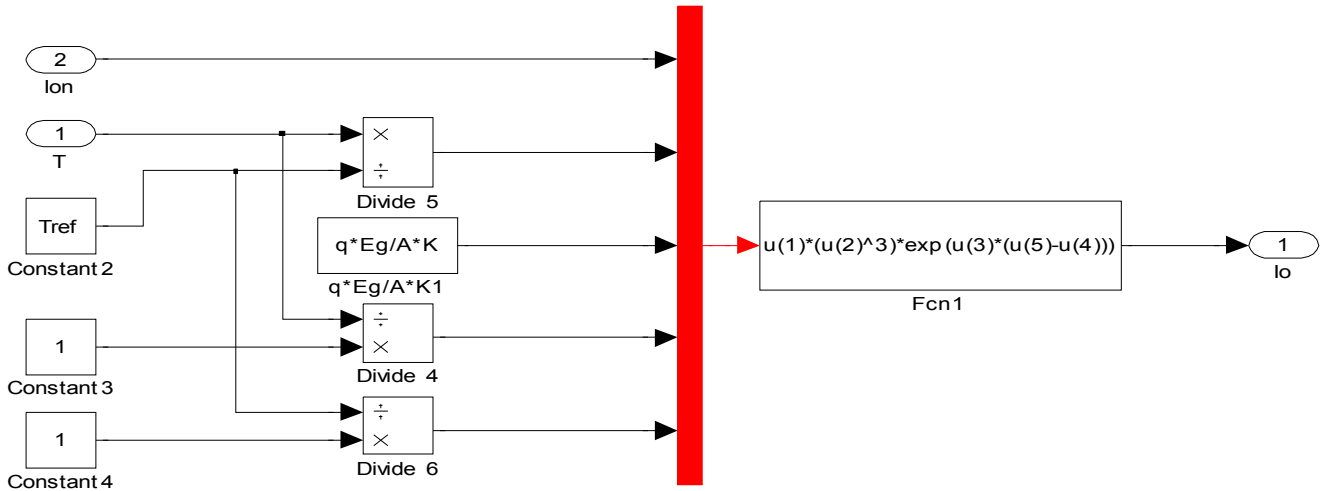
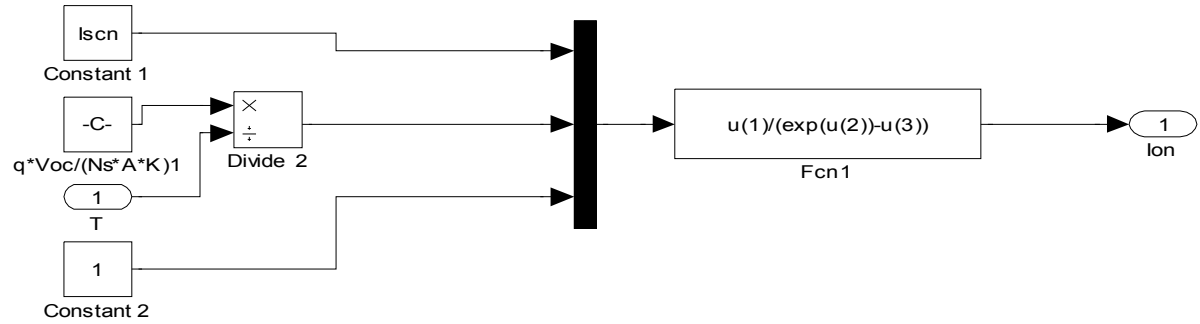


Figure 5-64 : Modèle de simulation d'un générateur PV

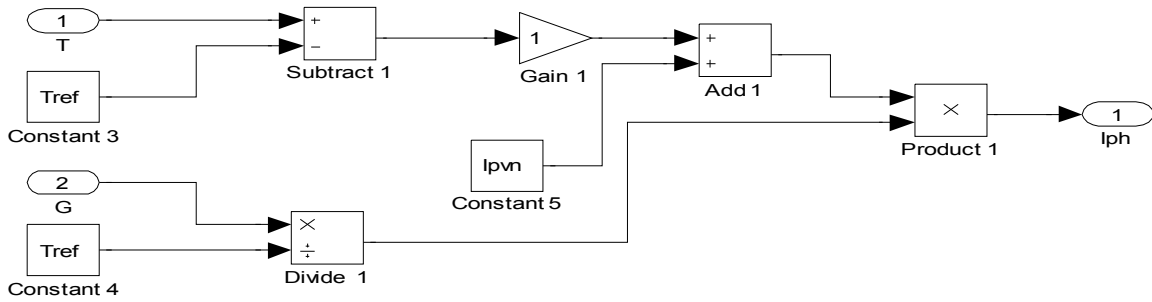
✓ Le courant I0 :



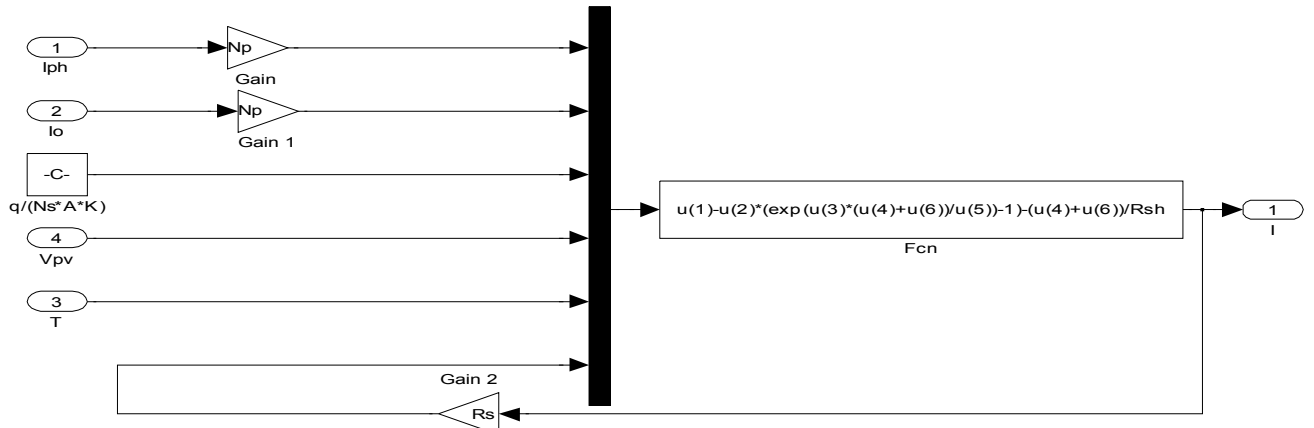
✓ Le courant Im=Ipv:



✓ Le courant Iph:



✓ Le courant Ipv:



3.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle :

À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ($G=1000\text{w/m}^2$; $T=25^\circ\text{C}$). Les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) sont données par la Figure (5-65).

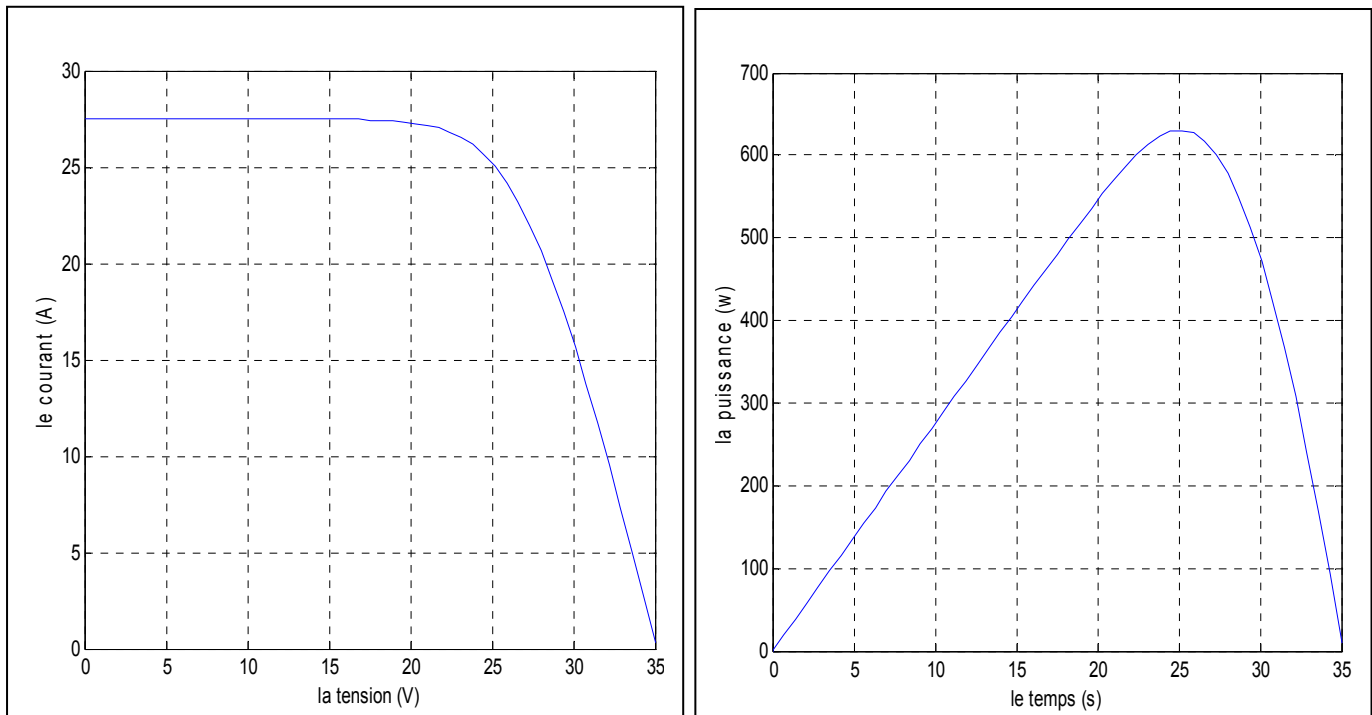


Figure 5-65 : Caractéristique (courant-tension) et (puissance-tension) du panneau

3.2. Influence de la température et de l'éclairement :

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

✓ L'influence de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement (G) entre (200w/m^2 ; 1000w/m^2) avec un pas de (200w/m^2), la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par la Figure (5.7).

D'après la figure (5-66) on remarque une forte diminution du courant de court-circuit et une faible diminution de la tension du circuit ouvert avec la diminution de l'éclairement(G). Ce qui prouve que le courant de court-circuit de la cellule dépend de l'éclairement, par contre la tension de circuit ouvert est moins influencé par la variation de celui-ci.

la variation de l'éclairement influe sur la puissance du GPV, plus l'éclairement augmente plus la puissance augmente.

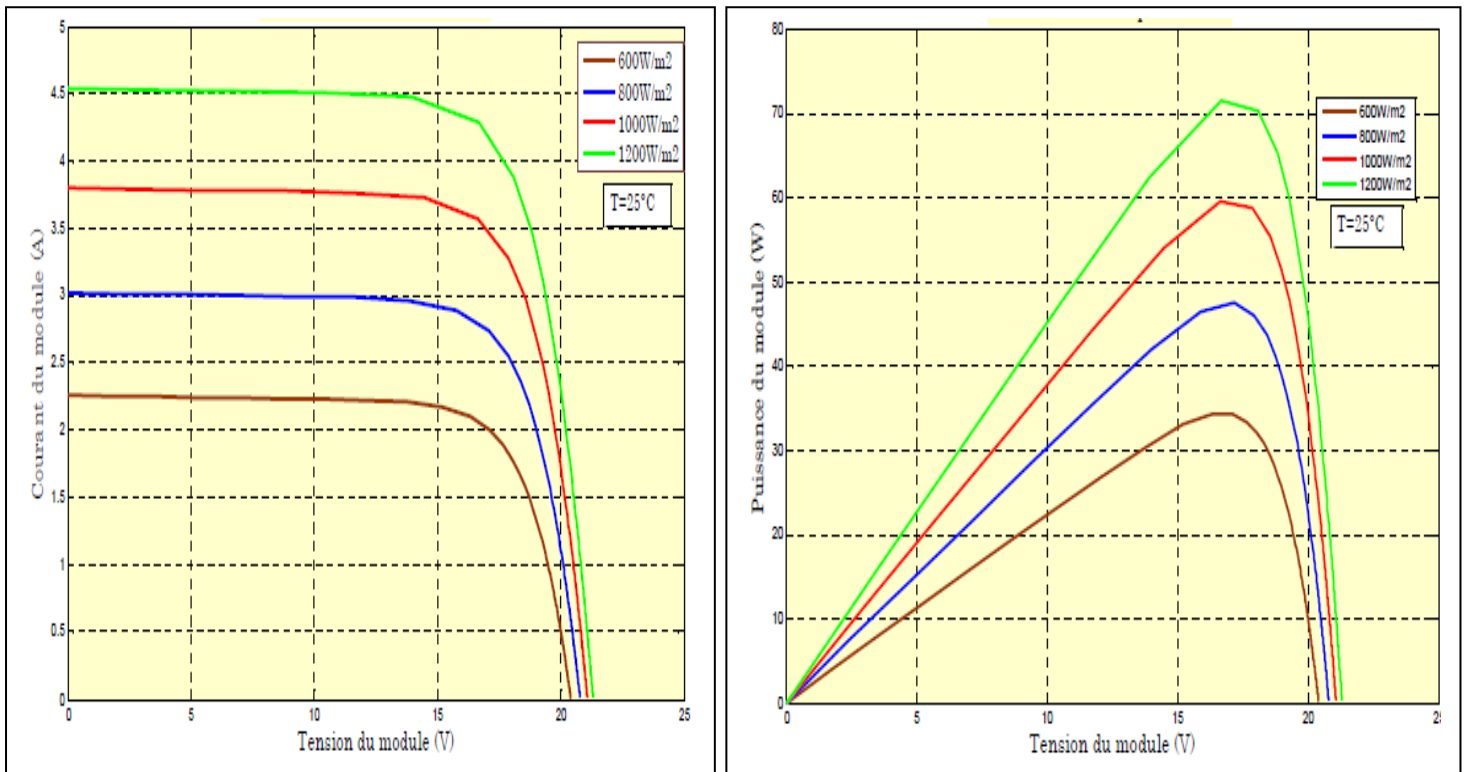


Figure 5-66 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$

✓ **Influence de la température :**

En faisant varier la température (T) entre (0 °C et 75 °C) avec un pas de (25 °C), l'influence de celle-ci sur la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par la figure (5-67) pour un éclairement ($G=1000w/m^2$)

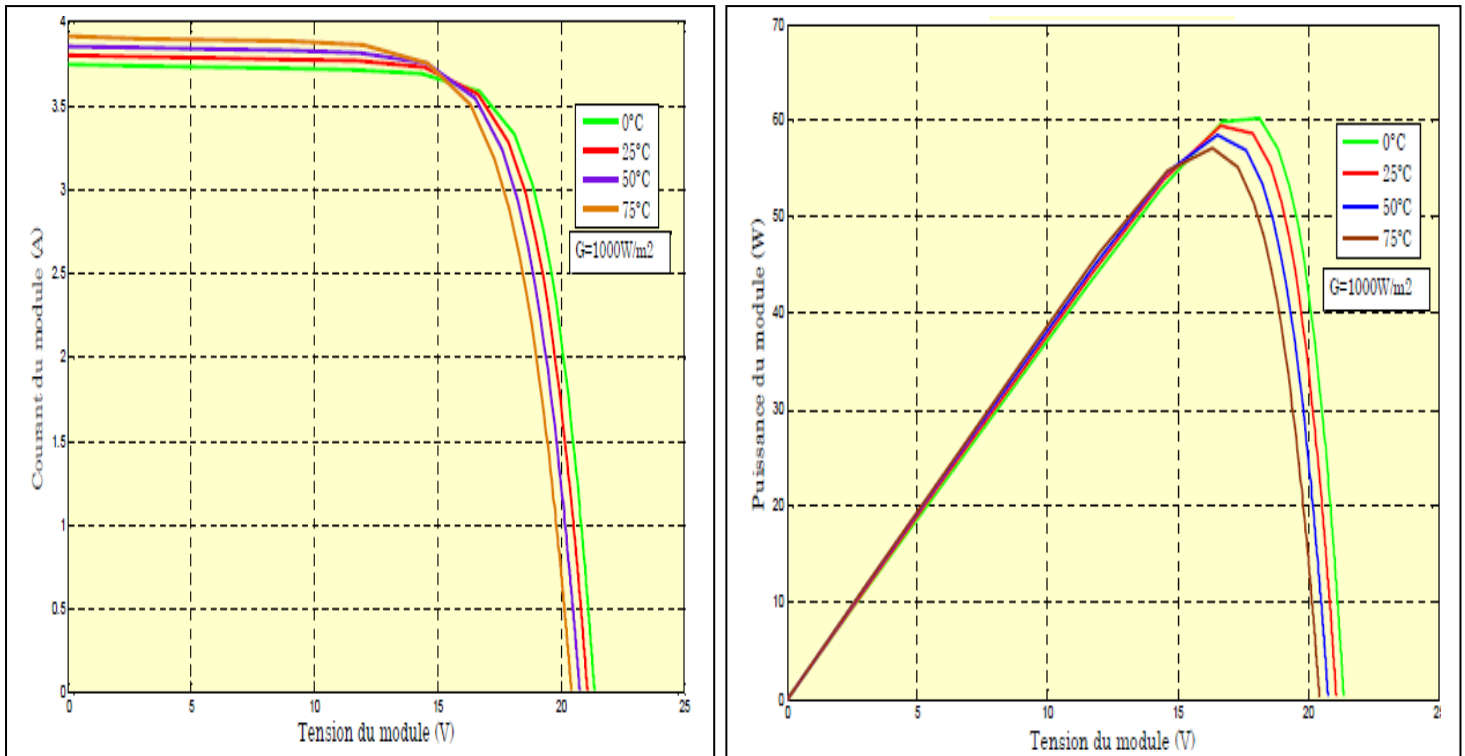


Figure 5-67 : Influence de la température sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$

On constate d'après la figure (5.8) que la tension à vide d'un module photovoltaïque (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

On peut remarquer sur la figure (5.8) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

4. Simulation du convertisseur Boost(Hacheur survolteur) :

La figure (5-68) montre le schéma du circuit du *convertisseur BOOST* alimentant une charge résistive R.

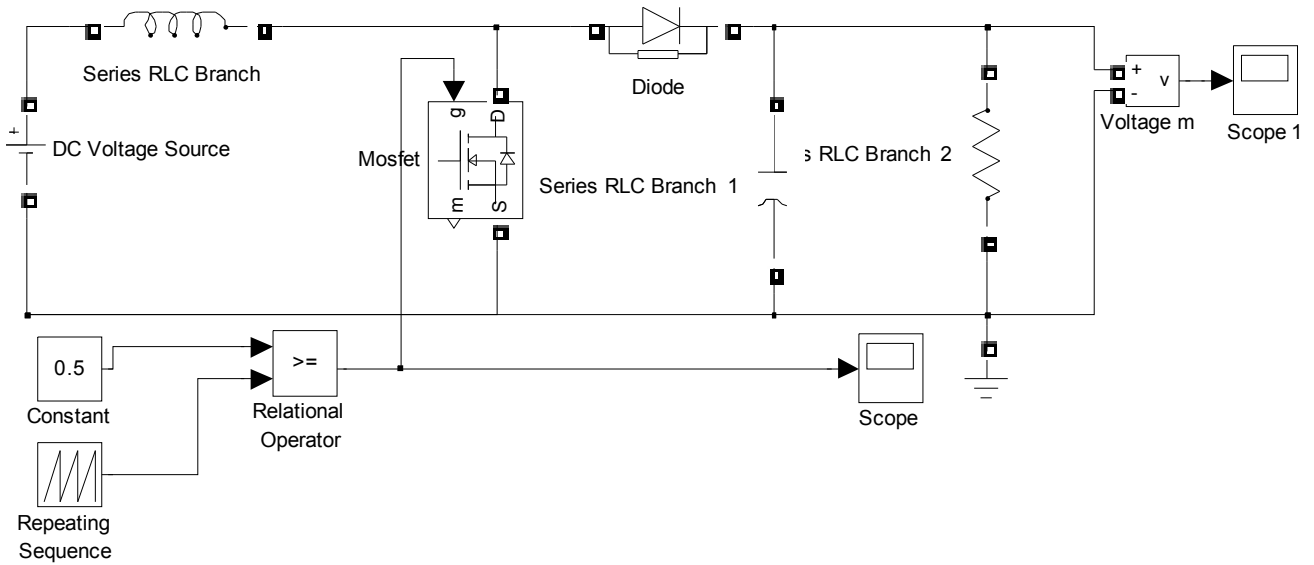
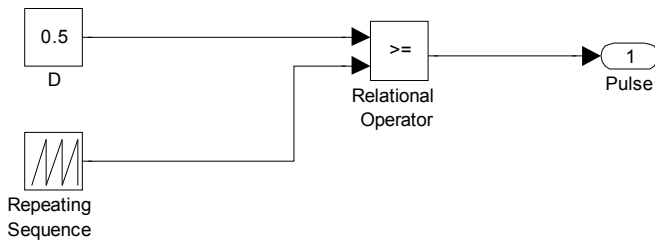


Figure 5-68 : schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

✓ **Bloc PWM (MLI) :**

Le bloc « PWM » génère le signal PWM nécessaire à la commande du commutateur



paramètres	Valeurs numériques
R	
C	
L	

Tableau paramètres de simulation du hacheur boost

Les figures suivantes (5-69), (5-70) représentent les résultats de la simulation :

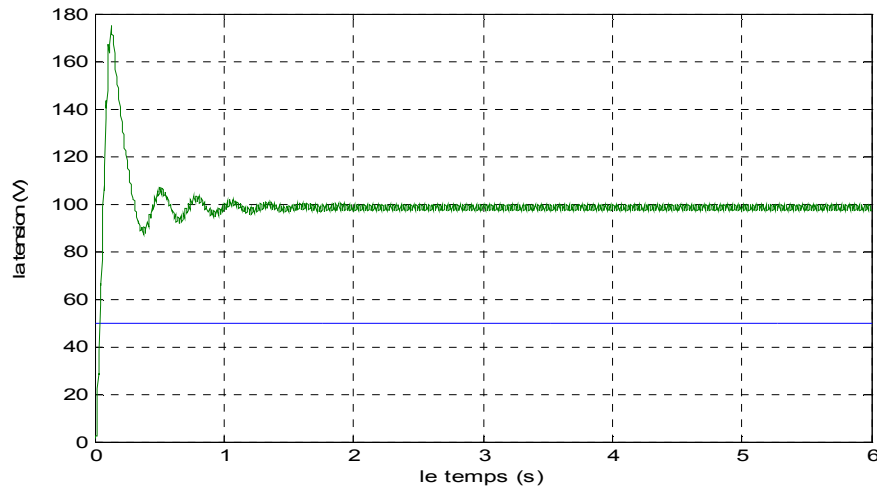


Figure 5-69 : Tension de source et Tension de charge (résistif) du hacheur survolteur

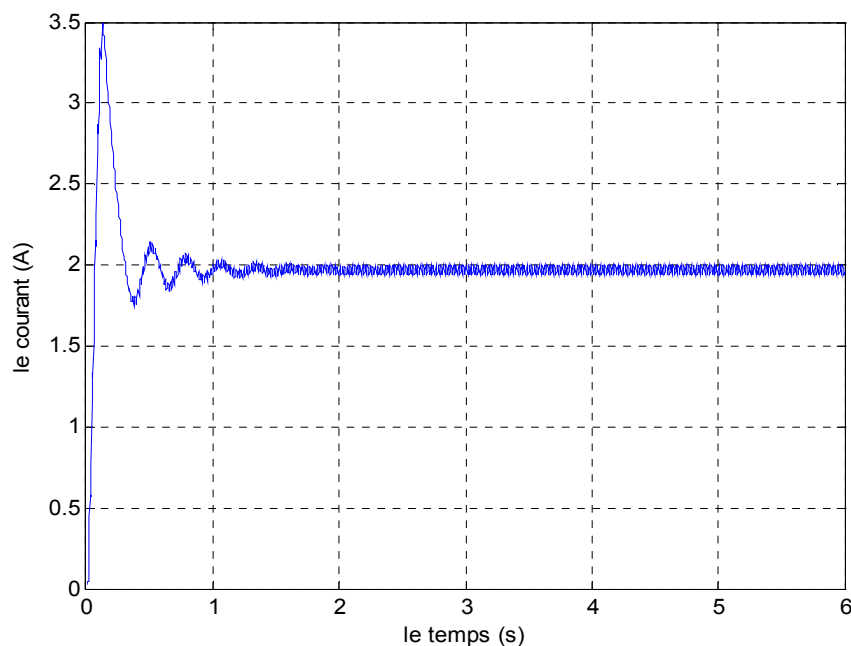


Figure 5-70 : Courant de charge (résistif) du hacheur survolteur

A travers les courbes précédentes on remarque que la tension a la sortie du convertisseur est environ deux fois supérieur à celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en gardant la

même puissance, avec une faible diminution a cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.

La figure (5-71) montre un autre schéma du circuit du convertisseur BOOST alimentant une charge résistive R.

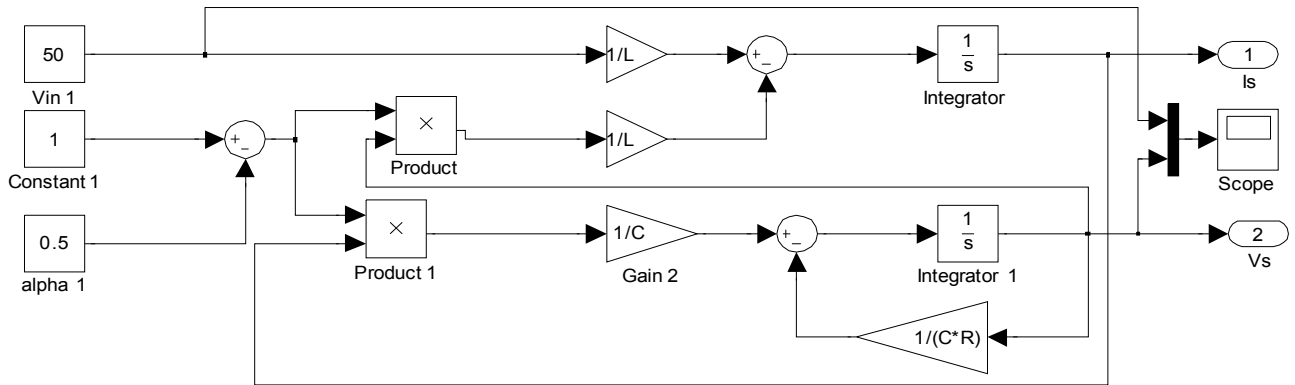


Figure 5-71 : schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST

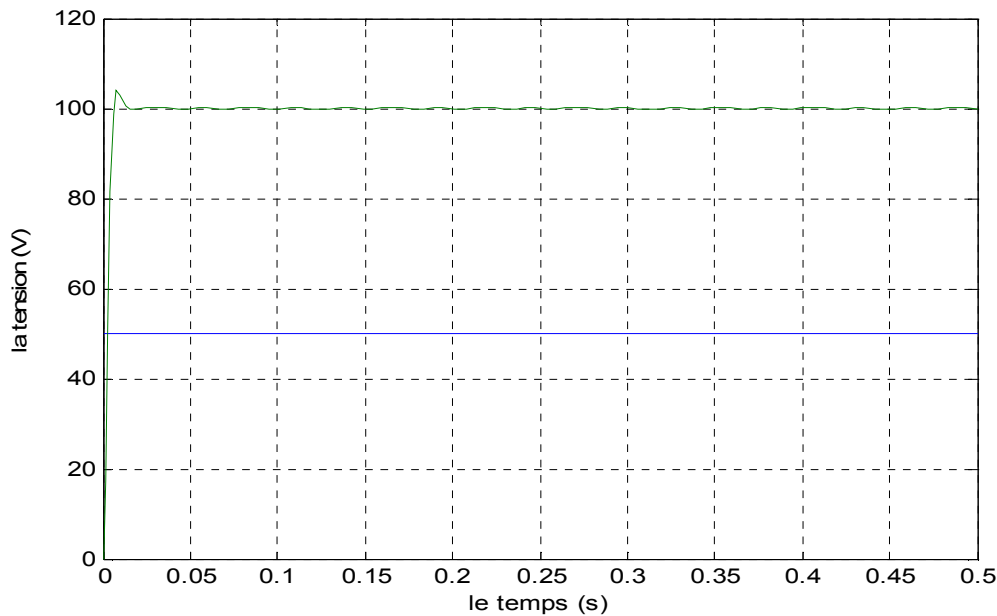


Figure 5-72 : Tension de source et Tension de charge (résistif) du hacheur survolteur

5. Simulations du MPPT

Le Schéma bloc de la commande MPPT (P&O) utilisé dans notre étude est présenté sur la figure (5-73).

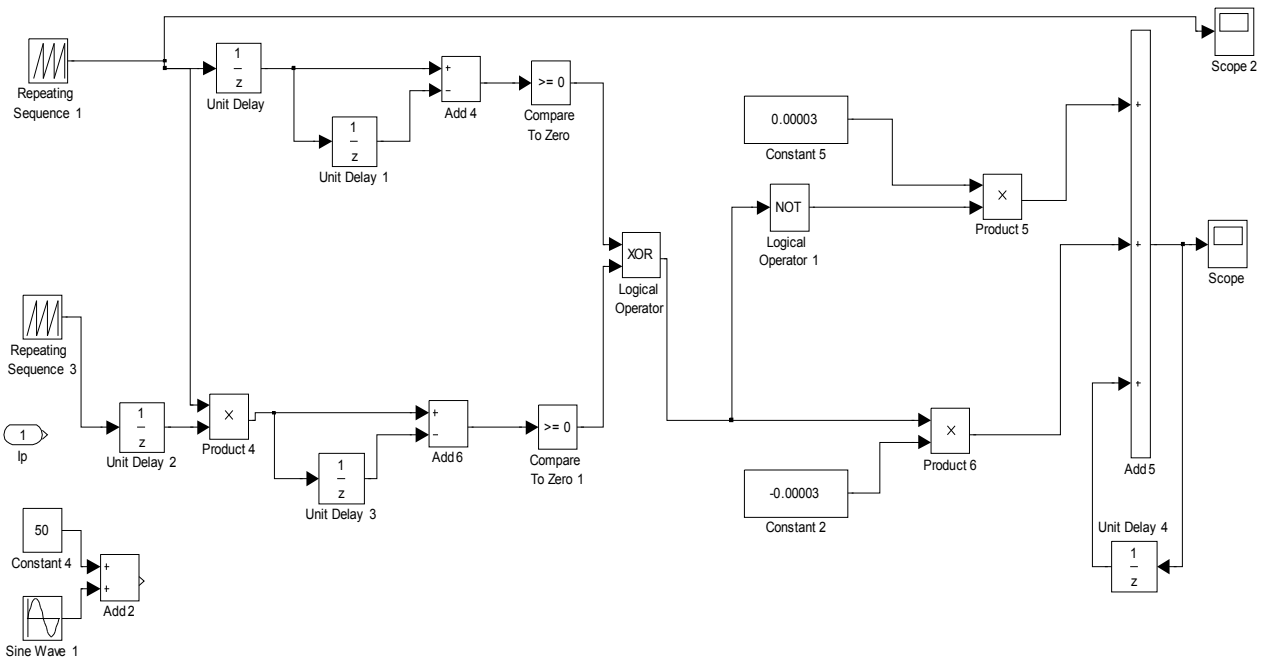


Figure 5-73 : Schéma bloc de l'algorithme MPPT.

6. Simulation du Convertisseur continu- alternatif (onduleur) :

La figure (5-74) montre le schéma du circuit d'onduleur alimentant une charge résistive R.

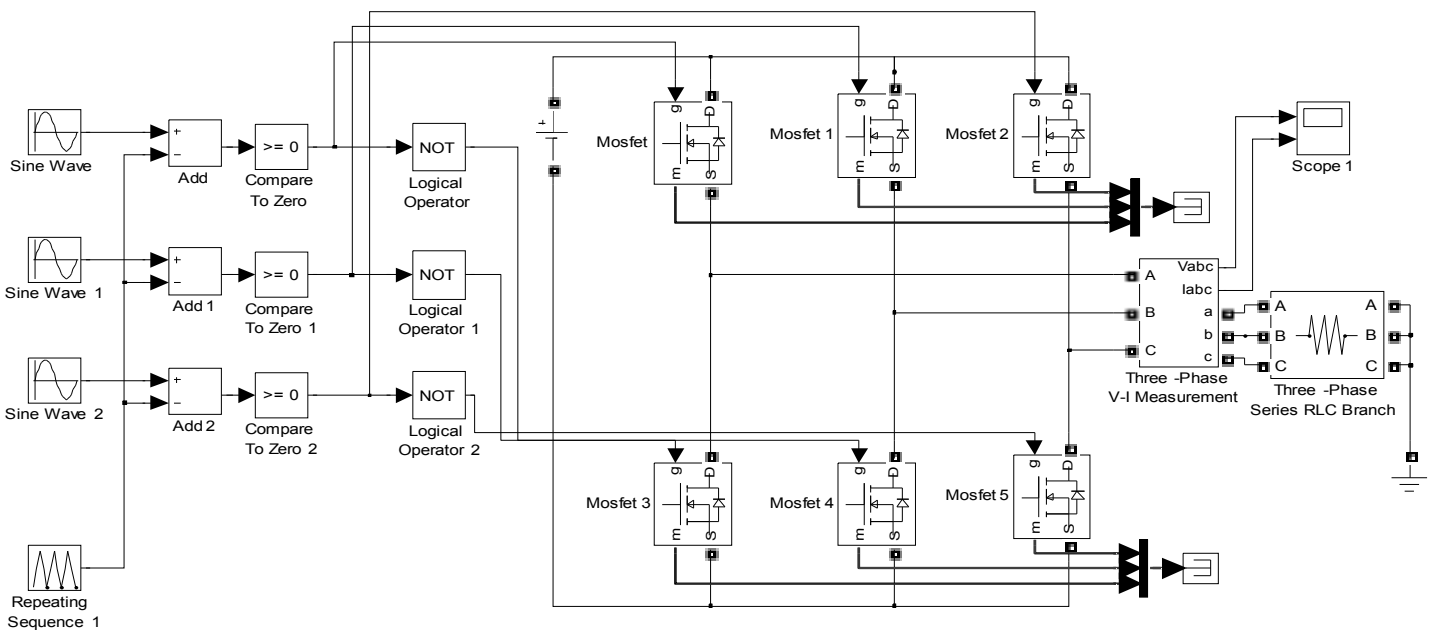


Figure 5-74 : schéma bloc de simulation de l'onduleur

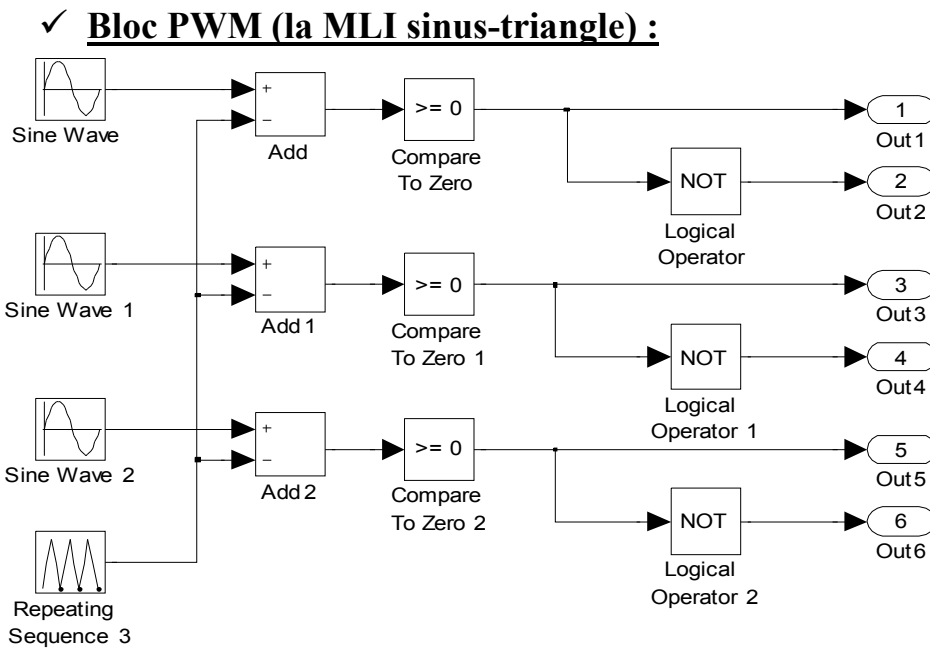
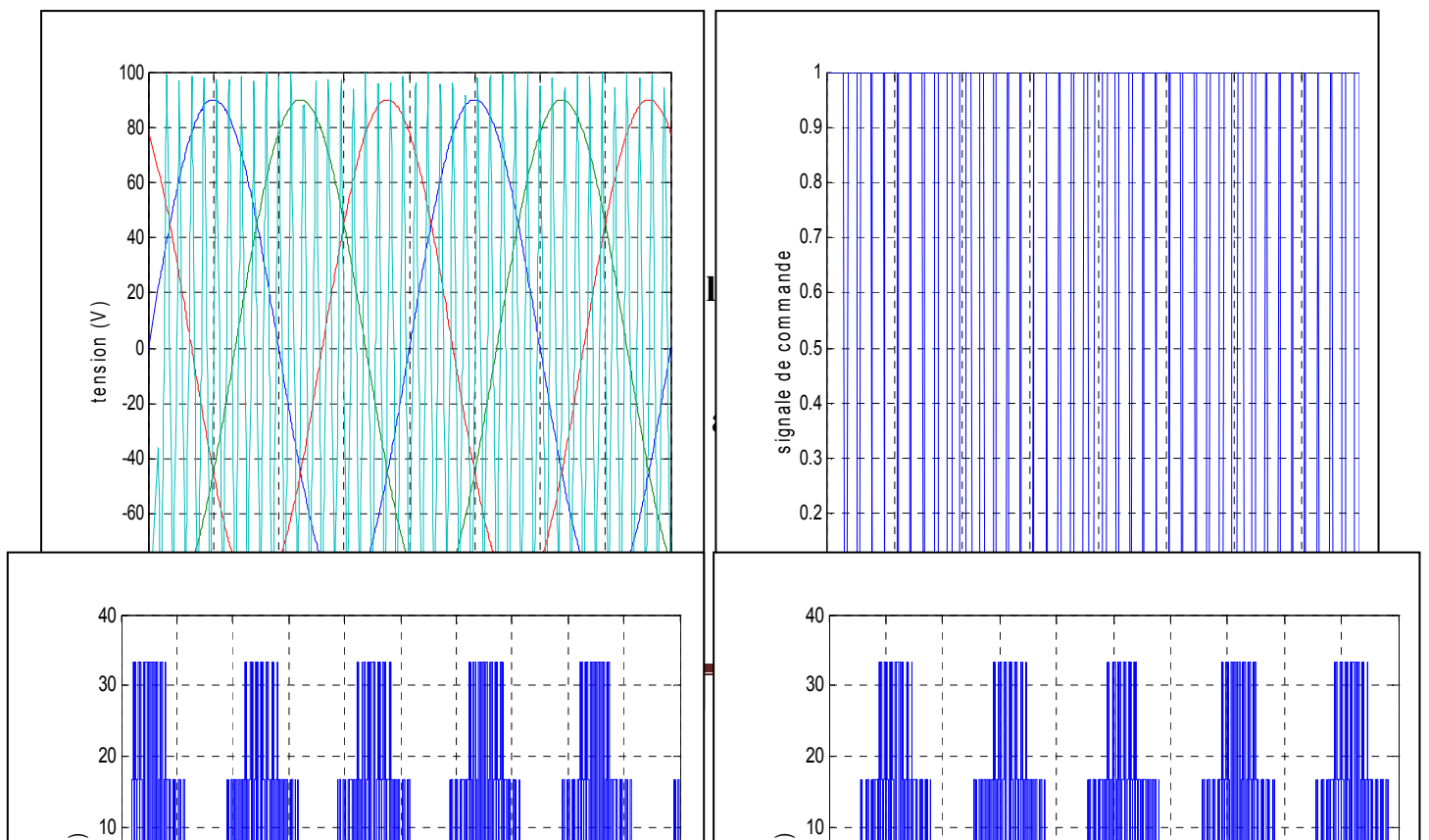


Figure 5-75 : Schéma de simulation de la commande MLI sinus-triangle.



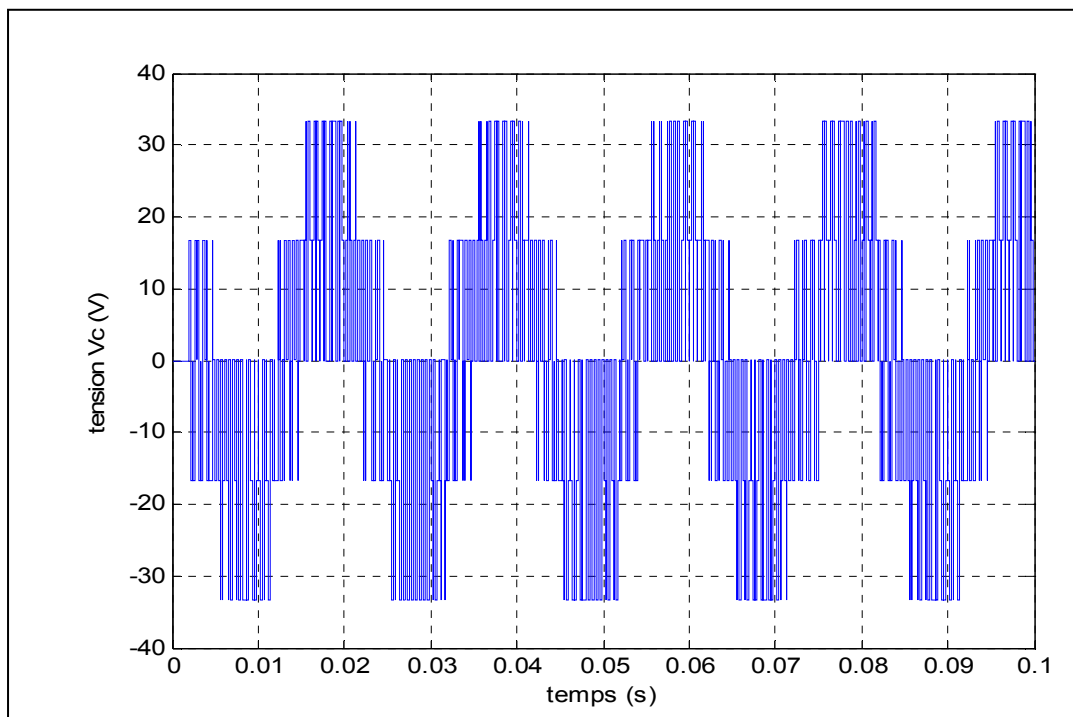


Figure 5-77 : Les tensions de sortie de l'onduleur

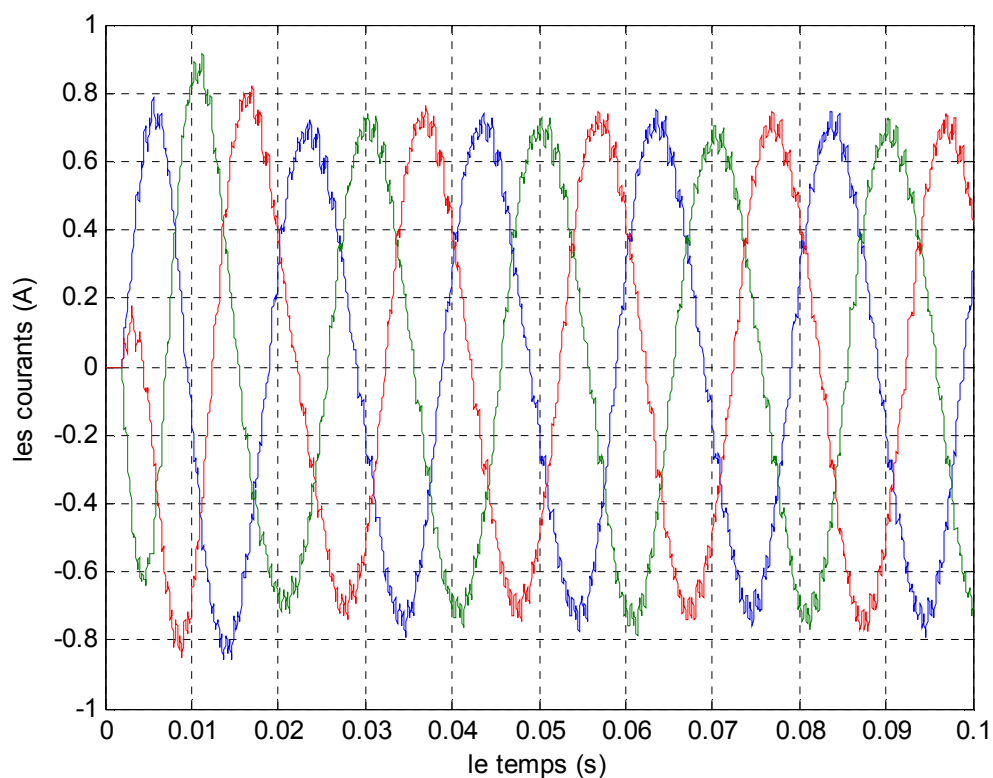


Figure 5-78: Les courants de sortie de l'onduleur

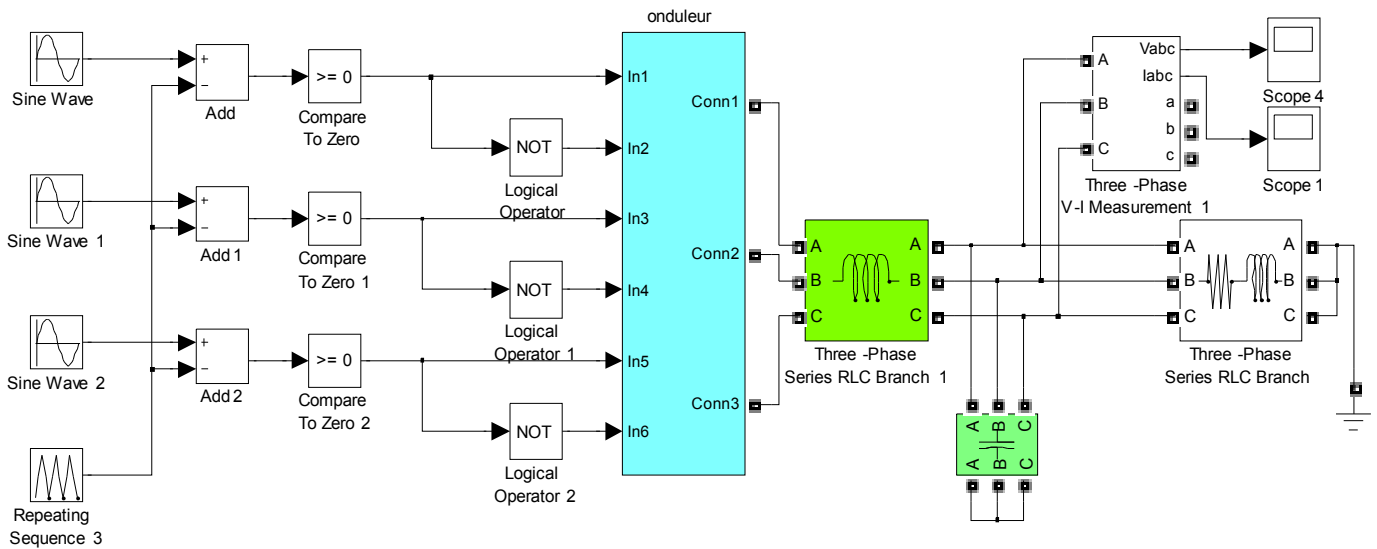


Figure 5-79 : Schéma de simulation de l'onduleur avec filtre de sortie.

Paramètres de simulation du filtre de sortie

Les tensions composées de l'onduleur dans les trois phases après le filtre sont présentés dans la figure suivante :

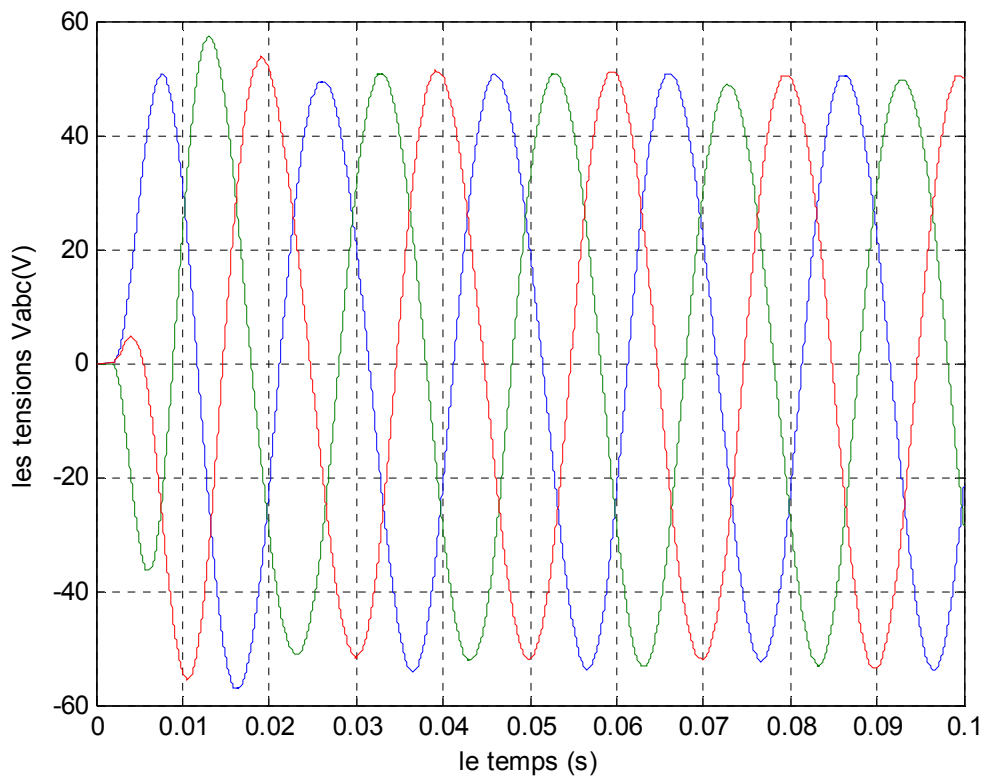


Figure 5-80 : Les tensions de sortie de l'onduleur (phase (a), phase (b), phase (c)).

7. Modèle global du système :

La figure (5-81) illustre le schéma synoptique du système photovoltaïque global avec les différentes commandes utilisées. Le modèle SIMULINK représente le groupement du générateur photovoltaïque, la commande MPPT, le hacheur survolteur, l'onduleur MLI, et le moteur à induction.

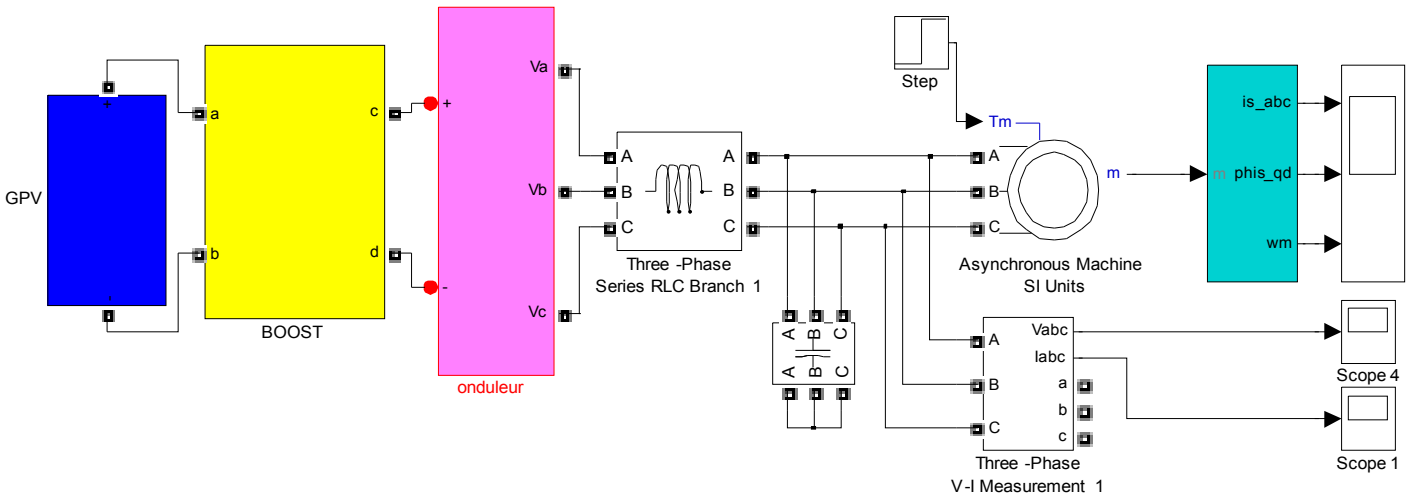


Figure 5-81 : Bloc de simulation du modèle global

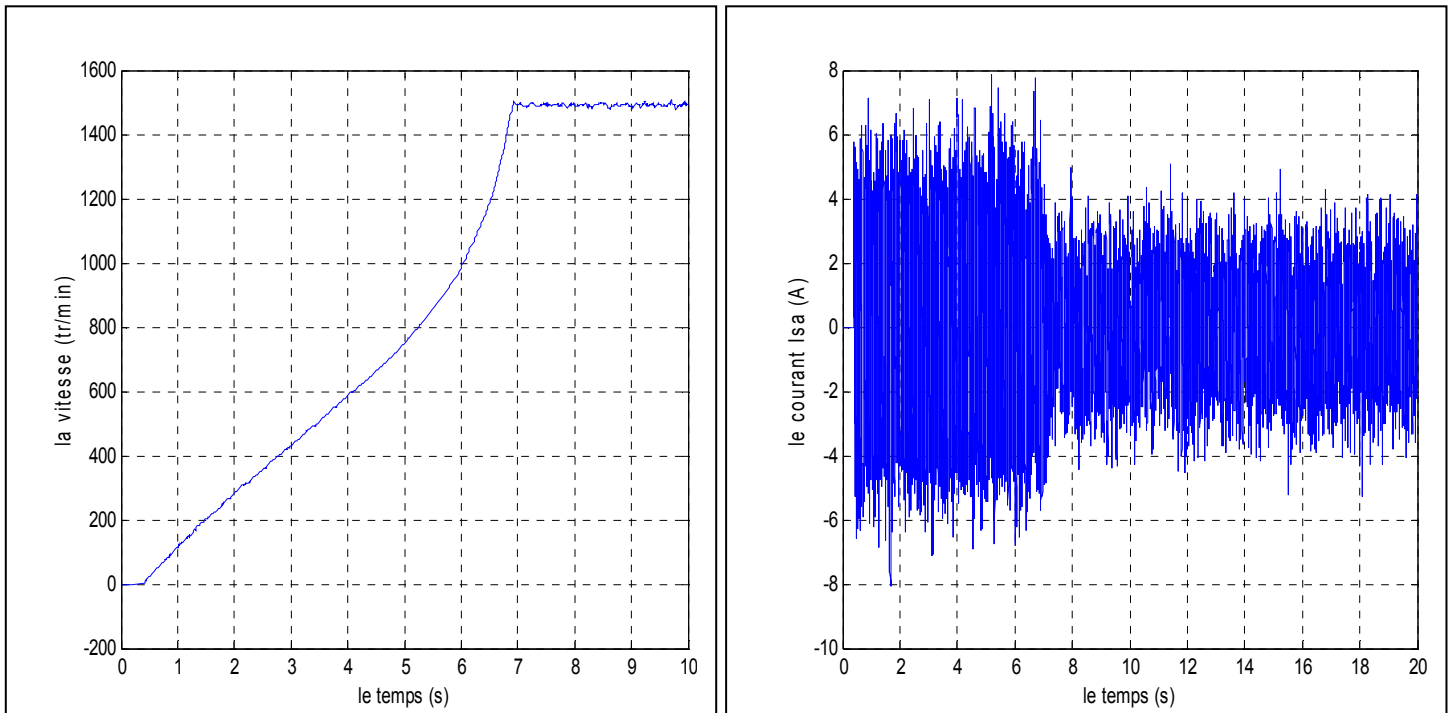


Figure 5-82 : Résultat de simulation du Modèle global du système

8. Interprétation des résultats :

La simulation de chaque élément séparément du système photovoltaïque nous donne des bons résultats en commençant par le panneau photovoltaïque. Les caractéristiques I(V) et P(V) de ce dernier sont illustrées dans **les figures 5-67 et 5-66** représentent l'influence de l'augmentation de la température sur la diminution de la tension du panneau solaire et évidemment sur son rendement énergétique.

Le hacheur Boost donne une tension continue stable avec un pic au début à cause de la recherche du point maximale de fonctionnement.

Malgré l'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion sinus triangle, on a obtenu à la sortie de l'onduleur des tensions de ligne ne sont pas purement sinusoïdales, à cause des harmoniques qui engendrent des pertes et des échauffements au système PV surtout lors du raccordement de l'onduleur avec le MAS.

Après la simulation du MAS, on a remarqué que la vitesse de rotation du moteur asynchrone va évaluer avec le temps et atteigne sa vitesse nominale (300 rad/s) dans un temps lent (dépassé 0.5 sec), avec une tendance à osciller à cause de l'inertie des masses tournantes et du coefficient d'amortissement du aux faibles valeurs des flux (**Figure 5-63**).

L'évolution du couple dans l'intervalle de temps 0 et 1 sec est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrone à cage. Celui-ci présente aux premiers instants des pulsations très importantes. Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, puis se stabilise en fin du régime.

Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles mathématiques, cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants.

Conclusion Général

Conclusion Générale

Ce travail, qui est destiné à modéliser et à simuler un système photovoltaïque comporte un générateur photovoltaïque, associé à un hacheur survolteur contrôlé par la commande MPPT P&O et un onduleur commandé par MLI Sinus- Triangle afin d'entraîner un moteur asynchrone. Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur l'effet photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV en se basant sur un circuit équivalent à une diode.

L'objectif était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un modèle mathématique d'une cellule. A l'issue des simulations effectuées, nous avons constaté une forte dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Cela, nous permet de modéliser un panneau solaire et prendre une idée sur le comportement d'un champ photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque. Ce dernier, est destiné, lui-même à alimenter un moteur asynchrone.

Afin d'extraire, en permanence, le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la générer et la transférer au moteur asynchrone, un hacheur Boost a été associé et doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale, la utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Cette technique joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. La solution fréquemment adoptée est l'incorporation d'un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge commandé directement par la technique PWM.

Conclusion Générale

Le choix de la structure de conversion est fonction de la charge à alimenter. La deuxième partie de ce mémoire était l'objet de dimensionnement des convertisseurs DC-DC communément utilisés dans les chaînes de conversion photovoltaïque. L'étude par simulation effectuée a montré la validation du calcul théorique des éléments passifs constituant ces convertisseurs.

Pour fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation P&O, puisqu'elle est simple et donne un bon rendement. Un onduleur a été utilisé afin de convertir la tension continue en tension alternative. Il joue aussi le rôle d'adaptateur source-charge lorsqu'il est commandé par la technique MLI.

Une suite de ce travail peut être enrichie par :

- L'évaluation des performances du système lors du raccordement du GPV au MAS.
- L'utilisation d'autres algorithmes MPPT.
- L'utilisation d'autres commandes MLI.
- L'utilisation d'autres types de convertisseurs DC-DC.
- L'utilisation d'un onduleur directement commandé par l'algorithme MPPT.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- 1-FELLAH Boumediene, **Système hybride photovoltaïque-éolien de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah**, mémoire de magister. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen. 2012
- 2- Guessabi Mohamed, Bouteldja Mohamed, « **optimisation et simulation d'une installation de pompage photovoltaïque** », mémoire de master, université Akli Mohamed Oulhadj Bouira. 2016/2017.
- 3- Soltane Belakehal, "**Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelable**", Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.
- 4- Energie renouvelables, "**Centrales photovoltaïques**", Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projet, PACER, 1996.
- 5- MAYOUF Somia, « **Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle** », mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- 6- Assia ZERDOUDI, « **Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension: Application au générateur photovoltaïque** », thèse de doctorat, université des Frères Mentouri de Constantine1 **2017/2018**.
- 7- **Encarta** 2005.
- 8-www.neal-dz.net consulté en 2013.
- 9- Soltane Belakehal, "**Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelable**", Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.
- 10- **A. Hammidat, A. Hadj Arab et M.T. Boukadoum** « Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie », Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 157 - 166).
- 11- KALAJDI Farah CHEKROUNI Nesrine, «**Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT)** », mémoire de master. Université ABOU BAKR BELKAID TLEMEN. 2013/2014.
- 12- J. Royer,T. Djiako,E. Schiller,B. Sada Sy, "**Le pompage photovoltaïque**" , Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa /EIER/CREPA. Canada, 1998.
- 13- MECHALIKH Med Nadjib, HAMADA Charaf Eddine, « **Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau** », mémoire de master. Université Kasedi Merbah Ourgla. 2013.

Références Bibliographiques

- 14- B.Equer « **Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours** », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993
- 15- F. Hananou et A. Rouabah, **Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque**, mémoire de master. Université Kasedi Merbah Ouargla. 2014.
- 16- A. M. Razali, M. Rahman, G. George, N. Rahim et al, "**Analysis and design of new switching lookup table for virtual flux direct power control of grid connected three –phase pwm AC/DC converter**", IEEE Transaction on Industry Application, Vol.51, No.2, pp.1189-1200, 2015.
- 17-Vincent Benamara, "**Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage**", Mémoire de la Maitrise en Génie Electrique, Université du Québec, 2012.
- 18- Basset Rahali, « **jsfjgfsksbf** », mémoire de master. Université Abbès Laghrour khanchela. 2019/2020.
- 19- R.Chenni, "**Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire** ", thèse Doctorat, Constantine, 2007.
- 20- B.Azoui «**Concept and realisation of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application** », These of doctorat of science, University of Batna 2002.
- 21- Anne Labouret, Pascal Cumunel, "**Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque**", Dunod, 5e édition, 2010.
- 22- Chelabi Anis et Ibelhoulen Aziz, « **Etude d'un système hybride autonome** », mémoire de master. Université de Bejaia. 2012.
- 23- AL IDRISSI Ramzi, **Dimensionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau**, Rapport de stage de fin d'études, EST Fès. Année universitaire 2015-2016.
- 24-Hallou Solaire, "**La fabrication des cellules photovoltaïques**", fiche technique.
- 25-Florent Monestier, "**Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques**", thèse de Doctorat, Université de Marseille, 10/04/2008.
- 26-Ibrahim Yassine, « **Système hybride (photovoltaïque, éolien, diesel) sans stockage** », PFE Ingénieur, Université libanaise Faculté de Génie-Branche3 ?2013.
- 27-A. Azizi, « **Propriétés électrique des composants électronique minéraux et organique, conception et modélisation d'une chaine photovoltaïque pou une meilleure exploitation de l'énergie solaire** », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatie, Toulouse III, France, 2006.

Références Bibliographiques

28-Mohamed Arrouf, "**Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et Pompe branche sur un générateur photovoltaïque**", Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.

29- T.Fogelman, « **Système photovoltaïque pour les pays en déventement** », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maitrise de l'énergie, (AFME), 1982.

30-Brahimi (MEM), "**Situation des énergies renouvelable en Algérie**", Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marche, Alger, Algérie.

31- Hamza. Bouzeria, "**Modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque**", Thèse de Doctorat 3eme cycle LMD en Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar Batna, Avril 2016.

32- C.Bernard, J.Chauvin, D.Lebrun, J.F.Muraz, P.Stassi, «**Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger** »2006.

33-Metiaz Nassim , « **Etude et simulation d'un système autonome à base photovoltaïque-générateur électrique** » , Mémoire de Master , université Kasdi Merbah ,Ouargla 2016/2017.

34- H.Colin, C. Duvauchelle, all "**Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension**", ESPRIT, Avril 2010.

35-Arnaud Sivert, **PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES Etude d'une valise solaire, IUT Génie Electrique & Informatique Industriel de Soissons**. Iutenligne, le catalogue de ressources de l'enseignement technologique universitaire.12 mars 2019.

36-Angel Cid Pastor. **Conception et réalisation de modules photovoltaïque électroniques. Micro et nanotechnologies / Microélectronique**. INSA de Toulouse ,2006.Français.

37- **J.A. Roger** « Theory of the Direct Coupling between DC Motors and Photovoltaic Solar Arrays », Solar Energy, 23, p. 193, 1979.

38-**W. Anis** and **H.M.B. Metwally** « Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System », Solar Energy, 53, 3, 1994.

39- KHELIFI Houda , GHAITAOUI Elmoulat, « **Alimentation d'un moteur asynchrone à partir d'un générateur photovoltaïque** », mémoire de master, Université Ahmed Draia ADRAR, 2018/2019.

Références Bibliographiques

- 40-J.Pireaux,"**Physique et énergie Travail sur les panneaux photovoltaïques**", Université de Namur, 2006-2007
- 41-Yahia Bakelli, "**Etude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque au réseau**", Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2004.
- 42-Nichiporuk , Oleksiy, "**Simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigctès**", Thèse de Doctorat, Lyon, 2005.
- 43-L. Protinand, S. Astier ,"**Convertisseur photovoltaïque**", Technique de l'ingénieur, D3360, 1996.
- 44-Abdelhalim Borni, "**Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire**", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- 45-I. Bendjamaa, « **Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque** », mémoire de magister, université bAbou-Baker Blkaid-Tlemcen.2011/2012.
- 46-F. TAZERART, R. ABDELLI, **GESTION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE**, mémoire de master. Université Abderrahmane Mira De Bejaïa. 2016.
- 47- F. TAZERART, R. ABDELLI, **GESTION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE**, mémoire de master. Université Abderrahmane Mira De Bejaïa. 2016.
- 48-A. L. Nemmour, "**Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation**", Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, Avril 2002.
- 49-A. Saibi, M. O. H. Mahmoudi, L. Nazli, "**Commande par mode de glissement d'une machine synchrone double étoile alimentée par onduleurs à MLI à trois niveaux**" 4th International Conférence on Electrical Engineering, CEE'06, Batna University, pp. 215–220, 7–8 November 2006.
- 50- M. F. Benkhoris, A. Gayed, "Discrete sliding control technique of DC motor drive," IEE Conference Publication No. 429 Power Electronics and Variable Speed drives, pp. 81–86, 23–25 September 1996.

Références Bibliographiques

- 51- S. J. Huang, H. Y. Chen, "Adaptive sliding controller with self-tuning fuzzy compensation for vehicle suspension control," Science Direct, Mechatronics 16, pp. 607–622, 2006.
- 52- Boucherit Omar, « Etude et modélisation d'un filtre LCL pour onduleur photovoltaïque connecté au réseau », université Saad Dahlab Blida, 2018/2019.
- 53-**D. P. Hohm, M. E. Ropp** « Comparative study of maximum power point tracking algorithms », Progress in photovoltaic: research and applications, 11: 47-62, 2003.
- 54-**L. Van der Merwe, G. J. Van der Merwe** « Maximum power point tracking Implementation Strategies », Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1(1): 214-217, 1998.
- 55-**V.Salas, E.Olias, A.Barrado, A.Lazaro** « Review Of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems », Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1555-1578.
- 56-**A. Brambilla, M. Gambarara, A. Garutti, F. Ronchi** « New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking », Proceedings of the 30th IEEE Power Electronics Conference, 632-637, 1998.
- 57- M. boukli hacene Omar, « **conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique** » thèse magister, Université de Tlemcen 2010.
- 58- A. Saibi, M. O. H. Mahmoudi, L. Nazli, "**Commande par mode de glissement d'une machine synchrone double étoile alimentée par onduleurs à MLI à trois niveaux**" 4th International Conférence on Electrical Engineering, CEE'06, Batna University, pp. 215–220, 7–8 November 2006.
- 59-Sahli Abdeslam, « Filtrage actif et contrôle de puissance : Application aux systèmes photovoltaïque interconnectés au réseau ». Mémoire de Magister, université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- 60-Zaaboub Fatima, « Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique et doté d'un FAP », université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2016-2017.
- 61-ZIGHA ALI, **ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN**, mémoire de master. Université Constantine. 2013.
- 62-S. L. Capitaneanu, "**Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux niveaux**", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse France, Novembre 2002.

Références Bibliographiques

63-Benoît Issartel, « **Conception d'un convertisseur DC/DC de type boost**», Critères de choix et dimensionnement des composants, note d'application, Polytech-Clermont-Ferrand.

64-S. L. Capitaneanu, "**Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux niveaux**", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Novembre 2002.

65-D.R. Chouiter« **Conception et réalisation d'une commande robuste de machine Asynchrone**», Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997, 192 p.

66- M. Lyazid BOUDJENAH, "Etude d'un système pompage hybride", Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Faculté de la Technologie, Département de Génie Electrique, Soutenue le 20 Juin 2013.

67-Lequeu Thierry, "**Cours d'électronique de puissance**", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005.

68-Philippe Barrade, "**Electronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire** ", press polytechnique et universitaire, 1ère édition 2006.

69- Touzani Youssef, "**Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé àprélèvement sinusoïdal**", Thèse de Doctorat, Université de Clermont- Ferrand, 2006.

70-Adjimi Nadia, Belaidi Wahiba, **Modélisation et commande d'un onduleur MLI**. Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi. 2009.

71-ZIGHA ALI, **ETUDE ET SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE-EOLIEN**, mémoire de master. Université Constantine. 2013.

72- Djamila CHERIFI, **Estimation de la vitesse et de la résistance rotorique pour la commande par orientation du flux rotorique d'un moteur asynchrone sans capteur mécanique**. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. Juin 2014.

73-NAAR Mustapha, ARBAOUI Fayçal, **Commande par mode flou-glisement de la machine asynchrone**, mémoire d'ingénieur d'état. Centre universitaire de Bechar .2005

74-Rachid ABDESSAMED, **Modélisation et simulation des machines électriques**, livre, Ellipses Edition. ISBN 978-2-7298-6495-8. Paris. 2011.

75- AISSAOUI Nassima, BOUGHRIS Karima et BENNABI Nacera, « Diagnostic des Structures assurant le transfert d'énergie photovoltaïque avec une meilleure efficience

Références Bibliographiques

énergétique », mémoire ingénieur, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2011.

76- LACHAISE Jérôme, « Etude des structures de commande pour le pilotage des systèmes Énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à la traction », thèse Doctorat Institut National de Toulouse, 2004.

77- C. Alexis, « Cours d'Electronique De Puissance », Université de MONTPELLIER, 2005.

78- SPIROV Dimitar, LAZAROV Vladimir, ROYE Daniel, ZARKOV Zahari, MANSOURI Omar, Université Technique de Sofia, 8 Kliment Ohridski, Sofia 1000, Bulgarie, G2ELab, UMR 5269 INPG-UJF-CNRS, ENSIEG - BP 46 – 38402, Saint-Martin-d'Hères. Onduleur

79- P. Barrade, « **électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire** » presse polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006

80- Tayebi azzedinne «**réalisation d'un onduleur de tension commandé par microcontrôleur pour un système photovoltaïque**» Doctorat en Science université Djilali liabes 2021

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

82- K. Dahmane, « **Contribution a la Modélisation et a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile Alimenté par Convertisseurs Matriciels** ». These de Magister, ENP Novembre 2004.

83- Tamrabt Hanane, « **robustes d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une Machine Asynchrone** ». These de Magister, Université de Batna 2006.

84- M. BAZI Smail, «**Contribution à la Commande Robuste d'une Machine Asynchrone par la Technique PSO**». These de Magister, Université de Batna 2009.

85- Dominique Barielle, Jean-Pierre Daunis « **Electrotechnique : Transformateurs et machines tournantes** », DUNOD, Paris 2006.

86 : S.Aminata, «*Simulation du système hybrides Photovoltaïque* » Thèse de Doctorat, canada, 1998.

87 : DJERIOU SALIM «*Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone*» Thèse de magister, université ferhat abbas de setif, 2011