

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



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière :electrotechnique
Option:Énergie renouvelable

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

MASTER

Thème

Modélisation et simulation d'un système hybride
PV-Diesel

Présenté par :
Berramdane Mohammed Ala Eddine

Fares Bettahar

Devant le jury composé de :

Mr Abdeddaim Sabrina

Mr Tkouti Nacira

Mr *Benyahya Naima*

MCA

MCB

MAA

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

Dedicaces 1

Je dédie ce travail :

- A tous les enseignants de l'université de Biskra.
- A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien inconditionnel, leurs encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.
- A mes frères et soeurs pour leurs encouragement et leur amour qu'ils portent à mon égard.
- Cher ami et Fares Bettahar .
- A tous mes collègues d'études surtout ceux D'électrotechnique.

Berramdane Mohammed Ala Eddine

Dedicaces 2

Je dédie ce travail :

- A mes chers parents
- A mon frère Mohamed Alaa Addine, mes soeurs Lamia et Chifaa
- A toute la famille Bettahar .
- Cher ami Mohammed Ala Eddine

Fares Bettahar

-

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous voulons traverser nous remercions et nous remercions à notre encadreur Md. Nacira Tkouti a d'avoir accepté de m'encadrer et de m'aider et pour la confiance qu'il m'a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de m'encourager.

Nos remerciements au département d'électromécanique et à tous les enseignants qui m'ont enseigné durant les années du cursus.

Nos remerciements est également adressé aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin nous remercions aussi toutes mes familles et les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Comparatif des différentes technologies.....11

Tableau II.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....55

Liste des figures

<u>Figure I.1</u>	composantes du rayonnement solaire.....	4
<u>Figure I.2</u>	Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la joncti.....	5
<u>Figure I.3</u>	Coupe transversale d'une cellule PV typique.....	6
<u>Figure I.4</u>	caractéristique d'une photodiode. B : caractéristique d'une cellule Photovoltaïque	7
<u>Figure I.5</u>	Cellules module et panneau photovoltaïques.....	7
<u>Figure I.6</u>	Cellule photovoltaïque (monocristalline).....	9
<u>Figure I.7</u>	Cellule PV poly cristalline.....	10
<u>Figure I-8</u>	Panneau photovoltaïque.....	13
<u>Figure I.9</u>	représentation des différents composants d'une installation PV.....	14
<u>Figure I.10</u>	Système PV autonome	15
<u>Figure I.11</u>	Système PV raccordée au réseau	15
<u>Figure I.12</u>	Configuration du générateur diesel	17
<u>Figure I.13</u>	Tension de « cut-off » d'une batteries	19
<u>Figure I.14</u>	Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb	19
<u>Figure I.15</u>	Système hybride avec connexion série.....	23
<u>Figure I.16</u>	Système hybride à commutation	24
<u>Figure I.17</u>	Système hybride a connexion parallèle	25
<u>Figure I.18</u>	Configuration à bus AC.....	27
<u>Figure II.1</u>	Système de production photovoltaïque.....	32
<u>Figure II.2</u>	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	33
<u>Figure II. 3</u>	Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque idéal et réelle.....	35
<u>Figure II.4</u>	Regroupement en série.	37
<u>Figure II.5</u>	Regroupement en parallèle.	38

<u>Figure II.6</u>	Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	39
<u>Figure II.7</u>	Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	39
<u>Figure II.8</u>	Schéma électrique d'un hacheur buck.....	40
<u>Figure II.9</u>	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck.....	41
<u>Figure II.10</u>	Schéma électrique d'un hacheur Boost.....	42
<u>Figure II.11</u>	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur.....	43
<u>Figure II.12:</u>	Schéma électrique d'un hacheur Buck- boost.....	43
<u>Figure II.13</u>	Chrono-grammes de courant et tension d'un hacheur Buck-boost.....	44
<u>Figure II.14</u>	Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	45
<u>Figure II.15</u>	Recherche du PPM par la méthode (P&O)	48
<u>Figure II.16</u>	L'algorithme de P&O classique.....	50
<u>Figure II.17</u>	caractéristique de tension-puissance du panneau.....	51
<u>Figure II.18</u>	l'algorithme IncCond classique.....	53
<u>Figure II.19</u>	structure de base de la commande floue	54
<u>Figure II.20</u>	Hacheur réversible en courant.....	56
<u>Figure II.21</u>	Représentation des composants bidirectionnels.	57
<u>Figure II.22</u>	Principe de la stratégie triangulo-sinusoïdale.....	59
<u>Figure II.23</u>	Modèle R-C de la batterie.....	59
<u>Figure II.24</u>	Modèle électrique de la batterie.....	60
<u>Figure II.25</u>	Principe de fonctionnement du régulateur PI.....	62
<u>Figure II.26</u>	Diagramme fonctionnel du générateur diesel.....	63
<u>Figure III.1</u>	Installation type du système étudié PV/Diesel parallèle.....	69
<u>Figure III.2</u>	Courbe du couple mécanique du générateur diesel.....	70
<u>Figure III.3</u>	Courbe de la puissance du générateur diesel.....	70
<u>Figure (III.4):</u>	Modélisation du GPV sous matlab (Simulink).	71
<u>Figure III.5</u>	Caractéristique (courant-tension) du GPV.....	72

Figure III.6 Caractéristique (puissance-tension) du GPV.	72
Figure III.7 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$	73
Figure III.8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$	74
Figure III.9 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$.).....	75
Figure III.10 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$.).....	75
Figure III.11 groupement des modules PV sous simulink.).....	76
Figure III.12 les caractéristiques P(V) et I(V) du groupe des modules pv).....	77
Figure III.13 Hacheur DC/DC sous simulink.).....	77
Figure III.14 Réponse en tension de l'hacheur).....	78
Figure III.15 changement de l'éclairement de 1000W/m ² à 500W/m ² avec une température fixe de 25°C.....	79
Figure III.16 Courbe de tension de système de stockage.....	80
Figure III.17 Courbe de la puissance délivrée par la batterie.....	81
Figure III.18 Courbe de courant de la batterie.....	81
Figure III.19 Courbe de l'EDC dans la batterie.....	82
Figure III.20 Stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride PV/Diesel.....	82

Nomenclature

1. Abréviation

PV-E-D : Photovoltaïque-éolien-diesel

EnR : Energies Renouvelables

DC : Courant Continue

AC : Courant Alternatif

PV : Photovoltaïque

GD : Générateur diesel

MPPT: Maximum Power Point Tracker

MLI : la modulation de largeur d'impulsion

PI : Proportionnelle intégrale

SOC : Etat de charge

2. Glossaire

I : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit).

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_0 : courant de court de saturation.

T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$].

K : Constante de Boltzman ($1,38.1023 \text{ J} / \text{K}^{\circ}$).

q : Charge élémentaire ($1,6.10^{-19} \text{ C}$).

n : Facteur d'idéalité de la jonction qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace, pour les cellules actuellement commercialisées au silicium : $A=1$.

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

V : La tension de sortie.

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p .

R_p : Résistance parallèle représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{oc} : La tension en circuit ouvert.

ff : Le facteur de forme.

η : Le rendement de conversion d'énergie .

R_s : La résistance séries.

R_p : La résistance shunt.

I_0 : Le courant de saturation.

O : Le flux d'éclairement.

I_{pco} : La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

V_{pco} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

V_{sco} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_c : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

α : Le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Q_{batt} : la quantité de charge électrique en Coulomb.

I : le courant a travers la capacité.

t : le temps de fonctionnement

C : la valeur de la capacité en Farad.

V : la différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie allant.

C_{batt} : Capacité de la batterie.

t : Temps de décharge de la batterie.

V_{b-ch} : Equation de charge de la batterie.

$V_{b-déch}$: Equation de décharge de la batterie .

$C(p)$: Fonction de transfert de régulateur PI.

K_p : Gain proportionnel du régulateur PI.

T_i : Constante de temps du régulateur PI.

SL : Puissance apparente demandée par la charge.

PL : Puissance active demandé par la charge.

QL : Puissance réactive demandé par la charge.

YL : Admittance de la charge.

P_{GD} : Puissance électrique produite par les générateurs diesel.

P_{pv} : Puissance électrique p

Résumé/ abstract / ملخص

العالم يشهد نمو ديموغرافي كبير وطلب متزايد في الكهرباء حتى الان يرتكز انتاج الكهرباء على مصدر واحد لتغطيه احتياجات المستهلك من ما جعل الاستمراريه غير مضمونه وهذا شكل عائق كبير خاصه في المناطق المعزوله ولذلك قد اضحى من ضمن البدائل المتوفره هو استخدام النظام الهجين وذلك للايجابيات التي لديه لحل مشكله الاستمراريه وضمان الاستقلاليه بالاضافه الى ذلك تكلفه منخفضه ولهذا العالم يتجه الى جعل محطات توليد الكهرباء بهذا النظام.

في بحثنا هذا سنقوم بدراسه النظام الهجين المكون من مصدرين للطاقة مصدر متجدد متمثل بالطاقة الشمسيه الاغلب استعمالا في الطاقات المتجددة لتوفرها مع مصدر ثاني وهو طاقه الديزل وذلك بشبكه معزوله بالاضافه الى جهاز تخزين الطاقة كيميائيا

كلمات البحث: الطاقة الشمسية - طاقه الديزل - محولات - بطاريه .

Le monde connaît une forte croissance démographique et une demande croissante d'électricité jusqu'à présent, la production d'électricité est basée sur une source unique pour couvrir les besoins du consommateur, ce qui a rendu la continuité non garantie, et cela a constitué un grand obstacle, en particulier dans les zones isolées, et c'est donc devenu l'une des alternatives disponibles est l'utilisation du système hybride en raison des avantages qu'il doit résoudre. Le problème de la continuité et d'assurer l'indépendance, en plus de cela, son coût est faible, et ce monde a tendance à faire des centrales électriques avec ce système.

Dans nos recherches, nous étudierons le système hybride constitué de deux sources d'énergie, une source renouvelable représentée par l'énergie solaire la plus couramment utilisée dans les énergies renouvelables car elle est disponible avec une seconde source, qui est l'énergie diesel, avec un réseau isolé en plus d'un dispositif de stockage d'énergie chimique.

Mots Clés : énergie solaire, énergie diésel, hacheur, batterie.

The world is witnessing a large demographic growth and a growing demand for electricity so far, electricity production is based on a single source to cover the needs of the consumer, which made continuity not guaranteed, and this formed a great obstacle, especially in isolated areas, and therefore it has become among the alternatives available is the use of the hybrid system because of the advantages that he has to solve The problem of continuity and ensuring independence,

In addition to that, its cost is low, and this world tends to make power plants with this system. In our research we will study the hybrid system consisting of two sources of energy, a renewable source represented by solar energy most commonly used in renewable energies because it is available with a second source, which is diesel energy, with an isolated network in addition to a chemically stored energy device.

Keywords: solar energy, diesel energy, chopper, battery.

Sommaire

<u>Introduction générale</u>	1
<u>Chapitre I Généralité sur les systèmes d'énergie multi-source PV-D</u>	
I.1 Introduction.....	2
I.2 L' 'énergie solaire.....	2
I.2.1 Rayonnement solaire	2
I.2.1.2 Différents types de rayonnement.....	3
I.2.3 Instruments de mesure.....	3
I. 2.4 L'effet photovoltaïque	4
I.2.5 L'installation photovoltaïque	4
I.2.6 La description des systèmes photovoltaïques	5
I.2.6.1 La cellule solaire	5
I.2.6.2 Fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	8
I.2.6.3.Différents types des cellules photovoltaïques.....	8
I.2.6.3.1 Cellules monocristallines.....	8
I.2.6.3.2 Cellules poly cristallines.....	9
I.2.6.3.3 Cellules amorphes.....	10
I.2.6 L'installation photovoltaïque.....	12
I.2.7 Panneau photovoltaïque	13
I.2.8 Différentes configuration d'une installation photovoltaïque	13
I.2.8.1 Système autonome	14
I.2.8.2 Système raccordée au réseau	15
I.2.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	16
I.2.9.1 Les avantage.....	16
I.2.9.2 Les inconvénients.....	16
I.3 Généralité sur les systèmes diesel	16

I.3.1 Générateur diesel.....	16
I.3.2.Réseaux autonome alimenté par centrale diesel	17
I.3.3 Fonctionnement des groupes diesel	18
I.4 Systèmes de stockage	18
I.5 Convertisseurs	20
I.6 Charges	20
I.7 Système d'exploitation	21
I.8 Etude de différentes structures du système d'énergie hybride.....	21
I.8.1 Classifications des systèmes hybrides PV/Diésel.....	21
I.8.2 Les déférentes structures du système hybride PV/Diésel	21
I.8.2.1 Configuration de bus CC	22
I.8.2.2 Configuration de bus mixte AC/CC.....	24
a) Connexion à bus mixte AC/CC avec Commutation.....	24
b) Connexion en parallèle.....	25
I..8.2.3 Configuration de bus CA.....	26
I.8.3 L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.....	27
I.9 Conclusion.....	28
References bibliographies.....	29

Chapitre II Modélisation du système hybride PV/Diesel

II.1 Introduction.....	32
II.2 la chaîne de production photovoltaïque.....	32
II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	33
II.2.2 Caractéristiques des cellules photovoltaïques	34
II.2.2.1 courant de court-circuit I_{CC}	35
II.2.2.2 Tension en circuit ouvert V_{CO}	35
II.2.2.3 la Puissance maximale P_{max}	36
II.2.2.4 Facteur de forme FF	36
II.2.2.5 Rendement énergétique η	36
II.2.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	36
II.2.4 Association de cellule photovoltaïque.....	37
II.3 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	38
II.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	39
II.3.1 Type des hacheurs.....	40

a) Hacheur Buck.....	40
b) Hacheur Boost.....	41
c) Hacheur Buck-Boost.....	43
II.4 Commandes spécifiques des systèmes Photovoltaïques (mppt).....	44
II.4.1 Principe de La Commande mppt.....	44
II.4.2 Classification Des Commandes MPPT.....	45
II.4.2.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.	45
A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS	45
B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du	
convertisseur.....	46
II.4.2.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	46
b. MPPT Direct	46
a. MPPT Indirect	46
II.4.3 Les Types Algorithmes MPPT.....	47
III.4.3.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe).....	47
III.4.3.2 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)	51
III.4.3.3 La Commande Mppt Flou.....	54
II.4.4 Autres Méthodes	56
II.5 Hacheur réversible en courant	56
II.5.1 Modélisation du hacheur réversible en courant	57
II.6 Modélisation de l'onduleur.....	57
II.6.1 Modulation de Largeur D'impulsion M.L.I.....	58
II.7 Modélisation de stockage.....	59
II.7.1 Le modèle électrique simple de la batterie	59
II.7.2 Modélisation des batteries Plomb-Acide.....	60
II.8 Modélisation du générateur Diesel.....	61
II.9 Modélisation de la charge	63
II.10 Modélisation d'une centrale hybride PV/diesel	64
II.11 Conclusion	64
References bibliographiques.....	65

Chapitre III : Simulation numérique du système hybride PV/Diesel

III.1. Introduction	68
III. 2 L'outil Matlab Simulink.....	68
III. 2. 1 Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK.....	68

III.3 Schéma global du système.....	69
III.4 Résultats de simulation.....	69
III.4.1 Générateur diesel.....	69
III. 4.2 Simulation du GPV.....	71
III.4.2. Simulation du générateur (GPV) à éclairment et température constante.....	72
III.4.3 Simulation du générateur (GPV) à éclairment et température variable.....	73
III.4.3.1. L'influence de l'éclairment sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$	73
III.4.3.2. L'influence de l'éclairment sur la caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$	74
III.4.3.3. L'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$	74
III.4.3.4. L'influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$	75
III.4.4.Groupement du module PV	76
III.4.4.1 : Les caractéristiques I(V) et P(V) du groupes des modules à l'état stander....	77
III.4.5 Hacheur DC/DC	77
III.4.6 La commande MLI	78
III.4.7 Batterie.....	79
III.4.8 Stratégie de gestion d'énergie	82
III.5 Conclusion.....	83
References bibliographies.....	84
<u>Conclusion générale.....</u>	85

Introduction General

Introduction General

L'énergie est une des causes du développement d'un pays, elle est partout et elle permet un véritable confort. Ainsi, alors que les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche, tant publique que privée, se tourne vers les énergies renouvelables, surtout avec l'augmentation brutale du prix du pétrole.

Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne et hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire. elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée.

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 nommés cellules PV [28].

L'installation d'un système de stockage d'énergie est une nécessité incontournable, pour assurer un bon équilibre entre la production et la consommation. De plus, des sources d'énergies complémentaires telles que des groupes électrogènes sont demandés pour bien compenser ou couvrir en cas de manque d'énergie renouvelable. Pour se faire, une architecture de connexion convenable s'impose pour assurer une bonne alimentation et garantir une exploitation optimale de l'énergie produite.

Dans ce contexte, on s'intéresse au système hybride photovoltaïque-diesel autonome. C'est un système qui allie l'énergie photovoltaïque et un groupe électrogène, qui peut convenir pour une installation non connectée au réseau.

Le premier chapitre, rappelle brièvement généralité sur photovoltaïque, et générateur diesel les modes de stockages d'énergies, et la description des systèmes hybrides.

Le second chapitre concerne la modélisation du système hybride photovoltaïque diesel.

Le troisième chapitre sera consacré à la schématisation globale du système, simulation de générateur photovoltaïque et le hacheur silvateur et onduleur MLI et l'interprétation des résultats.

Chapitre I

Généralité sur le photovoltaïque, générateur diesel, systèmes hybrides

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1].

Dans ce chapitre, nous commencerons par la définition de l'énergie solaire puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi principe de fonctionnement. Puis nous présentons les différents types des cellules photovoltaïques et généralité sur générateur diesel.

I.2 Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.2.1 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. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW c/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- ❖ L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut ainsi produire avec de la vapeur à partir la convertir en électricité.
- ❖ 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 de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

I.2.2 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui s'épare 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.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm [5], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :[6]

- ❖ 9% dans la bande des ultraviolets (< à 0.4 μm).
- ❖ 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 μm).
- ❖ 44% dans la bande des infrarouges (> à 0.8 μm).

I.2.2.1 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- **Rayonnement direct**

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

- **Rayonnement diffus**

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

- **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 la surface appelé Albédo (ρ) $0 \leq \rho \leq 1$.

- **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.

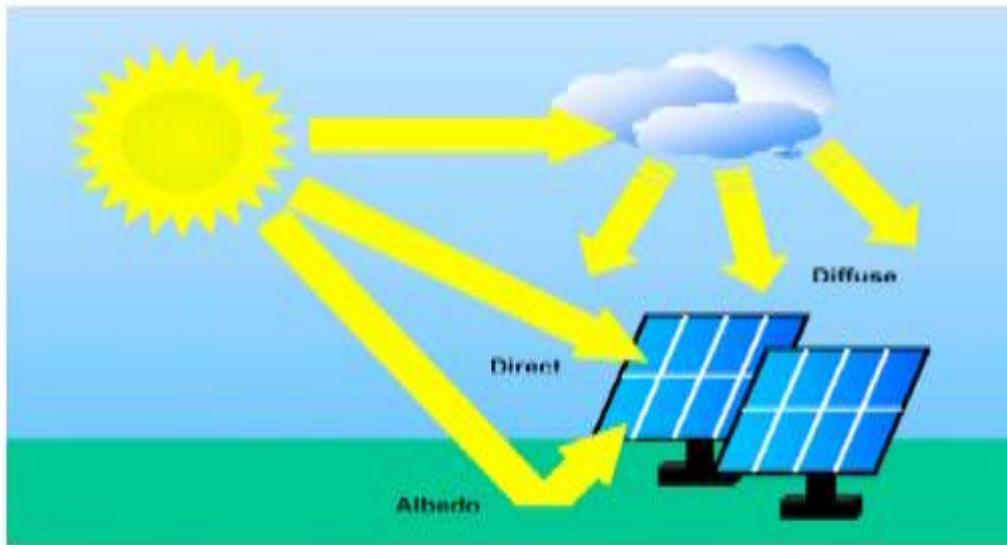


Figure I.1 composantes du rayonnement solaire. [32]

I.2.3 Instruments de mesure

Le pyranomètre: Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure du rayonnement global. un courant électrique, proportionnel à l'éclairement reçu, est fourni par une thermopile protégée par deux hémisphères en verre et par un disque métallique recouvert de peinture blanche. Le verre est transparent aux longueurs d'onde comprises dans la bande spectrale ($0.3 - 2.5\mu m$). L'appareil placé horizontalement grâce à un niveau à bulle, donne valeur de l'éclairement globale G: [7]

I. 2.4 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par A. Becquerel en 1839 il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en explication pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium. [8]

Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons

libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_c - E_v$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires. Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure à E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [9]

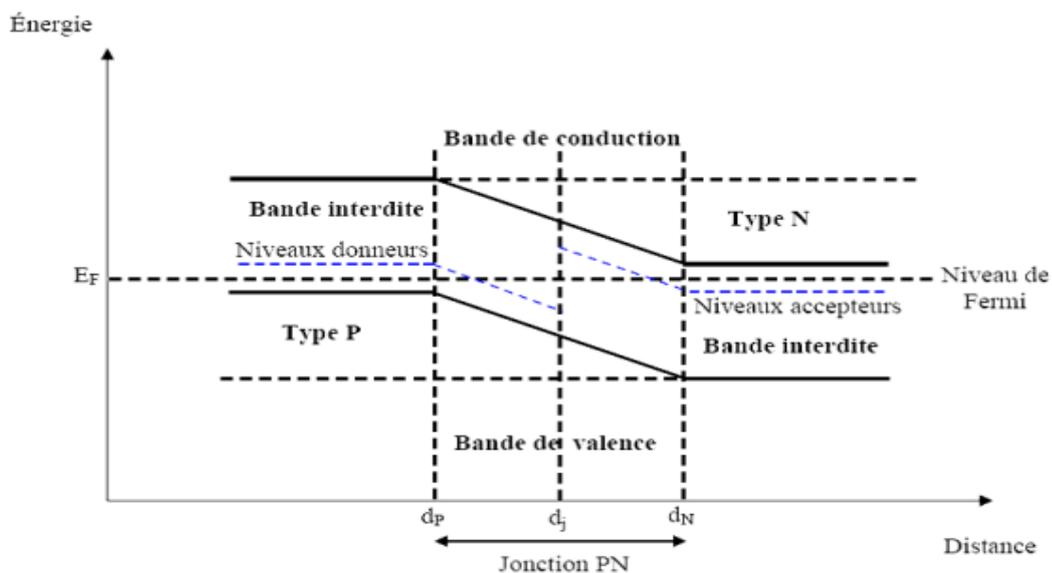


Figure I.2 Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

I.2.5 La description des systèmes photovoltaïques

I.2.5.1 La cellule solaire

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi

une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ $0,6v$ pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}), (Voir **figure (I.3)**). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

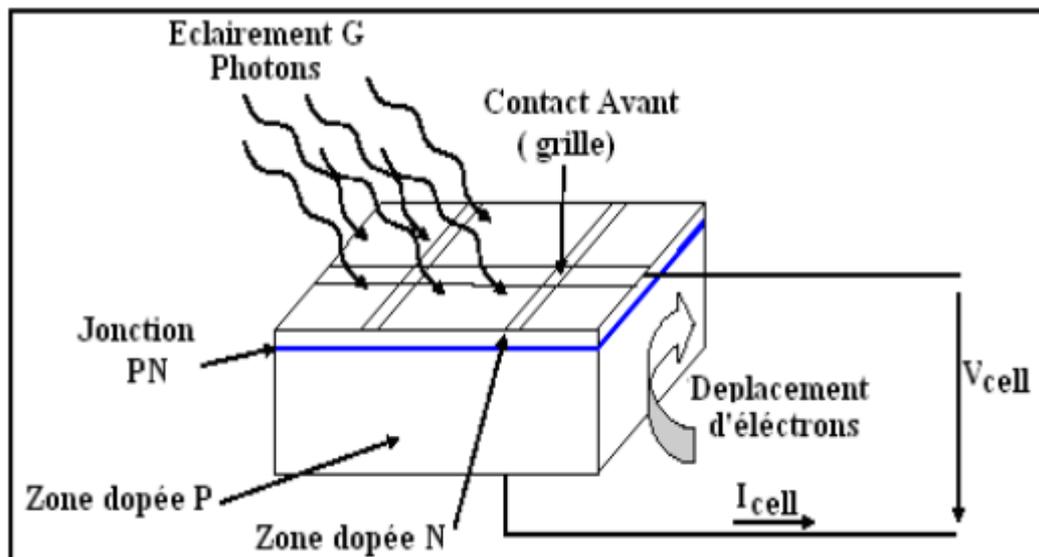


Figure I.3 Coupe transversale d'une cellule PV typique[11].

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention générateur (**figure (1.4)**).

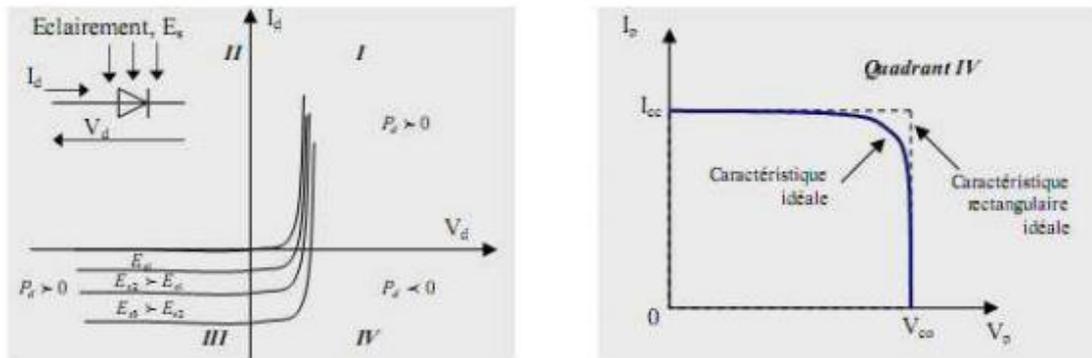


Figure I.4 caractéristique d’une photodiode. B : caractéristique d’une cellule Photovoltaïque [11].

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (figure (1.5)). [12].

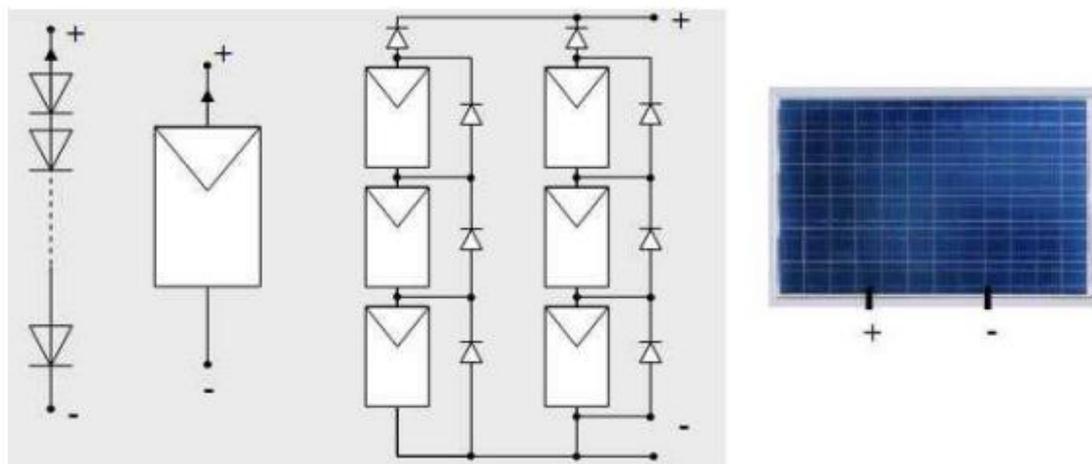


Figure I.5 Cellules module et panneau photovoltaïques [34].

Le passage d’un module à un panneau se fait par l’ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n’intervient qu’en cas de déséquilibre d’un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

I.2.5.2 Fonctionnement des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge. Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite

- Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de $0,5\text{V}$ en circuit ouvert. L'intensité du courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge.

I.2.5.3. Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent [10]. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules

I.2.5.3.1 Cellules monocristallines

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 **figure (I.6)**. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. [13]

Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N dépôt de

couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse

Avantage :

- ✓ Bon rendement (20% environ).

Inconvénients :

- ✓ Les cellules sont chères.
- ✓ Fonctionnement très médiocre sous un faible éclairage.

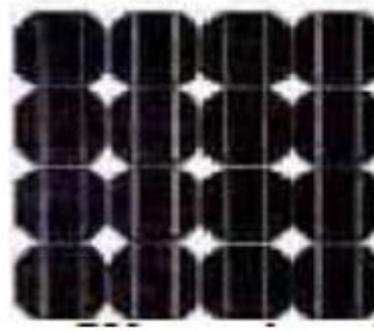


Figure I.6 Cellule photovoltaïque (monocristalline) [33]

I.2.5.3.2 Cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes), **figure (I.7)**.

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. [13]

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans.

Avantage

- ✓ Bon rendement (13% environ), mais cependant moins bon que pour le mono cristallin.
- ✓ Moins cher que le monocristallin.

Inconvénients

- ✓ Les mêmes que le mono cristallin.



Figure I.7 Cellule PV poly cristalline. Source: Wikipédia

I.2.5.3.3 Cellules amorphes

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Poly cristallines ou monocristallines. [13]

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.

Avantages

- ✓ elles fonctionnent faible (par temps couvert ou `a l'intérieur d'un bâtiment).
- ✓ Elles sont moins chères que les autres.

Inconvénients

- ✓ Leur rendement (10 % environ) est moins bon que les autres en plein soleil.

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristique	Principales Utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 a 30 ans	* Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 a 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)	* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment	

		délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.		
--	--	---	--	--

Tableau I. 1 Comparatif des différentes technologies

I.2.6 L'installation photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable. D'un point de vue purement technique, on estime que les systèmes de conversion à énergie solaire sont potentiellement capables de répondre à une grande partie de la demande énergétique mondiale.

Un système photovoltaïque est constitué des éléments suivants:

- Module photovoltaïque
- Régulateur,
- Convertisseur (onduleur).

Cette transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques (PV). Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques non linéaires dépendant de l'éclairement [10].

I. 2.7 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [20].



Figure I-8 Panneau photovoltaïque

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, 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.

I.2.8 Différentes configuration d'une installation photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques apparaissent comme une solution privilégiée pour la production d'électricité de faible ou moyenne puissance en site isolé et particulièrement pour les habitations. Ce système PV se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires ; les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules ; le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale ; l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin ; le câblage qui relie les différents composants du système entre eux [21].

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.[15]

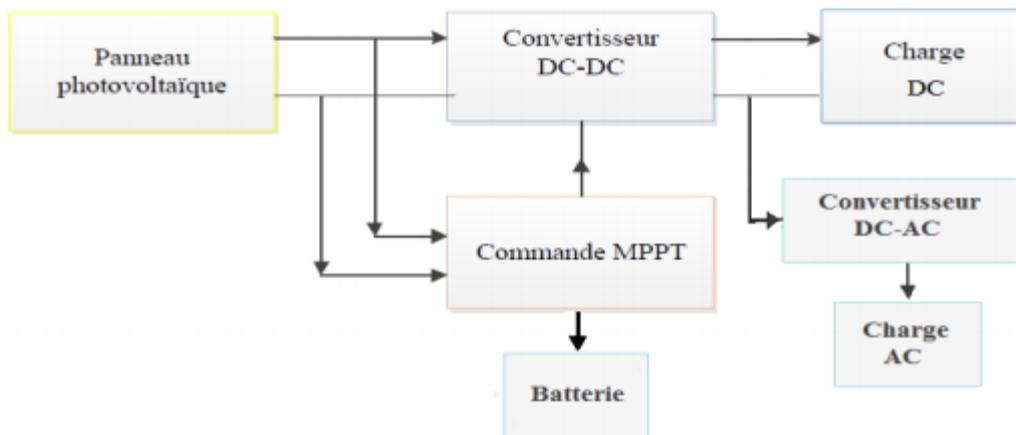


Figure I.9 représentation des différents composants d'une installation PV [22].

I.2.8.1 Système autonome

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente 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. Comme l'indique la figure I.10 représentant un exemple de système PV autonome, la présence d'éléments de stockage est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité [22]

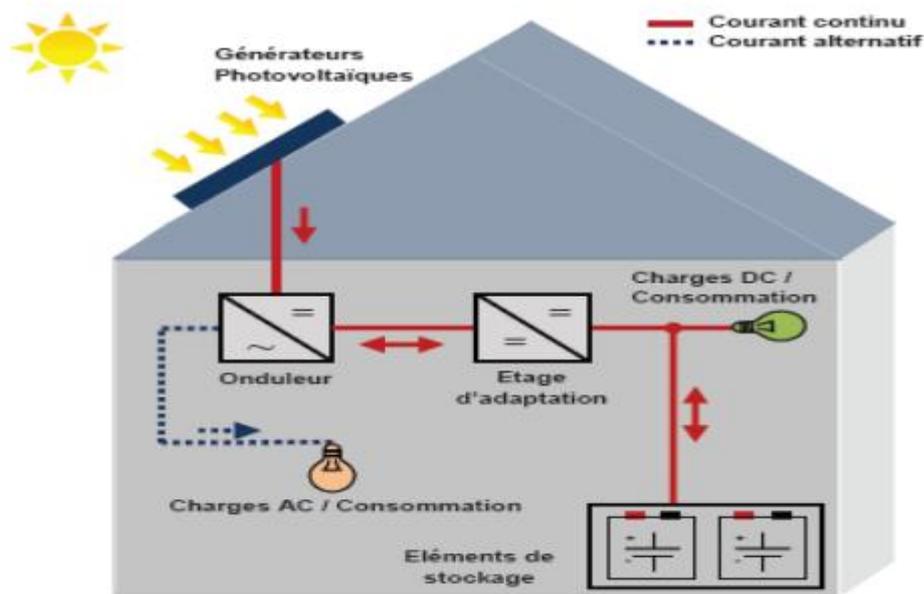


Figure I.10 Système PV autonome [22].

I.2.8.2 Système raccordée au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur continu/alternatif (DC/AC). Etant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [22].

La figure (I.11) représente un système PV connecté au réseau

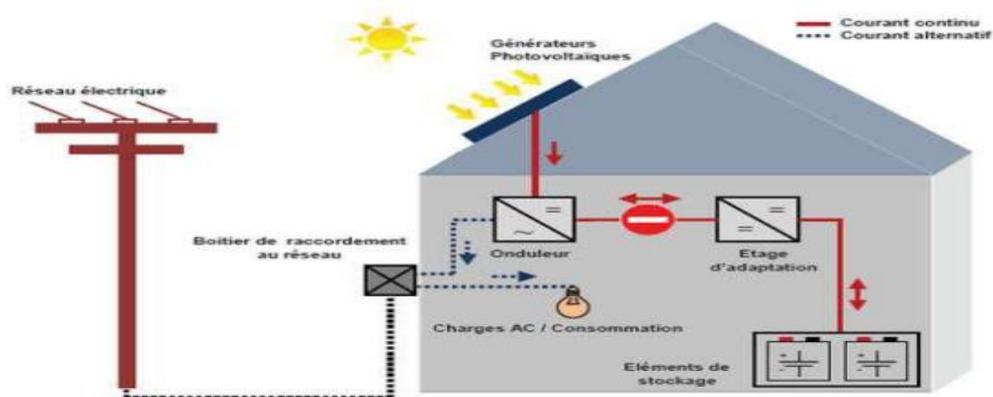


Figure I.11 Système PV raccordée au réseau [22].

I.2.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [27] [28,29]

I.2.9.1 Les avantage

L'énergie solaire photovoltaïque présente beaucoup d'avantages dont on peut citer à titre indicatif :

- ❖ L'énergie solaire est une énergie renouvelable et inépuisable.
- ❖ Aucune pollution, les sources PV peuvent convertir l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution.
- ❖ Coût de fonctionnement faible, le coût de fonctionnement est très faible par rapport aux sources conventionnelles.
- ❖ Coût d'investissement en diminution, le prix des panneaux solaire a déjà beaucoup diminué. -Faible entretien, les sources n'ont pas besoin de beaucoup d'entretien.
- ❖ Pas de risques électriques pour les usagers.

I.2.9.2 Les inconvénients

Cette source présente aussi quelques inconvénients tels que :

- ❖ Variation d'énergie solaire : les sources PV ne fonctionnent que lorsque l'énergie solaire est disponible.
- ❖ Densité énergétique et rendement : la densité des sources PV est faible et le rendement réel est aussi faible.
- ❖ Taille des installations : les surfaces des installations sont toujours importantes.
- ❖ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur augmente.
- ❖ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.3 Généralité sur les systèmes diesel

I.3.1 Générateur diesel

Dans la plupart des régions isolées, le groupe (générateur) diesel est la source principale d'énergie électrique.

Dans cette étude donc les générateurs diesel est la source d'énergie principale d'alimentation.

Le groupe électrogène est généralement un moteur diesel (voir Annexe I) directement couplé au générateur synchrone ou l'Alternateur **figure(I.12)**. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse sur le moteur diesel [23]. Ce régulateur fonctionne en ajustant le débit de carburant au moteur diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse de l'alternateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré. [24]

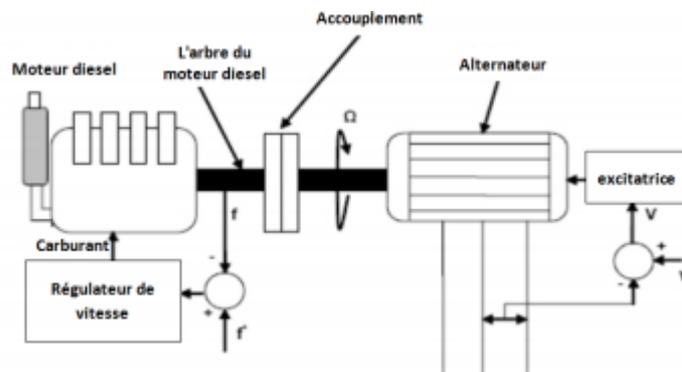


Figure I.12 Configuration du générateur diesel [24]

Contrairement à un moteur diésel d'automobile, un moteur diesel pour groupe électrogène doit fonctionner à vitesse constante et couple variable. En effet la fréquence des tensions produites par le générateur respecte la loi:

$$\omega_{\text{syn}} = \frac{\omega_e}{p}$$

Où ω_{syn} est la vitesse angulaire (vitesse synchrone) de l'arbre de groupe diesel,

$\omega_e = 2\pi f$ est la pulsation des courants statoriques de la génératrice synchrone du groupe, et p est le nombre de paires de pôles de la génératrice. Ainsi, la consigne de vitesse est appliquée sous forme de fréquence désirée et le système de régulation de la vitesse de la turbine se charge d'ajuster le couple moteur T_m de manière à maintenir la vitesse de rotation constante.

I.3.2. Réseaux autonome alimenté par centrale diesel

Les réseaux de courant alternatif alimenté par centrale diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Dans les processus industriels et domestiques utilisant l'énergie électrique, seule l'énergie active est transformée au sein de l'outil de production, en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc... L'autre,

L'énergie réactive sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, autotransformateurs, etc...). En fait, elle n'est pas consommée, mais les courants associés à la puissance réactive augmentent les pertes dans le système. La puissance réactive dans un système d'AC avec GD est produite par l'alternateur. Cela est fait conjointement avec le réglage de tension, en ajustant le courant d'excitation de l'alternateur. Par conséquent, dans un système d'énergie à AC avec plusieurs GD, on doit avoir au moins un GD connecté au réseau, pour fixer la fréquence du réseau et fournir la puissance réactive. Il est possible de modifier le système pour que le GD ne soit pas toujours sollicité, mais dans ce cas d'autres composants doivent être ajoutés.

I.3.3 Fonctionnement des groupes diesel

Quand plusieurs groupes diesels fournissent de l'énergie à la charge, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

Ce système de commande peut prendre une variété de formes, le plus répandu étant le système de commande numérique. Une approche est d'utiliser un seul générateur pour fixer la fréquence (générateur maître) du réseau et laisser les autres tourner à charge fixe (générateurs esclaves), donc fonctionner à un débit de carburant constant ou bien toute la charge sera répartie à tous les groupes selon la puissance nominale de chaque groupe. Dans les systèmes traditionnels, le débit de carburant est fixé manuellement par un opérateur. Avec les commandes modernes, le débit peut être ajusté pour optimiser l'usage du carburant. [25]

I.4 Systèmes de stockage

Il existe de nombreux moyens de stocker de l'électricité, qui passent quasiment tous par sa conversion en une autre forme d'énergie plus aisée à confiner, telle l'énergie chimique par exemple. Seuls le stockage électromagnétique et le stockage électrostatique stockent l'électricité sous forme de charges électriques. Le stockage électrochimique est largement employé dans les applications stationnaires. Cette technologie possède un retour d'expérience

de plus de cinquante ans, notamment grâce aux applications automobiles. Son faible coût et son excellent taux de recyclabilité en font un acteur incontournable du stockage dans les systèmes électriques. La technologie des accumulateurs est très diversifiée. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Ils sont normalement spécifiés par une capacité exprimée en ampères- heures(Ah). Cette valeur est définie comme l'énergie délivrée lorsque la batterie passe d'un état de charge à un état où la tension à ses bornes chute brutalement, tension dite de "cut-off " **figure (I.13)**. Notons que la valeur de la capacité dépend du courant délivré **figure (I.14)**. On peut remarquer sur cette figure que la capacité est plus faible si le courant de décharge est important.

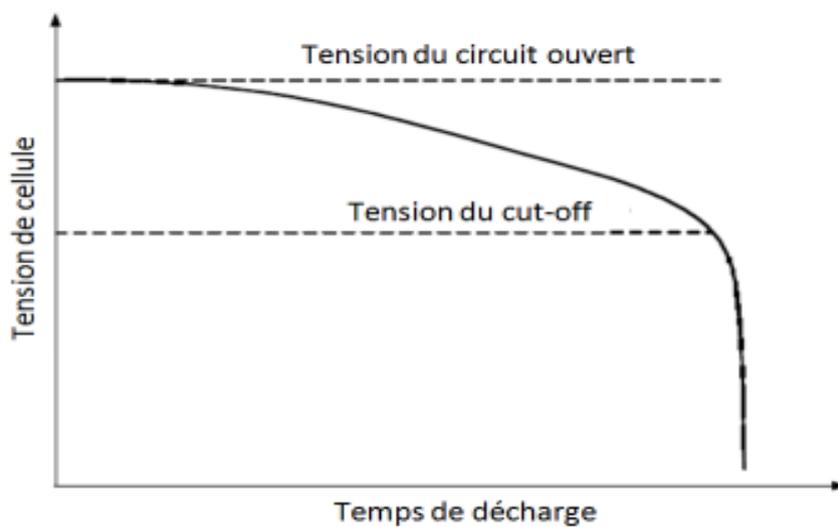


Figure I.13 Tension de « cut-off » d'une batteries [23]

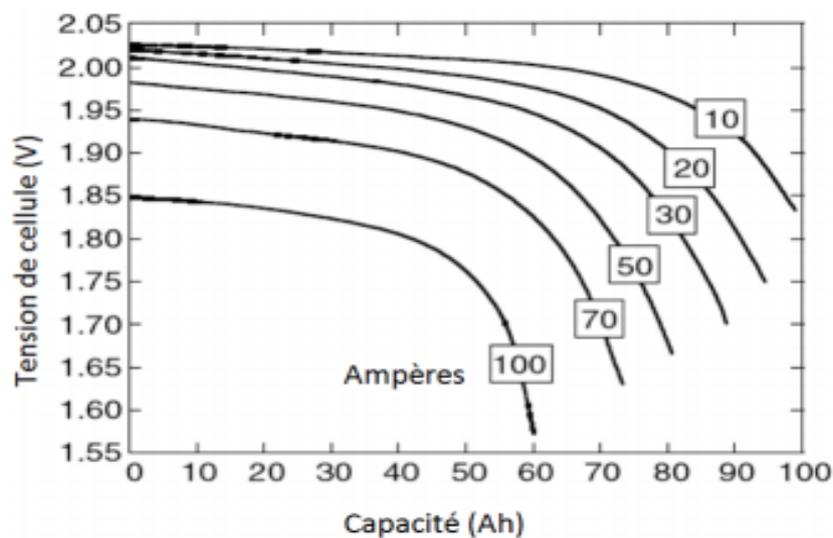


Figure I.14 Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb [23]

I.5 Convertisseurs

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. [26]

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC, Dans les systèmes multi-sources, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs convertissent le DC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à AC ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à AC pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

I.6 Charges

Les charges électriques rendent utile une puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont de charge résistive et inductives. Ils sont les principaux consommateurs de puissance réactive.

Les charges à DC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie.

I.7 Système d'exploitation

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les Chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop.

Les réseaux multi diésel peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs diesels et régler le flux de puissance. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de commandes intégrées sont le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, le régulateur de tension sur l'alternateur ou la commande de l'éolienne.

Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Ce système de surveillance est d'habitude automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges

I.8 Etude de différentes structures du système d'énergie hybride

I.8.1 Classifications des systèmes hybrides PV/Diésel

Une première classification des systèmes hybrides PV/Diésel en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante :

- **Centrales de petite taille ($P_w=1$ à 10 KW)** Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension [24].
- **Centrales de taille moyenne ($P_w=10$ à 100 KW)** Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille [24].
- **Centrales de grande taille ($P_w=500$ KW)** Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non [24].

I.8.2 Les différentes structures du système hybride PV/Diésel

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système photovoltaïque hybride.

- Le premier critère est le nombre générateur diesel.
- la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage sont des batteries rechargeables.
- les points de placement de systèmes photovoltaïques sur les réseaux par rapport à les générateurs Diesel, c'est-à-dire centralisé ou décentralisé. Un critère important est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimente.

En revanche, Le générateur photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation exige le plus souvent du courant alternatif, c'est pourquoi il est souvent nécessaire d'adjoindre au système un onduleur. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille en parallèle ou en alternance avec le générateur diesel [14]. On distingue plusieurs configurations selon:

Selon le type couplage

- • Système hybride PV/Diesel série
- • Système hybride PV/Diesel commuté
- • Système hybride PV/Diesel parallèle.

Selon le bus couplage :

- • Configuration de bus CC.
- • Configuration de bus mixte CC/AC.
- • Configuration de bus AC.

Alors, les structures de système PV/Diesel ont été décrites et classifiées selon le bus et type de couplage du système :

I.8.2.1 Configuration de bus CC

Dans ce cas, le générateur diesel est connecte sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimente par un onduleur. Le schéma de principe d' un système hybride avec une telle configuration est présent sur la **figure (I.15)** Dans cette configuration, le générateur diesel

peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie.

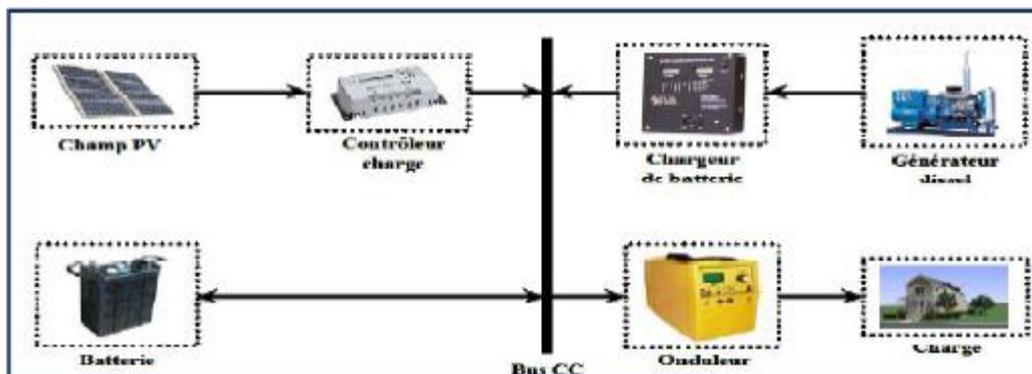


Figure I.15 Système hybride avec connexion série. [16]

Avantages

- Un dimensionnement facile du générateur diesel
- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif
- La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur et la fréquence sont convenables.

Inconvénients

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible
- La batterie doit avoir une grande capacité
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

Application

Typique pour les petits systèmes incluant un générateur diesel qui est rarement utilisé

I.8.2.2 Configuration de bus mixte AC/CC

La configuration à deux bus, à CC et à CA a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (Le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) [16]. Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé. Dans ce structure, les sources peut connecter avec commutation ou en parallèle.

a) Connexion à bus mixte AC/CC avec Commutation.

Elle est souvent utilisée malgré quelques désavantages. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur. L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur diesel peut charger la batterie par l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride.

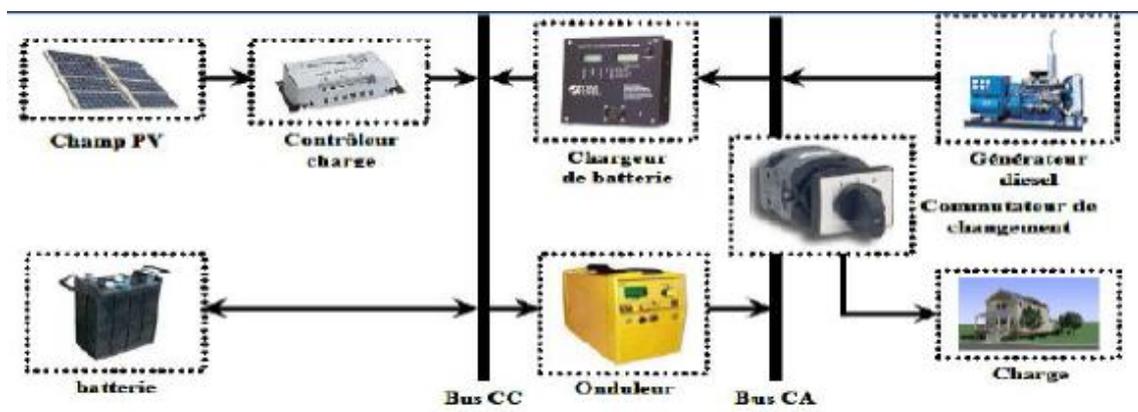


Figure I.16 Système hybride à commutation [16]

Avantages

- Le système possède un rendement plus haut, parce que le générateur diesel peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de fuel
- L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur
- Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel.

Inconvénients

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources.

Application

Généralement, cette configuration utilise pour les systèmes autonomes, avec des batteries de stockage, pour alimenter un site isolé (une station ou une antenne de télécommunication par exemple).

b) Connexion en parallèle

Le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif CA et l'installation Photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu CC. Les deux bus se sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie.

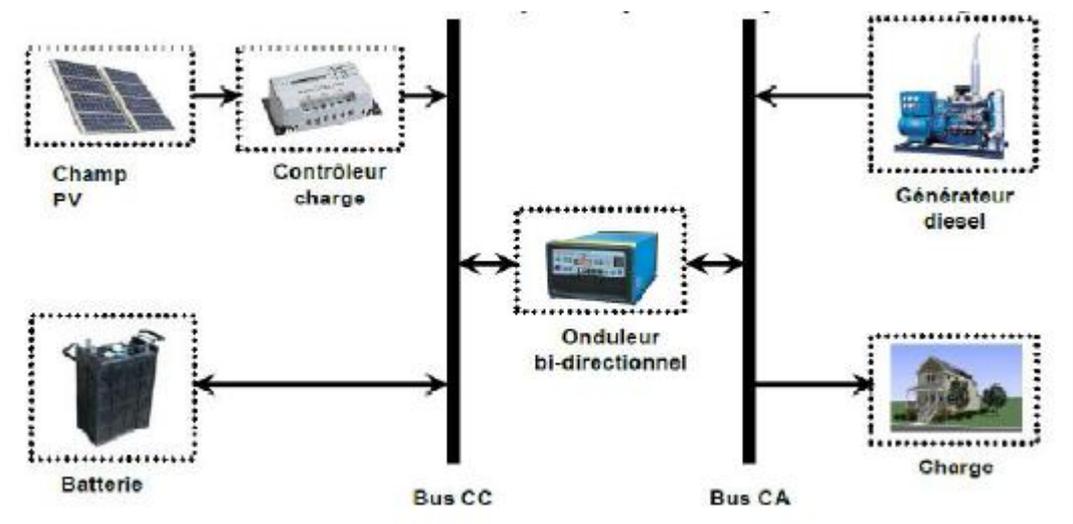


Figure I.17 Système hybride à connexion parallèle [16].

Avantages

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel
- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

Inconvénients

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la Synchronisation avec le générateur diesel soit possible
- Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié
- Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur)
- Le bus continu est plus difficile à contrôler.

Application

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément.

I.8.2.3 Configuration de bus CA

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA). Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus [16].

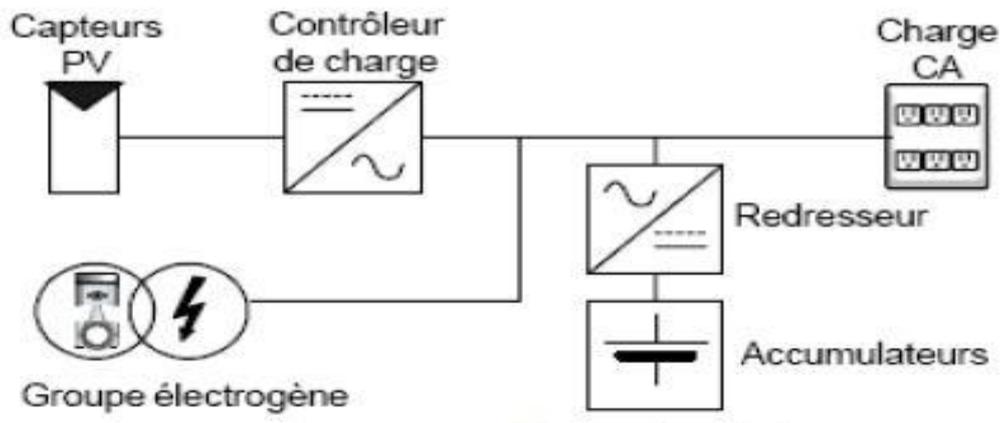


Figure I.18 Configuration à bus AC.

I.8.3 L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.

Le couplage toute la composante (charges, générateurs et stockage) au bus CA nous permet de réalisation des systèmes flexibles constitués de composants modulaires en fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer les différentes sources énergétiques, renouvelables et conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants. Ces structures peuvent être utilisées pour hybridation une centrale existant en énergie renouvelable, ainsi que, c'est la structure le plus approprié pour l'intégration les énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Généralement les études abordé aux systèmes hybrides PV/Diésel présentent des résultats issus de systèmes existants et installés (en Algérie par exemple Une installation hybride pilote, PV/diesel, a été conçue et réalisée par le Centre de Recherches et de Développement en Electricité et Gaz (CREDEG), au niveau de son siège sis à Ouled Fayet, pour servir de plateforme d'essai pour l'étude de l'impact de l'opération d'hybridation des centrales diesel existantes à l'énergie photovoltaïque[17])

.L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus (AC).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur)

- Structure 100 % compatible avec le réseau public.
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement;
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces;
- Évolutif à souhait, même pour les systèmes plus imposants (de 1 kW jusqu'au mégawatt).
- Combinable avec des générateurs en réseau parallèle et sur le même réseau.
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence) [16].

Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs ;
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande.

Application

Configuration typique pour les grands systèmes (hybridation des centrales diesel en énergie PV par exemple). Au moins un générateur diesel produit et contrôle la tension du réseau.

I.9 Conclusion

Une brève description du système multi-sources PV-D a été réalisée dans ce chapitre. Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans ce système ont été données. Ce travail portant sur un système PV-D composé, des panneaux photovoltaïques et d'un générateur diesel et batteries de stockage.

Les différents types d'architectures existants, ainsi que les problèmes et les stratégies de commande habituelles des systèmes PV-D ont également été présentés. Le fonctionnement des composantes du système PV-D doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables.

References bibliographiques

- [1] L. STOYANOV, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de doctorat, Université De Corse Pasquale Paoli et Université Technique De Sofia, 2011.
- [2] www.neal - dz.net : New Energy Algeria , 2009 .
- [3] **Ministère de l'énergie et des mines**, « Programme des énergies renouvelables et de
- [4] . HANANOU Fatiha, ROUBAH Aicha Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, mémoire master l'université Ourgla 2014.
- [5]. B.Equer le pompage photovoltaïque Manuel de cours, énergie solaire photovoltaïque elipses 1993.
- [6]. **MECHALIKH Med Nadjib**, HAMADA Charaf Eddine Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecte au réseau Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.
- [7] **Sekhri Toufik** , Mémoire de fin d'étude, «Etude comparatif entre deux concentrateur solaire» Université de Ouargla, 2012.
- [8] **N. OLEKSIY** « simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigites » thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de lyons
- [9] **T .Fogelman**, « système photovoltaïque pour les pays en développement », manuel d'installation et d'utilisation, agence Française pour la maîtrise de l'énergie, (AFME)
- [10] **A. OULD MAHMOUD**, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixte » thèse de doctorat de Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2008.
- [11] **S. A. Tadjer**, “Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque (GPV) ,” Mémoire de magistère, Université M'Hamed Bougara – Boumerdes, 2008.
- [12] **A. Sahli**, “ Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes

- [13]. **Salim MAKHLOUFI**, Optimisation des installations photovoltaïques , Thèse de Doctorat en science l'université Hadj lakhder Batna, 2013.
- [14] **L. Stoyanov 1***, **G. Notton 2** et **V. Lazarov 1**, " Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables"Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1 (2007) 1 – 18.
- [15] **S. VIGHETTI**, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2010
- [16] **BAGHDADI Fazia** "MODELISATION ET SIMULATION DES PERFORMANCES D'UNEINSTALLATION HYBRIDE DE CONVERSION D'ENERGIES RENOUVELABLES," mémoire magistère UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU septembre 2011.
- [17] Echo Sonelgaz Groupe N°1-2011.
- [20] **Belhadj Mohammed**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [21] **I. VECHIU**, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005.
- [22] **G. SIGUIER**, «L'électronique de puissance», Edition DUNOD 1990
- [23] **S. BELAKEHAL**, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédié aux Energies Renouvelables » Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [24] **F. Bouchtouche cherfa** «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [25] **I. VECHIU**, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005. photovoltaïques interconnectés au réseau,» Mémoire de magistère, Université de Sétif, 2012.
- [26] **G. SIGUIER**, «L'électronique de puissance», Edition DUNOD 1990

[27] **Madjid Zandi** « Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique », thèse de Doctorat de L'INPL, Nancy, 2010.

[28] **Mohamed Arouf** : « Optimisation de l'ensemble onduleur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.

[29] **Belhadj Mohammed** :« Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de Magister, Université de Bechar, 2007/2008.

[30] **I. Hussein, A. Ilinca, J.Perron** “Investigations Des Différentes Alternatives Renouvelables etHybrides pour l'Électrification des Sites Isolés”, Rapport interne Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne, LREE-03, Université du Québec à Rimouski,Canada, 2008

[31] **H. Kanchev**, “ Gestion des Flux énergétiques dans un Système Hybride de Sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain,” Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, 2014

[32] : **Soufi Adel**, Mémoire de fin d'étude « Modélisation et Control System photovoltaïque par l'espace d'ETA », Université de Ouargla, 2012

[33] :« **Energie solaire photovoltaïque**».doc / B. Flèche - D. Delagnes .2007

[34] **MAHAMMEDI Abdellatif** “ Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque“ mémoire de magister universite de stif

Chapitre II

Modélisation du système hybride PV/Diesel

II.1 Introduction

Après avoir étudié en général, nous mentionner les différents éléments du système et étudions tous équations mathématiques et caractéristique à chaque élément on ca Apple modélisation.

La modélisation du système d'énergie multi-source *PV-D* est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système (photovoltaïque et diesel) et la charge aussi pour l'amélioration performance à éléments

Dans ce chapitre, nous représenterons le modèle: chaîne de production photovoltaïque, système de Régulation, groupe diesel, système de conversion et du dispositif de stockage (batterie).

II.2 la chaîne de production photovoltaïque

Chaine de production ou conversion PV c'est une série d'appareils ou composants qui se connectent GPV (générateur photovoltaïque) avec la charge (les usines, maisonetc.)

Pour qu'il soit représenté d'appareils GPV, système de Régulation (mppt, MIL), système de conversion (onduleur, hacheur) et système de de stockage (batterie) ...etc.

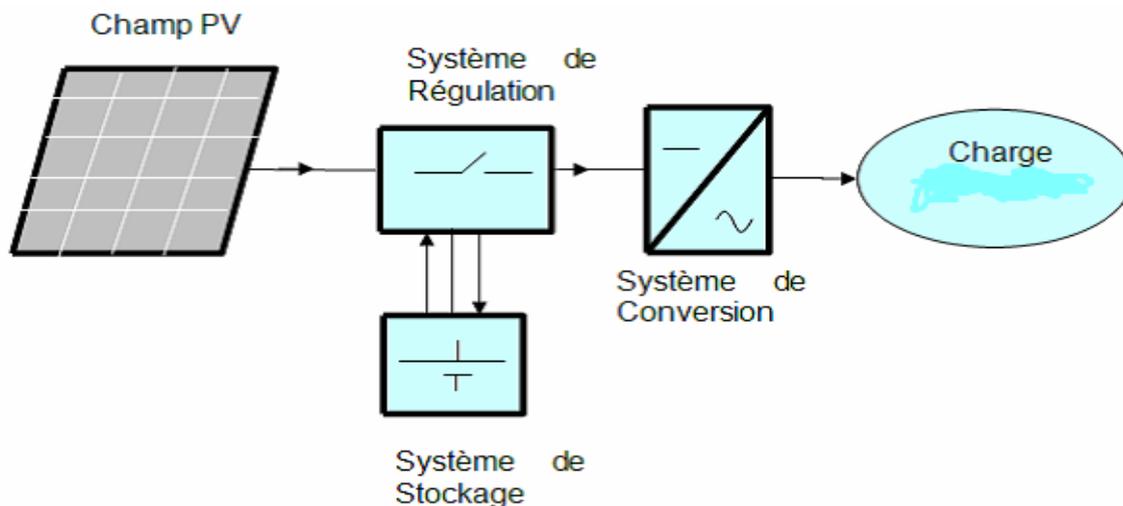


Figure II.1 Système de production photovoltaïque

II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV **figure(II.2)** fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Les résistances R_s et R_p permettent de tenir compte des pertes liées aux défauts de fabrication ; R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_p caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [1].

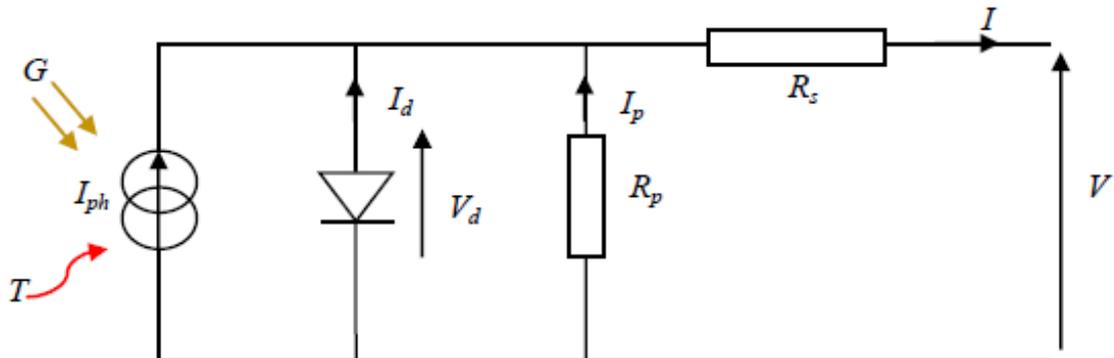


Figure II.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. [3]

En appliquons la loi de kirchoff aux noeuds on obtient [2] [3]

$$I = I_{ph} - I_d - I_p$$

(II.1)

I : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit).

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right]$$

(II.2)

$$V_d = V + R_s * I \quad (II.3)$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + (I * R_s)}{R_p} \quad (II.4)$$

En substituant les équations (II-2), (II-3) et (II-4) dans l'équation (II-1) le courant « I » devient :

$$I = I_{ph} - I_0$$

Avec:

I_0 : courant de court de saturation.

T : Température de la jonction des cellules PV [°K].

K : Constante de Boltzman (1,38.1023 J / K°).

q : Charge élémentaire (1,6.10⁻¹⁹ C).

n : Facteur d'idéalité de la jonction qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace, pour les cellules actuellement commercialisées au silicium : $A=1$.

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

V : La tension de sortie.

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p .

R_p : Résistance parallèle représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

II.2.2 Caractéristiques des cellules photovoltaïques

Il y a quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules

Solaires:

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension en circuit ouvert V_{oc} ;
- Le facteur de forme ff ;
- Le rendement de conversion d'énergie η [4].

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants, par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants).

En circuit ouvert ($R_c = \infty$, $I = 0$, $V = V_{oc}$) ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance $P = V_{max} \cdot I_{max}$ fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale, et vaut P_{max} [45]. La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la

figure ci-dessous. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.

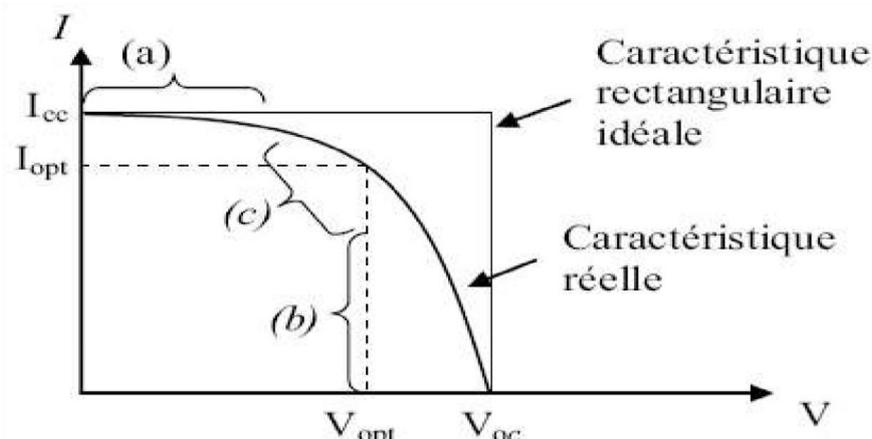


Figure II. 3 Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque idéal et réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} .
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement [46].

II.2.2.1 courant de court-circuit I_{CC}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie) .

ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation. on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc} * R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_p} \quad (II.6)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_o \left[\exp \left(\frac{q(I * R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (II.7)$$

Devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{CC} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (II.8)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule $I_{cc} = I_{ph}$.

II.2.2.2 Tension en circuit ouvert V_{CO}

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. (V_{co} la tension maximale d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q*V}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \quad (\text{II.9})$$

Elle représente la tension de cellule lorsqu'elle est à l'ombre. Elle est donnée par [6] :

$$V = V_{co} = Vt * \ln\left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right] \quad (\text{II.10})$$

II.2.2.3 la Puissance maximale P_{max}

Dans cas optimale d'un générateur qui fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule

$$P_{max} = V_{opt} \times I_{opt} \quad (\text{II.11})$$

II.2.2.4 Facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance idéal :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (\text{II.12})$$

II.2.2.5 Rendement énergétique η

C'est le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i).

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{\emptyset * S} \quad (\text{II.13})$$

S : Surface de la cellule solaire. \emptyset : Flux incident.

II.2.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur

Photovoltaïque, ces paramètres sont [5]:

- La resistance series R_s .
- La resistance shunt R_p .
- Le courant de saturation I_0 .
- Le flux d'éclairement O .

Pour un flux O égale à 1 kW/m^2 , ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepte le courant de saturation I_0 qui dépend directement de la température T de la cellule [5].

II.2.4 Association de cellule photovoltaïque

❖ Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série figure permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [7].

$$V_{sco} = N_s \times V_{co} \tag{II.14}$$

$$I_{cc} = I_c \tag{II.15}$$

V_{sco} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_c : courant de court-circuit de N_s cellules en série

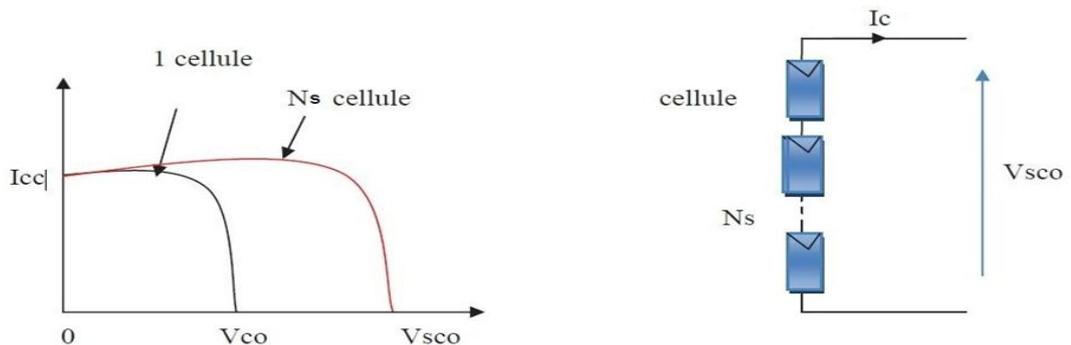


Figure II.4 Regroupement en série.

❖ Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule **figure(II.5)** est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [8].

$$I_{pcc} = N_p \times I_{cc} \tag{II.16}$$

$$V_{pco} = V_{co} \tag{II.17}$$

I_{pco} : La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle,

V_{pco} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

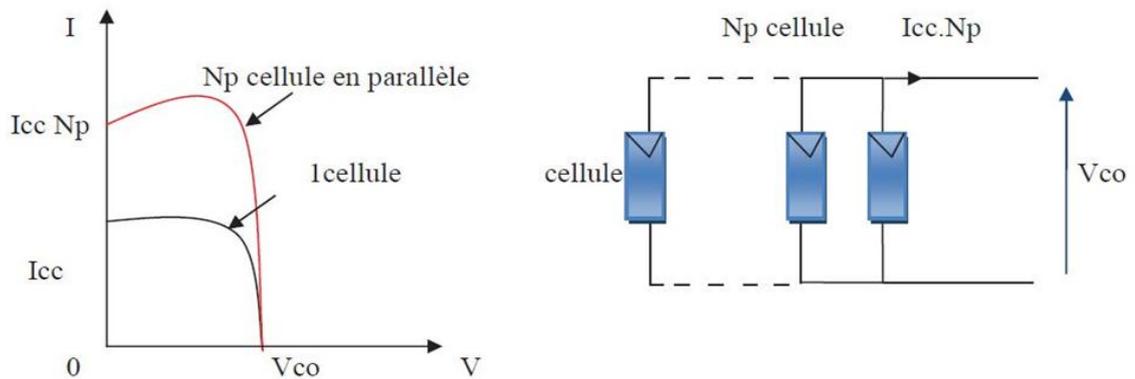


Figure II.5 Regroupement en parallèle.

❖ Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [9].

II.3 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la **figure (II.6)** Cet étage 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 P_{MAX} disponible [16].

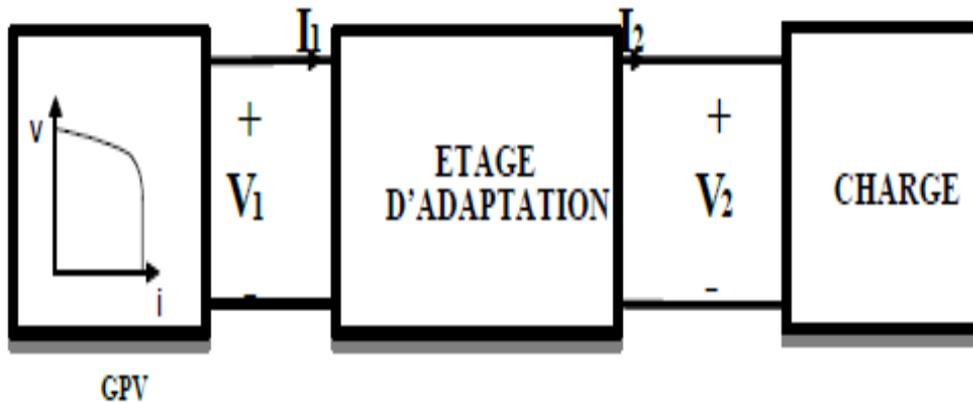


Figure II.6 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

II.3 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [10]. Le hacheur se compose de condensateurs d'inductance et de commutateurs.

Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [11]. Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [12].

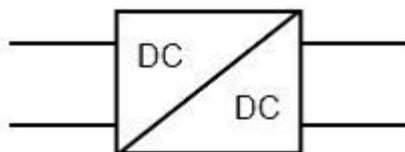


Figure II.7 Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.3.1 Type des hacheurs

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs a découpage (abaisseur (buck), élévateur (boost), et mixte (buck-boost)), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaites ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges [13].

a) Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K **figure (II.8)** peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et a l'amorçage) [14].

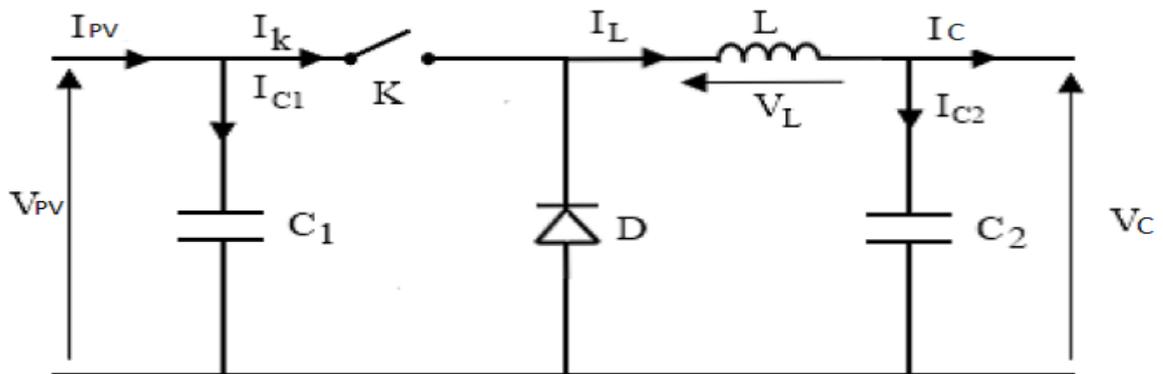


Figure II.8 Schéma électrique d'un hacheur buck

Fonctionnement

On note :

α : Le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha \cdot T$ la tension V_{pv} appliquée aux bornes de la diode et L'interrupteur est commande a la fréquence de découpage $f_e = 1/T_e$. La source V_{PV} fournit de l'énergie à la charge et a l'inductance. 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.

La tension à ses bornes est donc nulle [14].

Les chrono-grammes (tracés dans le cas idéal) de la **figure (II.9)** sont traces dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour

calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [14].

$$v_c = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v_{pv} dt \tag{II.18}$$

$$v_c = \alpha * v_{pv} \tag{II.19}$$

A pertes minimales on a :

$$P_{pv} = P_c \leftrightarrow V_c \cdot I_c = V_{pv} \cdot I_{pv} \leftrightarrow I_{pv} = \frac{V_c}{V_{pv}} \cdot I_c \leftrightarrow I_{pv} = \alpha I_c \tag{II.20}$$

donc

$$\alpha = \frac{V_c}{V_{pv}} = \frac{I_{pv}}{I_c} \tag{II.21}$$

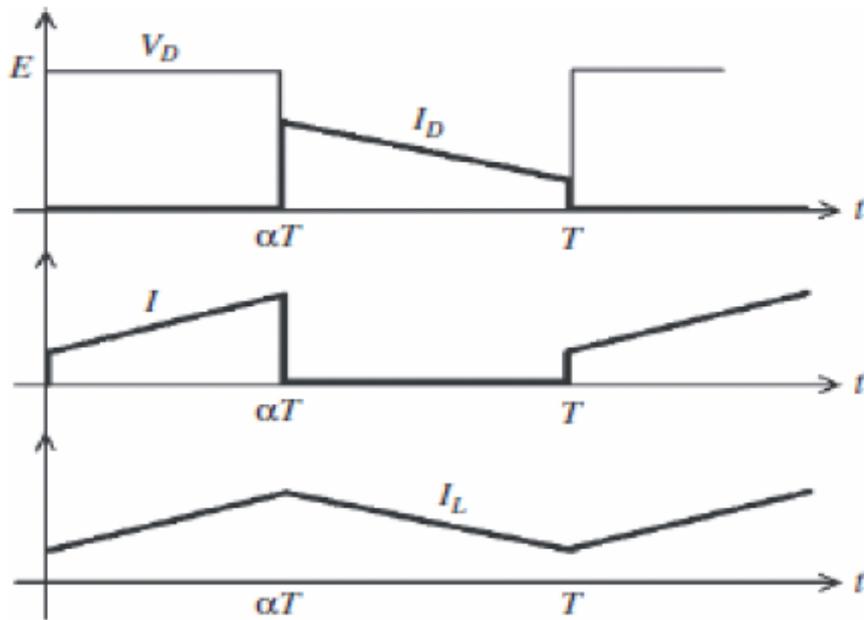


Figure II.9 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

b) Hacheur Boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K **figure (II.10)** peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et a l'amorçage) [15].

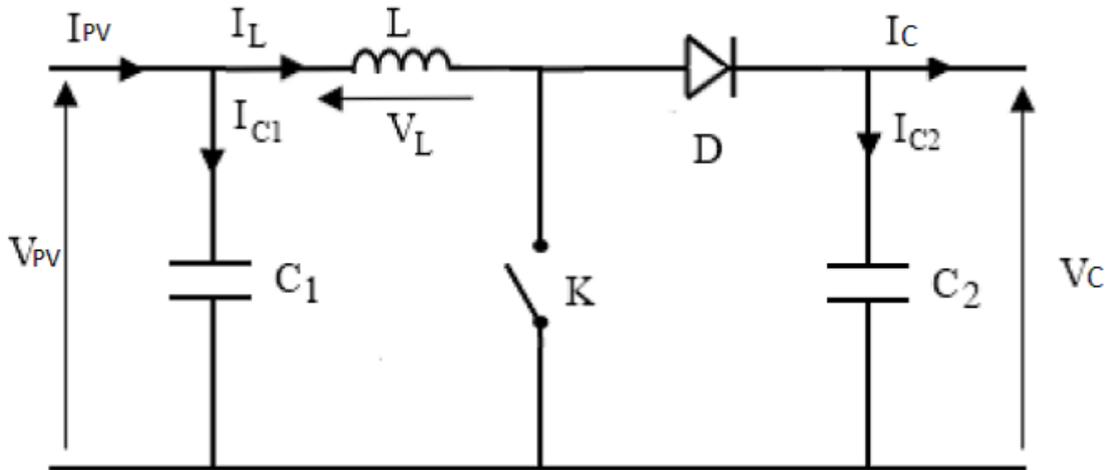


Figure II.10 Schéma électrique d'un hacheur Boost

Fonctionnement

Quand l'interrupteur est ferme pendant la durée $\alpha \cdot T$, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle [14]. 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 alors $V_k = V_c$.

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [14] :

$$v_{pv} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v_c dt \quad (\text{II.22})$$

$$v_{pv} = (1 - \alpha) * v_{pv} \quad (\text{II.23})$$

A pertes minimales on a :

$$P_c = P_{pv} \leftrightarrow V_c \cdot I_c = V_{pv} \cdot I_{pv} \leftrightarrow I_c = \frac{V_{pv}}{V_c} \cdot I_{pv} \leftrightarrow I_c = (1 - \alpha) I_{pv} \quad (\text{II.24})$$

Donc

$$(1 - \alpha) = \frac{V_{pv}}{V_c} = \frac{I_c}{I_{pv}} \quad (\text{II.25})$$

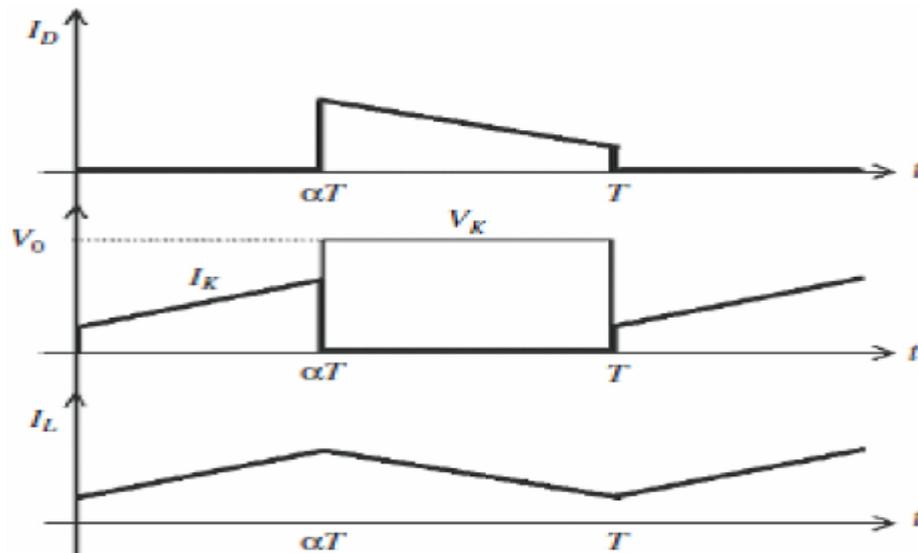


Figure II.11 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost

c) Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC _a stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (Filtrage captatif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [14].

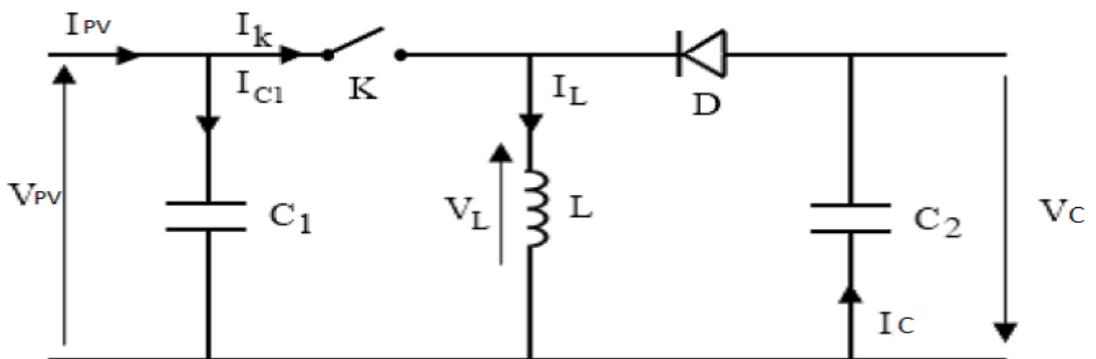


Figure II.12: Schéma électrique d'un hacheur Buck- boost

Fonctionnement

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présent sur. **figure (II.12)** Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée α, T_e le courant augmente linéairement. La

tension est égale à V_{pv} . à l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à V_c . Par définition La tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [16] :

- d) Quand le rapport cyclique $\alpha > 0,5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost
- e) Et si le rapport cyclique $\alpha < 0,5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

$$V_{pv} \alpha T = V_c(1 - \alpha)T \quad (\text{II.26})$$

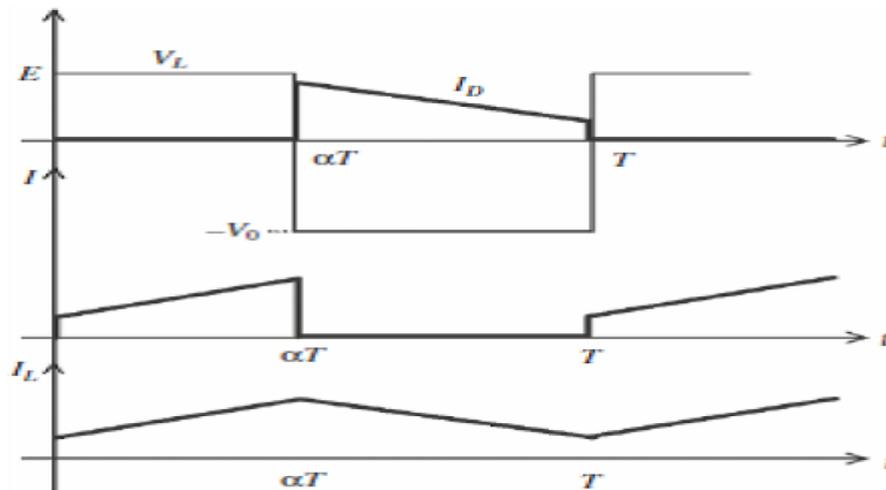


Figure II.13 Chrono-grammes de courant et tension d'un hacheur Buck-boost

II.4 Commandes spécifiques des systèmes Photovoltaïques (mppt)

II.4.1 Principe de La Commande mppt

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [17].

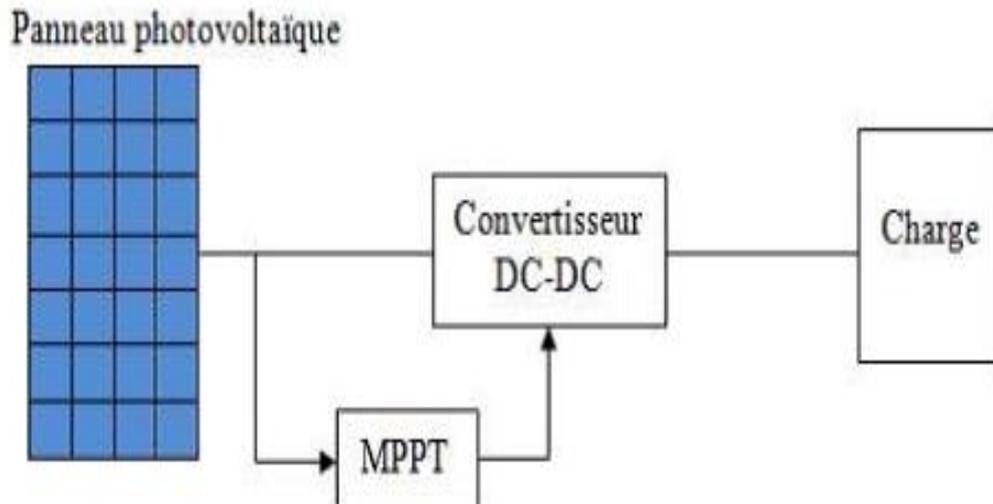


Figure II.14 Schéma de principe du convertisseur MPPT

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [18].

II.4.2 Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [19].

II.4.2.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance

maximal ($VOPT$ et $IOPT$) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant Stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives.

Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [19].

B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [19].

II.4.2.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

a. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [20] [19].

b. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces

procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [20][19].

II.4.3 Les Types Algorithmes MPPT

III.4.3.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [21].

Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent il est préférable de contrôler la tension du GPV [22].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance [23]. **figure (II.15)** montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela

implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

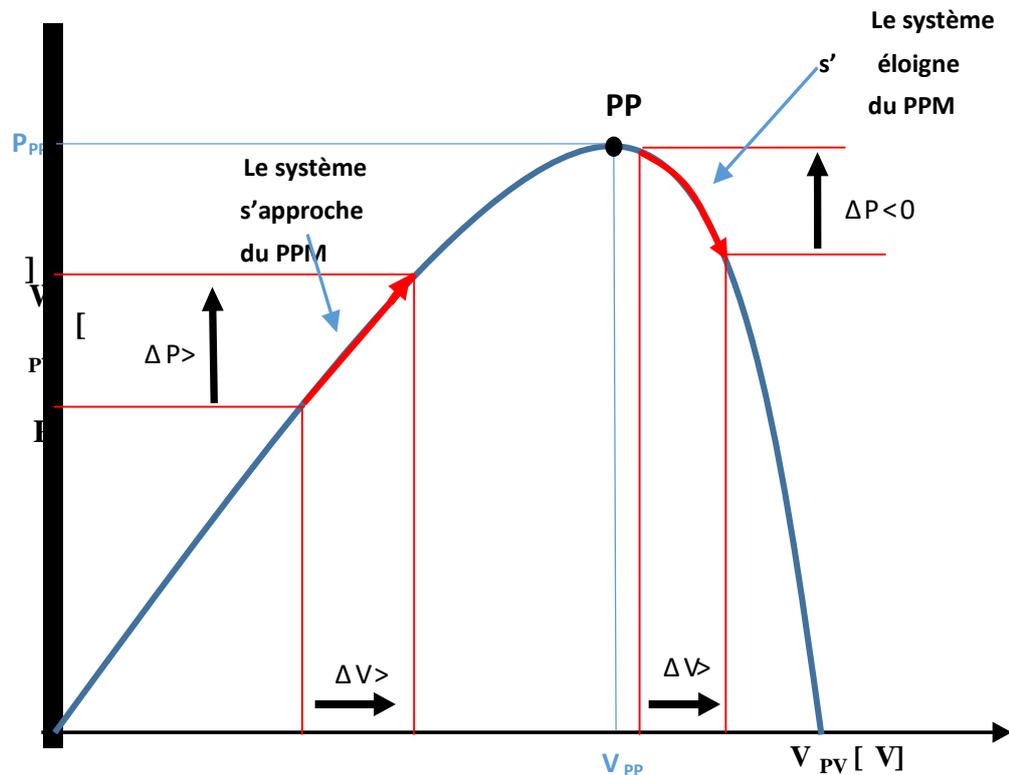


Figure II.15 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode

P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [24]. La **figure (II.16)** représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type

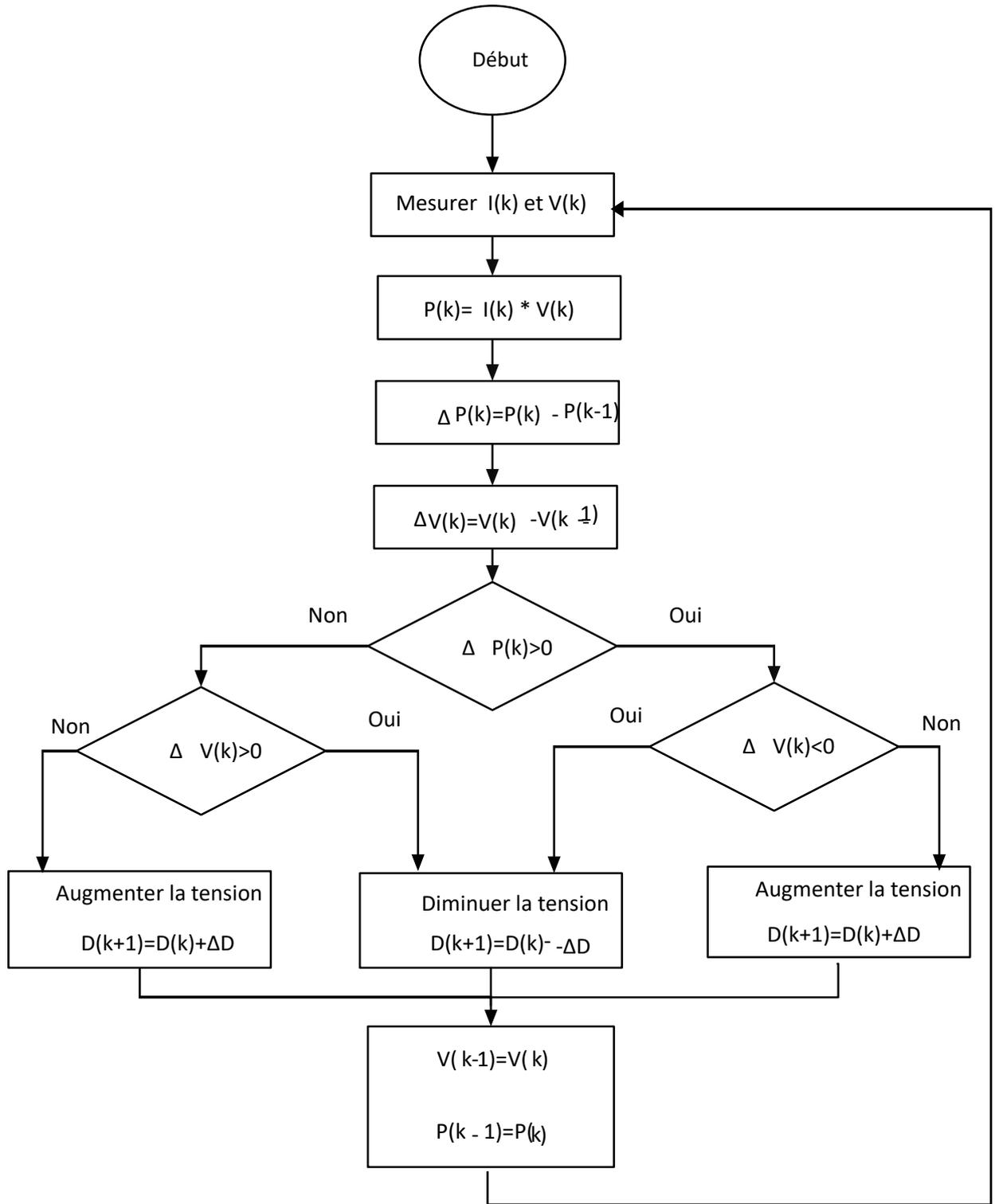


Figure II.16 L'algorithme de P&O classique

III.4.3.2 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite **figure (II.17)**.

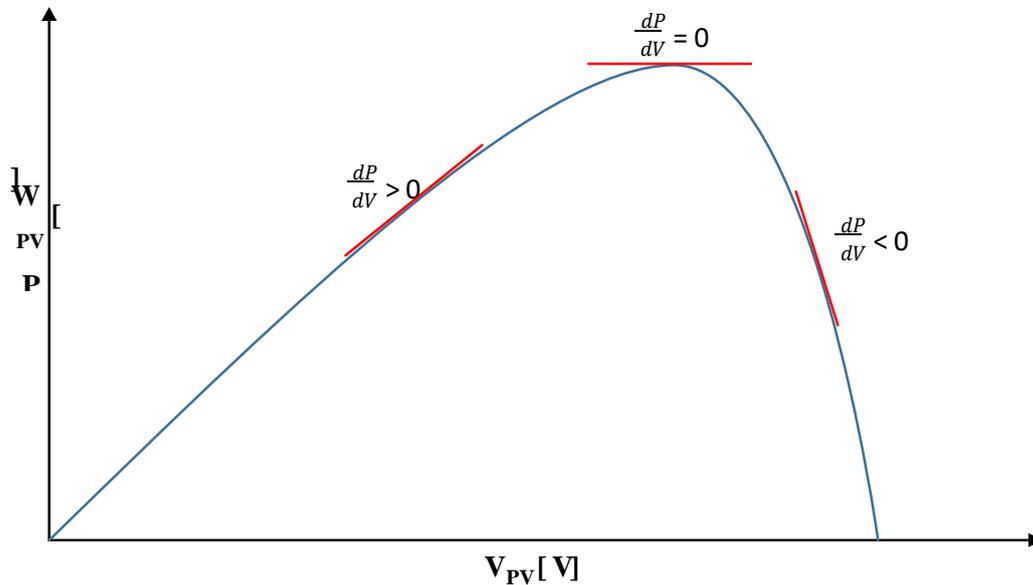


Figure II.17 caractéristique de tension-puissance du panneau

On observe que :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 & \text{au PMM} \\ \frac{dP}{dV} > 0 & \text{à gauche du PMM} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{à droite du PMM} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V * I \quad (\text{II.28})$$

Et sa dérivée partielle est donnée par

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{II.29})$$

Donc, l'équation (II.27) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur PMM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est a gauchedu PPM} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{le point de fonctionnement est sur ladroite du PPM} \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

Le PPM peut être atteinte en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance ($dIPV/dVPV$). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM. La **figure (II.18)** montre l'algorithme de cette méthode.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition $dP/dv = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert V_{oc} sur le courant de court-circuit I_{sc} . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur [24].

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.31})$$

D'après l'équation (II.31), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

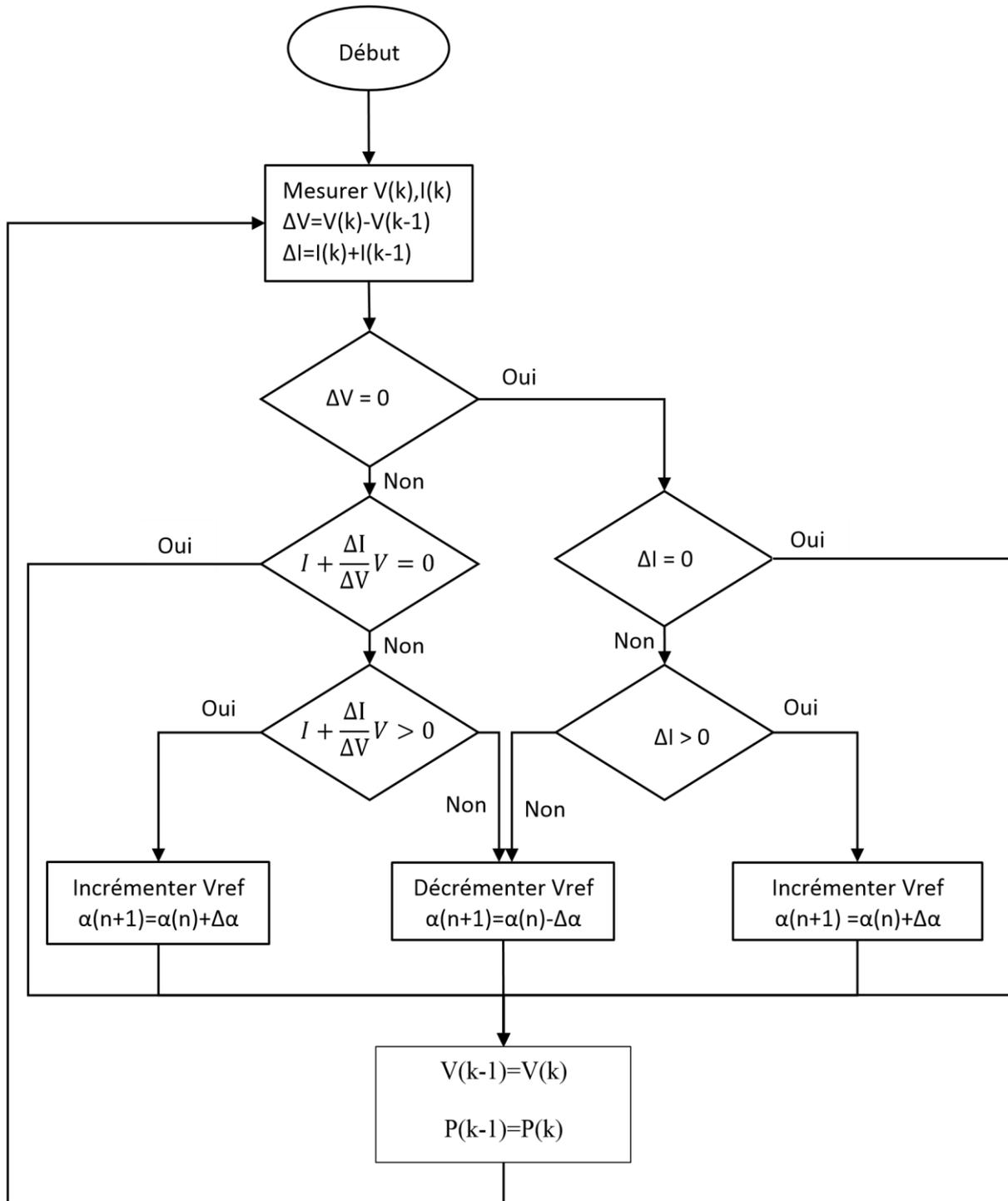


Figure II.18 l’algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encore comme la méthode de p&o .c’est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est [25] :

$$\alpha(k) = \alpha(1 - k) \mp N \times \left| \frac{P(k) - P(1-k)}{V(k) - V(1-k)} \right| \tag{II.32}$$

III.4.3.3 La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [26-27]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta \alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la defuzzification.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB : Negative Big.
- NS : Negative Small.
- ZE : Zero.
- PS : Positive Small.
- PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en **figure (II.19)**

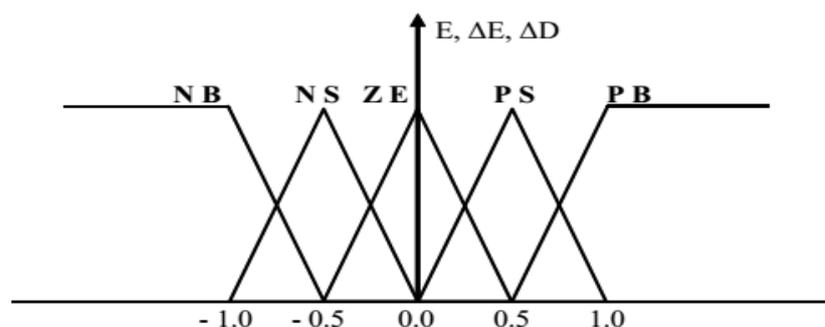


Figure II.19 structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \tag{II.33}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \tag{II.34}$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta \alpha$.

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau II.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

La variable linguistique assignée à $\Delta \alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta \alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta \alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta \alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [28-29].

II.4.4 Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [30-31]:

- les algorithmes à base de réseau de neurones
- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

II.5 Hacheur réversible en courant

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus à CC. Dans le cas du Hacheur utilisé par la charge / décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la **figure (II.20)** [32].

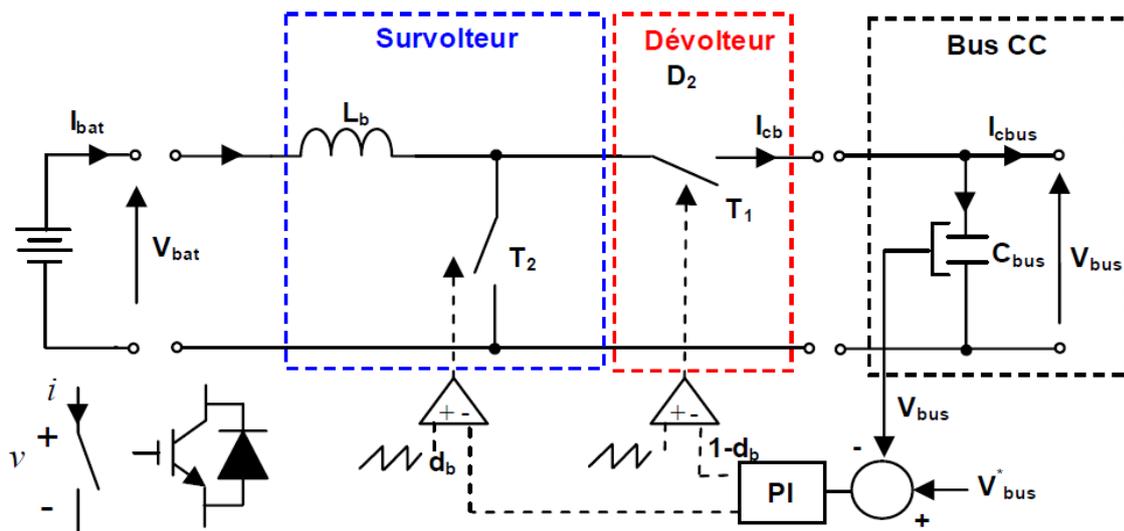


Figure II.20 Hacheur réversible en courant

II.5.1 Modélisation du hacheur réversible en courant

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs réunis sur la structure présentés dans la **figure(II.20)** ont été résolues en utilisant un modèle en valeurs moyennes. Sachant que la commande des interrupteurs $T2$ et $T1$ est simultanée avec des rapports cycliques d_p et $1-d_p$ complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par [32]:

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L}(d_b v_{bus} - v_{bat}) \quad (II.35)$$

En appliquant la loi de conversion de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus à CC s'exprime :

$$i_{cb} = d_b i_{bat} \quad (II.35)$$

Le rapport cyclique db est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC

II.6 Modélisation de l'onduleur

L'association d'un transistor Ti et d'une diode Di donne un composant bidirectionnel Ki . Comme les commandes des deux transistors du même bras sont complémentaires, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions comme l'indique la **figure (II .21)** [33].

Soit Fi l'état de l'interrupteur, il est donné par:

$$Fi = \begin{cases} 1 & \text{si } Ti \text{ est ouvert et } T'i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } Ti \text{ est fermé et } T'i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

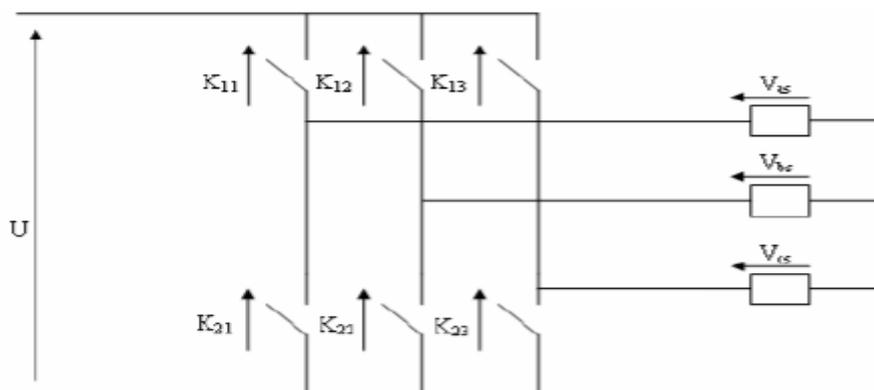


Figure II.21 Représentation des composants bidirectionnels.

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par:

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = E \cdot \begin{pmatrix} F_1 - F_2 \\ F_2 - F_3 \\ F_3 - F_1 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 36})$$

Par conséquent, les tensions simples et le courant I_s à l'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des fonctions logiques comme suit:

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = E \cdot \begin{pmatrix} 2F_1 - F_2 - F_3 \\ -F_1 - 2F_2 - F_3 \\ -F_1 - F_2 - 2F_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 37})$$

$$I_s = F_1 \cdot I_{Sa} + F_2 \cdot I_{Sb} + F_3 \cdot I_{Sc} \quad (\text{II. 38})$$

II.6.1 Modulation de Largeur D'impulsion M.L.I.

Le MLI permet de former chaque alternance de la tension de sortie de plusieurs créneaux. Pour obtenir cela, il faut adopter certaine technique de commande des interrupteurs de l'onduleur. La stratégie triangulo-sinusoïdale est l'une des techniques les plus simples. Elle consiste à comparer les trois tensions de référence ($V_{a^*,*}, V_{c^*}$) à un signal (porteuse) triangulaire d'amplitude fixe et de pulsation nettement supérieur à celle des tensions de référence. ($F=10$ kHz).

La stratégie triangulo-sinusoïdale est caractérisée par deux paramètres qui sont l'indice de modulation m qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence et r le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse.

Les instants de commutation sont obtenus par comparaison de trois tensions de référence avec le signal triangulaire [33].

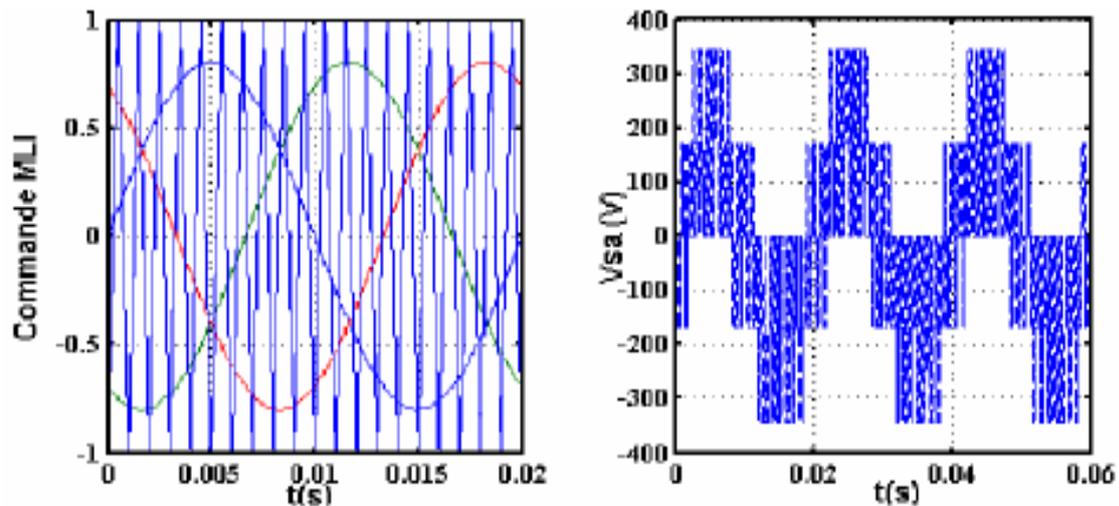


Figure II.22 Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale [33]

II.7 Modélisation de stockage

Actuellement, il existe plusieurs techniques Utilisateur en stockage Dont le Nickel-Cadium (Ni-Cd) et le Lithium-ion (Li-ion), Mais la technologie au Plomb (Pb).Le plus à utiliser pour ses pros eu leurs couts diminuent, stocker beaucoup et Longue durée de vie.Dans ces chapitres, nous étudions la technologie au Plomb-Acide.

II .7.1 Le modèle électrique simple de la batterie

Le modèle électrique simple comprend une fem E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s).

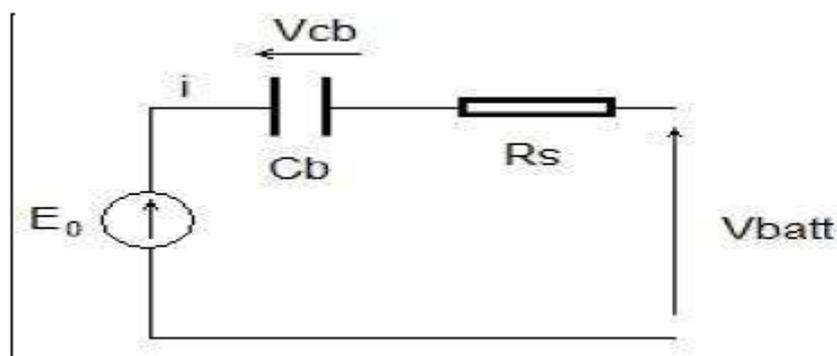


Figure II.23 Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc:

$$v_{batt} = E_0 - R_s \cdot i - V_{Cbatt} \quad (\text{II.39})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \tag{II. 40}$$

Avec C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} . [34].

D'après le modèle R-C de la batterie présentée à la **figure(II.23)** la capacité en ampères heure est modélisée par C_{bat} dont la valeur est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{batt} = I * t_{batt} \tag{II. 41}$$

$$C = \frac{Q_{batt}}{V} \tag{II. 42}$$

Avec:

Q_{batt} : la quantité de charge électrique en Coulomb,

I : le courant a travers la capacité,

t : le temps de fonctionnement,

C : la valeur de la capacité en Farad

V : la différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie allant

II .7.2 Modélisation des batteries Plomb-Acide

Dans cette étude, on a utilisé un modèle qui permet de calculer la capacité de stockage

Et la tension de charge/décharge. Le modèle électrique est représenté sur la **figure (II.24)** [37]

:

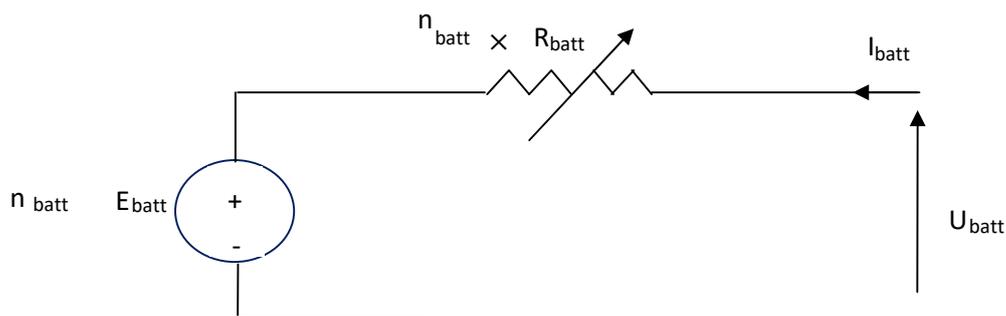


Figure II.24Modèle électrique de la batterie

La batterie est caractérisée par sa capacité de stockage sa valeur est calculé par la relation (II.43) [37].

$$C_{batt} = C_{10} \frac{1.67}{1+0.67\left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1+0.005\Delta T) \quad (II.43)$$

Avec:

C_{batt} : Capacité de la batterie.

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C_{batt}} \quad (II.44)$$

Avec:

$$Q = I_{batt} \times t \quad (II.46)$$

t : Temps de décharge de la batterie.

$$V_{b-ch} = \eta_{batt} [2.16 \times SOC] + \eta_{batt} \frac{I_{batt}}{C_{10}} \left[\frac{6}{1+I_{batt}^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.002 \right] \times (1 - 0.007 \times \Delta T) \quad (II.47)$$

Où

V_{b-ch} : Equation de charge de la batterie

$$V_{b-déch} = \eta_{batt} [1.965 + 0.12 \times SOC] - \eta_{batt} \times \frac{I_{batt}}{C_{10}} \left[\frac{6}{1+I_{batt}^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.002 \right] \times (1 - 0.007 \times \Delta T) \quad (II.48)$$

$V_{b-déch}$: Equation de décharge de la batterie

II.8 Modélisation du générateur Diesel

- **Régulateur PI**

C'est un correcteur proportionnel intégrale série, il est défini par une fonction de transfert qui régit son principe de fonctionnement. Un régulateur PI est physiquement réalisable. La **figure (II.25)**, illustre le principe de fonctionnement d'un régulateur proportionnel intégrale série PI.

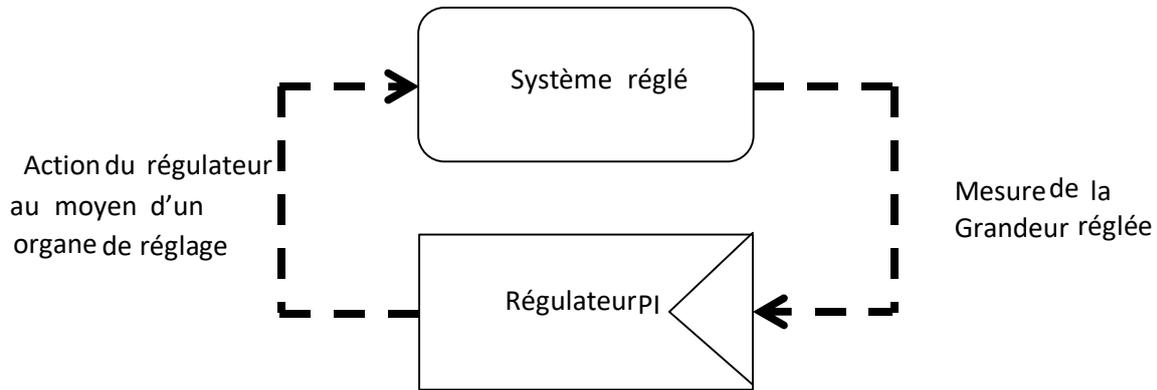


Figure II.25 Principe de fonctionnement du régulateur PI

La fonction de transfert d'un régulateur proportionnel intégrale PI est définie par la relation (II.49) [38] :

$$C_{(p)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{p \cdot T_i}\right) \quad (\text{II.49})$$

Où:

$C(p)$: Fonction de transfert de régulateur PI.

K_p : Gain proportionnel du régulateur PI.

T_i : Constante de temps du régulateur PI.

Le groupe diesel est constitué d'un moteur diesel à deux temps et une machine Synchrone.

Le couple développé par le moteur diesel, donné par l'équation (II.50), pourrait être simplement modélisé par la fonction de transfert du premier ordre à temps constant, τ_c est la constante de combustion effectué et τ_d est le retard au démarrage de la combustion pur [39]:

$$T_{diesel} = \frac{F}{1 + \tau_c} e^{-\tau_d} \quad (\text{II.50})$$

Généralement le moteur diesel est modélisé par le diagramme fonctionnel représenté sur la **figure (II.25)**. Le correcteur intégral proportionnel est associé à T_{diesel} , pour réguler la tension de sortie du générateur diesel, à la valeur de la tension de sortie du système.

L'utilisation des moteurs diesels comme moteur d'entraînement dans les groupes Électrogènes de petite puissance est due aux avantages qui présentent, qu'on peut citer [39] :

- ✓ · Rendement élevé comparativement à celui d'une centrale à gaz ou à vapeur
- ✓ · Fiabilité ET la simplicité de fonctionnement.

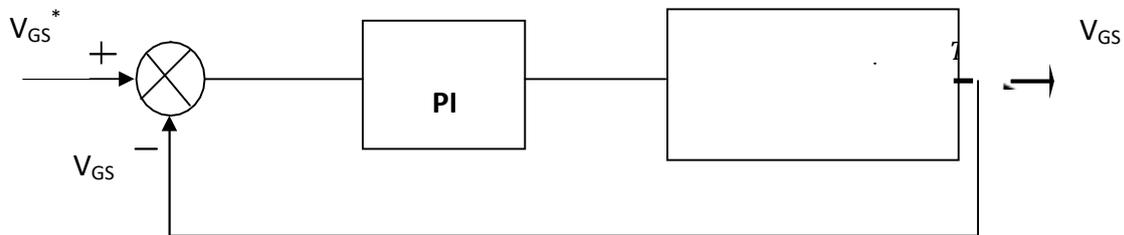


Figure II.26 Diagramme fonctionnel du générateur diesel

II.9 Modélisation de la charge

Les charges sont les éléments consommateurs de puissance électrique d'un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge. Une modélisation correcte de ses caractéristiques est indispensable pour représenter finement le comportement de la charge.

Les profils de consommations considérés seront déterministes. On cherchera tout d'abord à évaluer l'impact de ces profils sur le dimensionnement du système puis dans un deuxième temps à les optimiser. Cependant, chaque profil de consommation considéré ne prendra en compte que la puissance active appelée par le consommateur. La puissance réactive ainsi que les harmoniques ont été négligés dans un but de simplification des modèles nécessaire à une approche d'optimisation du dimensionnement. Alors, il existe deux types de charge, des charges linéaires à caractère résistif et inductif, comme, les ampoules à incandescence, les chauffe-eaux etc. Le deuxième type de charges est représenté par les charges non linéaires qui détériorent la qualité d'énergie.

Les charges ou les groupes de charges peuvent être représentés par des modèles statiques ou dynamiques. Un modèle statique et dynamique exprime la puissance active et la puissance réactive à tout instant en fonction de l'amplitude et la fréquence de la tension pour ces mêmes instants [35].

Dans l'analyse des systèmes classiques, la demande de la charge en puissance est Représentée par l'équation suivant:

$$S_{charge} = P_{charge} + jQ_{charge} = Y_{charge} |V_{charge}|^2 \quad (II. 50)$$

Avec :

S_L : Puissance apparente demandée par la charge.

P_L : Puissance active demandé par la charge.

Q_L : Puissance réactive demandé par la charge.

Y_L : Admittance de la charge.

II.10 Modélisation d'une centrale hybride PV/diesel [36]

Ici les trois modèles précédemment développés respectivement pour le gisement solaire, le générateur PV et les générateurs diesels sont combinés et la configuration adoptée du système est une configuration parallèle c.à.d. que le générateur PV et les générateurs diesels sont sollicités en même temps pour satisfaire une charge donnée. Il faut que la puissance active produite par les deux sources d'énergies soit égale à celle consommée par la charge P_{charge} .

$$P_{source} = P_{charge} \quad (II.51)$$

$$P_{source} = P_{pv} + P_{GD} \quad (II.52)$$

D'où

P_{GD} : Puissance électrique produite par les générateurs diesel.

P_{pv} : Puissance électrique produite par la générateur PV.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on étudie la modélisation mathématique de système d'énergie multi source PV-D. On commence avec la chaîne photovoltaïque. On passe après à les convertisseurs (hacheur, onduleur et hacheur réversible en courant), où nous utilisons trois méthodes de maximisation de puissance (méthode (P&O), Conductance Incrémentale Fuzzy Logic Control). Ensuite, on étudie le dispositif de stockage on choisit la modélisation des batteries Plomb-Acide. On donne un modèle qui peut calculer la Capacité produite par batterie. On continue avec le modèle générateur Diesel et le modèle de la charge. On finit par un modèle qui peut calculer la puissance totale produite d'une centrale hybride PV/diesel.

References bibliographiques

- [1] **H. J. Moller**, "Semiconductors for solar cells," Artech House, Inc. Norwood MA, 1993.
- [2] **M. SONAM et G. MANJU**, « Modeling & simulation of a photovoltaic energy system », Trans Stellar, International Journal of Electrical and Electronics, Vol. 3, Issue 1,61-66, 2013.
- [3] **W. M. ANTHONY**, « modeling and analysis of a photovoltaic system with a distributed energy storage system », Thèse de doctorat, San Luis Obispo Faculty of California Polytechnic State University, 2012.
- [4] **M. Zakaria** « Contribution à la Modélisation D'une cellule solaire » Mémoire de magistère, Université de Bechar – 2009
- [5] **A. Zerga**, « Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p », Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.
- [6] **Alain Ricaud**, " Modules et systèmes photovoltaïques," Edition Presses polytechniques et universitaires romandes, Sept, 2008
- [7] **S. PETIBON** ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [8] **L. ABBASSEN** ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo,
- [9] **H. BELGHITRI et H.** ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, 2009.
- [10] **CH.Maher** 'Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque" Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.
- [11] **K.Sobaihi** ' étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction ' Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El {Harrach Alger.
- [12] **Alain Bilbao** learreta Réalisation de commandes MPPT Numérique Rapport de stage fin d'études Université Rovira virgili 2006.
- [13] **MECHALIKH Med Nadjib, HAMADA Charaf Eddine** _Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecte au réseau _Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.
- [14] **Lequeu Thierry**. Cours d'_électronique de puissance, IUT GEII 2 ième année, Option EEP. 2004/2005.

- [15] **Christian Ripoll Bogdan Grabowski**. Aide-mémoire Electronique. Dunod, 5e édition, 2008.
- [16] **Alain Bilbao** « learreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006.
- [17] **Aamarouyache Mohamed**, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechniques option ,2014
- [18] **J. Ferrieux, f. Forest**, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, France: dunod, 1999.
- [19] **M. Angel Cid Pastor**, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [20] **M. Boukli-Hacene Omar** « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [21] **Hajar Bagheri** "advances in electric power engineering" publisher: lulu (usa), 2015
- [22] **Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi** "active power control for a single-phase grid connected pv system " , international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [23] **Bisker Asma, Chiri Meriem**, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, el-harrach, algérie, 2012
- [24] **Akihiro Oi**, " design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of cali- fornia polytechnic state university, 2005
- [25] **A. Dolara, R. Faranda, S. Leva** "energy comparison of seven mppt techniques for pv systems", scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009
- [26] **M.Hatti**, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque".jcge'08 lyon, 2008.
- [27] **N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk**, "risc-microcontroller builtin fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered lightflasher applications"industrial electronics society, 2004.
- [28] **W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All**, "a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", IEEE power electronics specialists conference, pesc'94, pp. 396-403, jun. 1994.
- [29] **M. Veerachary, T.Senjuand K. Uezato**, "feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller", IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, july 2002. *Bibliographie*

- [30] **Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim**, “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.
- [31] **Trishan Esrām And Patrick** “comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.
- [32] **I. Vechiu**, “ Modélisation et Analyse de l’intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome,” Thèse, Université du Havre, France, Décembre, 2005.
- [33] **L. ZAROUR**, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [34] **O.Gergaud**: « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur » Ecole Normale Supérieure de Cachan, Thèse soutenue le 9 September 2002.
- [35] **Haizea GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI**, "ETUDE DE STRUCTURES D'INTEGRATION DES SYSTEMES DE GENERATION DECENTRALISEE : APPLICATION AUX MICRORESEAUX," *thèse doctorat. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, Décembre 2006*
- [36] **Ahmed IDDA** MEMOIRE DE FIN D'ETUDE « Hybridation d'une Centrale Diesel en Energie Photovoltaïque : Faisabilité techniques et Rentabilité économique. »
- [37] **S.Aissou, D.Rekioua, N.Mezzai, T.Rekioua and S.Bacha**, "Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage", Energy Conversion and Management 89 (2015) 615–625.
- [38] **M.L.Elhafyani and F.Z.Kadda**, "Optimal sizing of an Autonomous Hybrid System" , IEEE 2013.
- [39] **J.Y.Fabert**, "Automatismes et Automatique, cours et exercices corrigés", EllipsesEdition, 2005.

Chapitre III

**Simulation d'un système hybride PV-
Diesel**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les équipements représentant le système hybride PV-DIESEL tels que le générateur PV, le générateur diesel, le hacheur survolteur, l'onduleur.

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

III. 2 L'outil Matlab Simulink

III. 2. 1 Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK

MATLAB est un langage de programmation interactif qui peut être utilisé de plusieurs façons, y compris l'analyse de données et la résolution de problèmes de visualisation, de simulation et d'ingénierie. Il peut être utilisé comme outil interactif ou comme de programmation de haut niveau. Il fournit un environnement efficace tant pour le débutant que pour l'ingénieur et le scientifique [1]

SIMULINK est une extension de MATLAB qui fournit un environnement de programmation iconographique pour la solution des équations différentielles et d'autres systèmes dynamiques [1].

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

Des modules temps réel, développés autour des produits dSPACE (Real Time Interface, TRACE, COCKPIT) sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils

nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

III.3 Schéma global du système

La configuration la plus favorable pour le cas de notre habitation est bien parallèle, vu ces avantages au terme de transition de la puissance. L'association du groupe diesel et le champ PV permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul ainsi, dans le cas de cette configuration, le rendement de générateur diesel peut être augmenté. De plus, les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge [2].

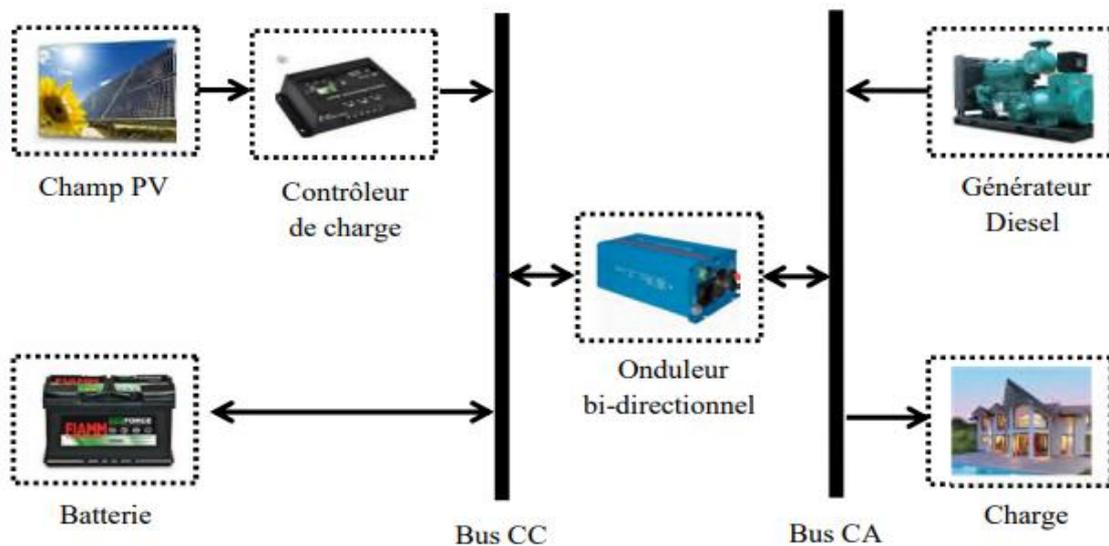


Figure III.1 Installation type du système étudié PV/Diesel parallèle

III.4 Résultats de simulation

III.4.1 Générateur diesel

*Courbe du couple mécanique du GD

Sur la **figure (III.2)**, on a représenté l'allure du couple mécanique du générateur diesel étudié dans le cas de notre installation.

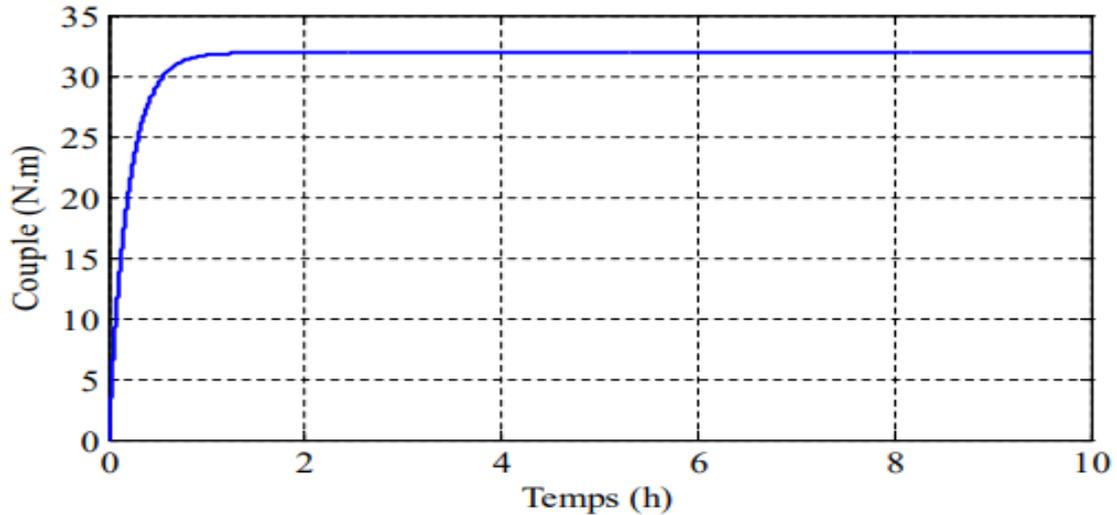


Figure III.2 Courbe du couple mécanique du générateur diesel

D'après l'allure, on remarque que le couple mécanique est d'une valeur de 32.5 N.m, dans son régime nominal.

- **Courbe de la puissance du GD**

Afin d'assurer une continuité de l'alimentation en énergie électrique de notre habitation isolée, l'intégration du groupe électrogène est d'un grand apport. Sur la **figure (III.3)**, on a représenté la courbe de la puissance mécanique du groupe électrogène

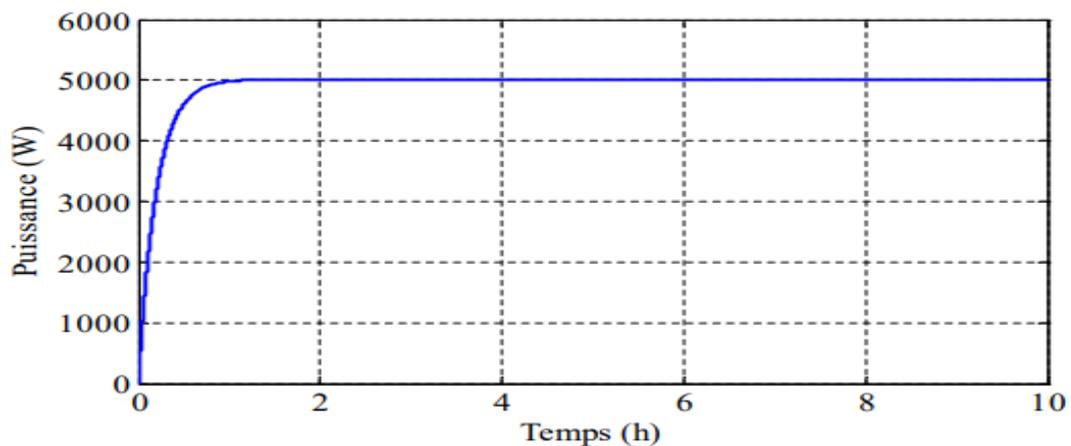


Figure III.3 Courbe de la puissance du générateur diesel

La puissance délivrée par le générateur diesel est d'une valeur de 5000 Watt, cette dernière assure le pic de la consommation.

III. 4.2 Simulation du GPV

Le modèle mathématique d'un GPV a été présenté et donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_c \left[1 - \frac{\left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{n \cdot V_T \cdot N_s}\right) - 1 \right)}{\left(\exp\left(\frac{V_{co}}{n \cdot V_T \cdot N_s}\right) - 1 \right)} \right] \tag{III.1}$$

D'autres expressions (équations) ont été données pour exprimer I_{cc} et V_{co} respectivement par :

$$I_{cc} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc_ref} [1 + \alpha_{icc} (T_c - T_{ref})] \tag{III.2}$$

$$V_{co} = V_{co_ref} + \alpha_{vco} (T_c - T_{ref}) + n \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \tag{III.3}$$

Pour construire un modèle équivalent (par Simulink) du GPV, les expressions ci-dessus ont été utilisées pour subdiviser le GPV en blocs représentant les divers éléments de son modèle de circuit équivalent. Le schéma représentatif du modèle mathématique courant-tension d'un module photovoltaïque sous matlab-simulink est donné par la **figure (III.4)**.

Les valeurs de la température de cellules T , l'ensoleillement G_a , et le nombre de cellules photovoltaïques en série N_s sont accessibles en tant que variables externes et peuvent être changées pendant le procédé de simulation. Ceci permet d'observer et d'évaluer la réaction du système aux changements brusques des conditions de fonctionnement, telles que des variations de l'ensoleillement.

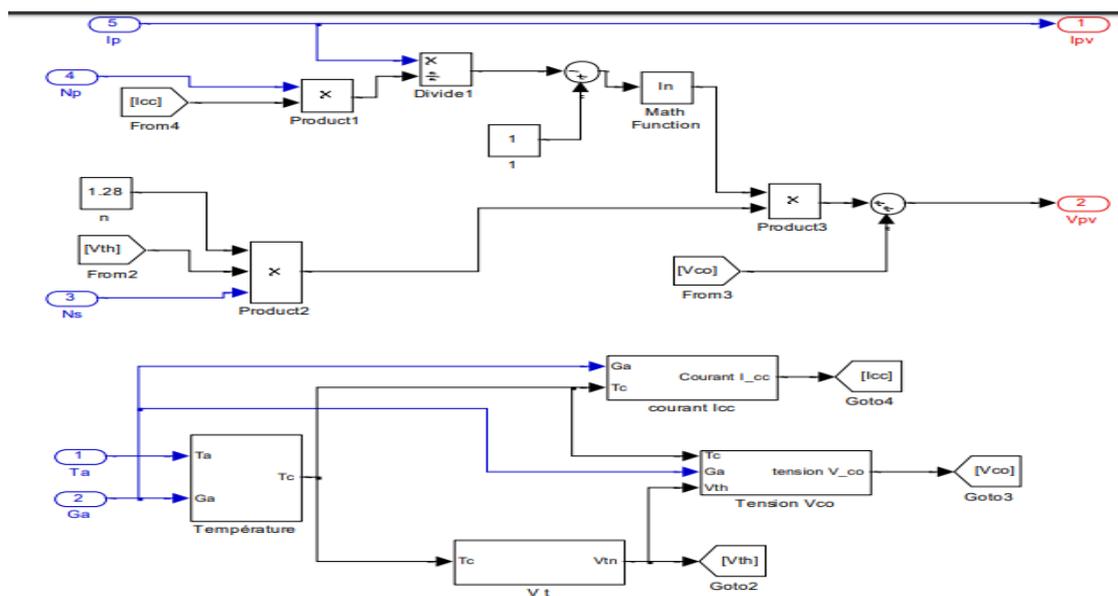


Figure (III.4): Modélisation du GPV sous matlab (Simulink).

III.4.2. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante

- Caractéristique ($I_{pv} = (V_{pv})$) : à température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC)($G_a = 1000w/m^2 , T_a = 25^\circ C$). La caractéristique ($I_{pv} = (V_{pv})$) est donnée par la **Figure (III.5)**.

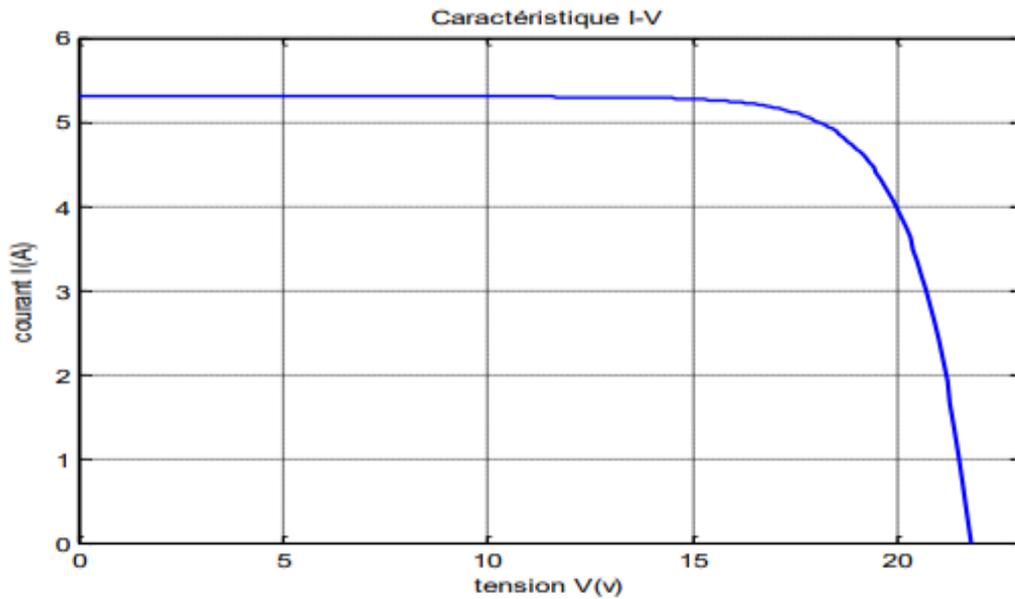


Figure III.5 Caractéristique (courant-tension) du GPV.

- Caractéristique ($P_{pv} = (V_{pv})$) : à température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC)($G_a = 1000w/m^2 , T_a = 25^\circ C$). La caractéristique ($P_{pv} = (V_{pv})$) est donnée par la **figure (III.6)**

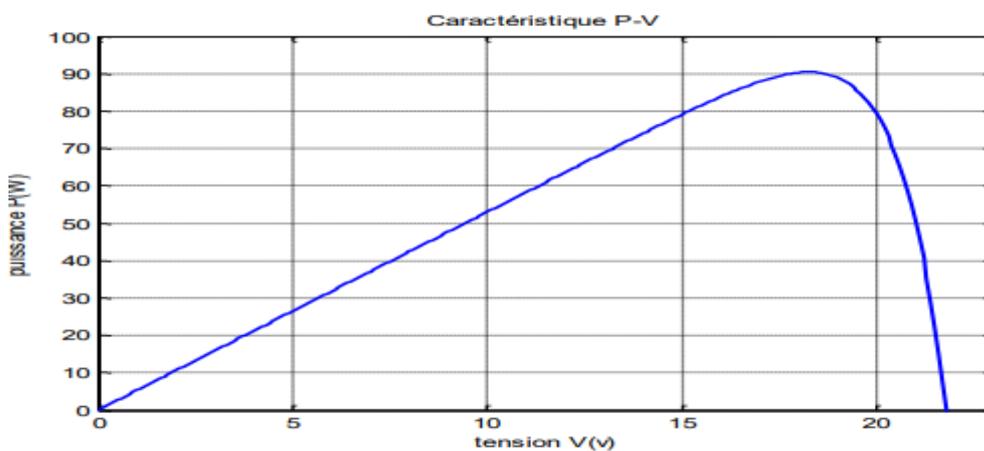


Figure III.6 Caractéristique (puissance-tension) du GPV.

III.4.3 Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable

Afin d'observer l'influence des conditions externes, de l'éclairement et de la température (G_a) sur les caractéristiques ($I_{pv} - V_{pv}$) et ($P_{pv} - V_{pv}$) nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ($T_a = 25^\circ\text{C}$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.
- Pour visualiser l'influence de la température, on fixe l'éclairement ($G_a = 1000\text{w/m}^2$) et on fait varier la température dans une gamme suffisante.

III.4.3.1. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$

En faisant varier l'éclairement () entre (800w/m^2 et 1000w/m^2) avec un pas de 100w/m^2 , la caractéristique ($I_{pv} - V_{pv}$) est donnée par la **figure (III.7)**.

D'après la figure 4.8, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement () et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui prouve que le courant de court circuit de la cellule dépend au éclairement, par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de 800w/m^2 à 1000w/m^2 .

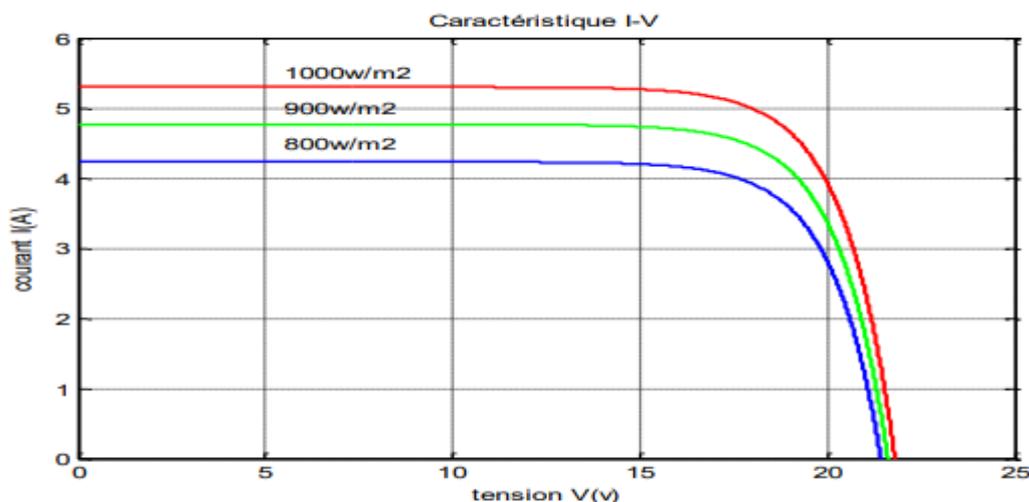


Figure III.7 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$.

III.4.3.2. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$

En faisant varier l'éclairement () entre (800w/m² et 1000w/m²) avec un pas de 100w/m² , la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ est donnée par la **figure (III.8)**.

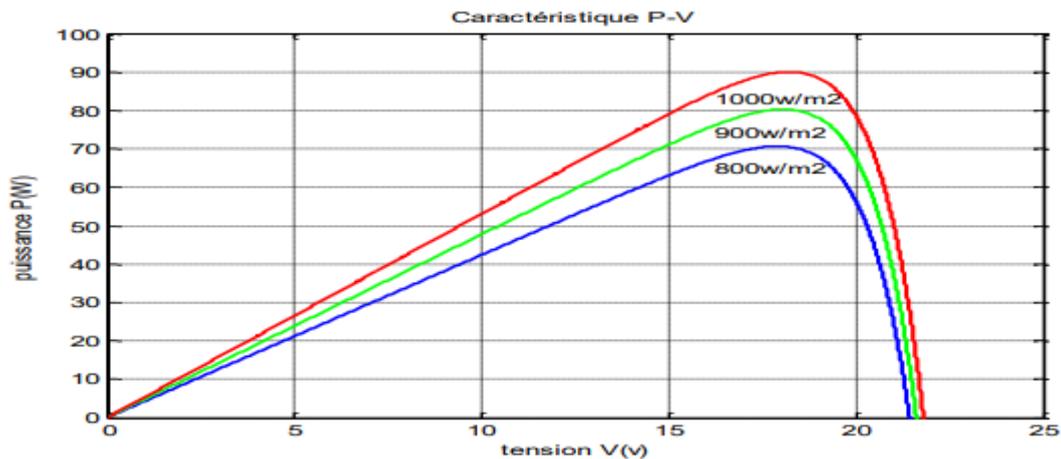


Figure III.8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$.

Figure (III.8) représente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation de la puissance. On remarque aussi que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de GPV. Pour un éclairement variable, le courant généré par le module photovoltaïque est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Par contre la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est en fonction de la différence de potentiel de la jonction PN du matériau lui-même. La tension du circuit ouvert ne diminue que légèrement avec le flux lumineux

III.4.3.3. L'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

En faisant varier l'éclairement () entre 0°C et 50°C avec un pas de (25°C), la caractéristique ($I_{pv} - V_{pv}$) est donnée par la figure 4.10, avec un éclairement constant ($G_a = 1000w/m^2$).

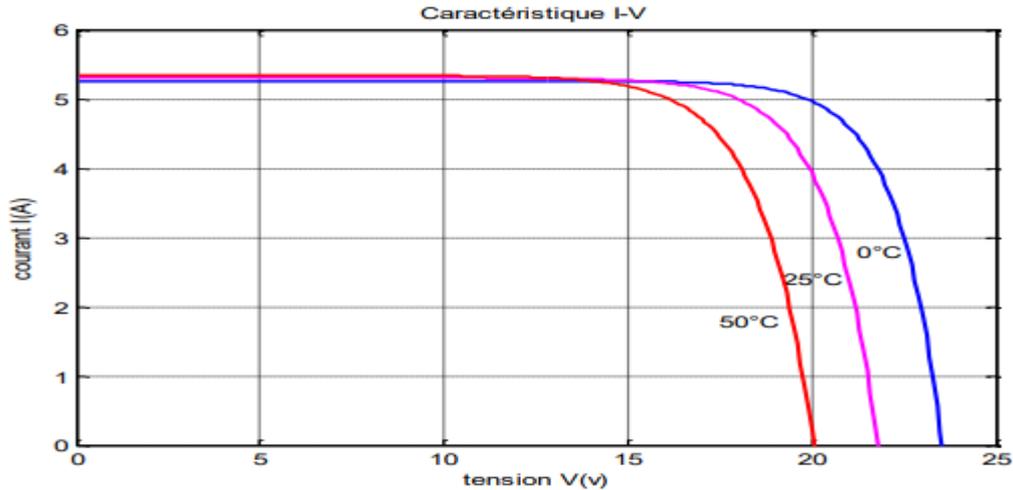


Figure III.9 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = (V_{pv})$.

La figure (III.9) présente l'évolution du courant généré par le module en fonction de la tension à éclairage fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne une baisse de la tension maximal atteinte aux bornes du module. Cependant nous remarquons que le courant du module est relativement constant.

III.4.3.4. L'influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$

La caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$ est donnée par la figure (III.10):

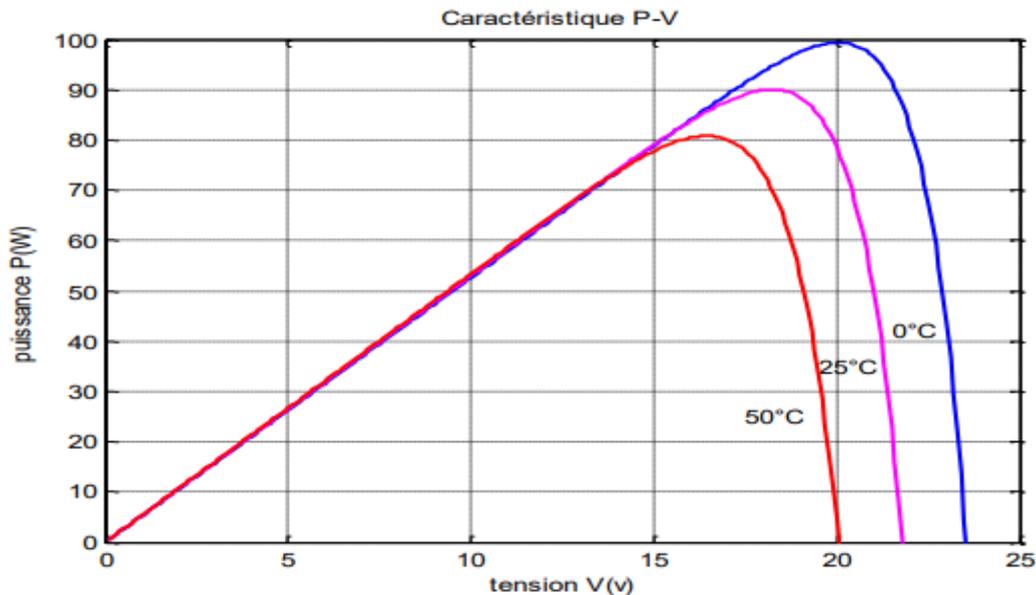


Figure III.10 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = (V_{pv})$.

La Figure (III.10) montre l'évolution de la puissance générée par le module en fonction de la tension à l'éclairement fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne une baisse de la puissance maximale, on peut aussi remarquer que la tension maximal atteinte aux bornes du module diminue.

Le modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus dans la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

Interprétation

Chaque matériau a un niveau de sensibilité de température qui lui correspond. L'influence de la température dans un matériau donné se situe au niveau de sa résistance à la circulation des électrons. Dans le cas d'une cellule photovoltaïque, une forte température réduit la différence de potentiel (ddp). Pour une température variable, la tension générée par le module photovoltaïque est pratiquement proportionnel au flux thermique. Par contre le courant ne diminue que légèrement avec la température.

III.4.4.Groupement du module PV

Pour augmenter la puissance délivrée par le module PV on fait une association des modules en parallèle, La figure (III.11): illustre, le groupement des modules PV.

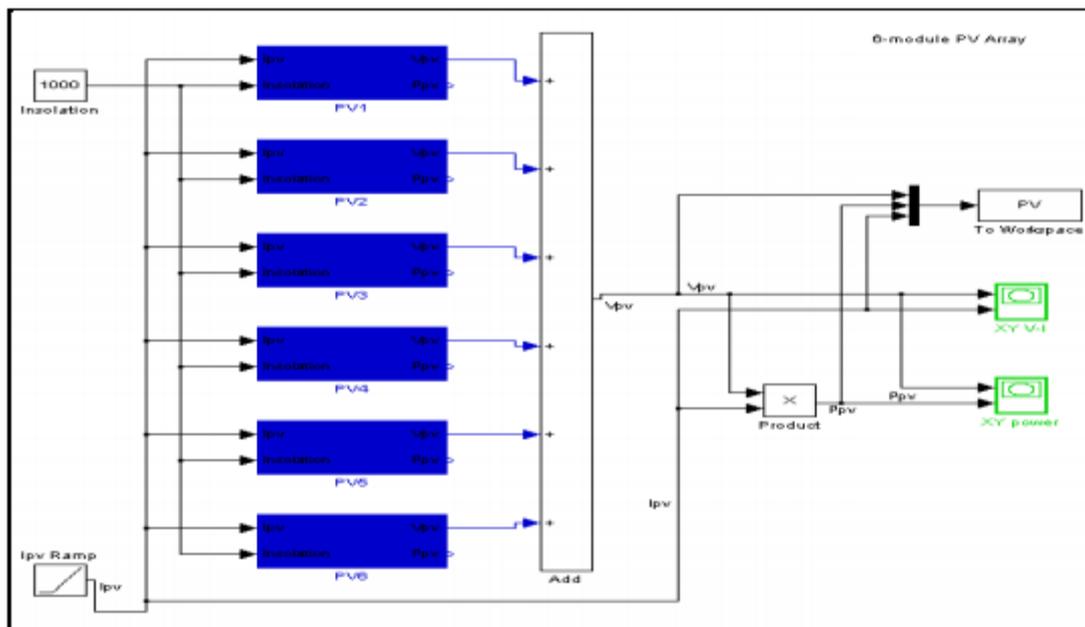


Figure III.11 groupement des modules PV sous simulink.

III.4.4.1 : Les caractéristiques I(V) et P(V) du groupes des modules à l'état stander :

Les figures (III.12) illustre la caractéristique P(V) et I(V) du groupes des modules.

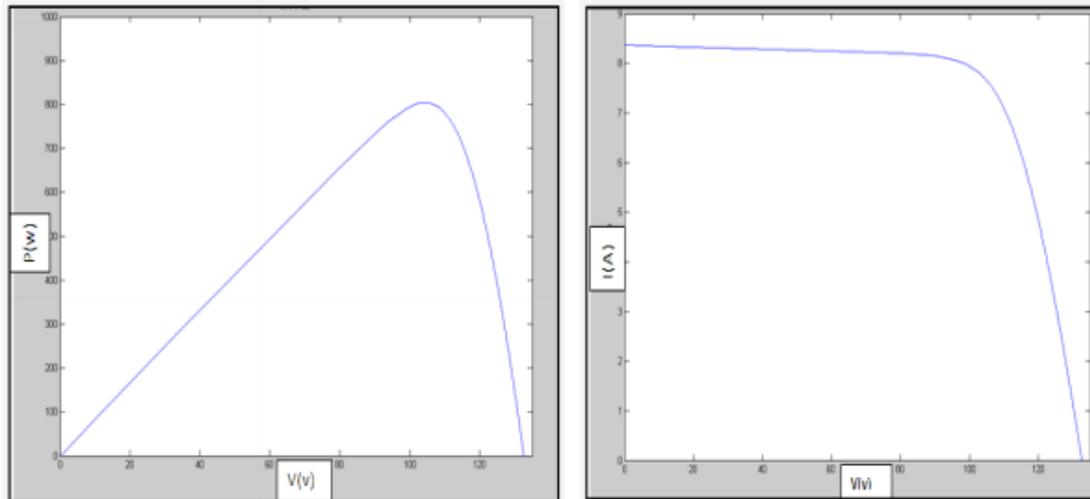


Figure III.12 les caractéristiques P(V) et I(V) du groupe des modules pv BP 3135

III.4.5 Hacheur DC/DC

Deux types de topologies des convertisseurs DC/DC convertisseur buck ou convertisseur « boost » sont les plus généralement employés par la majorité des concepteurs du suiveur de puissance Maximum dans le travail actuel, le convertisseur « boost » est choisi puisqu'il a d'excellentes caractéristiques telles que les possibilités des tensions élevées et de rendement important ; la petite taille et le bas prix

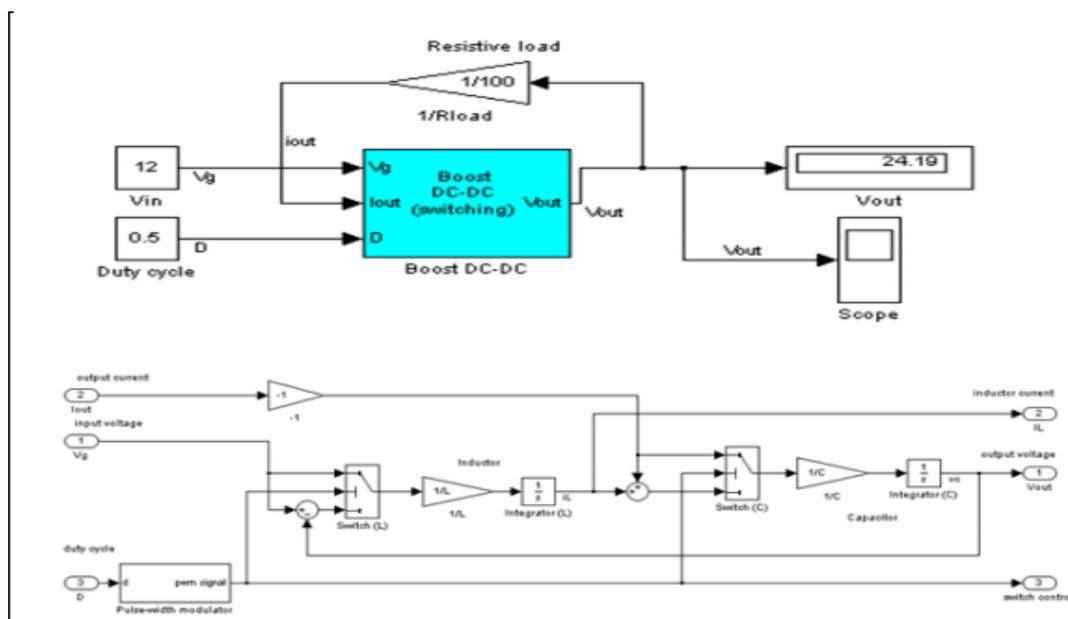


Figure III.13 Hacheur DC/DC sous simulink.

D'après la simulation et pour une valeur de tension d'entrée ($V_{in}=12V$), la sortie du hacheur deviendra ($V_{out}=24V$).

Et la figure (III – 14) représente la tension délivrée par le hacheur pour une tension d'entrée $V_{in}=12V$

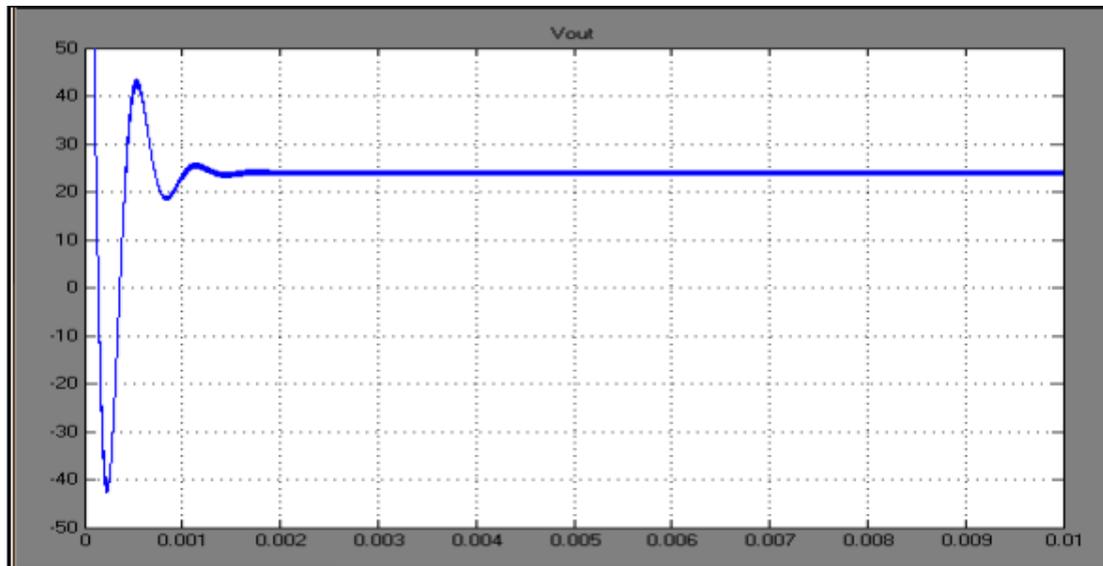


Figure III.14 Réponse en tension de l'hacheur

III.4.6 La commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence beaucoup plus basse [3]).

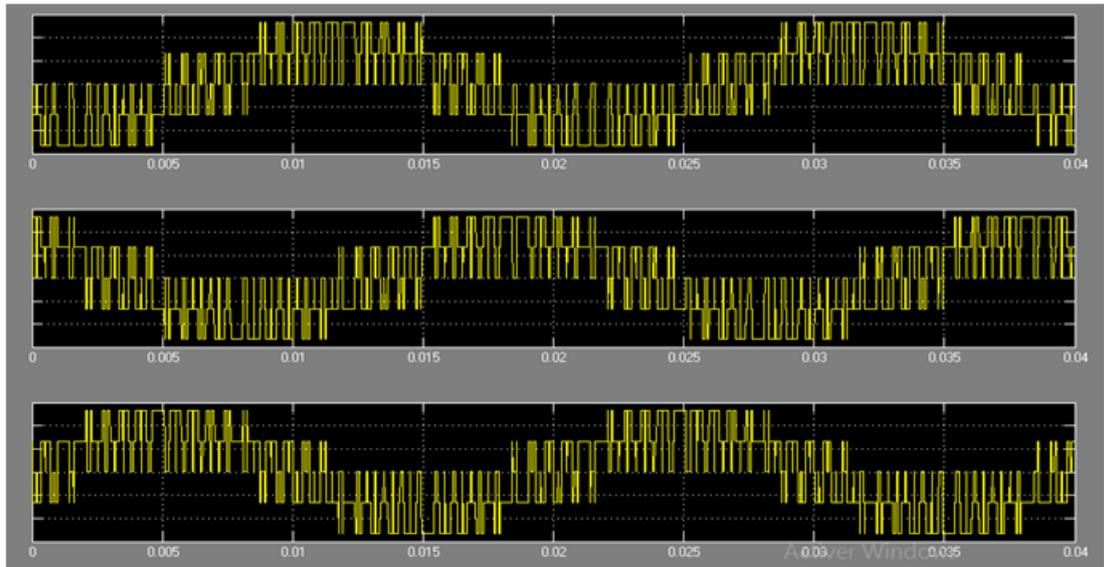


Figure III.15 Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

III.4.7 Batterie

Une batterie d'accumulateurs, ou plus communément une batterie, est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension et de capacité désirée. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellule.

- **Courbe de la tension de la batterie**

La tension de la batterie est 48 V, l'allure de cette tension est représentée sur **la figure(III.27)**, on remarque une légère variation de la tension à ces bornes, cette variation est dû à la variation de l'état charge et décharge de la batterie. En cas de décharge, la tension diminue jusqu'à un niveau minimal acceptable pour une batterie plomb-acide, il est défini comme le seuil de tension de décharge.

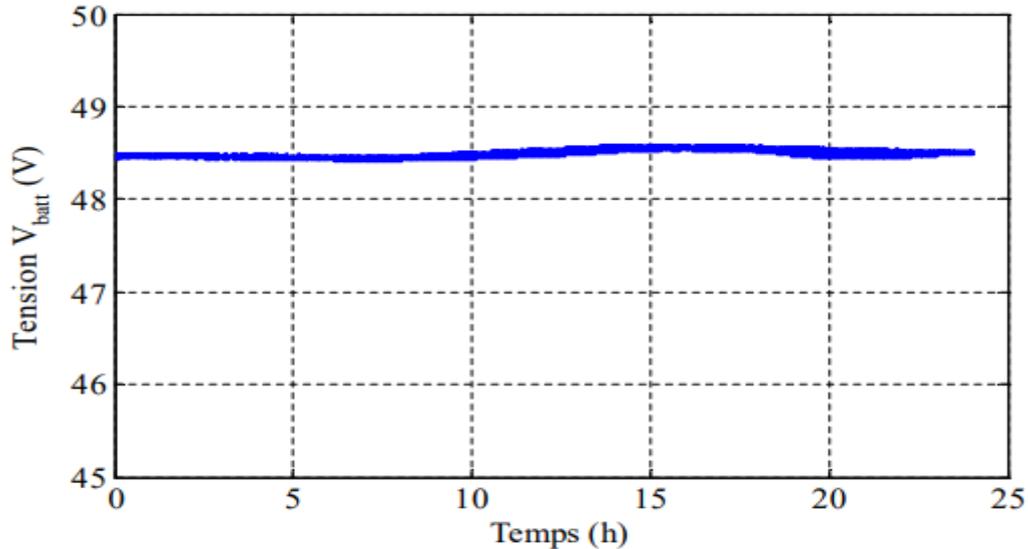


Figure III.16 Courbe de tension de système de stockage

- **Courbes du courant et de la puissance de la batterie**

Les batteries est une source complémentaire au champ PV, au terme d'alimentation de la charge, on a relevé l'allure de la puissance fournie par les batteries représentée sur la **figure (III.28)**. On remarque que :

* La batterie se charge de neuf-heures à seize-heures, tandis que de seize-heures jusqu'à vingt-deux-heures elle délivre sa puissance pour couvrir le déficit d'énergie.

D'après l'allure du courant délivré par la batterie, représentée sur la **figure (III.29)**, on remarque trois intervalles essentiels :

* De minuit au neuf-heures du matin l'allure décroît, la batterie débutera son courant sur la charge.

* De neuf-heures à seize heures après midi la batterie se charge, donc elle ne délivre pas le courant.

* De seize-heures au minuit la batterie, débite son courant à la charge pour assurer le déficit d'énergie dans le système.

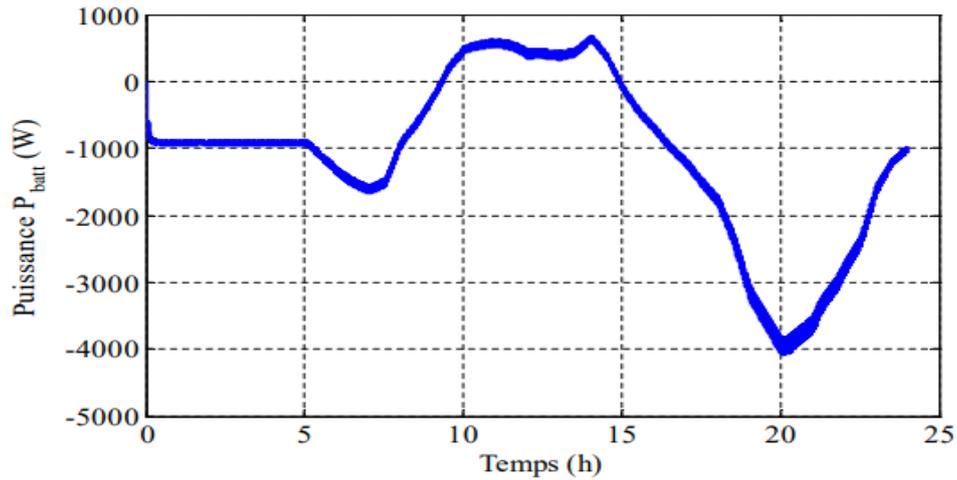


Figure III.17 Courbe de la puissance délivrée par la batterie

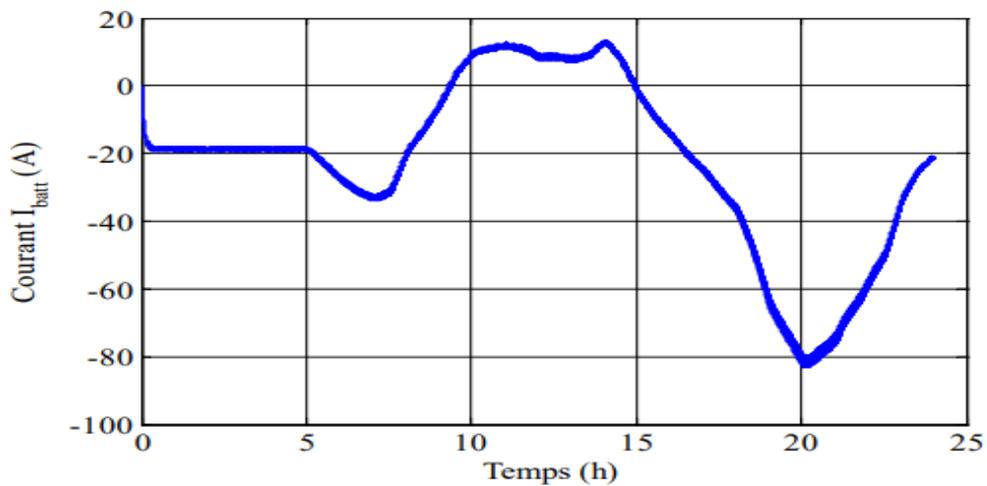


Figure III.18 Courbe de courant de la batterie

- Courbes d'état de charge (EDC)

Au cours de son utilisation, une batterie placée dans un système hybride autonome peut subir les surcharges au delà de 80%, ou bien des décharges profondes au dessous de 20%. Sur la **figure (III.30)**, on a représenté l'allure de l'EDC de la batterie utilisée dans notre système.

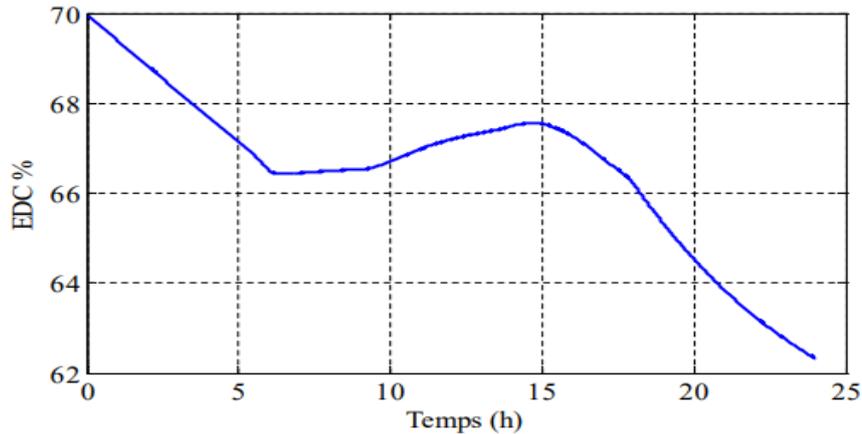


Figure III.19 Courbe de l'EDC dans la batterie

III.4.8 Stratégie de gestion d'énergie

L'organigramme, est une représentation schématique, un graphique permettant de représenter et de visualiser le transit de l'énergie, par ordre de priorité et selon son utilité. Sur la **figure (III.31)**, on a présenté un organigramme de gestion d'énergie de notre système PV/Diesel globale.

La schématisation d'un système de production d'énergie électrique autonome, via un organigramme, permet une bonne gestion d'énergie d'une manière à assurer une alimentation continue et une fiabilité permanente, ainsi qu'une longévité à notre système PV/Diesel.

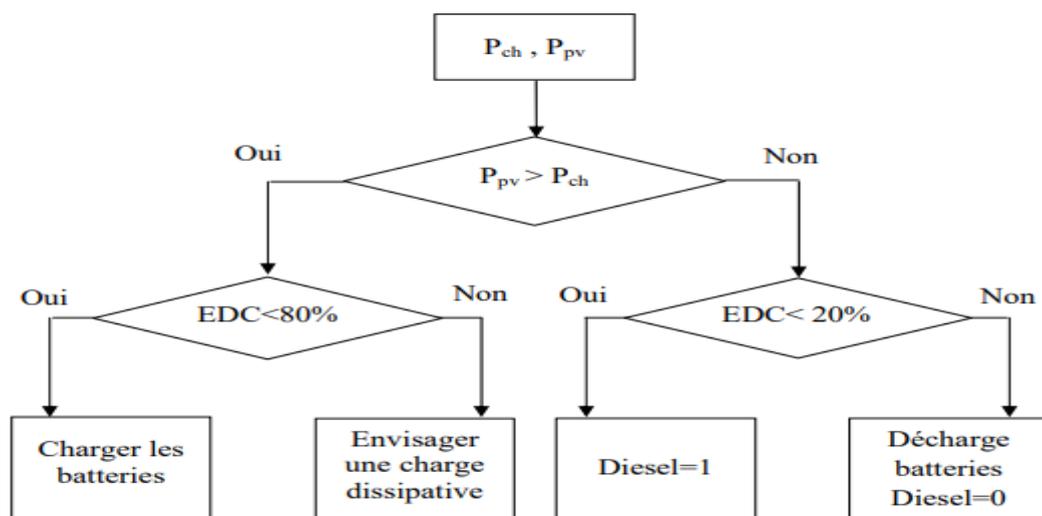


Figure III.20 Stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride PV/Diesel

- **Cas n°1 : $P_{pv} \geq P_{ch}$**

Si la puissance PPV fournie par le champ PV est supérieure à la puissance de la charge Pch et que l'état de charge des batteries est inférieure à 80%, le surplus sera fourni aux batteries de stockage. Si l'état de charge des batteries est à 80%, le surplus produit par le champ PV sera fourni à la charge dissipative.

- **Cas n°2 : $P_{pv} < P_{ch}$**

Si la puissance PPV fournie par le champ PV est inférieure à la puissance de la charge Pch et l'état de charge des batteries est supérieure à 20%, les batteries fournissent le déficit d'énergie. Par contre, si l'état de charge des batteries est inférieure à 20%, le groupe électrogène assure l'alimentation de la charge et le surplus servira à charger les batteries.

III.5 Conclusion

Dans le présent chapitre plusieurs points essentiels ont été traités : Premièrement, l'utilité de la simulation pour la conception des systèmes multi-sources et la classification des méthodes de simulation existantes ont été présentées. Deuxièmement, un ensemble d'outils utilisés pour la simulation et le dimensionnement des systèmes d'électrification dans les sites isolés et les sites connectés au réseau ont été présentés.

References bibliographies

- [1] **Z. Zarkov**, « Modelisation Des Convertisseurs Statiques DC-DC Pour Des Applications Dans Les Energies Renouvelables en Utilisant Matlab/Simulink », p. 1-9, 07mars 2017.
- [2] **G.V.Marcelo, R.G.Jonas, and R.F.Ernesto**, " Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays ", IEEE transactions on power electronics, Vol. 24, No. 5, Mai 2009.
- [3] **Touzani Youssef**, ” Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boosttriphase à prélèvementsinusoidal du courant”, thèse de Doctorat, Universite de Clermont-Ferrand, 10/07/2006.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse étudie un système hybride PV-DIESEL totalement autonome .L'objectif de ce système est de produire l'électricité pour satisfaire à tout instant la demande d'un consommateur dans un site isolé , qui se compose d'un champ photovoltaïque, un dispositif de stockage par batteries électrochimique et d'un groupe diesel comme source de secours et d'appoint, au champ PV pour alimentation d'une habitation isolée.

Nous avons présenté les composants de ce système et leur principe de fonctionnement. Ensuite, Pour modéliser notre système hybride, on a effectué le choix d'une chaîne de conversion photovoltaïque, un modèle de cellules qui compose les panneaux, un hacheur MPPT à commande MLI, afin de pousser notre champ à fonctionner à sa puissance maximale quelque soit les conditions météorologiques.

En ce qui concerne la chaîne de production photovoltaïque, nous avons utilisé un hacheur Boost commandé par la technique MPPT (basé sur la méthode logique floue), pour maximiser la puissance produite par le générateur photovoltaïque.

Comme perspective, nous espérons que notre travail de simulation et de soit complété par des tests de validation sur le terrain afin de connaître les performances réelles de notre système hybride et que la modélisation qu'on a effectué soit enrichie.