

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science et technologie.
Département : Electrotechnique.
Domaine : Science et technologie.
Filière : Electrotechnique.
Spécialité : Commande Electrique.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

Structure et commande d'une installation photovoltaïque

Présenté par : *ATI ZINA*
GHERIB SALHA

Encadrant : *Dr. CHINE ABDELGHANI* MAA Université ANNABA

Jury de Soutenance :

Pr. Ourici Amel	Pr	Université Annaba	Président
Dr. Chine Abdelghani	MAA	Université Annaba	Encadrant
Dr. Soltani Fatma	MCA	Université Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier du fond du cœur, avant tout, **MON DIEU** .

Nous a donné la volonté, le courage et la continuité dans nos études ,Et nous a gardé jusqu'à l'atteinte de ce niveau ,Et nous exprimons notre profonde gratitude.

Nous remercions à notre encadreur **Dr A.CHINE**

Pour l'honneur qu'il nous a donné en acceptant de nous encadrer

Dans ce travail, et qui a contribué avec son aide et ses efforts ainsi

Que son soutien en plus des différentes documentations Moyens mise à disposition pour la réalisation de Notre travail.

Nous tenons également à remercier tout enseignant qui a contribué à

Nous former depuis le primaire jusqu'à l'université.

Enfin nous remercions nos amis sans exception.

Dédicaces

Je dédie ce travail de fin d'études à la mémoire de **mon cher père Abed**, que Dieu ait son âme.

À ma mère Ghania, pour son amour inconditionnel, ses prières et son soutien inestimable.

À mon mari Bachir, pour sa patience, sa compréhension et son encouragement constant.

À ma binôme, Salha Gherib, pour son sérieux, sa persévérance et sa précieuse collaboration.

À mes frères et sœurs : Radouane, Fadi et Bouchra, pour leur amour et leur présence rassurante.

À mes amies chères : Aya, Chahinez et Lina, pour leur amitié sincère et leur soutien moral tout au long de ce parcours.

Merci à vous tous, du fond du cœur

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à **mes parents** bien-aimés, dont l'amour, le soutien et les sacrifices ont été les piliers de mon parcours académique.

À **mon mari, Karim**, pour sa patience, sa compréhension et son encouragement constant tout au long de cette aventure.

À **mes frères, Sabri et Abdelhak**, pour leur présence rassurante et leur soutien indéfectible.

À **ma binôme, Zina ati**, pour sa collaboration précieuse et son engagement sans faille.

À **mes tantes et cousins**, pour leur affection et leur encouragement qui m'ont portée dans les moments de doute.

À **mes chères amies, Aya, chahinez, Lina, Rahma**, pour leur amitié sincère et leur soutien tout au long de ce parcours.

Ce travail est le fruit de votre amour, de votre patience et de votre foi en moi.

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I .1 : les différentes Energies Renouvelable.....	(06)
Figure I .2 : Le dispositif mécanique.	(07)
Figure I .3 : Eolienne A Axe Horizontal.	(09)
Figure I .4 : Eolienne A Axe Vertical	(09)
Figure I .5 : Energie Hydraulique.....	(11)
Figure I .6 : Schéma fonctionnel d'une centrale hydraulique.....	(12)
Figure I .7 : Energie Solaire.....	(13)
Figure I .8 : Les Types De L'Energie Solaire.....	(14)

CHAPITRE II

Figure II .1 : Principe d'énergie solaire.	(16)
Figure II . 2 : L'effet PV.....	(16)
Figure II . 3 : Cellule photovoltaïque.....	(17)
Figure II .4 : La structure de cellule PV.....	(18)
Figure II.5 : Principe de fonctionnement d'un cellule PV.....	(19)
Figure II.6 : schéma équivalent d'une cellule solaire	(20)
Figure II .7 : Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome	(21)

Figure II-8: un générateur photovoltaïque.....	(22)
Figure II-9: Schéma de simulation d'un module photovoltaïque	(22)
Figure II-10 : Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.	(23)
Figure II-11 : Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque.....	(23)
Figure II-12: Courbe I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C.	(24)
Figure II-13: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C.....	(24)
Figure II-14: Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à G=1000W/m.....	(25)
Figure II-15: Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à G=1000W/m ²	(26)

CHAPITRE III

Figure III -1: les différents types de convertisseurs statiques	(28)
Figure III -2: Schéma de principe de la conversion Continu-continu (DC-DC).....	(29)
Figure III -3 : Convertisseur Buck	(30)
Figure III -4 : Structure du hacheur abaisseur.....	(30)
Figure III-5 : grandeur électrique caractéristique.....	(31)
Figure III-6: caractéristique statique (interrupteurK1,K2).....	(32)
Figure III-7 : schémas de simulation de l'hacheur abaisseur (Buck)	(35)
Figure III-8 : Tension et courant de charge : f=50 Hz et T _{on} = 30% de T	(35)
Figure III-9 : Tension et courant de charge : f=50 Hz et T _{on} = 70% de T.....	(35)

Figure III–10 : Tension et courant de charge : $f=100$ Hz et $T_{on}= 30\%$ de T	(36)
Figure III–11 : Tension et courant de charge : $f=100$ Hz et $T_{on}= 70\%$ de T	(36)
Figure III–12 : Le courant de charge, transistor, diode.....	(36)
Figure III–13: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	(37)
Figure III–14: Schémas équivalents du hacheur survolteur (a):K fermé,(b):K ouvert.....	(37)
Figure III–15: Résultats de simulation de l’hacheur élévateur (BOOST)	(39)
Figure III–16: Courant de charge ; Tension source et charge.....	(39)
Figure III–17: Impulsions de commande du transistor.....	(40)
Figure III–18: Tension et courant de la bobine	(40)
Figure III–19: Tension et courant du condensateur.....	(41)
Figure III–20: Impulsions de commande du transistor	(41)
Figure III–21: Tension et courant du transistor.....	(42)
Figure III–22: Tension et courant de la diode.....	(42)

CHAPITRE IV

Figure IV–1: Connexion directe entre un GPV et une charge.....	(45)
---	-------

Figure IV-2 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.	(45)
FigureIV-3 : Etage d'adaptation d'un GPV-charge	(46)
FigureIV-4 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.....	(48)
Figure IV-5 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	(48)
Figure IV-6 : Recherche et recouvrement du point puissance maximale (A) Suite à une variation d'éclairement, (B) Suite à une variation de charge,(C)Suite à une variation de température.....	(50)
Figure IV-7 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance.....	(53)
Figure IV-8 : Algorithme d'incrémentacion de la conductance.....	(54)
Figure IV-9 : Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	(56)
Figure IV-10 : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O.....	(57)
FigureIV-11 : montage PV-MPPT.....	(58)
FigureIV-12 : consigne sur la puissance maximale et puissance délivrée	(59)
FigureIV-13 : d'augmentation de l'éclairement.....	(59)
FigureIV-14 : cas de diminution de l'éclairement.....	(60)

SOMMAIRE

Introduction Générale.....(01)

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART.

I .1 :	Introduction	(05)
I .1.1 :	Energie éolienne.....	(06)
I .1.1.1 :	Principe de fonctionnement.....	(06)
I .1.1.2 :	Classification des turbines éoliennes	(08)
I .1.1.3 :	Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	(10)
I .1.2 :	L'énergie hydraulique.....	(11)
I .1.2.1 :	Principe de fonctionnement.....	(11)
I .1.2.2 :	Les avantages et les inconvénients de l'énergie Hydrolique.....	(12)
I .1.3 :	Energie Solaire.....	(13)
I .1.3.1 :	L'énergie solaire Thermique.....	(14)
I .1.3.2 :	Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.....	(15)
I .2 :	Conclusion.....	(15)

CHAPITRE II : L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE.

II . 1 :	Introduction	(16)
II . 2 :	Effet photovoltaïque	(16)
II . 3 :	Cellule photovoltaïque	(17)
II . 3 .1 :	La cellule PV.....	(17)

II . 3.2 :La structure	(17)
II .4 : Principe de fonctionnement.....	(18)
II . 5 : Circuit équivalent et modèle mathématique	(19)
II . 6 : Composante de système PV.....	(20)
II . 7 : Générateur photovoltaïque et ses performances.....	(22)
II . 7.1 : Caractéristique courant-tension	(23)
II . 7.2 : Influence de l'ensoleillement	(23)
II . 7.3 : Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V).....	(25)
II . 8 : Conclusion.....	(26)

CHAPITRE III : CONVERTISSEUR DC-DC .

III .1 : Introduction	(27)
III .2 : Avantages et inconvénients des convertisseurs.....	(27)
III .2.1 : Avantages.....	(27)
III .2.2 : Inconvénients	(27)
III .3 : Les principales applications.....	(27)
III .4 : Différents types des convertisseurs statistiques.....	(28)
III .5 : Convertisseur continu-continu (Hacheur).....	(28)
III .5. 1 : Introduction.....	(28)

III .5. 2 : Type des convertisseurs DC-DC.....	(29)
III .6 : Hacheur abaisseur (Buck).....	(29)
III .6.1 : Principe.....	(29)
III .6.2 : Structure.....	(30)
III .6. 3 : Caractéristique statique des interrupteurs.....	(32)
III .6. 4 : Inventaires des solutions relatives à la nature des interrupteurs.....	(34)
III .6.5 : Simulation de la hacheur buck	(34)
III .7 : Hacheur dévolteur (Boost).....	(37)
III .7. 1 : Simulation de la hacheur boost	(38)
III .8 :	
Conclusion.....	(43)

CHAPITRE IV : LA COMMANDE MPPT.

IV.1 : Introduction.....	(44)
IV.2: Connexion direct entre la source et la charge.....	(44)
IV.3 :Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque.....	(46)
IV.4 : Principe de fonctionnement de MPPT.....	(47)
IV.5 : Classification de l'algorithmme de suiveur la puissance max	(51)

IV.5.1 : Les méthodes indirectes.....	(51)
IV.5.1.1 : La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.....	(51)
IV.5.1.2 : La méthode de court-circuit.....	(52)
IV.5.2 : Les méthodes directes.....	(52)
IV.5.2.1 : La méthode incrémentation de la conductance	(52)
IV.5.2.2 : Méthode à contre réaction de la tension.....	(55)
IV.5.2.3 : Méthode contre réaction de courants	(55)
IV.5.2.4 :La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	(55)
IV.6 :Simulation de la méthode MPPT.....	(58)
IV.7 : Conclusion.....	(60)
Conclusion Générale	(61)

Introduction Générale.

Aujourd'hui, il est difficile d'imaginer notre quotidien sans électricité. Il est donc crucial de maîtriser sa production de manière continue et performante. Face à une demande énergétique en constante augmentation, il a été nécessaire de développer et construire des centrales capables de produire de grandes quantités d'électricité. Une fois l'énergie générée, elle doit être acheminée jusqu'aux utilisateurs finaux. Dans un pays, ce sont les réseaux de transport et de distribution publics qui assurent le transfert de l'électricité des sites de production vers les consommateurs.

Dans les centrales thermiques, c'est la vapeur générée par la combustion de combustibles dans des chaudières qui entraîne la turbine.

Par contre, dans le cas des centrales hydroélectriques, c'est l'énergie de l'eau qui fait tourner la turbine.

Elle est reliée à un alternateur, constitué d'un aimant tournant autour d'une bobine, qui a la capacité de générer un courant alternatif.

Il faut ensuite acheminer ce courant vers les zones où il est consommé.

Ainsi, la génération d'énergie électrique dépend de grandes installations (comme les turbines et chaudières) et a des répercussions importantes sur l'environnement qui influencent particulièrement notre planète.

Grâce aux progrès technologiques, l'homme a su tirer parti de diverses ressources naturelles telles que le soleil, l'eau, le vent, le bois et autres éléments végétaux pour produire de l'énergie.

Dans un contexte où la gestion des déchets nucléaires et la réduction des gaz à effet de serre sont des défis cruciaux, leur faible empreinte écologique les positionne comme des

solutions prometteuses.

Les énergies renouvelables offrent également une opportunité pour plus de
Deux milliards d'individus résidant dans des régions éloignées d'obtenir enfin
L'accès à l'électricité.

Avec l'amélioration constante des technologies, ces sources d'énergie
Connaissent une croissance significative.

Cependant, leur mise en œuvre demeure très variable, en fonction des
Ressources à disposition et des contextes locaux.

Dans un environnement où la consommation d'énergie ne cesse de croître, il paraît
Irréaliste que les énergies renouvelables puissent, sur le court terme, remplacer complè-
tément les sources d'énergie conventionnelles.

Il est donc crucial que chacun reconnaisse sa propre consommation et adopte des
Comportements plus responsables.

Quotidiennement, le soleil envoie une vaste quantité d'énergie à notre planète.
Par le biais de la technologie photovoltaïque, les électrotechniciens peuvent saisir
L'énergie solaire et la convertir en électricité.

Actuellement, l'énergie solaire est considérée comme l'une des solutions les plus promet-
teuses et connaît une croissance rapide à travers le monde.

Antoine Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque, qui convertit la lumière en
Électricité, en 1839.

Toutefois, ce n'est qu'après près d'une centaine d'années que les chercheurs ont commen-

cé à creuser et à exploiter ce phénomène.

Dans les années 50, l'énergie solaire a véritablement progressé, particulièrement pour l'alimentation des véhicules spatiaux, avec l'introduction du premier satellite doté de cette technologie en 1958.

À cette époque, c'était la seule source d'énergie non nucléaire disponible pour les Satellites.

En effet, les images satellites que vous visionnez à la télévision sont directement liées à l'énergie photovoltaïque.

Durant les années 70 et 80, de considérables efforts ont été déployés pour réduire les Coûts, ce qui a permis l'expansion de l'énergie photovoltaïque à des applications terrestres. Cette époque a connu une croissance industrielle considérable.

Depuis le début des années 1980, l'expédition annuelle de modules photovoltaïques — mesurée en mégawatts-crête (MWc) n'a jamais cessé de croître, alors que leur coût par watt-crête a baissé grâce à la montée des volumes de production.

Malgré la stabilisation des prix actuellement observée, l'augmentation des livraisons de modules photovoltaïques continue.

Le rayonnement solaire, qu'il soit direct ou diffus, peut être transformé directement en électricité sous forme de courant continu à l'aide de cellules photovoltaïques, sans passer par un cycle thermodynamique. Cela confère aux systèmes photovoltaïques une grande simplicité : contrairement aux centrales thermiques classiques ou solaires, ils ne nécessitent ni fluides à haute température ou sous pression, ni pièces mobiles, ni source froide utilisant de l'eau.

Dans ce dispositif, l'énergie primaire provient du rayonnement solaire, qui est naturellement présent dans notre environnement.

Il suffit de placer les panneaux ou modules à la lumière du jour pour générer de

L'électricité.

Cette forme d'énergie est gratuite et accessible toute la journée.

Les systèmes photovoltaïques conviennent particulièrement à la génération d'électricité décentralisée, notamment dans les zones reculées.

Ils répondent efficacement aux besoins d'électrification dans les zones rurales, que ce soit pour des usages domestiques ou communautaires (centres de santé, écoles, etc.), l'extraction d'eau, la conservation des aliments ou même les services de télécommunication.

Ainsi, ces solutions conviennent parfaitement aux communautés rurales qui ne peuvent être reliées aux réseaux d'électricité standard.

Même dans un cadre urbain, l'installation de panneaux solaires sur les toits ou les façades des bâtiments aide à réduire la consommation d'énergie et permet de réaliser des économies.

Dans notre étude, le premier chapitre est consacré aux sources et aux différents types d'énergies renouvelables, présentant un état de l'art.

Le deuxième chapitre : Les différents composants d'un système photovoltaïque, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, caractéristiques essentielles. (l'énergie photovoltaïque) .

Le troisième chapitre : les rôles essentiels des hacheurs Buck et Boost en électronique de puissance, et en particulier des hacheurs (buck et boost) et leurs simulation par MATLAB SIMULINK .(convertisseur DC-DC)

Le quatrième chapitre : présente l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) appliqué aux convertisseurs DC-DC, en particulier le convertisseur Boost et leurs simulation par MATLAB SIMULINK. (La commande MPP)

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

I .1- Introduction:

Les énergies renouvelables proviennent de sources naturelles qui se renouvellent plus vite qu'elles ne sont consommées.

Par exemple, le soleil et le vent sont des sources d'énergie qui se régénèrent constamment. Ces sources d'énergie sont pléthoriques et omniprésentes dans notre environnement.

Cependant, les ressources fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz sont des ressources non renouvelables qui se créent sur une période s'étendant sur plusieurs centaines de millions d'années.

Quand on les brûle pour générer de l'énergie, ces combustibles produisent des émissions de gaz à effet de serre, tel que le dioxyde de carbone, qui sont préjudiciables à l'environnement.

La production d'énergie verte émet nettement moins de gaz à effet de serre que la brûlure de carburants fossiles.

Pour lutter contre la crise climatique, il est essentiel de remplacer les combustibles fossiles, qui sont responsable en grande partie des émissions actuelles, par des sources d'énergie renouvelables.

Dans la majorité des pays, les énergies renouvelables sont désormais moins chères et créent trois fois plus d'emplois que les énergies fossiles.

On dénombre diverses sortes d'énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et biomasse.[2]

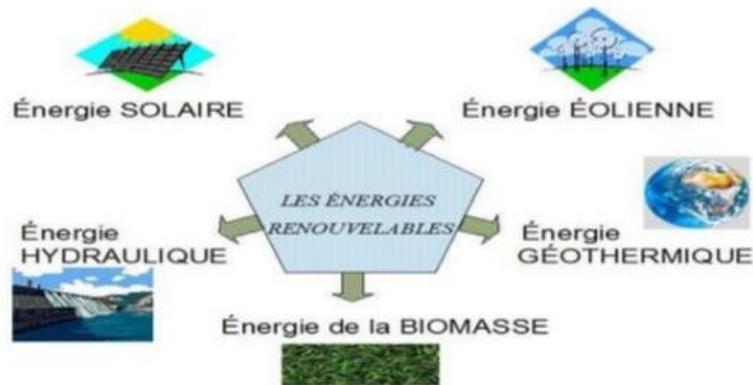


Figure I .1 : les différentes Energies Renouvelable.

Les énergies renouvelables

I .1.1 - Energie éolienne.

• Définition

La force du vent génère de l'énergie éolienne. Elle découle du fonctionnement des turbines éoliennes, des appareils électriques alimentés par le vent, dont la mission est de produire de l'électricité.

Quand le vent actionne une hélice, celle-ci met en mouvement le rotor. Ce dernier, connecté à un générateur, transforme l'énergie mécanique en électricité.

L'énergie générée par une turbine éolienne est essentiellement liée à la vitesse du vent, à la superficie des pales et à la densité de l'air.[3 ,4]

I .1.1.1- Principe de fonctionnement :[5]

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est essentiellement constituée des éléments ci-après :

a. Un mât :

Habituellement d'une centaine de mètres de haut, qui soutient la nacelle pour lui donner la capacité de saisir des vents plus hauts et plus forts.

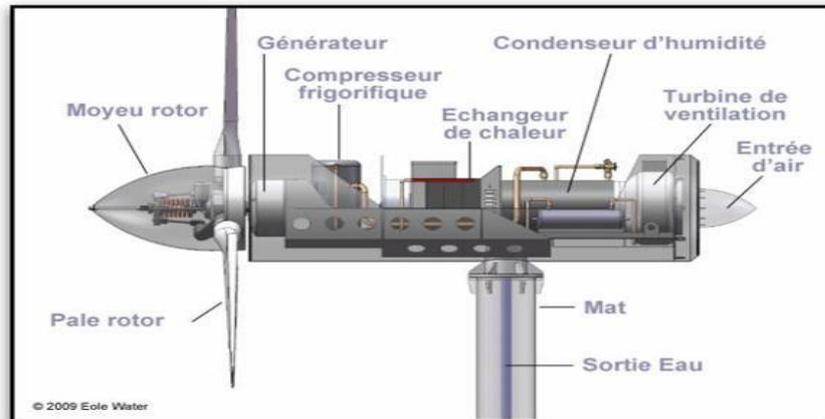


Figure I .2 : Le dispositif mécanique.

b) **La nacelle :**

Installée au sommet du mât, contient notamment la génératrice ainsi que les autres éléments indispensables au fonctionnement de l'éolienne.

c) **Le rotor :**

Les trois pales qui sont fixées à celui-ci sont mises en mouvement par la force du vent. Ce déplacement actionne un arbre mécanique, dont la vitesse est amplifiée par un multiplicateur avant d'être transformée en électricité par le biais de la génératrice.

d) **Une éolienne :**

Produit de l'énergie lorsque la vitesse du vent est comprise entre 3 mètres par seconde, le minimum nécessaire pour actionner les pales, et 25 mètres par seconde.

Au-delà de cette vitesse limite, un dispositif monté dans la nacelle se déclenche pour contrôler la rotation du rotor et modifier l'angle des pales, arrêtant par conséquent l'appareil tant que le vent ne diminue pas. Les pales fixées au rotor, sous l'influence du vent, mettent en mouvement une génératrice électrique située dans la nacelle.

L'électricité générée, avec une tension variant entre 400 et 690 volts, est ensuite transportée par un câble enterré jusqu'au point de livraison.

À cette étape, la tension est montée à approximativement 20 000 volts pour permettre son intégration au réseau électrique national.

I .1.1.2- Classification des turbines éoliennes: [6]

Il existe deux catégories majeures d'éoliennes utilisées pour capter l'énergie éolienne :

A-1) Les machines à axe horizontal:

- Rotor avec pales
- Transmission mécanique comprenant un arbre et une boîte de vitesses
- Génératrice
- Nacelle supportant le rotor
- Système d'orientation
- Mât soutenant la nacelle
- Axe du générateur
- Machines à vent classiques
- Éoliennes à rotation lente
- Éoliennes à rotation rapide



Figure I .3 : Eolienne A Axe Horizontal.

A-2) Les machines à axe vertical:

- Machines à traînées différentielles
- Machines à écran
- Machines à clapets battants
- Machines à pales tournantes
- Machines à variations cycliques d'incidence, avec aubes fixes et mobiles



Figure I .4 : Eolienne A Axe Vertical.

I .1.1.3 - Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

- **Avantage**

- L'énergie éolienne contribue à la sauvegarde des ressources en eau.
 - Elle s'adapte aisément à d'autres utilisations des terres et peut stimuler la croissance économique des régions rurales.
 - Elle ne produit ni pollution liée à l'eau, ni débris solides nocifs.
 - L'énergie du vent est entièrement renouvelable, extrêmement sûre et performante.
 - Elle est considérée comme une des sources d'électricité les plus concurrentielles pour la production en grande quantité.
 - En neutralisant les émissions issues d'autres sources d'énergie, elle aide à atténuer les effets du changement climatique global.

- **Inconvénients**

- L'utilisation de l'énergie éolienne est écologiquement propre en soi, cependant, les éoliennes génèrent une pollution sonore en raison du bruit des pales, ce qui entraîne également une altération du paysage.
- La disponibilité de l'énergie éolienne est relativement faible (entre 20 et 30 %).
- Il existe des difficultés pour connecter ces installations au réseau électrique.
- L'espace nécessaire au sol pour installer ces infrastructures est un facteur limitant.
- L'acceptation par le public reste un enjeu important.

I .1.2- L'énergie hydraulique. [7]

- **Définition**

L'énergie hydraulique, générée à partir de l'eau dans des centrales hydroélectriques, est une ressource renouvelable. Elle produit de l'électricité grâce à la force de l'eau, qui est déterminée soit par le débit, soit par la hauteur des chutes.

En France, l'hydroélectricité se positionne comme la seconde source de production d'électricité après le nucléaire, et comme le principal fournisseur d'électricité renouvelable.

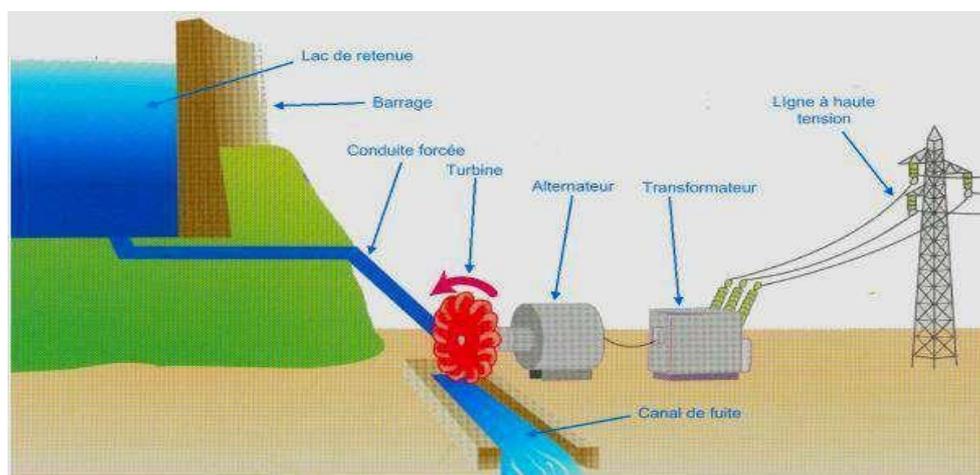


Figure I .5 : Energie Hydraulique.

I .1.2.1- Principe de fonctionnement.[8]

L'énergie hydraulique est généralement produite par les cascades d'eau générées par l'ouverture des vannes d'un barrage qui retient un réservoir.

L'eau est donc acheminée par des conduites forcées jusqu'à l'usine, où sa puissance considérable due à la chute d'altitude fait tourner une grande roue de turbine. Un alternateur, entraîné par cette turbine, produit l'électricité.

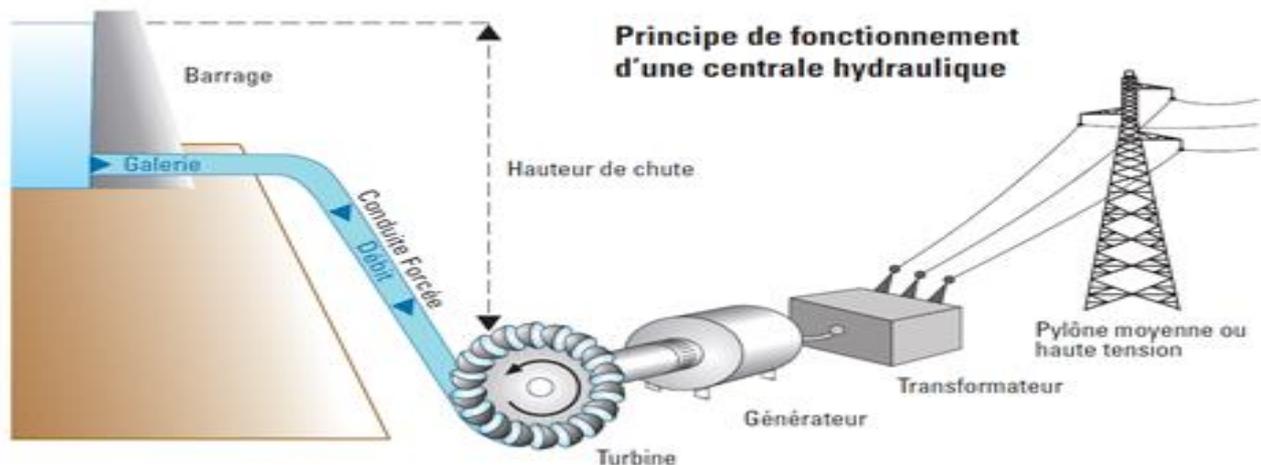


Figure I .6:schéma fonctionnel d'une centrale hydraulique.

I .1.2.2 - Les avantages et les inconvénients de l'énergie Hydraulique.

- **Avantage.**
- 1/ Tant que le cours d'eau ne s'assèche pas, l'énergie reste disponible. C'est une source d'énergie généralement fiable (à l'exception des périodes de sécheresse prolongée).
- 2/ Il s'agit d'une énergie propre, inépuisable, sans émissions de fumées ni pollution, et elle est également très économique grâce à un retour sur investissement rapide.
- 3/ La gestion des cours d'eau permet de maîtriser les crues.
- 4/ En période de sécheresse, de l'eau est libérée pour maintenir les niveaux nécessaires.
- 5/ Lors d'inondations, l'excédent d'eau est retenu pour éviter des dégâts.

- **Inconvénients**

- 1/ Les grands barrages peuvent submerger des zones très étendues, y compris des zones habitées, entraînant ainsi des déplacements de population. Ils peuvent également mettre en danger les écosystèmes locaux, affectant la faune et la flore.
- 2/ Les barrages peuvent s'envaser, car ils ralentissent l'écoulement de l'eau et retiennent également tous les sédiments transportés par les cours d'eau.
- 3/ Le relâchement d'eau (ou, plus rarement, la rupture d'un barrage) peut causer des destructions importantes en aval, semblables à un raz-de-marée.

I .1.3 - Energie Solaire:[2]

- **Définition.**

La production d'électricité à partir des rayons solaires est ce que l'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque.

On la considère comme une source d'énergie renouvelable, étant donné que le soleil représente une ressource infinie à l'échelle humaine.

Toutefois, elle n'est pas entièrement renouvelable, car la production, l'installation et l'utilisation des panneaux solaires nécessitent une grande quantité d'énergie provenant majoritairement de sources non renouvelables.

Néanmoins, un système photovoltaïque génère habituellement entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qu'il consomme lors de sa production.



Figure I .7 : Energie Solaire.

Il existe 2 utilisations de l'énergie solaire:

- ✓ La production de chaleur : le "solaire thermique"
- ✓ La production d'électricité : le "solaire photovoltaïque"

I .1.3.1 -L'énergie solaire Thermique:

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie issue du rayonnement solaire, visant à exploiter la chaleur produite par le soleil pour chauffer un fluide (qu'il soit liquide ou gazeux). Cette chaleur peut être utilisée de manière directe (par exemple pour l'eau chaude ou le chauffage) ou indirecte (comme pour produire de la vapeur afin d'alimenter des alternateurs et générer de l'électricité, ou encore pour la production de froid).

À l'inverse de certaines méthodes d'énergie solaire, comme l'énergie solaire Photovoltaïque qui convertit l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet Photoélectrique, l'énergie solaire thermique exploite la chaleur du soleil à travers un fluide de circulant dans des capteurs.

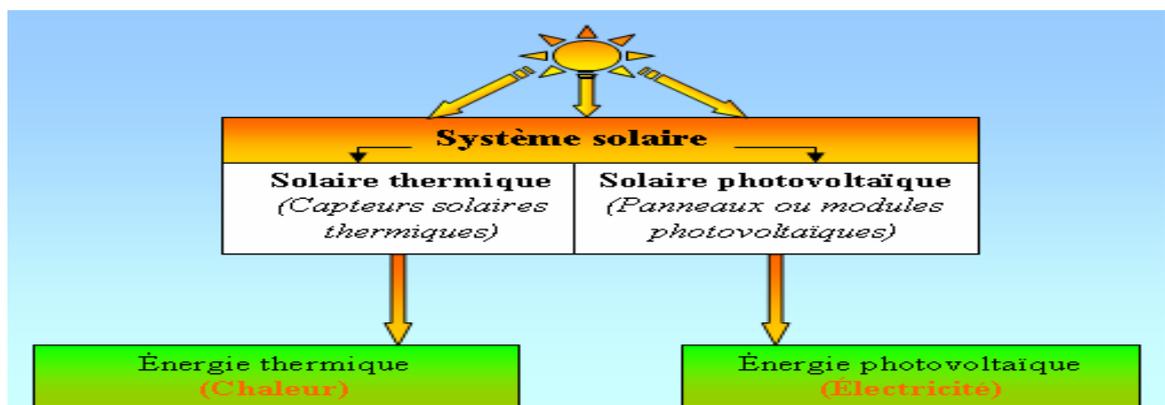


Figure I .8 : Les Types De L'Énergie Solaire.[2]

I .1.3.2- Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

- **Avantage.**

- L'énergie électrique est non polluante lors de son utilisation et respecte les principes du développement durable.
- C'est une source d'énergie renouvelable, car elle est inépuisable à l'échelle humaine.
- Elle peut être utilisée dans les pays en développement où le réseau électrique est peu développé, ainsi que dans des zones isolées, comme les montagnes, où l'accès au réseau électrique national est difficile.

- **Inconvénients.**

- L'investissement initial est conséquent.
- L'installation doit être compatible avec son environnement.
- La production d'énergie éolienne est variable, car elle dépend du vent, qui est aléatoire.
- Les projets ont une durée de réalisation longue.
- Il y a un besoin de stocker l'électricité produite.

I .2- Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons examiné que chaque source d'énergie renouvelable présente à la fois des avantages et des inconvénients. Toutefois, des recherches sont menées pour améliorer leur efficacité, surtout compte tenu du fait que les réserves de pétrole et de gaz naturel sont estimées pour durer environ un siècle. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la structure d'un système photovoltaïque.[1]

CHAPITRE II

L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE.

II. 1- Introduction.

La méthode de l'énergie solaire photovoltaïque repose sur la transformation de l'énergie du rayonnement solaire en électricité grâce à une cellule photovoltaïque.

Ce chapitre traitera de l'effet photovoltaïque et du fonctionnement des cellules photovoltaïques.

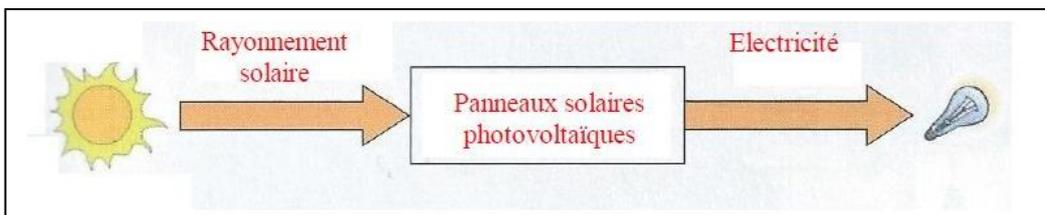


Figure II . 1 : Principe d'énergie solaire.[11]

II. 2- Effet photovoltaïque.[9]

Le terme "photovoltaïque" se compose de deux éléments : le préfixe « photo », qui provient du mot grec signifiant « lumière » ou « clarté », et le suffixe « volt », en référence à Alessandro Volta, un pionnier de l'électricité.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Il résulte de l'absorption des photons par un matériau semi-conducteur, ce qui génère une tension électrique. Les cellules photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en courant continu, qui peut être utilisé pour alimenter des appareils ou recharger des batteries.

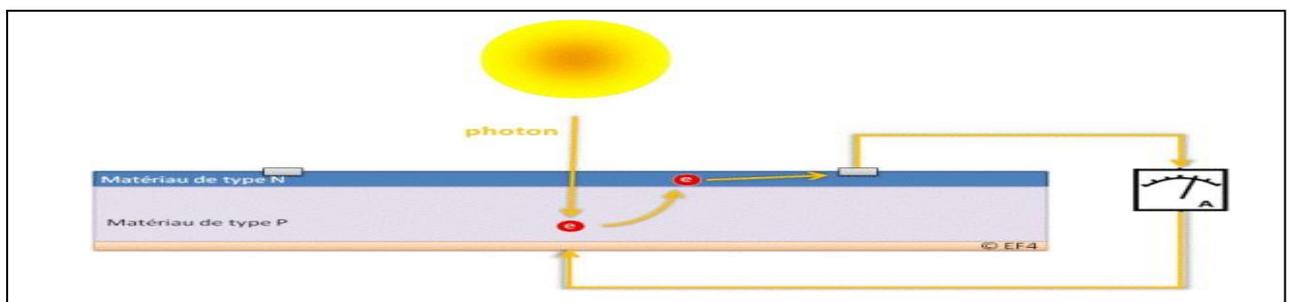


Figure II . 2 :L'effet PV [11]

II . 3-Cellule photovoltaïque:[9]

II . 3 .1-La cellule PV:

Une cellule photovoltaïque, aussi connue sous le nom de cellule solaire, est un dispositif électronique qui génère de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière, grâce au phénomène d'effet photovoltaïque.

La quantité d'énergie électrique produite est fonction de la luminosité captée et de l'efficacité de la cellule.Elle produit une tension continue et crée un courant dès qu'elle est reliée à une charge électrique, telle qu'un onduleur ou parfois une batterie.



Figure II . 3 : Cellule photovoltaïque.

II . 3.2-La structure:

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est un dispositif électronique capable de générer de l'électricité lorsqu'il est soumis à la lumière, en vertu de l'effet photovoltaïque.

Le volume d'énergie produite est directement associé à l'intensité de la lumière reçue et à la performance de la cellule.

Elle génère une tension continue et un courant débute à circuler en son sein dès qu'elle est reliée à une charge électrique, généralement un onduleur ou, dans certains scénarios, une batterie.

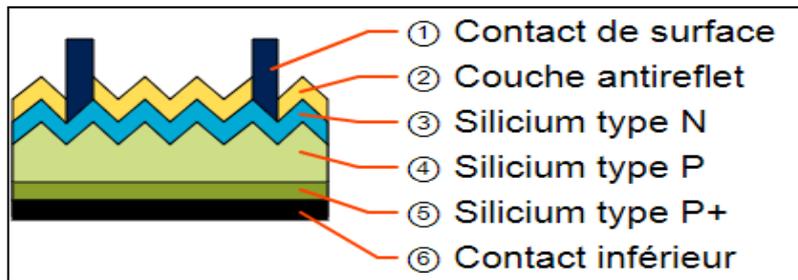


Figure II . 4 : La structure de cellule PV

II . 4-Principe de fonctionnement:[10]

Ils se déplacent de manière désordonnée à la recherche de « trous » où ils pourraient se recombinaison. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur les propriétés des semi-conducteurs. Quand ces substances sont exposées à des photons — des particules élémentaires transportant l'énergie solaire à une vitesse de 300 000 km/s, décrites par Albert Einstein dans les années 1920 comme des « grains de lumière » — elles émettent des électrons.

Quand un semi conducteur comme le silicium est frappé, les photons détachent des électrons des atomes, amorçant leur mouvement.

Pour générer un courant électrique, il est nécessaire que les électrons se déplacent dans une direction uniforme.

On emploie donc deux genres de silicium dopé de manière distincte.

La surface qui est en contact avec le soleil a été dopée avec du phosphore, dont les atomes possèdent une surabondance d'électrons comparativement au silicium, alors que l'autre surface a été dopée avec du bore, qui contient moins d'électrons.

Cette configuration génère un type de pile : l'extrémité riche en électrons agit en tant que terminal négatif (N), tandis que celle dépourvue d'électrons se comporte comme terminal positif (P). Ainsi, une zone électrique est générée entre ces deux régions.

Quand les photons stimulent les électrons, ces derniers se dirigent vers la zone N sous

l'effet du champ électrique, alors que les « trous » se déplacent vers la zone P. Ces électrons et trous sont par la suite recueillis par des connexions électriques disposées à la surface des deux zones, puis ils se déplacent dans un circuit externe sous forme d'énergie électrique, créant ainsi Une tension continue. De plus, une couche antireflet est mise en œuvre afin de réduire la perte de photons causée par la réflexion sur la surface de la cellule. Voir le schéma.

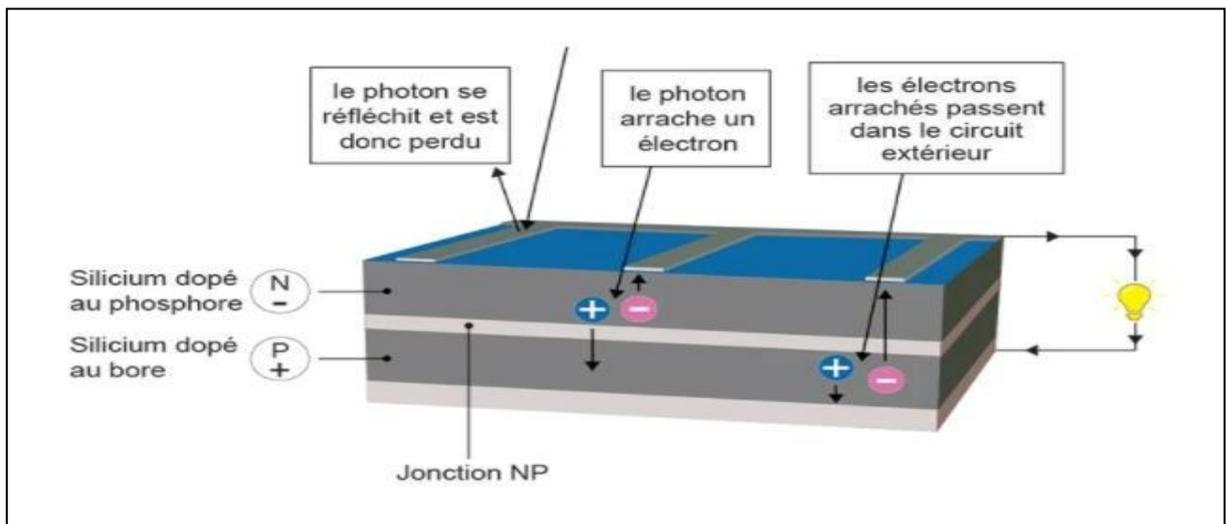


Figure II.5 :Principe de fonctionnement d’une cellule PV.

II . 5-Circuit équivalent et modèle mathématique:[11]

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée comme un générateur de courant (I_{ph}) monté en parallèle avec une diode et deux résistances parasites. Ces résistances influencent la caractéristique courant-tension $(I = f(V))$ de la cellule, comme suit :

****La résistance série (R_s) ** :**

C'est la résistance interne de la cellule en question, laquelle est principalement influencée par la résistance du semi-conducteur employé, la résistance de contact des grilles collectrices et la résistivité de ces dernières.

La résistance de Shunt (R_{sh}) :

Cette résistance découle d'un courant de fuite à la jonction, et est dépendante du processus de fabrication employé.

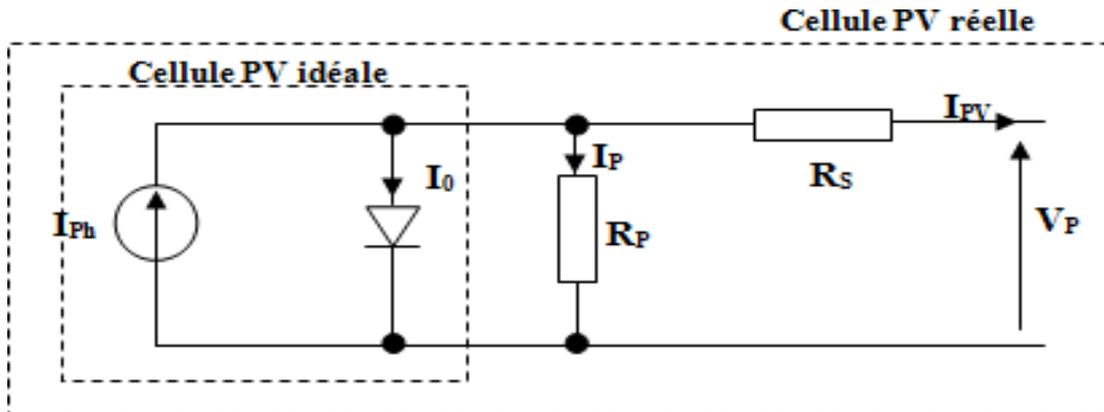


Figure II.6 : schéma équivalent d'une cellule solaire .

Selon la loi de Kirchhoff, le modèle mathématique d'une cellule PV idéale est donné par l'expression suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

Où :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0}$$

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1)$$

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

Avec :

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G \left(\frac{NOCT-20}{800} \right)$$

$$I_s = I_{or} \left(\frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{qEg}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)}$$

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv}$$

$$V_{th} = \frac{A \cdot k \cdot T_{mod}}{q}$$

Nous avons ainsi l'expression de I_{pv} qui sera égale à :

$$I_{pv} = [I_{cc} + K_i(T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$

II . 6- Composante de système PV:

Un système photovoltaïque (PV) est un dispositif intégral qui convertit l'énergie solaire en électricité et permet de l'exploiter pour alimenter divers dispositifs tels que des éclairages, des appareils de petite taille, etc.

Typiquement, un système photovoltaïque comporte cinq composants clés, à savoir :

1. **Générateur** : Il est constitué des panneaux photovoltaïques qui captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité.

2. **Onduleur** :

Il convertit le courant continu (DC) généré par les panneaux solaires en

La majorité des équipements peuvent utiliser le courant alternatif (AC).

3. **Régulateur** :

Il gère la charge et la décharge des batteries afin d'éviter les surtensions ou les décharges excessives, allongeant ainsi leur longévité.

4. **Batterie** : Elle permet de stocker l'électricité produite pour une utilisation ultérieure, lorsque la production solaire est faible ou inexistante (par exemple la nuit).

5. **Stockage** : Cela fait référence à l'ensemble des dispositifs permettant de stocker l'énergie, généralement sous forme de batteries, afin de garantir une alimentation continue.



Figure II . 7 : Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome.[11]

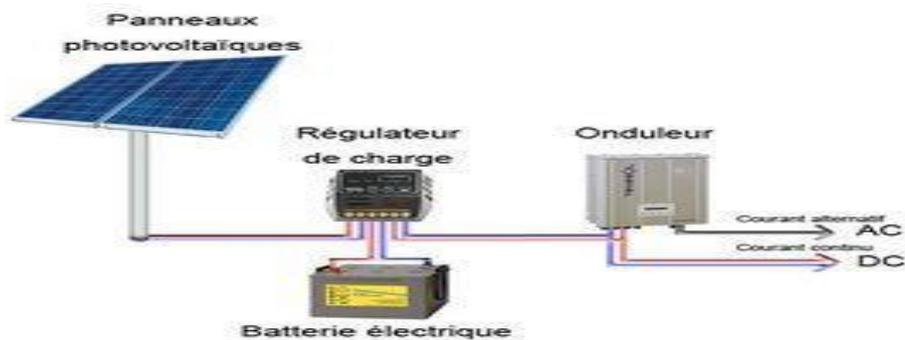
II . 7- Générateur photovoltaïque et ses performances:

L'ensemble des dispositifs requis pour l'exploitation de l'énergie solaire afin de satisfaire les demandes en électricité est compris dans le générateur photovoltaïque.

En fonction de la puissance désirée, on peut combiner plusieurs modules en panneaux, créant ainsi un « champ photovoltaïque ».

Quand un panneau solaire est relié directement à un récepteur sans intermédiaire, il opère en mode « fil du soleil », indiquant que l'énergie électrique délivrée fluctue de zéro la nuit à un pic durant le jour. [11]

Figure II-8:un générateur photovoltaïque.



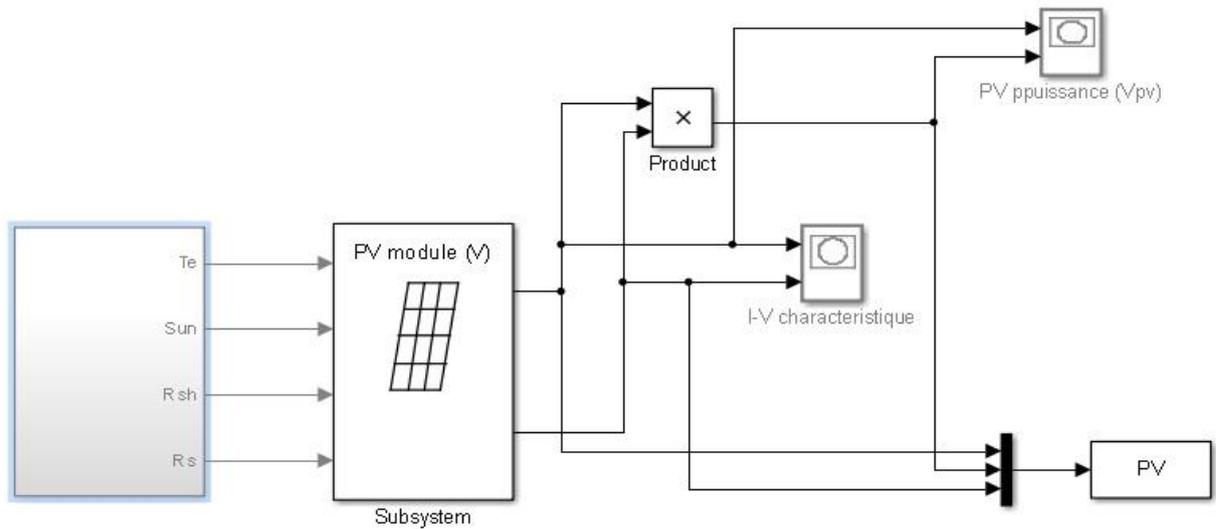


Figure II-9: Schéma de simulation d'un module photovoltaïque.[2]

II . 7.1- Caractéristique courant-tension:[12]

La caractéristique courant-tension illustrée dans la figure(II.10) décrit le comportement du générateur photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T=25^\circ\text{C}$).

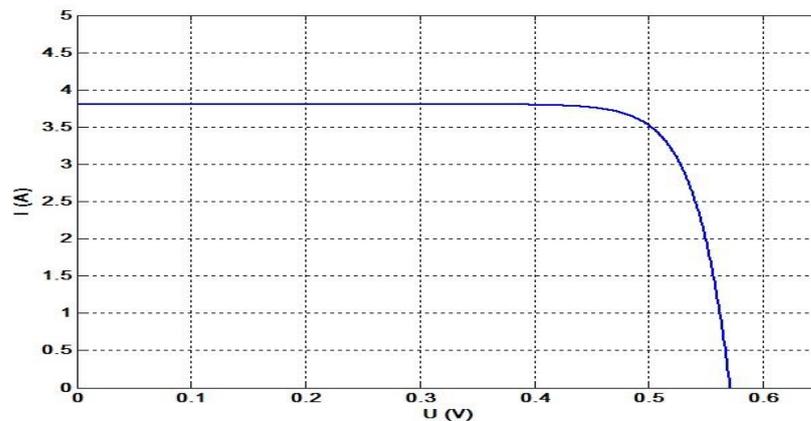


Figure II-10 : Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.

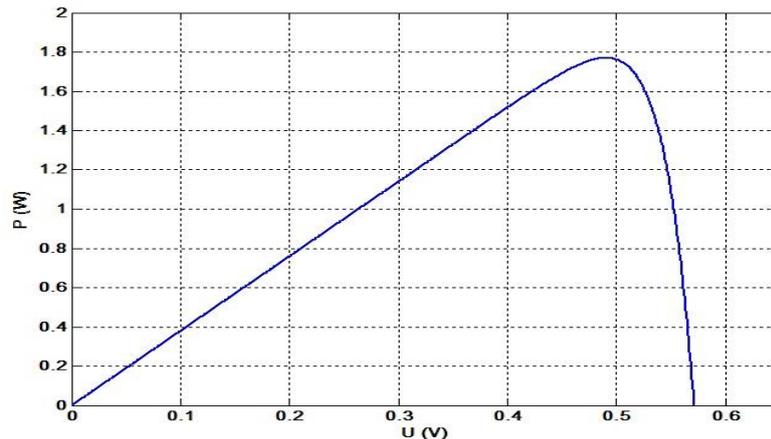


Figure II-11 : Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque.

II . 7.2- Influence de l'ensoleillement: [12]

Une diminution de l'ensoleillement entraîne une réduction de la génération de paires électron-trou, ce qui affecte le courant produit en l'absence de lumière. Le courant du panneau solaire correspond à la différence entre le photocourant et le courant de diode à l'obscurité. Ainsi, le courant solaire I_{cc} diminue proportionnellement à la variation de l'ensoleillement, accompagnée d'une légère baisse de la tension V_{coM} . Cela provoque un déplacement du point de puissance maximale P_{max} du panneau solaire vers des niveaux de puissance plus faibles.

Les graphiques suivants illustrent les caractéristiques puissance-tension $P(V)$ et courant-tension $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque, pour une température constante de $25^{\circ}C$ et un ensoleillement variable.

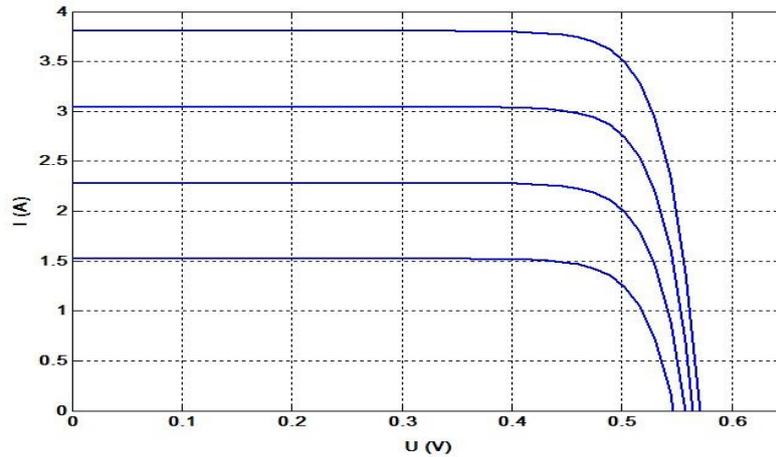


Figure II-12: Courbe I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

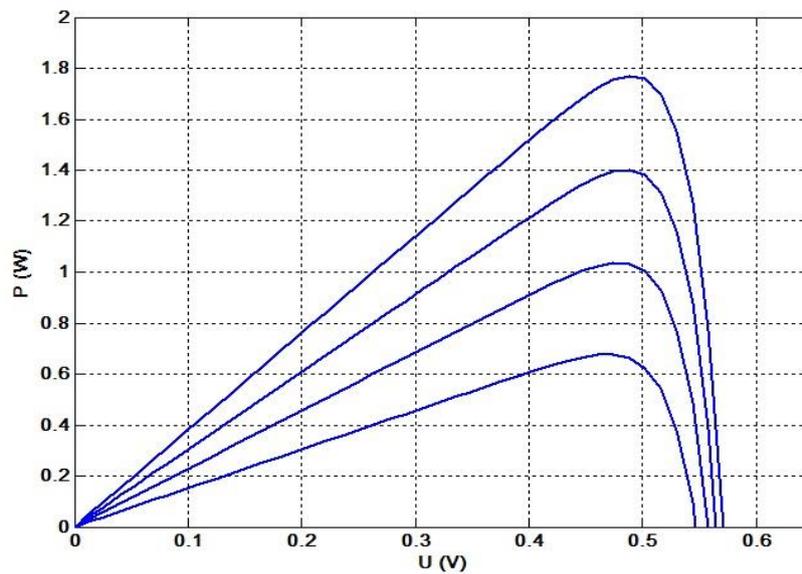


Figure II-13: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

II . 7.3- Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V):

La figure (II.14) et (II.15) présentent respectivement des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante. Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température

augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue.[12]

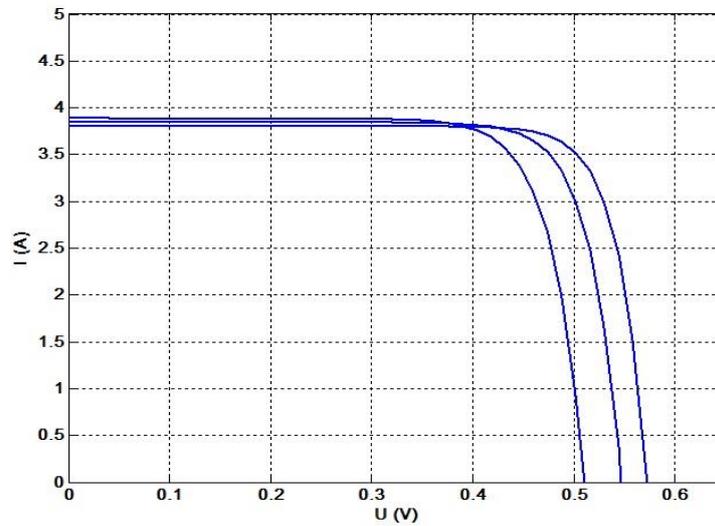


Figure II-14: Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}$

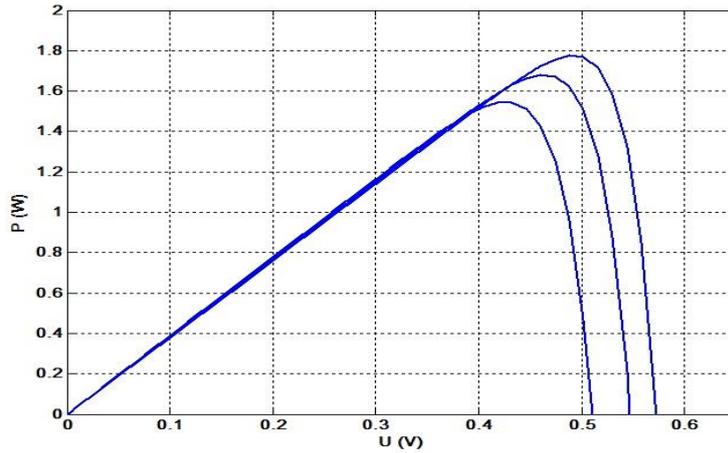


Figure II-15: Courbes $P(V)$ d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

II. 8- Conclusion:

Ce chapitre est dédié à l'exposition des divers éléments d'un système photovoltaïque. Nous avons examiné le concept de l'effet photovoltaïque, en plus du mécanisme de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques. Par la suite, un rappel a été effectué concernant les systèmes photovoltaïques et leur rendement.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs).

CHAPITRE III
CONVERTISSEUR DC-
DC

III .1-Introduction :

Les convertisseurs sont des équipements qui ont pour fonction d'ajuster la tension continue produite par les panneaux solaires ou les batteries, en vue de l'adapter aux récepteurs utilisant soit une autre tension continue, soit une tension alternative.

L'examen des convertisseurs est d'une grande importance, étant donné leur utilisation généralisée dans la majorité des nouvelles sources d'énergie distribuées reliées au réseau, comme les éoliennes, les systèmes solaires ou les piles à hydrogène.

Dans le contexte de notre mission, nous focaliserons nos efforts sur les convertisseurs employés dans les systèmes photovoltaïques.

III .2- Avantages et inconvénients des convertisseurs :

III .2.1- Avantages :

- Bon rendement.
- Taille et masse réduites.
- Fonctionnement silencieux.

III .2.2- Inconvénients :

Harmonique est le seul désavantage important des systèmes électroniques considérables, tant du côté de la charge connectée que du côté de la source d'alimentation.

- Faible facteur de puissance.
- Capacité de surcharge faible.
- Les forts dv/dt et di/dt générés par les commutations peuvent perturber les capteurs, et il peut être intéressant de remplacer un ensemble de capteurs exposés au bruit, par un même nombre de capteurs moins perturbés.

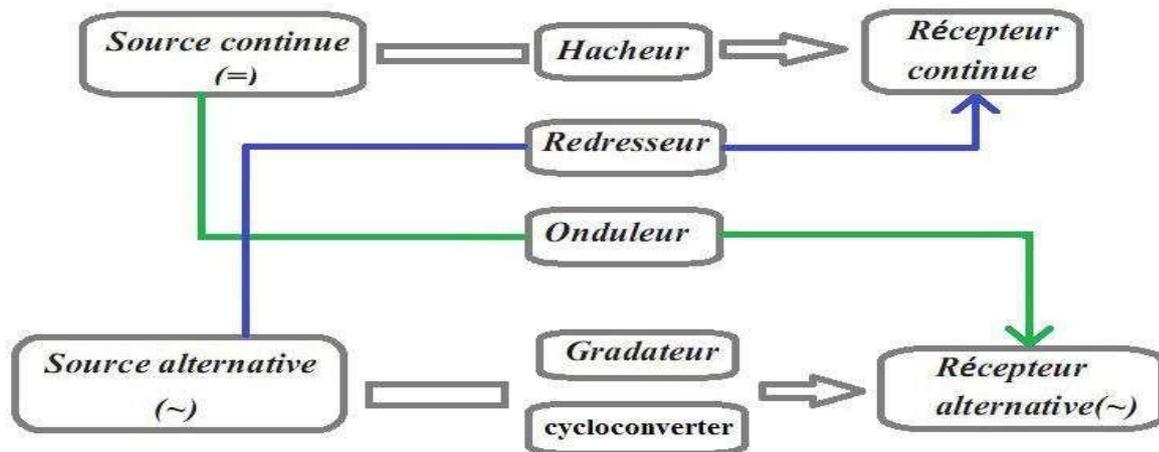
III .3- Les principales applications :

- Cas d'urgence (hôpitaux, salle informatique).
- Photo volumique.

- Gestion, transport et distribution d'EE.
- Application domestique et industrielles.

III .4- Différents types des convertisseurs statistiques :

Suivant le type de la machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, en distingue plusieurs sources familières de convertisseurs statiques (schéma



ci-dessus).

Figure III -1:les différents types de convertisseurs statiques. [1]

III .5- Convertisseur continu-continu (Hacheur) :

III .5. 1-INTRODUCTION.

Les hacheurs sont des dispositifs de conversion statique de type continu-continu, qui permettent d'extraire une tension continue variable à partir d'une source de tension continue stable. Ils se servent de commutateurs conçus à partir de semi-conducteurs comme les diodes, les transistors, les thyristors, GTO, TRIAC, et plus encore. Ces éléments opèrent uniquement en mode de commutation.

On utilise aussi des composants à faible perte d'énergie, tels que les conducteurs, les inductances et les transformateurs.

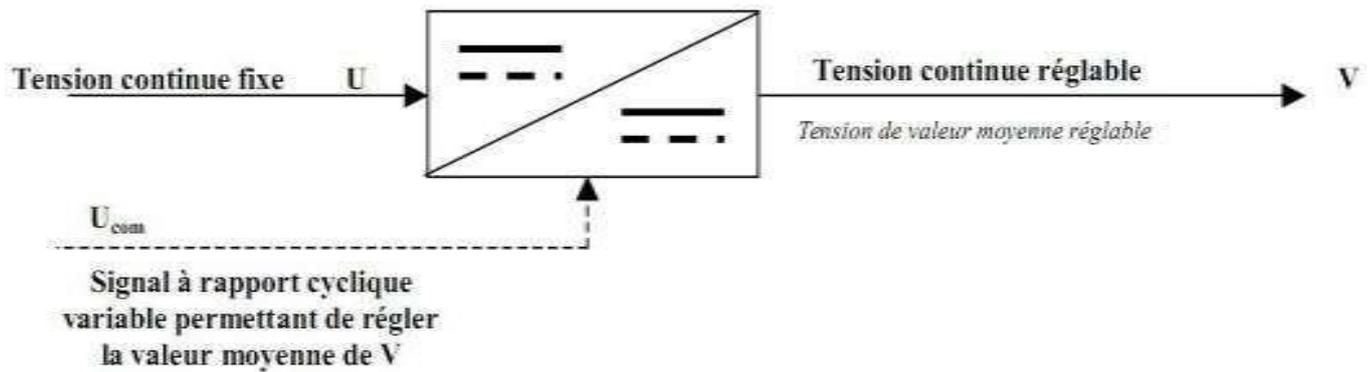


Figure III -2:Schéma de principe de la conversion Continu-continu (DC-DC).[2]

III .5. 2-Type des convertisseurs DC-DC :

On distingue diverses configurations de convertisseurs DC-

DC, regroupées en deux principales catégories en fonction de leur isolation.

Les topologies isolées font appel à un transformateur d'isolement qui opère à haute fréquence. On les utilise fréquemment, surtout dans les alimentations à découpage.

Les topologies Flyback, demi-pont et pont complet font partie des plus courantes.

Dans le domaine du photovoltaïque, les systèmes reliés au réseau préfèrent souvent ces configurations indépendantes, en raison de considérations de sécurité électrique.

En revanche, les topologies non isolées ne possèdent pas de transformateur d'isolement.

On les utilise couramment dans les formations sur les moteurs à courant continu.

On peut également diviser ces topologies en deux catégories. .[13]

- Abaisseurs(Buck).
- Élévateurs (Boost).

III .6- Hacheur abaisseur (Buck):[14]

III .6.1 –Principe:

Un tel convertisseur doit permettre le transfert d'énergie entre une source de tension continue et un récepteur fonctionnant en courant continu.

Il doit également offrir la possibilité de régler la tension aux bornes du récepteur.

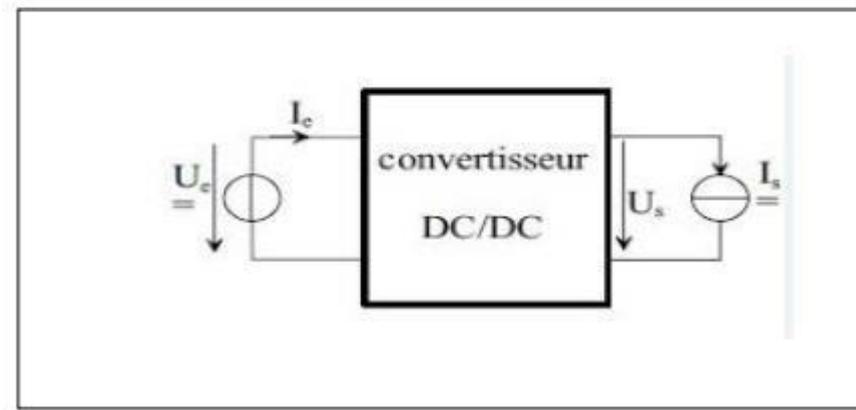


Figure III -3 : Convertisseur Buck .

III .6.2- Structure:

Cellule de commutation, la structure du hacheur abaisseur est constituée d'une seule cellule de commutation, comme représenté sur la figure suivante :

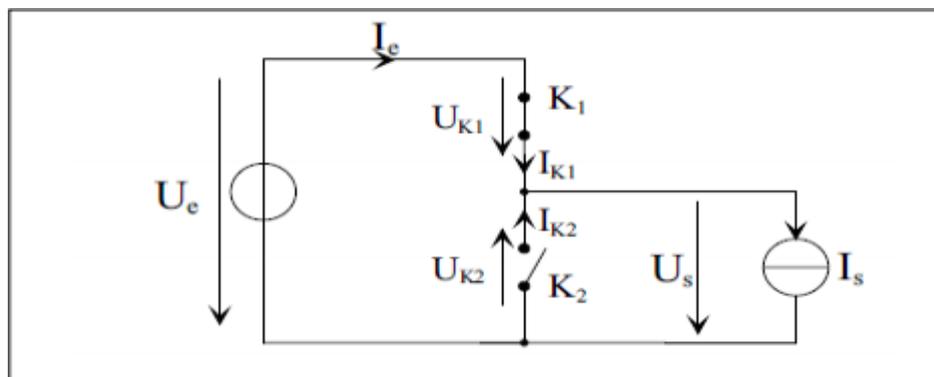


Figure III –4 : Structure du hacheur abaisseur.

La mise en conduction et le blocage des deux interrupteurs donnent deux états de fonctionnement:

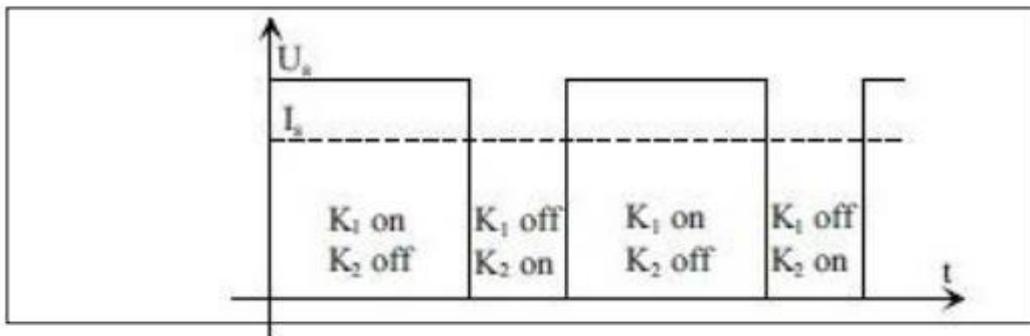
- K1 passant et K2 bloqué. Les conditions de fonctionnement sont les Suivantes :

$$\begin{cases} U_r = U_s \text{ avec } U_{k2} = -U_r \\ I_s = I_r \text{ avec } I_{k1} = I_r \end{cases} \quad (2.1)$$

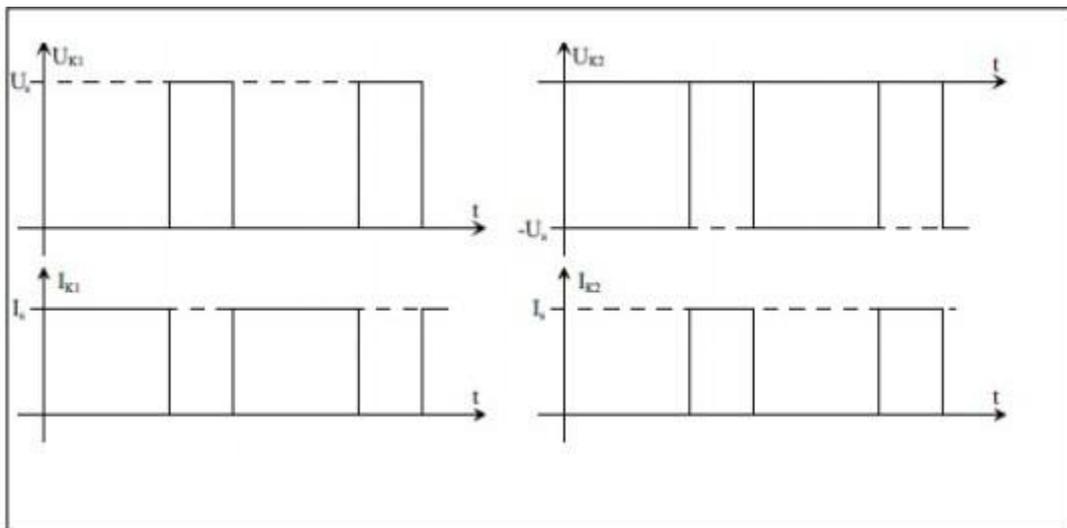
K1 bloquée et K2 passant. Les conditions de fonctionnement sont les suivantes :

$$\begin{cases} U_r = 0 \text{ avec } U_{k2} = U_s \\ I_s = 0 \text{ avec } I_{k2} = I_r \end{cases} \quad (2.2)$$

La figure (III-5) illustre graphiquement ses états de fonctionnement :



(a)- Grandeurs de sortie.



(b)- Interrupteur K1

(c)- Interrupteur K2

Figure III-5 : grandeur électrique caractéristique.

III .6. 3- Caractéristique statique des interrupteurs: [14]

On considère des sources de tension et de courant unidirectionnelles en courant et en tension, on peut donc écrire :

$$\begin{cases} U_{k1} - U_{k2} = U_s \\ I_{K1} + I_{k2} = I_r \end{cases} \tag{2.3}$$

Suivant les états respectifs des deux interrupteurs, on peut donc écrire:

- K1 passant et K2 bloqué:

$$\begin{cases} U_{k2} = -U_e \\ I_{k1} = I_s \end{cases} \tag{2.4}$$

- K1 bloqué et K2 passant:

$$\begin{cases} U_{k1} = U_e \\ I_{k2} = I_s \end{cases} \tag{2.5}$$

On démontre ainsi que deux segments suffisent pour les caractéristiques statiques des interrupteurs K1 et K2, ainsi que nous le représentons sur la figure (III-5) :

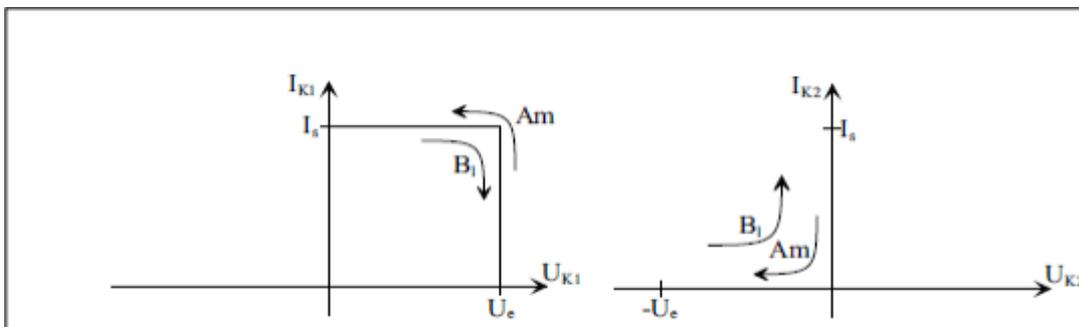


Figure III-6: caractéristique statique (interrupteur K1, K2).

Nous donnons également (Figure III-6) les mécanismes de commutation des interrupteurs :

➤ **Amorçage de K1** : Il se fait suivant la trajectoire indiquée par la flèche A_m dans le plan (U_{k1}, I_{k1}) . Lorsque K1 est bloqué, celui-ci Supporte U_e , alors que K2 est à l'état passant conduit le courant I_s . L'amorçage de K1 ne sera effectif que lorsque l'interrupteur K2 supportera une tension $-U_e$. Il est impossible, dans le plan (U_{k2}, I_{k2}) , d'obtenir une trajectoire qui traverse le quadrant $U_{k2}, I_{k2} < 0$. Le blocage de K2 ne peut donc se faire qu'en suivant longéant les axes de la caractéristique statique de K2. Ceci correspond a une commutation spontanée : annulation du courant, puis application d une tension inverse (négative) Le processus de commutation est donc le suivant :

- Commutation de courant de K2 vers K1. Pendant cette phase, la tension aux bornes de K2 reste nulle aux bornes de K2 et vaut U_e .
- La tension aux bornes de K1 devient brusquement nulle et aux bornes de K2 s'établit une tension inverse.

Au contraire de K2, la commutation de K1 traverse donc le quadrant $U_{k1}, I_{k1} > 0$. Il s'agit donc d'une commutation commandée. On peut donc dire que l'amorçage commandé de K1 entraîne le blocage spontané de K2.

➤ **Blocage de K1**: Il se fait suivant la trajectoire indiquée par le flèche A_m dans le plan (U_{k1}, I_{k1}) . Il indique dans le plan par le flèche B_1 . Lorsque K1 est amorcé, il conduit le courant I_s , alors que K2 à l'état bloqué supporte la tension $-U_e$, le blocage de K1 ne sera complet que lorsque l'interrupteur K2 reprend la totalité du courant I_s . On ne peut pas obtenir une trajectoire, dans le plan (U_{k2}, I_{k2}) , qui traverse le quadrant $U_{k2}, I_{k2} < 0$. L'amorçage de K2 ne peut donc se faire qu'en suivant les axes. Il s'agit donc d'une commutation spontanée annulation de la tension inverse aux bornes de K2 et établissement

du courant .Le processus de commutation est donc le suivant :

- La tension aux bornes de K2 s'annule, alors qu'une tension positive s'établit aux bornes de K1.
- Commutation de courant de K1 vers K2.Pendant cette phase, la tension aux bornes de K2 reste nulle et vaut aux U_e bornes de K2.

On peut donc dire que le blocage commandé de K1entraîne l'amorçage spontané de K2.

III .6. 4 –Inventaires des solutions relatives à la nature des interrupteurs :

Suite à l'examen de la structure et du fonctionnement d'un hacheur abaisseur, nous nous attelons désormais à la synthèse des interrupteurs K1 et K2.

- L'interrupteur K2 doit être capable de tolérer une tension inverse et de conduire un courant positif. Toutes les transitions de cet interrupteur peuvent être aléatoires.

Il s'agira donc d'un interrupteur de type diode.

- L'interrupteur K1 doit être capable de tolérer une tension positive et de conduire un courant positif. De plus, il doit être sous commande d'amorçage et de blocage.

Il faudra donc utiliser un interrupteur de type transistor

(bipolaire, MOS, IGBT ou GTO) .[14]

III .6.5 – Résultats Simulation du hacheur buck :

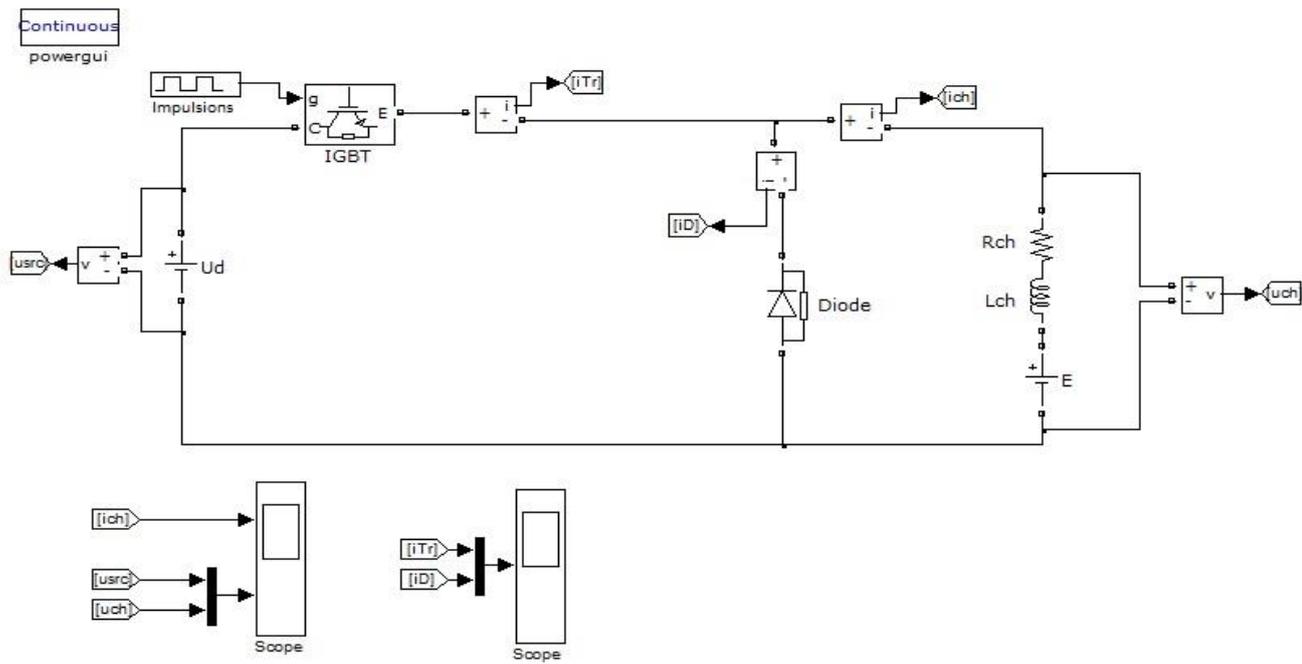


Figure III-7 : Schéma de simulation de l'hacheur abaisseur (Buck) .

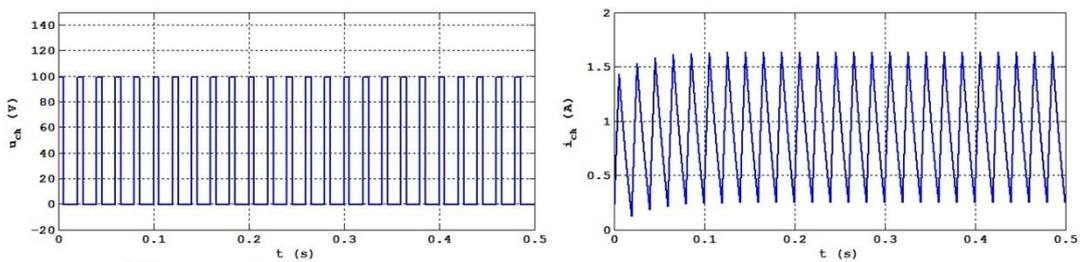


Figure III-8 : Tension et courant de charge : $f=50$ Hz et $T_{on}= 30\%$ de T .

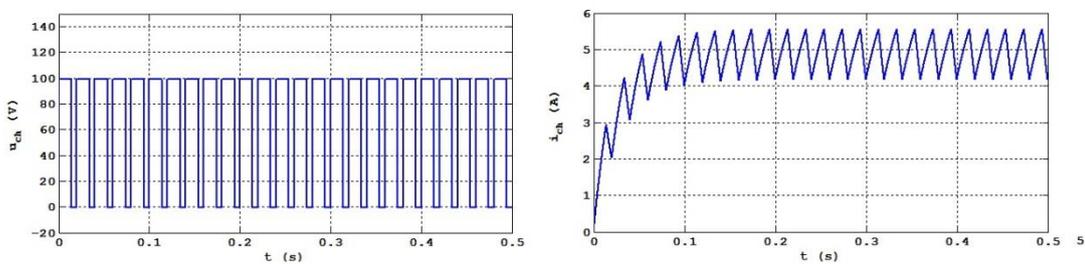


Figure III-9 : Tension et courant de charge : $f=50$ Hz et $T_{on}= 70\%$ de T .

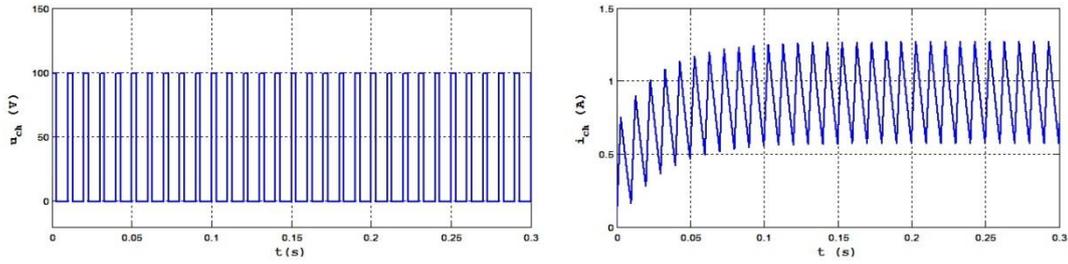


Figure III-10 : Tension et courant de charge : $f=100$ Hz et $T_{on}= 30\%$ de T .

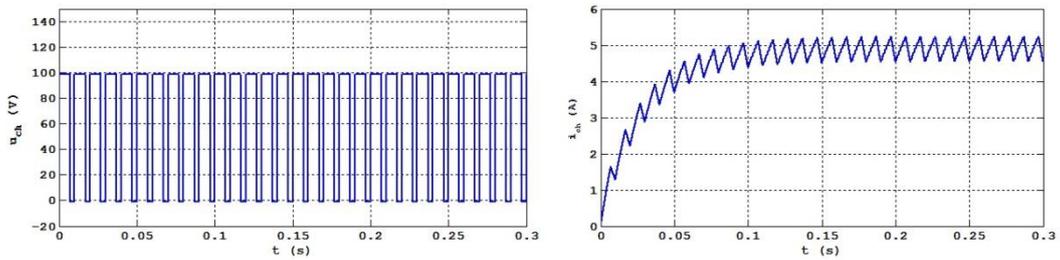


Figure III-11 : Tension et courant de charge : $f=100$ Hz et $T_{on}= 70\%$ de T .

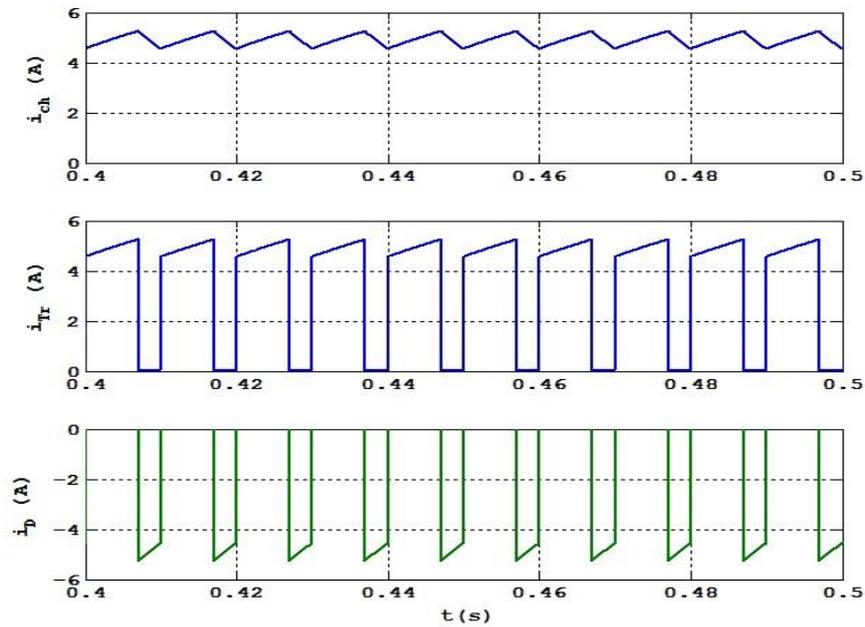


Figure III-12 : le courant de charge, transistor, diode.

III .7- Hacheur dévolteur (Boost): [2]

Le hacheur parallèle ou convertisseur boost est une alimentation à découpage qui transforme une tension continue en une autre de valeur supérieure, également appelé (Élévateur de tension), et peut être illustré par le circuit dans la **Figure. III-7.**

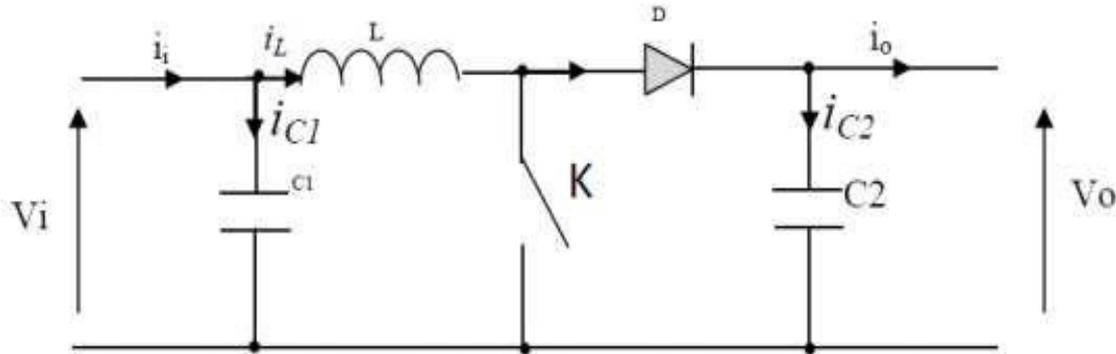


Figure III-13:Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.

La **Figure (III-14)** explique le fonctionnement du convertisseur Boost durant une période de commutation T_s . Pendant le temps de fermeture ($t \in [0, D.T_s]$).

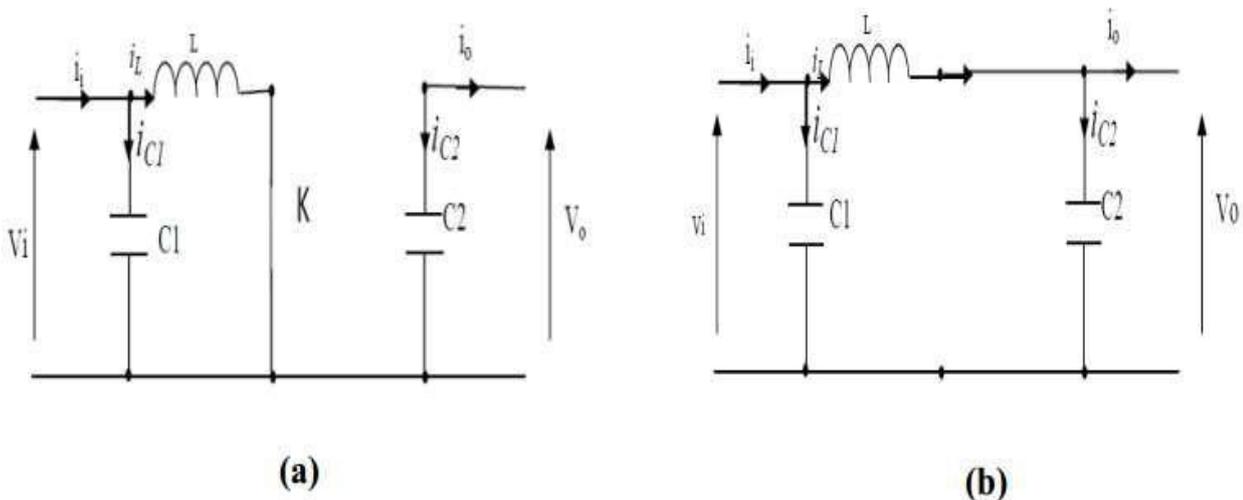


Figure III-14: Schémas équivalents du hacheur survolteur (a):K fermé,(b):K ouvert .

Le rapport de conversion d'un hacheur Boost est donné sous la forme suivante:

$$(D) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (2.6)$$

Donc le convertisseur Boost est un élévateur de tension.

Pour la première période $d Ts$:

$$\begin{aligned} i_{c1}(t) &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Pour la deuxième période $(1-d)Ts$:

$$\begin{aligned} i_{c1}(t) &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

III .7. 1-Résultats Simulation du hacheur boost :

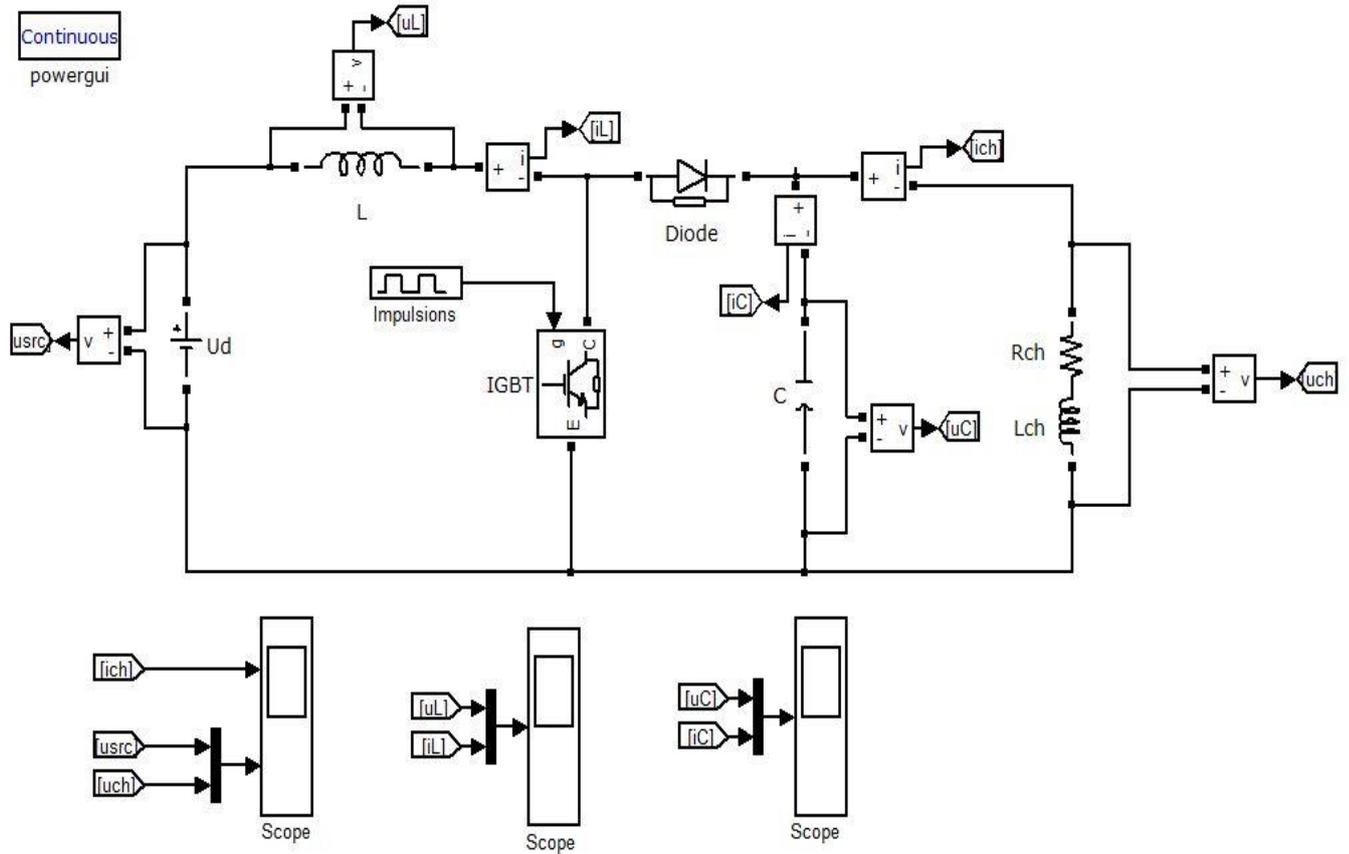


Figure III-15: schémas de simulation de l'hacheur élévateur (BOOST) .

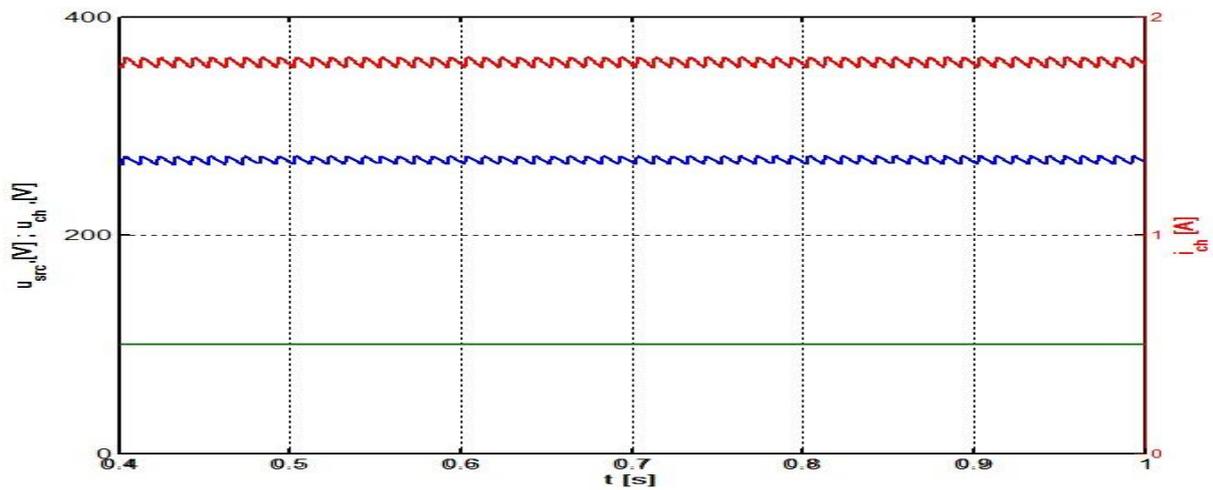


Figure III-16: Courant de charge ; Tension source et charge.

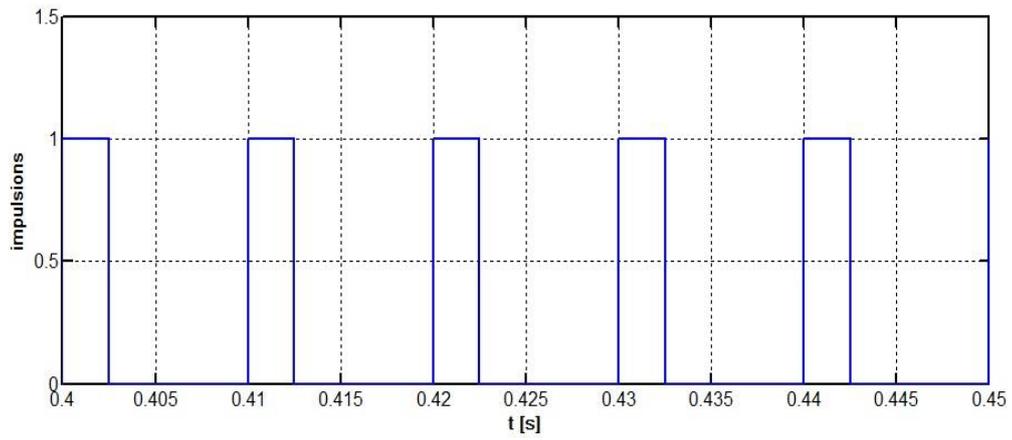


Figure III–17: Impulsions de commande du transistor

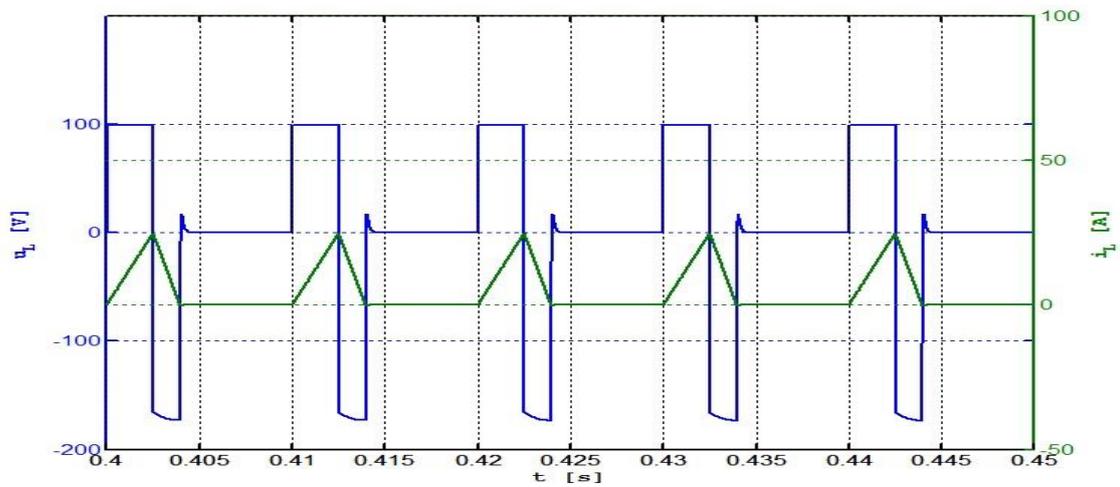


Figure III–18: Tension et courant de la bobine

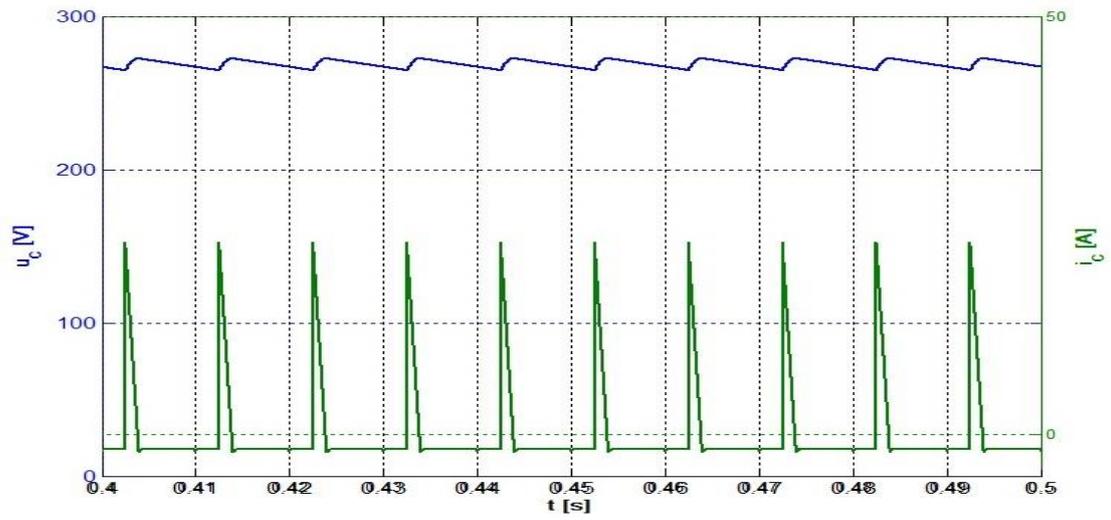


Figure III–19: Tension et courant du condensateur

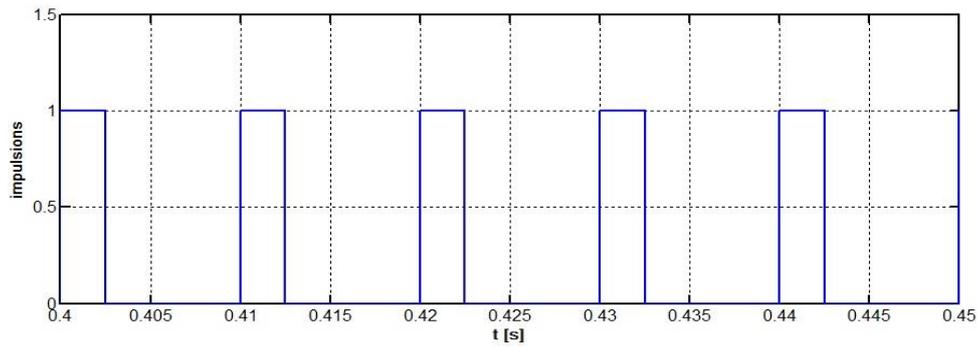


Figure III–20: Impulsions de commande du transistor

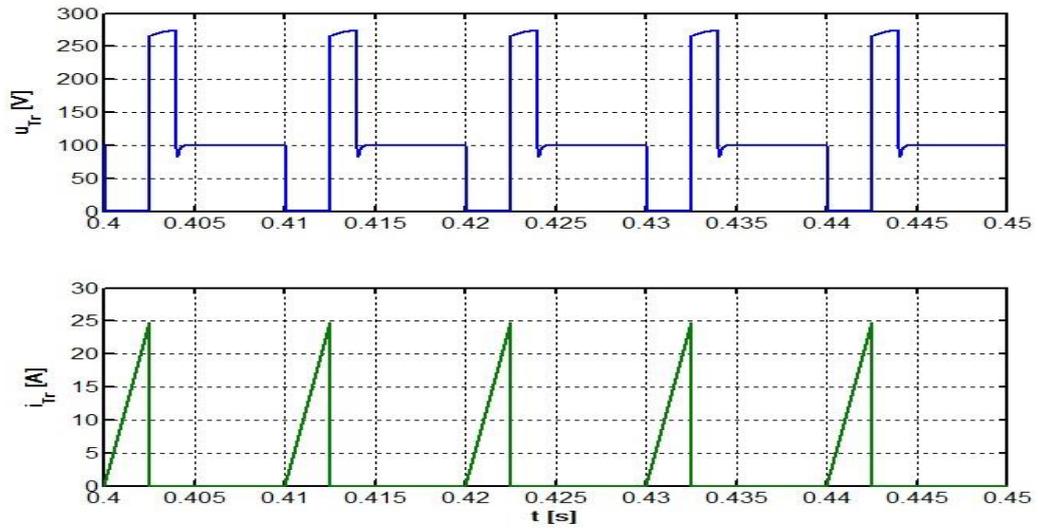


Figure III–21: Tension et courant du transistor

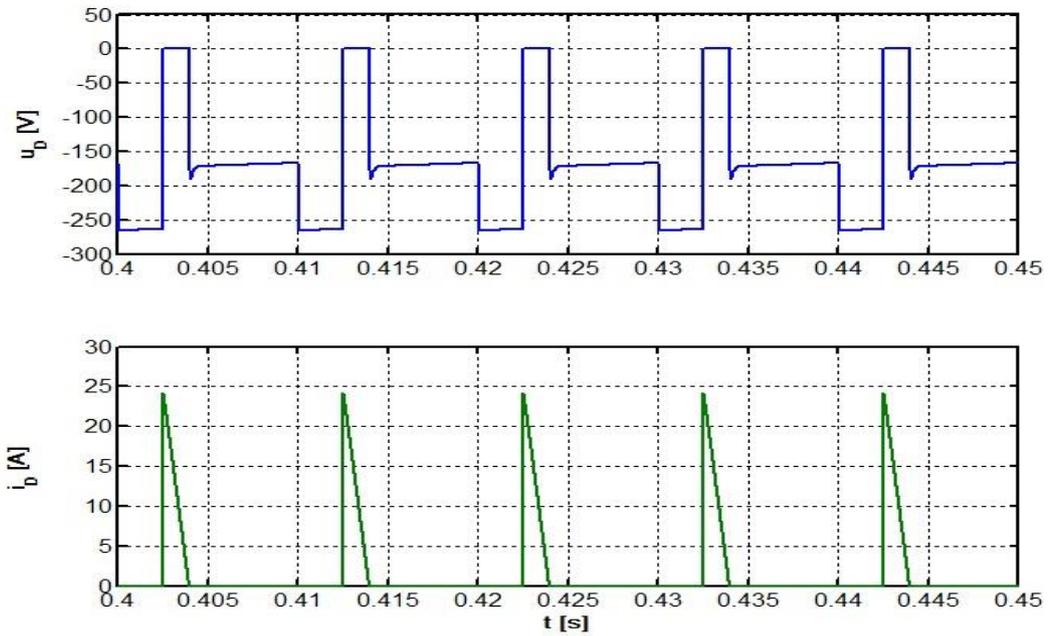


Figure III–22 : Tension et courant de la diode.

III .8- Conclusion.

Ce chapitre a mis en lumière les rôles essentiels des hacheurs Buck et Boost en électronique de puissance. Le hacheur Buck (dévolteur) abaisse une tension continue, idéal pour alimenter des composants à tension réduite. Le hacheur Boost (survolteur), à l'inverse, élève une tension continue, parfait pour des applications nécessitant une tension plus élevée.

Bien que leurs fonctions soient opposées, ils partagent des principes de commutation basés sur la MLI et l'utilisation d'inductances et de condensateurs pour la conversion et le filtrage. Leur conception requiert une bonne compréhension des rapports cycliques, des modes de conduction et du choix des composants.

En somme, les hacheurs Buck et Boost sont des piliers des systèmes d'alimentation modernes, offrant des solutions efficaces pour réguler et convertir l'énergie DC. Leur maîtrise est fondamentale pour tout professionnel de l'électronique de puissance

CHAPITRE IV

LA COMMANDE MPPT

IV. 1– Introduction:

Le coût élevé des générateurs photovoltaïques peut justifier l'ajout d'un système complémentaire, même sophistiqué, pour optimiser la gestion de l'énergie produite. En effet, la courbe caractéristique courant-tension du générateur, qui varie en fonction de l'ensoleillement, de la température et du vieillissement, présente un point de fonctionnement où la puissance délivrée est maximale.

L'optimisation consiste à maintenir en permanence le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale en ajustant automatiquement la charge qu'il voit. Cette adaptation, désormais bien établie, se réalise généralement à l'aide d'un convertisseur statique. Idéalement, ce convertisseur présente des pertes minimales et peut également remplir une fonction de conversion, par exemple, en transformant du courant continu en courant alternatif ou en ajustant la tension continue.

Ce chapitre se consacrera à l'examen des diverses techniques pour suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Nous commencerons par aborder le problème de la connexion directe entre le GPV et la charge, puis nous présenterons les différentes méthodes (directes et indirectes) pour maximiser la puissance. Enfin, nous conclurons avec une simulation d'un système photovoltaïque optimisé par un contrôle « perturbation et observation ».

IV. 2– Connexion direct entre la source et la charge:

Dans une configuration de connexion directe, qui reste l'approche la plus répandue pour l'utilisation de l'énergie solaire à travers le monde, le point d'exploitation du générateur photovoltaïque (GPV) est défini par l'impédance de la charge connectée.

On opte généralement pour cette solution en raison de sa facilité d'utilisation, de sa fiabilité et de son coût abordable [IV-1](#).

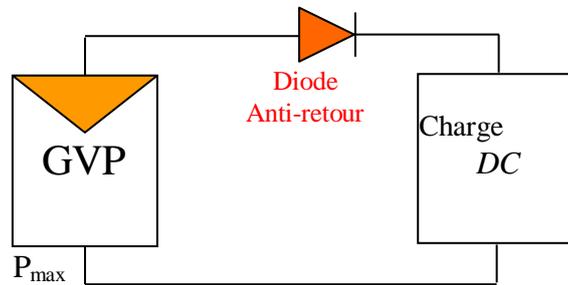


Figure IV-1: Connexion directe entre un GPV et une charge.

Le désavantage de cette configuration est que la quantité d'énergie produite par un générateur photovoltaïque (GPV) directement relié à une application est généralement bien moins importante que la puissance maximale qu'il serait capable de délivrer, comme le montre la figure. IV-2.

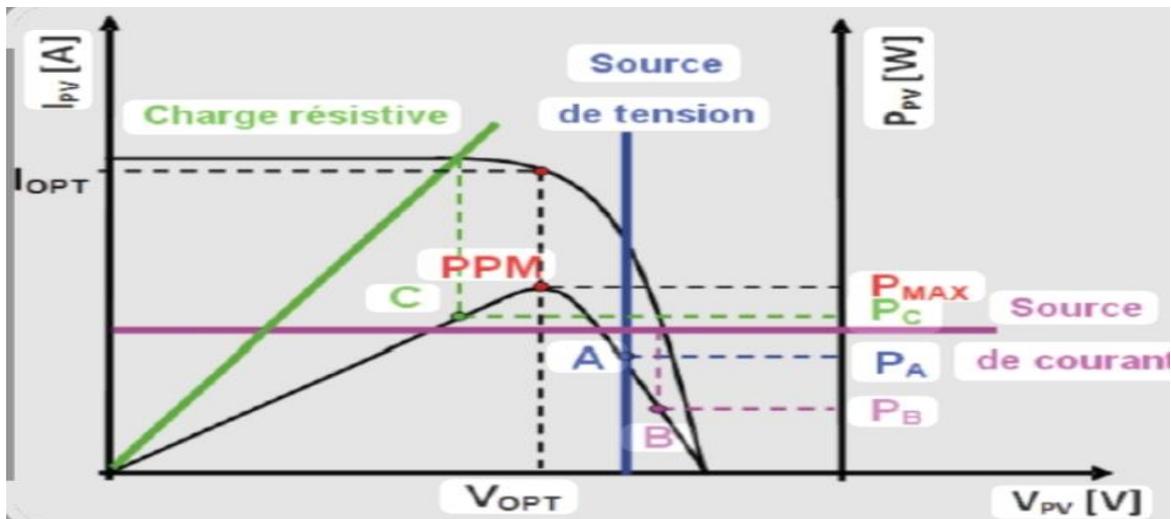


Figure IV-2 : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

Comme indiqué dans la figure IV-

2, un générateur photovoltaïque (GPV) peut être relié directement à trois sortes de charges :

- une charge considérée comme une source de tension continue .
- une charge assimilable à une source de courant continu .
- une charge strictement résistive.

Comme démontré précédemment, on peut identifier trois points de fonctionnement distincts A, B et C, fournissant respectivement une puissance P_A , P_B et P_C .

Ces scénarios indiquent que le GPV est sous utilisé et ne délivre pas sa puissance optimale.[15]

IV. 3– Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque:

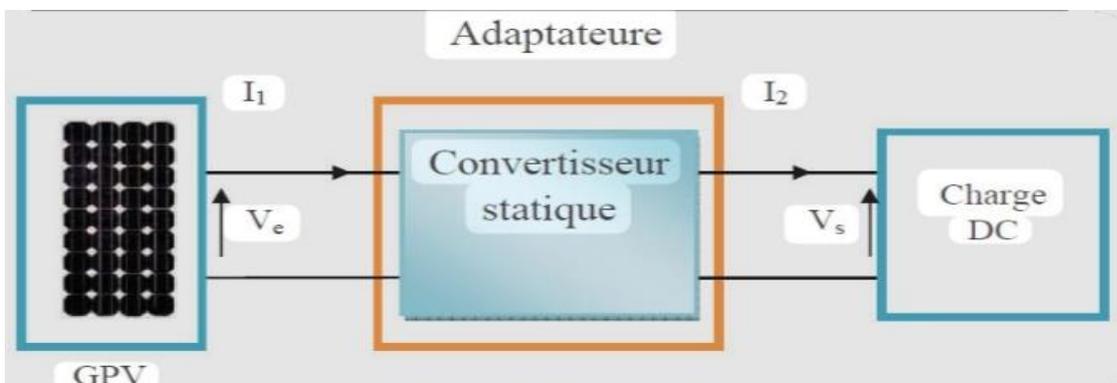
L'élaboration d'un système photovoltaïque optimisé est intrinsèquement complexe.

Effectivement, la puissance générée par le système photovoltaïque change grandement en fonction de l'ensoleillement, de la température et du vieillissement général du dispositif.

Concernant les charges, qu'elles soient de type continu (DC) ou alternatif (AC), comme c'est le cas pour le réseau électrique, chaque forme présente un comportement distinctif, souvent imprévisible.

Pour garantir un fonctionnement du générateur au plus près de son rendement optimal, la méthode couramment employée est l'intégration d'un convertisseur statique — comme démontré à la figure IV-2 —

qui fait office d'intermédiaire entre la source et la charge. [16-17]



FigureIV-3: Etage d'adaptation d'un GPV-charge.

Prenons le cas d'un convertisseur DC-DC (élevateur), l'expression de la tension et du courant de sortie du convertisseur en fonction du cycle de travail de sortie peut être écrite à l'aide des relations suivantes :

$$V_s = \frac{V_e}{1-D} \quad (4.1)$$

$$I_s = (1 - D)I_e \quad (4.2)$$

$$R_{pv} = R_s(1 - D)^2 \quad (4.3)$$

Aussi, le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances Rpv et Rs.

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \quad (4.4)$$

Puisque le rapport a est inférieur à 1 ($D < 1$), le convertisseur ne joue le rôle d'un élevateur que si la charge RS remplit la condition suivante:

$$R_s > R_{pv} \quad (4.5)$$

Dans les conditions optimales et pour une charge Rs donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv}=R_{opt}$) et le rapport cyclique ($D=D_{opt}$) obéit donc à l'équation:

$$R_{OPT} = R_s \cdot (1 - D_{opt})^2 \quad (4.6)$$

IV.4- Principe de fonctionnement de MPPT:

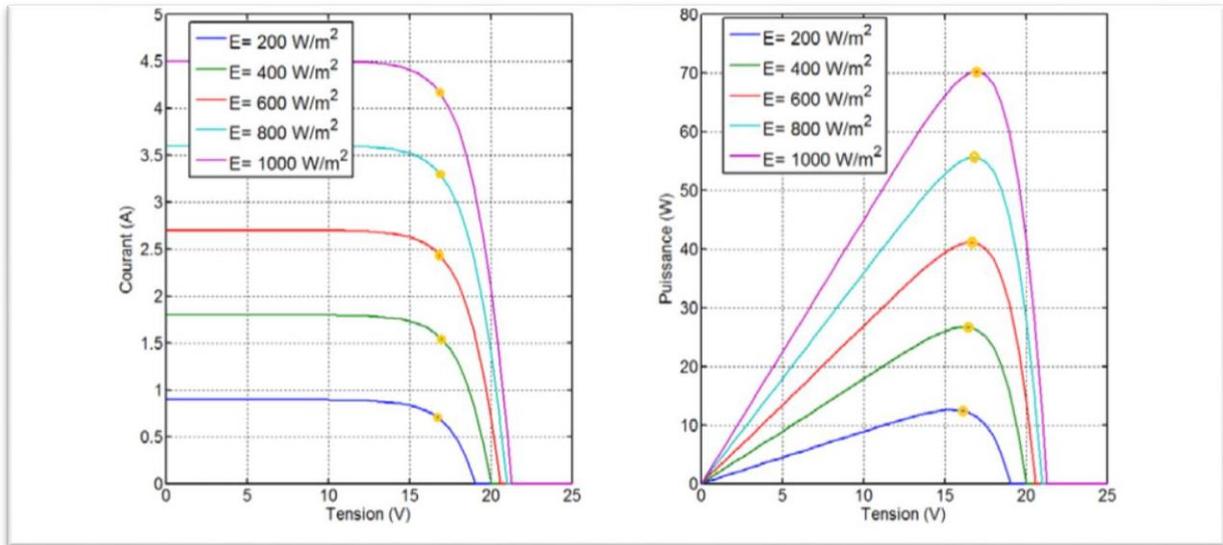
Un MPPT, ou « Suivi du Point de Puissance Maximale » en français, est une technique qui, comme son nom l'indique, permet de traquer le point où un générateur électrique non linéaire délivre sa puissance maximale.

Par conséquent, pour une luminosité équivalente, la puissance délivrée dépendra de la charge.

Un régulateur MPPT contrôle donc le convertisseur statique qui assure la connexion

entre la charge (telle qu'une batterie) et le panneau solaire, assurant ainsi un approvisionnement continu en puissance maximale à la charge à tout instant.

La trajectoire du point de puissance maximale générée par le générateur est illustrée dans la figure IV-3.



FigureIV-4 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.

Le schéma explicatif d'un module photovoltaïque avec un niveau de conversion DC-DC entre le générateur photovoltaïque et la charge de sortie est illustré en Figure IV-4. Cette configuration correspond à un système généralement désigné comme un système autonome.

Il permet généralement de recharger une batterie qui stocke l'énergie pour un appareil qui ne tolère pas les variations de tension.

Cet adaptateur est équipé d'un système de suivi du point de puissance maximale (MPPT), lui permettant de déterminer le PPM que peut délivrer un panneau solaire photovoltaïque. La complexité de l'algorithme MPPT peut varier selon le type d'implémentation sélectionné et les performances visées.

En fin de compte, tous les algorithmes performants doivent manipuler la variation du rapport cyclique D du convertisseur de puissance lié.[18]

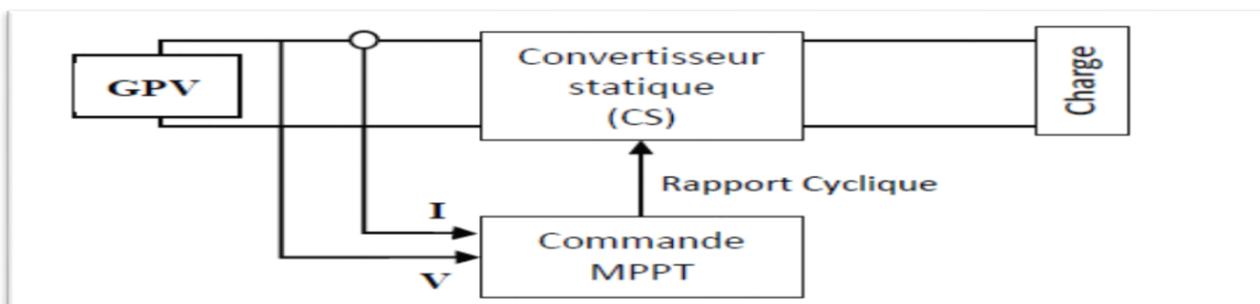


Figure IV-5 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Afin de garantir le fonctionnement d'un système photovoltaïque à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont mis en place. Ces dispositifs ont pour but de réduire l'écart entre la puissance opérationnelle et la puissance maximale de référence, qui varie selon les conditions climatiques, en se basant sur des méthodes optimales. [17]

La figure IV-6 représente trois exemples de perturbations. Selon la nature de la perturbation, le point de fonctionnement se déplace du point de puissance maximale PPM1 vers un nouveau point PI, qui peut être plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ce scénario, pour une modification de l'ensoleillement, il suffit d'ajuster la valeur du rapport cyclique afin de se rapprocher du nouveau point de puissance maximale PPM2. Pour le cas b, lors d'une variation de charge, on peut aussi observer un changement du point de fonctionnement qui pourrait trouver une nouvelle position optimale grâce à l'intervention d'un contrôle.

Dans le dernier scénario, une variation du point de fonctionnement peut survenir à cause des fluctuations de la température opérationnelle du GPV. Il est également nécessaire d'intervenir au niveau de la commande.[19]

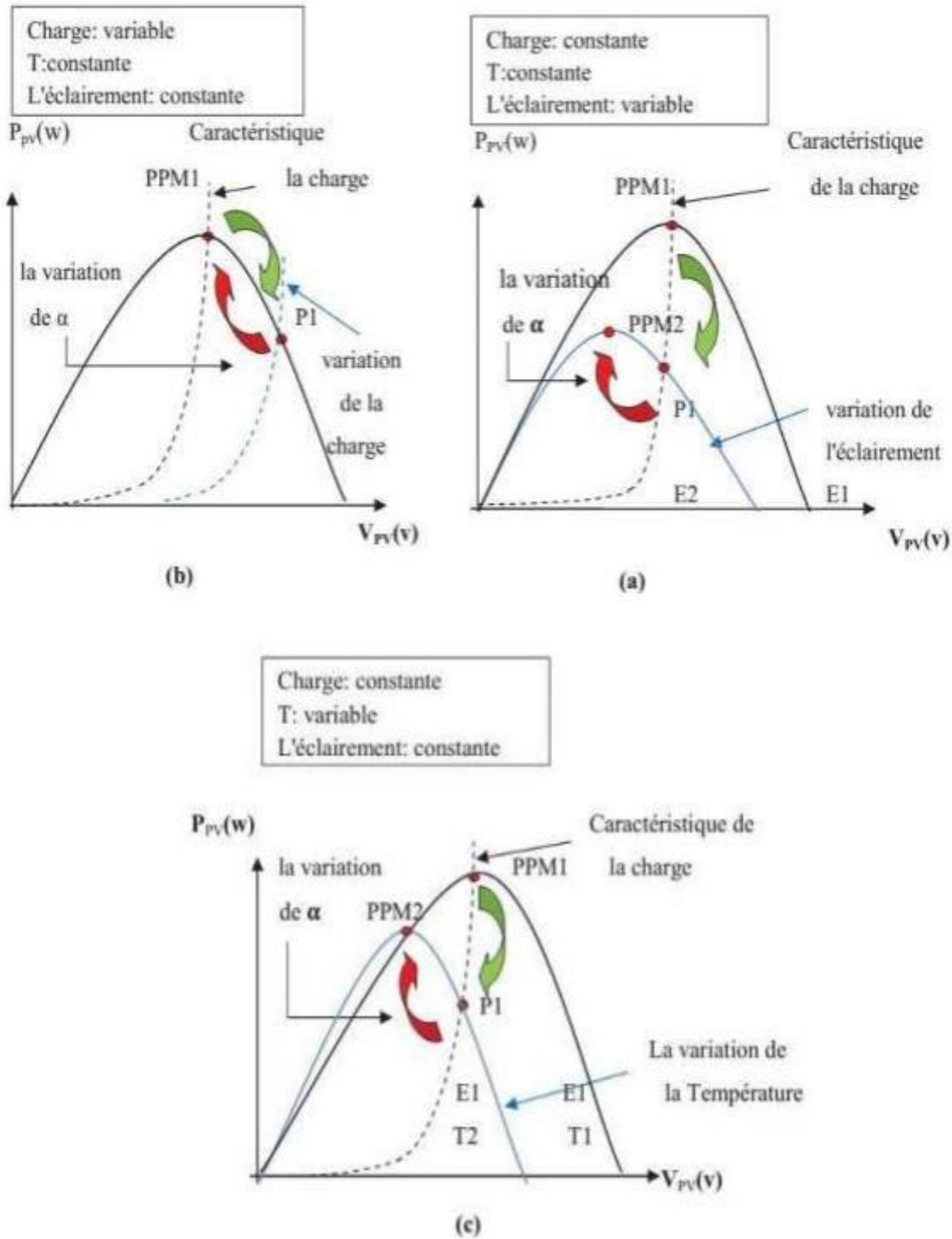


Figure IV-6 : Recherche et recouvrement du point puissance maximale (A) Suite à une variation d'éclairement, (B) Suite à une variation de charge, (C) Suite à une variation de température.

IV. 5– Classification de l'algorithme de suiveur la puissance max:

La catégorisation des algorithmes de suivi peut être fondée sur les fonctions ou les stratégies de commande appliquées. Ainsi, on distingue généralement deux groupes : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

IV. 5.1 Les méthodes indirectes:

Les approches indirectes s'appuient sur des banques de données qui regroupent les spécificités des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions météorologiques (température, ensoleillement, etc.), et font également appel à des formules empiriques pour définir le point de puissance maximale (MPPT).

Il est généralement ardu de généraliser ces méthodes, car elles sont souvent propres à chaque catégorie de panneau.

On peut distinguer plusieurs techniques, notamment la technique du tableau de correspondance (lookup table), la technique de la tension à circuit ouvert du générateur et la technique de court-circuit.

IV.5.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur:

Cette technique repose sur la tension du générateur photovoltaïque au point de puissance maximale, qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert V .

Le facteur proportionnel k_1 est lié à la technologie des cellules photovoltaïques, au facteur de forme et aux conditions climatiques.

$$K_1 = \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \cong \text{Cte} < 1 \quad (4.7)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système, cette opération s'effectuant à une certaine fréquence Le MPP est calculé

suivant l'équation (1), et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de K_1 .

Cette technique est donc sujette à des inexactitudes, mais elle a le mérite d'être facile et peu coûteuse. De plus, l'interruption de service à la frontière des systèmes dotés de stockage ou la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur. [14]

IV.5.1.2 La méthode de court-circuit:

Cette méthode est analogue à la précédente et repose sur la relation proportionnelle existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale (équation 4.9) :

$$K_2 = \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \cong Cte < 1 \quad (4.8)$$

Cette technique offre les mêmes points forts et points faibles que ceux de la méthode de mesure de tension à circuit ouvert.

IV.5.2 Les méthodes directes:

Les méthodes directes se basent sur les variations des mesures de tension et de courant des panneaux pour établir leur algorithme.

Un des atouts de ces algorithmes est qu'ils ne requièrent pas une compréhension préalable des propriétés des panneaux photovoltaïques.

On peut citer plusieurs méthodes, comme la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), ou encore l'incrément de conductance...

IV.5.2.1 La méthode incrémentation de la conductance. [20]

Le bénéfice de cet algorithme est sa capacité à rapidement trouver le point de puissance maximale lorsque les conditions atmosphériques varient. La description de l'algorithme sera fournie ultérieurement. On peut exprimer la puissance générée par le générateur photovoltaïque de la manière suivante :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \tag{4.9}$$

La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension Ppv:

$$\frac{1}{V} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{4.10}$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance:

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{4.11}$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{4.12}$$

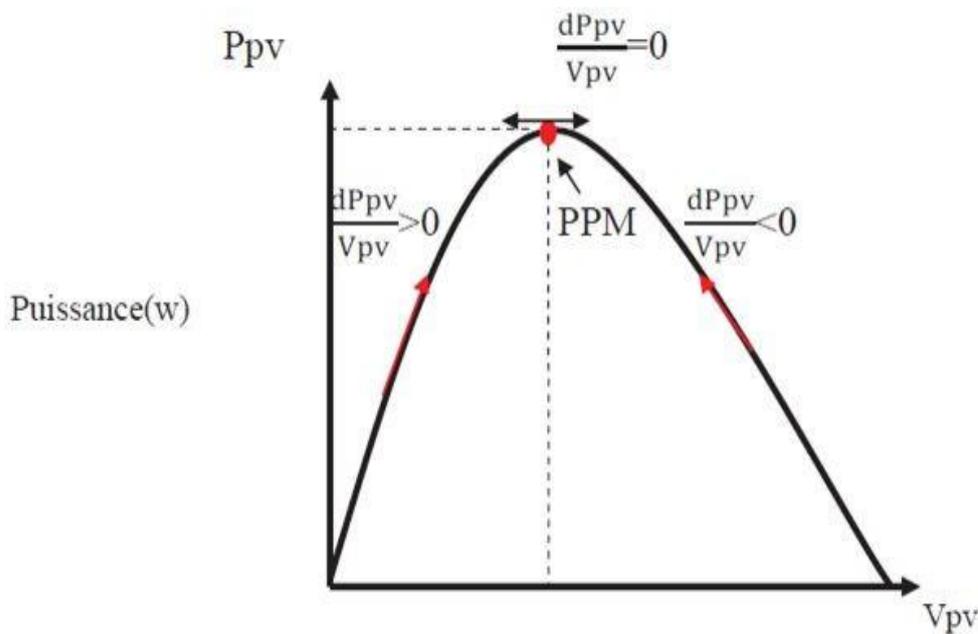


Figure IV-7 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance.

On peut écrire aussi:

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$: Le point de fonctionnement est à gauche du PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$: Le point de fonctionnement sur le PPM.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$: Le point de fonctionnement est droit de PPM.

IV .5.2.2 Méthode à contre réaction de la tension:

Ce procédé s'appuie sur la régulation de la tension opérationnelle des panneaux en comparant cette dernière à une référence [21].

Cela entraîne une tension d'erreur qui modifie le rapport cyclique de la modulation de largeur d'impulsions (MLI) de la commande dans le but d'éliminer cette erreur.

Cette configuration présente les mêmes inconvénients que la méthode de connexion directe (générateur PV + charge de profil).

Autrement dit, le système n'est pas capable de s'ajuster aux conditions

environnementales changeantes, comme l'exposition à la lumière et la température.

Cette méthode présente l'avantage d'être simple, économique et de n'utiliser qu'une seule commande de boucle de rétroaction.[22]

IV .5 .2. 3 Méthode contre réaction de courants:

Dans toutes les techniques (MPPT) exposées jusqu'à présent, on a utilisé une évaluation de l' I_{pv} et du V_{pv} pour recueillir des données sur la puissance de sortie du panneau.

Cette technique innovante (MPPT) s'appuie uniquement sur une mesure de courant pour déterminer le point opérationnel et en cours du système.

L'atout de cette approche réside dans sa simplicité, contrairement aux techniques évoqués précédemment. [23]

IV .5 .2. 4 La méthode Perturbe & Observe (P&O):

La méthode MPPT de type P&O fonctionne en faisant varier légèrement la tension VPV autour de sa valeur initiale et en observant le changement de puissance PPV qui en découle.

Par conséquent, comme le démontre la figure (3.11), on peut conclure que si une augmentation de la tension VPV entraîne une hausse de la puissance PPV, cela indique que le point d'opération est situé à gauche du PPM.

Dans le cas où la puissance diminue, cela signifie que le système a franchi le seuil du PPM.

On peut appliquer un raisonnement comparable lorsque la tension diminue. Suite à ces différentes études sur l'impact d'un changement de tension sur la caractéristique P(V), il devient aisé de définir le point de fonctionnement en relation avec le PPM, et d'orienter ce dernier vers le pic de puissance via un ordre de commande.

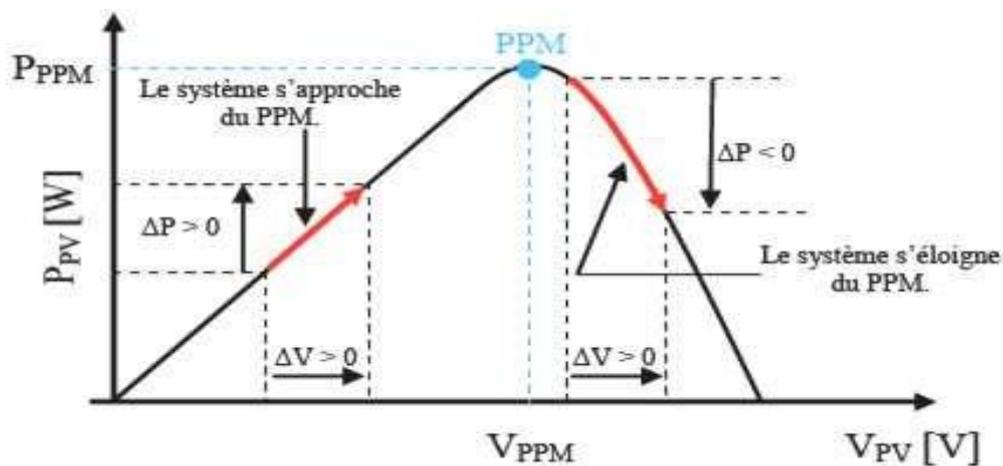


Figure IV-9 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

La figure **IV-10** représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant .[24]

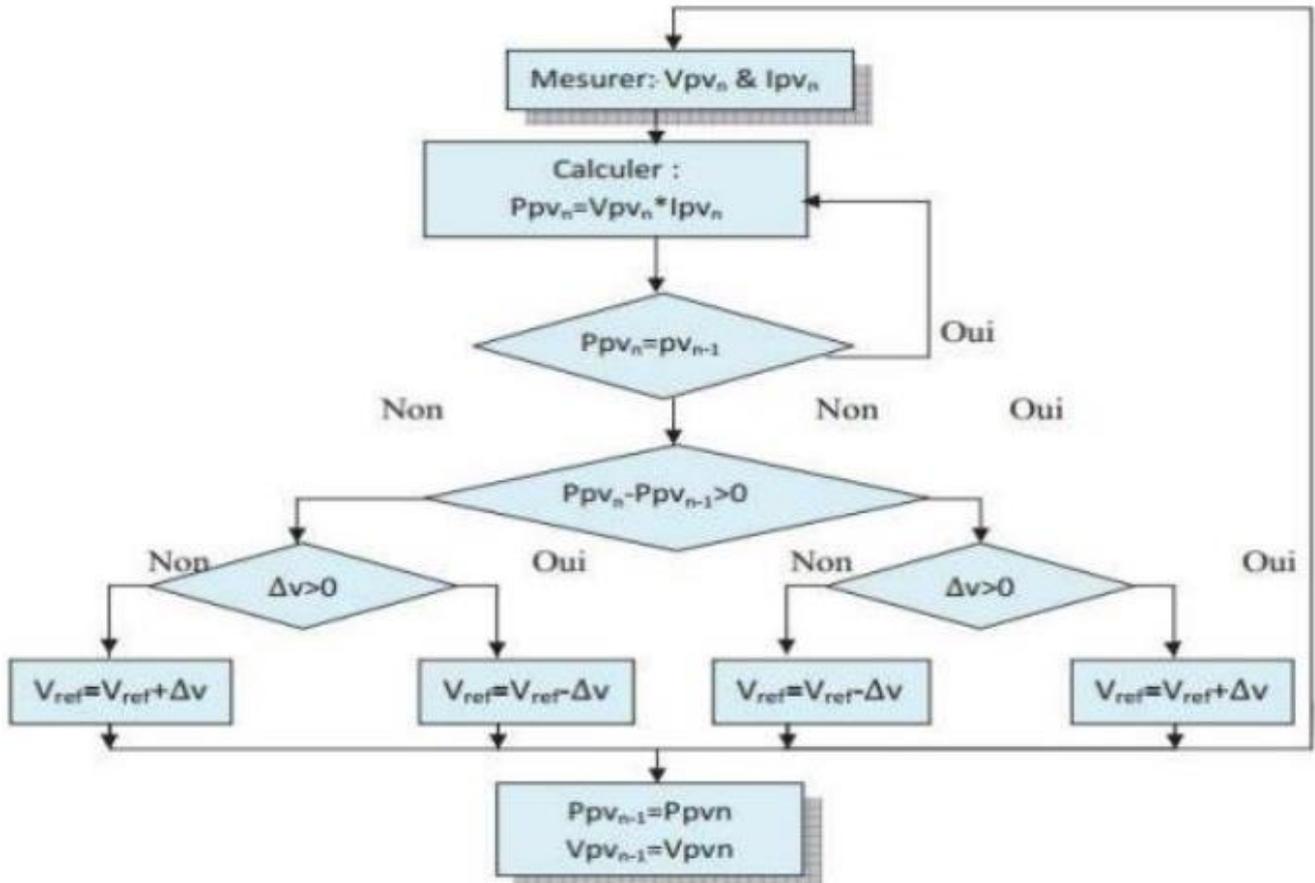


Figure IV-10 : Algorithme de MPPT a base de la méthode P&O.

Telle que:

Ppv : la nouvelle puissance.

Ppv-1 : l'enceint puissance dans le temps (T-1).

$$\Delta v = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} \tag{4.13}$$

$$\Delta p = P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}} \tag{4.14}$$

La technique P&O est actuellement très répandue en raison de sa simplicité d'application, néanmoins, elle soulève certains problèmes liés aux fluctuations autour

du PPM qu'elle provoque en régime stable. En effet, la recherche du PPM doit être effectuée régulièrement, ce qui force le système à osciller continuellement autour du PPM une fois que celui-ci a été atteint.

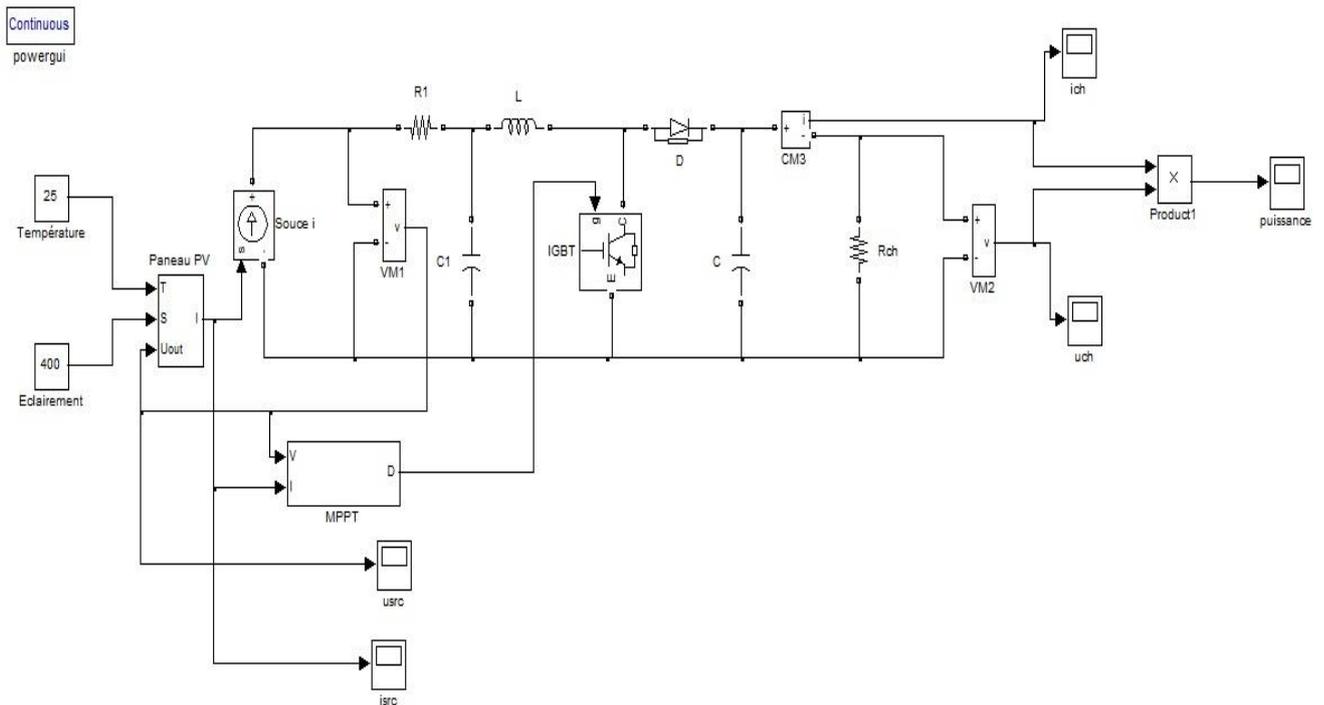
On peut minimiser ces fluctuations en diminuant la valeur de la variable perturbatrice.

Toutefois, une valeur d'incrément basse retarde la recherche du PPM, il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre la précision et la vitesse.

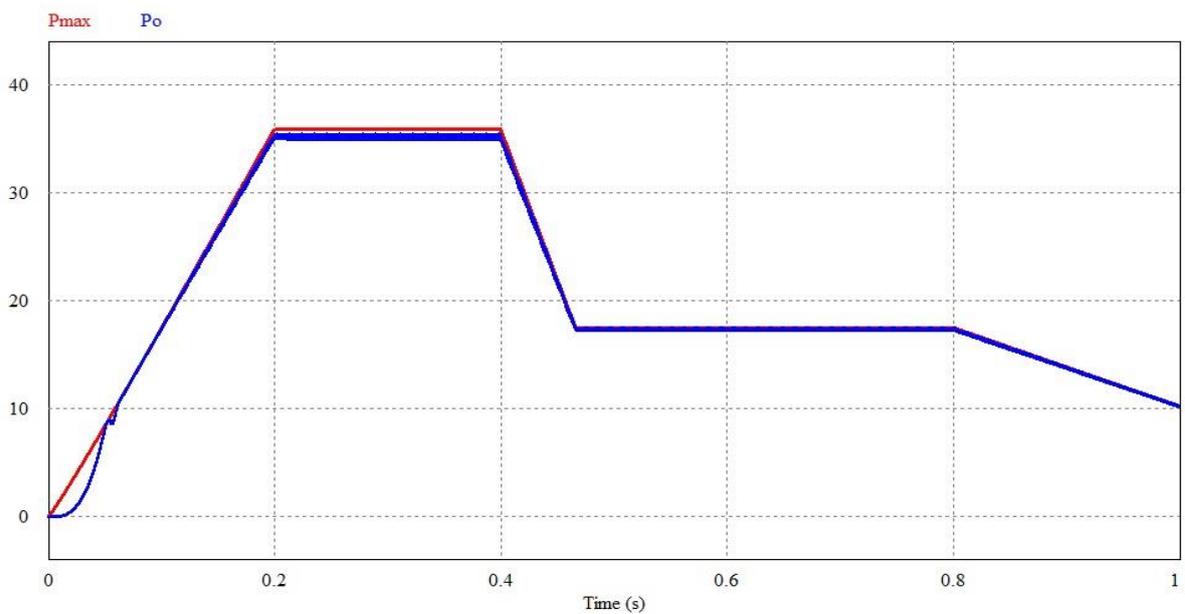
C'est ce qui complique l'optimisation de cette commande. [24]

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC dévolteur (buck).

IV.6 -Simulation de la méthode MPPT:



FigureIV-11 : montage PV-MPPT.



FigureIV-12 : consigne sur la puissance maximale et puissance délivrée.

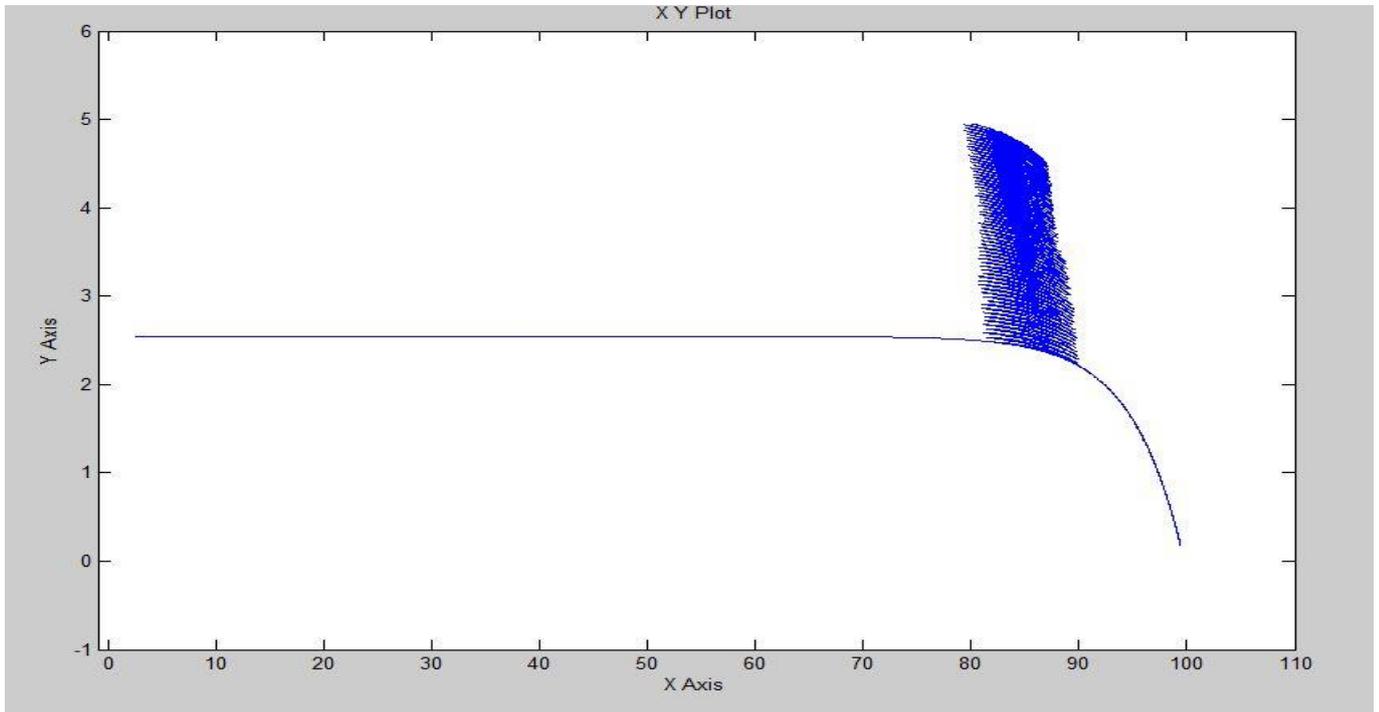


Figure IV-13 : caractéristique I-V : cas d'augmentation de l'éclairement.

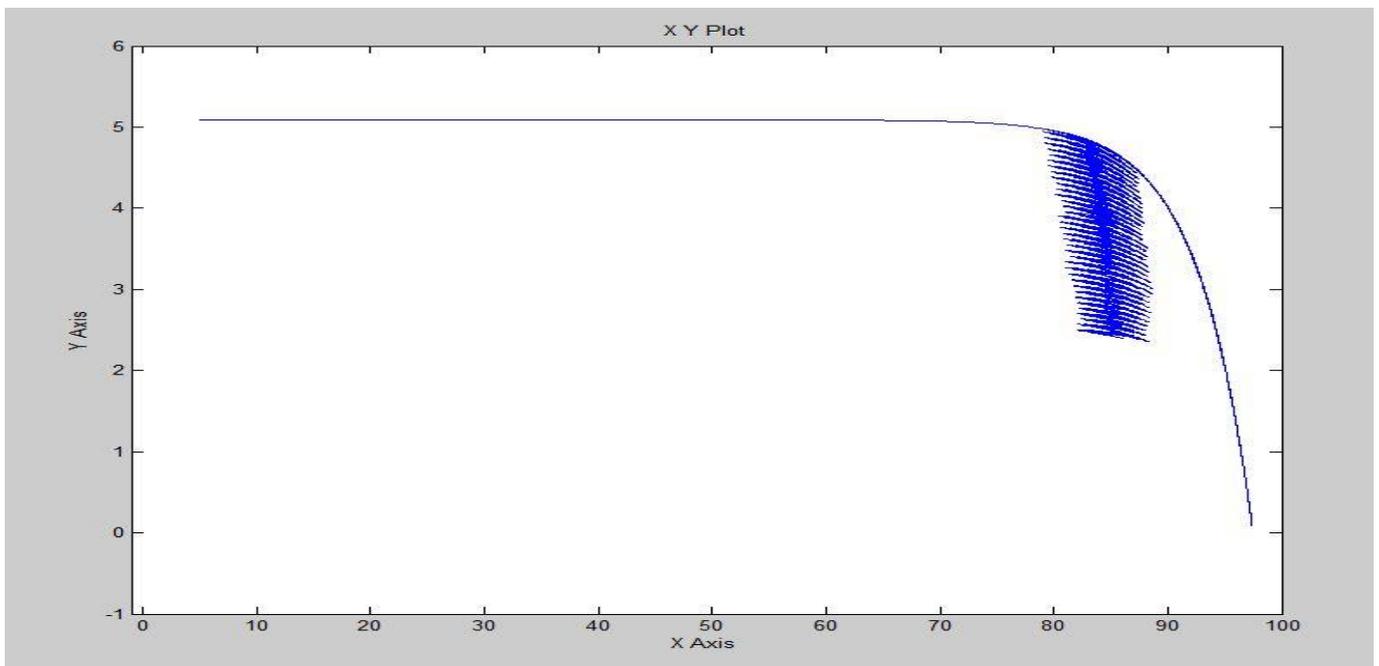


Figure IV-14 : caractéristique I-V: cas de diminution de l'éclairement.

IV.7 – Conclusion:

Ce chapitre présente l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) appliqué aux convertisseurs DC-DC, en particulier le convertisseur Boost . L'algorithme de type Perturbe & Observe (P&O) ajuste dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur pour maximiser la puissance extraite du panneau photovoltaïque, malgré les variations d'ensoleillement et de température.

Une simulation de ce système a été réalisée sous MATLAB/Simulink, permettant d'analyser le comportement du système en temps réel et d'évaluer l'efficacité de la commande MPPT.[2]

Conclusion Générale :

L'exigence mondiale en énergie augmente de manière accélérée, tandis que les ressources naturelles telles que l'uranium, le gaz et le pétrole se raréfient en raison de leur exploitation intensive et de la croissance industrielle constatée ces dernières années. Pour satisfaire cette demande croissante, des recherches sont menées dans le secteur des énergies renouvelables. Parmi ces alternatives, l'énergie solaire se distingue comme une solution d'avenir : elle est gratuite, abondante dans diverses parties du monde et constitue une ressource financièrement stable.

Le recours à l'énergie solaire en tant qu'alternative énergétique présente des inconvénients, notamment le coût élevé des panneaux solaires, leur rendement limité et leur production d'énergie intermittente en fonction des variations climatiques.

Ainsi, toute conception de système d'application d'énergie solaire devrait considérer ces dés avantages.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit les fondements requis pour comprendre le sujet. Nous avons exposé les diverses formes d'énergies renouvelables, en soulignant leurs points forts et leurs points faibles.

Dans le second chapitre, nous avons explicité le principe d'opération des cellules photovoltaïques, en soulignant leurs propriétés fondamentales tout comme les facteurs qui limitent leur efficacité et leur prix.

Nous avons aussi fourni un récapitulatif sur le montage des panneaux solaires et indiqué les différentes zones opérationnelles.

Par ailleurs, nous avons traité des modules photovoltaïques et de leurs agencements, en mettant l'accent sur les points forts et les faiblesses de chaque configuration.

Puis et dans la troisième chapitre on a fait une étude détaillée sur les convertisseurs

statiques qui représentent une partie essentielle dans un système PV et en particulier

des hacheurs (buck et boost) et leurs simulation par MATLAB SIMULINK.

Dans un système énergétique photovoltaïque, on vise constamment à opérer près du point de puissance maximale (MPP), dans le but de réduire au minimum les pertes énergétiques produites. Pour cela, vous découvrirez dans le quatrième chapitre de cet ouvrage la commande MPPT et sa simulation via MATLAB/SIMULINK.

C'est pour cela on a parlé de commande MPPT dans la dernière partie . [14]

Bibliographie

- [1]- BOUCHAKER Amir Abderaouf et BENBRINIS Mouad « Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé » MÉMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.
- [2]-LAOUAR LOKMEN « Structure et Commande d'une installation photovoltaïque» MEMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.
- [3]- DJEBBARI MOHAMED ISLEM et HRARTIA CHOUKRI « ETUDE D'UNE STATION DE POMPAGE »MEMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.
- [4] www.projet-eolien-pallieres.fr.
- [5] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne.fr>.
- [6] <https://enerlice.fr/2017/05/15/eolienne-horizontale-contre-eolienne-verticale>.
- [7]<https://www.geo.fr/environnement/energie-barrage-electricite-hydraulique>.
- [8]-https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- [9]-BOUDENABDEL MALEK «Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque »Thème de Magister, Université Mentouri_Constantine2008.
- [10]-Ben djamaa Ibrahim« Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » Thème de ABOU-BAKR BELKAID _TLEMCEM 2012.
- [11]- TOUMI NIHED et KOUDA ISKANDAR « énergie solaire photovoltaïque et système photovoltaïque autonome » MÉMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.
- [12]- Rabhi Lamine et Tabane Younes « Commande d'un système photovoltaïque

Connecté au Réseau Electrique »Mémoire de fin d'étude Université
Abderrahmane MIRA- BEJAIA.

[13]- S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[14]- TOUMI BOUDJEMAA et BOUGUEMILA ZINEB« STRUCTURE ET COMMANDE D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE » MÉMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA.

[15] - M.S.Rodriguez' Réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur ingénieur, juin 2008.

[16] – C.CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque' thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.

[17]- Y. PANKOW 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque', thèse de doctorats de l'école nationale, 2004.

[18] - M.ARROUF Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque', thèse doctorats université de Constantine, 2007.

[19]- S.ABADA 'Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur spic', Mémoire Maître es Sciences, Université Laval, 2011.

[20] F. Ansari,A. K. Jha' Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm' international journal of research in engineering & applied sciences, issn: 2294-3905, PP 19-30,2011.

[21] B.Multon ,O.Gergaud,H.ben ahmed, X.Roboam, S.Aster, B.Dakyo, C.Nikita, 'Etat de l'art des aérogénérateur', l'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les

énergies renouvelables, Ed.novelect-ecrin, 2002.

[22] S. Ndoye, I.ly, f. barro, O. H. lemraott, G. Sissoko 'Modélisation et simulation sous matlab/simulink de la chaine d'alimentation d'une station relais de télécommunications en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique' Journal des sciences, université de Dakar, pp 45-55, 2009.

[23] L. ABBASSEN Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.

[24] V.Boitier P. Maussion, C. CABAL 'Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques', université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.

