



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière: Département de Génie Électrique

Spécialité: Réseaux électrique

Par: Merrakchi Mohammed Riad, Omrane Driss, Hafied Abdelaziz

Thème

Etude comparative des commandes
MPPT pour un système photovoltaïque

Devant le jury composé de:

Mr. Barka Nouredine

Président

Mr. Lobbi Yacine

Examineur

Mr. Gacem Abdelmalek

Encadreur

Année universitaire : 2023-2024

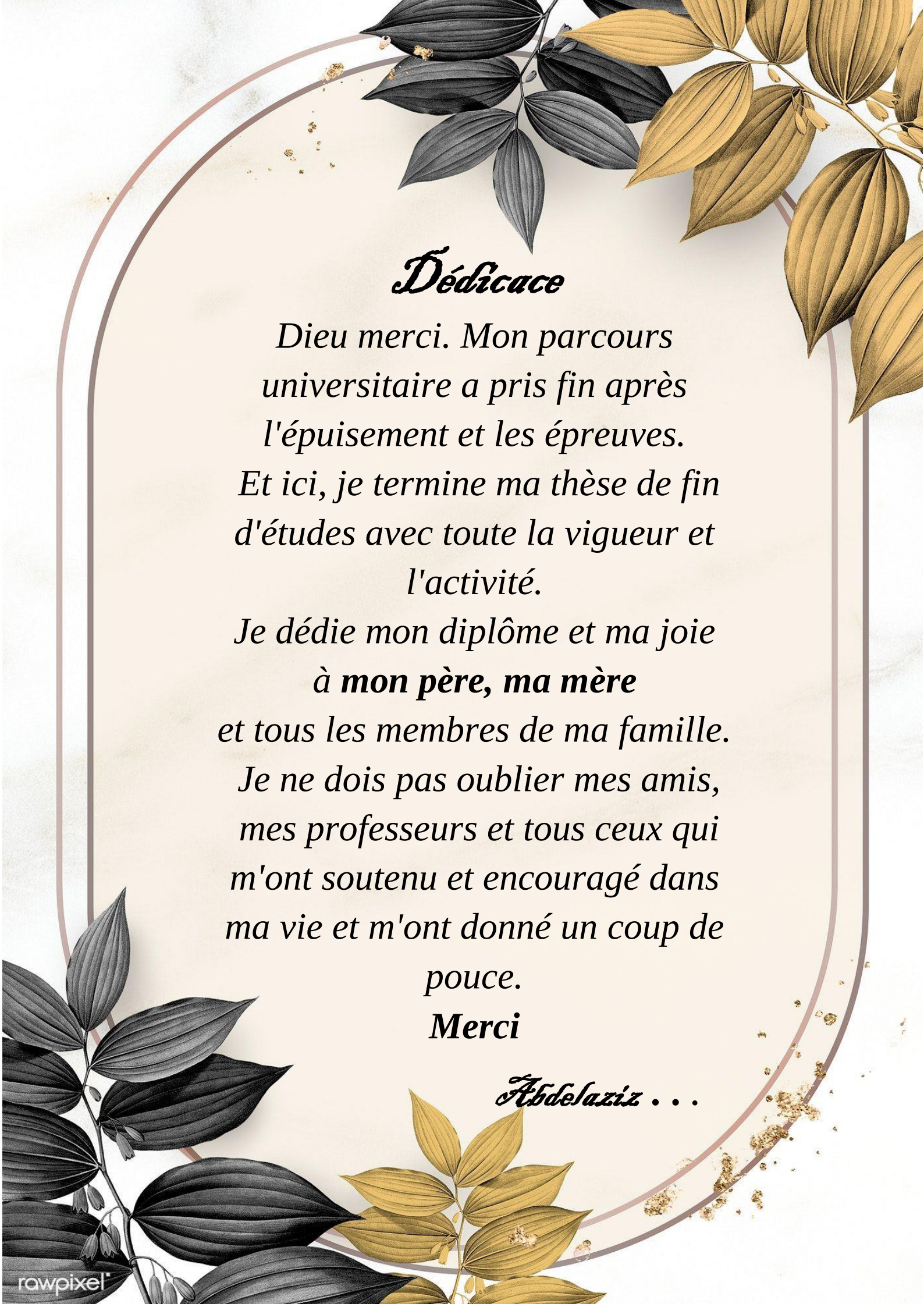
Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à
remercier notre encadreur*

***Dr. Gacem Abdelmalek** , pour son
précieux conseil et son aide
durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux
membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont
porté à notre recherche en acceptant
d'examiner notre travail Et de l'enrichir par
leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons également à remercier
toutes les personnes qui ont participé de près
ou de loin à la réalisation de ce travail.*



Dédicace

Dieu merci. Mon parcours
universitaire a pris fin après
l'épuisement et les épreuves.
Et ici, je termine ma thèse de fin
d'études avec toute la vigueur et
l'activité.

Je dédie mon diplôme et ma joie
à mon père, ma mère
et tous les membres de ma famille.
Je ne dois pas oublier mes amis,
mes professeurs et tous ceux qui
m'ont soutenu et encouragé dans
ma vie et m'ont donné un coup de
pouce.

Merci

Abdesaziz . . .



Dédicace

Dieu merci. Mon parcours
universitaire a pris fin après
l'épuisement et les épreuves.
Et ici, je termine ma thèse de fin
d'études avec toute la vigueur et
l'activité.

Je dédie mon diplôme et ma joie
à mon père, ma mère
et tous les membres de ma famille.
Je ne dois pas oublier mes amis,
mes professeurs et tous ceux qui
m'ont soutenu et encouragé dans
ma vie et m'ont donné un coup de
pouce.

Merci

Driss . . .



Dédicace

Dieu merci. Mon parcours
universitaire a pris fin après
l'épuisement et les épreuves.
Et ici, je termine ma thèse de fin
d'études avec toute la vigueur et
l'activité.

Je dédie mon diplôme et ma joie
à mon père, ma mère
et tous les membres de ma famille.
Je ne dois pas oublier mes amis,
mes professeurs et tous ceux qui
m'ont soutenu et encouragé dans
ma vie et m'ont donné un coup de
pouce.

Merci

Mohammed Riad...

Table des matières

Liste des figures	vii
Introduction générale :	viii
1 généralité sur les systèmes photovoltaïque	1
1.1 Introduction :	1
1.2 Les ressources des énergies renouvelables :	2
1.3 L'énergie solaire :	3
1.3.1 Rayonnement solaire :	3
1.3.2 Spectre du rayonnement :	6
1.3.3 Durée d'insolation :	8
1.4 Description des éléments d'un système photovoltaïque :	8
1.4.1 Cellule photovoltaïque :	11
1.4.2 L'effet photovoltaïque :	14
1.4.3 La cellule photovoltaïque :	14
1.5 La protection des modules solaires :	17
1.5.1 La diode anti-retour :	17
1.5.2 Les diodes by-pass :	18
1.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :	19
1.6.1 Cas d'une cellule idéale :	20
1.6.2 Cas d'une cellule réelle :	20
1.7 Simulation de générateur photovoltaïque :	22

1.7.1	Plaque signalétique d'un générateur photovoltaïque 75 (w) : . . .	22
1.7.2	Présentation générale de proteus :	22
1.7.3	Schéma équivalente de (GPV) :	23
1.7.4	L'influences de température :	24
1.7.5	L'influences de l'éclairement :	25
1.8	Avantages et inconvenantes d'une installation PV :	26
1.8.1	Avantages :	26
1.8.2	Inconvénient :	26
1.9	Conclusion :	27
2	Convertisseur DC/DC	28
2.1	Introduction	28
2.2	Convertisseur DC/DC :	29
2.2.1	Définition de convertisseur DC/DC :	30
2.2.2	Application de convertisseur DC/DC :	30
2.3	Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire :	31
2.4	Composition du convertisseur :	32
2.4.1	Le transistor MOSFET :	32
2.4.2	Le condensateur :	33
2.4.3	L'inductance :	34
2.4.4	La diode Schottky :	35
2.5	Les type des convertisseurs DC/DC :	35
2.5.1	Hacheur survolteur (Boost) :	36
2.5.2	Hacheur dévolteur (Buck) :	38
2.5.3	Hacheur dévolteur-survolteur :	40
2.5.4	Convertisseur Cuk :	42
2.5.5	Le Convertisseur SEPIC :	44
2.6	: Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :	45
2.7	Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT) :	47
2.8	Puissance des convertisseurs :	47
2.8.1	Définition :	47

2.8.2	Puissance instantanée :	48
2.8.3	Puissance active :	48
2.8.4	Puissance apparente :	48
2.9	Conclusion :	49
3	Méthodes MPPT	50
3.1	Introduction	50
3.2	La commande MPPT :	51
3.3	principe de la recherche du point de puissance maximal :	51
3.4	classification de l'algorithmes du suiveur la puissance max :	53
3.4.1	Méthodes Indirectes :	53
3.4.2	les méthodes directes :	55
3.5	definitions des differentes rendements d'une chaine de conversionphoto- voltaïque	65
3.6	critères d'évaluation d'une commande MPPT :	65
3.6.1	Simplicité et Coût :	66
3.6.2	Réponse dynamique :	67
3.6.3	Flexibilité	67
3.6.4	Compétitive sur une large gamme de puissance :	67
3.7	Conclusion :	67
4	Simulation de Système	69
4.1	Itroduction	69
4.2	Simulation d'un système photovoltaïque :	69
4.3	Schéma du simulationde système photovoltaïque :	70
4.4	Résultats de la simulation :	71
4.4.1	Algorithme PO :	71
4.4.2	Algorithme INC :	74
4.4.3	Algorithme de PSO :	76
4.4.4	Algorithme de coucou search	78
4.5	Conclusion :	79

Liste des figures

1.1	Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45)	4
1.2	Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes	4
1.3	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.	5
1.4	Le spectre électromagnétique	6
1.5	Caractéristiques générateur photovoltaïque et batterie	9
1.6	type de cellule solaire.	11
1.7	Silicium poly cristalline	13
1.8	Silicium monocristallin	13
1.9	Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	15
1.10	Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque	16
1.11	Schéma équivalent d'une cellule idéale	20
1.12	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	21
1.13	Schéma équivalent de générateur photovoltaïque à l'aide de Porteuse	23
1.14	Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température	24
1.15	Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température	24
1.16	Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement	25
1.17	Caractéristique P (V) d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement	25

2.1	La structure du système photovoltaïque.	29
2.2	fonctionnement du convertisseur statique	29
2.3	Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC	32
2.4	Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N	33
2.5	Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance	33
2.6	Schéma équivalent d'une inductance réelle L	34
2.7	Schémas d'hacheur de type élévateur.	36
2.8	Schéma électrique boost ouvert	37
2.9	Schéma électrique boost fermé	37
2.10	Schémas d'hacheur de type dévolteur	38
2.11	: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck	39
2.12	Schéma électrique d'un hacheur buck fermé	39
2.13	Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert	40
2.14	Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur	40
2.15	Schémas équivalents du hacheur survolteur, (A) : K fermé, (B) : K ouvert	41
2.16	Schéma de principe de convertisseur C_{uk}	42
2.17	Schéma de base d'un convertisseur Sepic	44
2.18	SEPIC K fermé	45
2.19	SEPIC K ouvert	45
2.20	Étage d'adaptation entre un GPV et une charge	46
2.21	Couplage de convertisseur avec un récepteur	47
3.1	Schéma de conversion photovoltaïque	52
3.2	Recherche et recouvrement du point maximal de puissance	53
3.3	Caractéristique P_{pv} (V_{pv} d'un panneau solaire.	56
3.4	Organigramme de la Methode P&O	56
3.5	Divergence de la divergence de la méthode P&O	57
3.6	Schéma bloc de l'algorithme INC	59
3.7	Organigramme du PSO	63
3.8	Operation of cuckoo search technique	64
3.9	Operation of cuckoo search technique	66

4.1	Données sur les caractéristiques électriques du module PV	70
4.2	Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque.	70
4.3	Changement de rapport cyclique	71
4.4	Resultat de simulation de PV puissance.	71
4.5	Resultat de simulation de PV tension.	72
4.6	: Resultat de simulation de PV courant.	72
4.7	Changement de rapport cyclique	73
4.8	Resultat de simulation de PV puissance.	73
4.9	Resultat de simulation de PV puissance.	74
4.10	La puissance de sortie panneau PV	74
4.11	Résultat de simulation de PV tension	75
4.12	Résultat de simulation de PV courant	75
4.13	Changement de rapport cyclique	75
4.14	Resultat de simulation de PV puissance.	76
4.15	Changement de rapport cyclique.	76
4.16	Resultat de simulation de PV puissance.	77
4.17	Resultat de simulation de PV tension.	77
4.18	Resultat de simulation de PV courant.	77
4.19	Changement de rapport cyclique.	78
4.20	Résultat de simulation de PV puissance.	78
4.21	Résultat de simulation de PV tension	78
4.22	Résultat de simulation de PV tension	79

Introduction générale :

La production d'énergies renouvelables est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrielles ne cessent d'augmenter et l'énergie produite à partir de sources fossiles diminue. De plus, les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. Aujourd'hui, une grande partie de la production énergétique mondiale est assurée par des sources fossiles. L'aide d'énergies renouvelables, la consommation de ressources fossiles entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est que la consommation excessive des stocks de ressources naturelles réduit dangereusement les réserves de ce type d'énergie, ce qui complique les choses pour les générations futures. Par énergie renouvelable, on entend l'énergie du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou de la biomasse. Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies aux ressources illimitées, continues et inépuisables. Les énergies renouvelables regroupent plusieurs secteurs technologiques en fonction de la source d'énergie utilisée et de l'énergie utile obtenue. L'exploitation directe de l'énergie solaire par des capteurs comprend deux technologies bien distinctes : l'une qui produit des calories, qui est l'énergie solaire thermique, et l'autre qui produit de l'électricité. Ce que l'on sait de l'énergie solaire, c'est que le rendement de conversion réel du module PV est faible. Il est nécessaire d'exploiter plus d'énergie que le module solaire ne peut fournir. Il existe plusieurs façons de procéder, et nous les aborderons au cours de ce message dans lequel nous examinons les meilleurs moyens d'obtenir la plus grande énergie de l'énergie solaire. Cette thèse est composée de quatre chapitres. Le premier chapitre est constitué

de généralités sur le système énergétique solaire et ses Principes de base, les différents types d'énergies renouvelables, la définition de l'énergie Solaire, la modélisation et la simulation de la cellule photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre nous étudions et modélisons les différents types de convertisseur DC/DC Dans le troisième chapitre, nous avons présente une étude théorique de plusieurs méthodes Pour suivre le point d'énergie maximale. Dans le quatrième chapitre, nous avons simule le système photovoltaïque avec les quatre Algorithmes étudiés dans le chapitre précédent, et ils ont donne des résultats satisfaisants Nous terminons cette thèse par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simule

généralité sur les systèmes photovoltaïque

1.1 Introduction :

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et Géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les Réserves sont mal réparties et épuisables. de plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de l'Europe occidentale de tels "sites isolés" ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde. Compte tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique, en exploitant les énergies propres sur la terre, comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc. L'énergie photovoltaïque est l'un des enjeux de la politique énergétique du notre siècle, qui résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique, au moyen d'une photopile. S'il est vrai que l'énergie issue du soleil semble sans limites, il n'est pas possible de la puiser à toutes heures de la journée ni durant toute l'année, ce qui limite le rachat du photovoltaïque. Au problème d'intermittence s'ajoute celui de la météo, souvent capricieuse, qui rend cette source d'énergie incertaine. D'où l'importance du stockage de l'énergie solaire pour couvrir les besoins énergétiques. Dans ce chapitre, nous effectuons un bref rap-

pel sur le système photovoltaïque (cellules, modules et champs) avec le stockage de l'énergie photovoltaïque.

1.2 Les ressources des énergies renouvelables :

La production d'énergie renouvelable génère bien moins d'émissions que la combustion de Combustibles fossiles. Afin de faire face à la crise climatique, il est primordial de passer des combustibles fossiles, qui sont actuellement à l'origine de la majeure partie des émissions, aux sources d'énergie. Renouvelables Les énergies renouvelables sont désormais moins chères dans la plupart des pays et permettent de créer trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles.[1] Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces derniers années . D'ici 20-30 ans , tout système énergétique durable Sera base sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 de la demande, dont 10 pour l'hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage[1]

-Energie renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous. En revanche, les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont des ressources non renouvelables qui mettent des centaines de millions d'années à se constituer. Les combustibles fossiles, lorsqu'ils sont brûlés pour produire de l'énergie, provoquent des émissions de gaz à effet de serre nocifs, tels que le dioxyde de carbone. La production d'énergie renouvelable génère bien moins d'émissions que la combustion de Combustibles fossiles. Afin de faire face à la crise climatique, il est primordial de passer des combustibles fossiles, qui sont actuellement à l'origine de la majeure partie des émissions, aux sources d'énergie. Renouvelables Les énergies renouvelables sont

désormais moins chères dans la plupart des pays et permettent de créer trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles.[2]

1.3 L'énergie solaire :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.[2] L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement[3].

1.3.1 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire transmis dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque elle a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m^2 . La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon plusieurs facteurs qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [1-2]. En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivant[4] :

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude) ;
- la saison ;
- l'heure ;
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...) ;

— l'altitude du lieu.

Il est possible de représenter l'allure des courbes correspondant aux variations de l'ensoleillement selon différents paramètres (Figures ?? et 1.2). Les types de rayonnement :

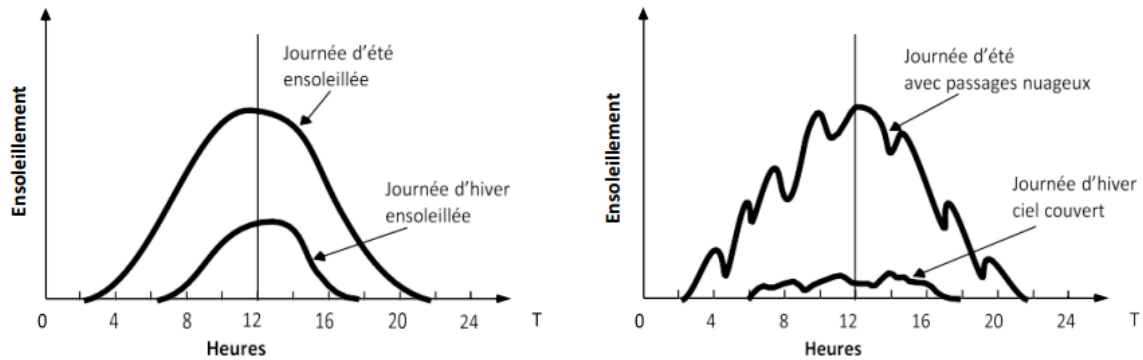


FIGURE 1.1 – Courbes d'ensoleillement typique par heure (latitude 45)

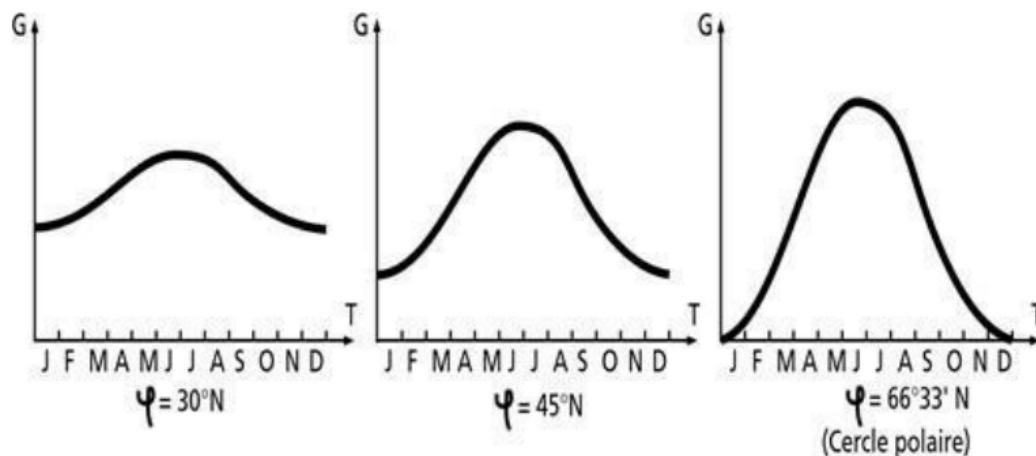


FIGURE 1.2 – Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes

Il y a quatre types de rayonnement : Ensoleillement Ensoleillement

- **Le rayonnement direct**(γ) : est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.
- **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

- **Le rayonnement solaire réfléchi** : ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

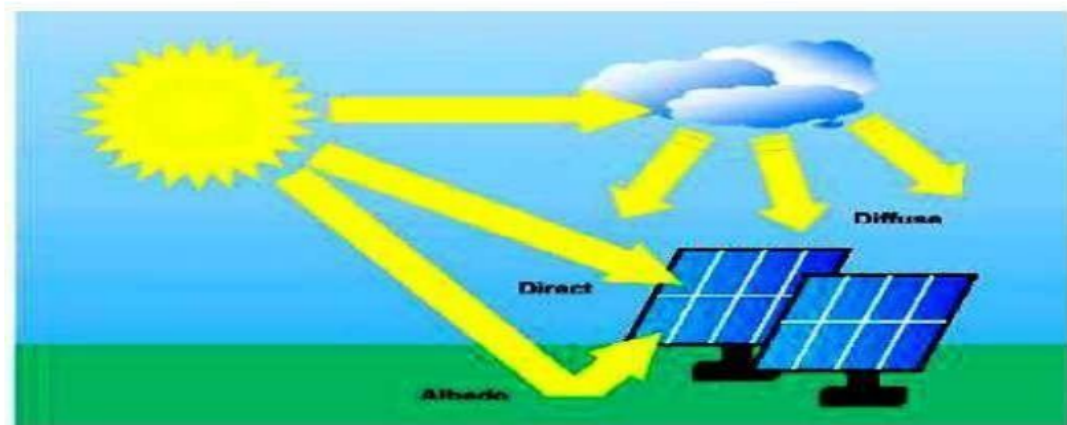


FIGURE 1.3 – Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du Soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

1.3.2 Spectre du rayonnement :

Le spectre électromagnétique :

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous). En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successi-

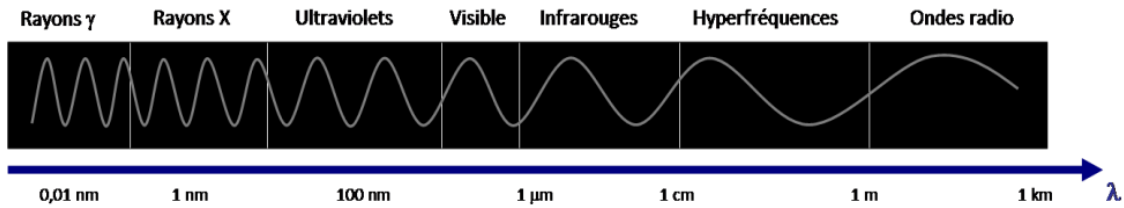


FIGURE 1.4 – Le spectre électromagnétique

vement :

- **Les rayons gamma (γ)** : ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième (10^{-14}) à un milliardième (10^{-12} m) de millimètre.
- **Les rayons X** : rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière (rayonnement synchrotron). Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10^{-12} m) et un cent millième (10^{-8} m) de millimètre.
- **Les ultraviolets** : rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules. Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millième (10^{-7} m) à quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-8}$ m) de millimètre.
- **Le domaine visible** : correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique

perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ($0,5 \mu\text{m}$) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge. Il s'étend de quatre dixièmes de millièment ($4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) - lumière bleue - à huit dixièmes de millièment ($8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) de millimètre - lumière rouge.[5]

- L'infrarouge : rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C). En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages. La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millièment de millimètre ($8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) à un millimètre (10^{-8} m).
- Les ondes radar ou hyperfréquences : Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre et s'apparente dans ce cas à la télédétection dans l'infrarouge thermique, mais également par les capteurs actifs comme les systèmes radar.[5] Un capteur radar émet son propre rayonnement électromagnétique et en analysant le signal rétrodiffusé, il permet de localiser et d'identifier les objets, et de calculer leur vitesse de déplacement s'ils sont en mouvement. Et ceci, quelque soit la couverture nuageuse, de jour comme de nuit. Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre.[5]
- Les ondes radio : Ce domaine de longueurs d'onde est le plus vaste du spectre électromagnétique et concerne les ondes qui ont les plus basses fréquences. Il s'étend des longueurs d'onde de quelques cm à plusieurs km. Relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio, télévision et téléphone). La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre. Celles utilisées pour les téléphones cellulaires sont de l'ordre de 10 cm environ.

Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (longueurs d'onde comprises entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,7 \mu\text{m}$), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre

Trois fenêtres spectrales sont principalement utilisées en télédétection spatiale :

- Le domaine du visible
- Le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique)
- Le domaine des micro ondes ou hyperfréquences (pas abordé ici, même si elles ont une importance considérable en télédétection RADAR notamment)

Certains capteurs, peu nombreux, permettent de mesurer l'énergie du rayonnement ultraviolet. Ils sont utilisés principalement en astronomie pour l'étude des atmosphères planétaires ou pour mesurer la quantité d'UV atteignant la surface terrestre. En télédétection aérienne, le rayonnement proche UV 250 - 350 nm est utilisé pour des applications en océanographie, notamment pour l'identification et la cartographie des nappes d'hydrocarbures.[5]

1.3.3 Durée d'insolation :

Le période d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, ou celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés. On parle alors de la durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.[6]

1.4 Description des éléments d'un système photovoltaïque :

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil », convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Les cellules solaires
- Les batteries
- Les régulateurs de charge
- Les convertisseurs
- Autres composants

-Les batteries

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par les batteries. Celles-ci sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des systèmes autonomes. Le stockage d'énergie représente 13 à 15 des investissements initiaux sur une durée d'exploitation de vingtans. Elles sont de type plomb-acide . On utilisera des batteries dans le cas où la demande de puissance est décalée par rapport au soleil. Le choix du type de batterie se fait d'après une approximation de la puissance moyenne journalière et du temps de stockage nécessaire.

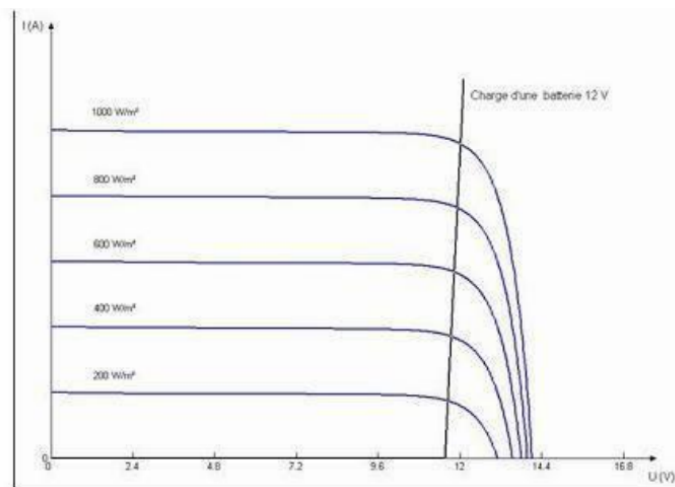


FIGURE 1.5 – Caractéristiques générateur photovoltaïque et batterie

La caractéristique des batteries s'adapte assez bien à celles des générateurs photovoltaïques, car elles fonctionnent à tension quasi constante. Il suffit de dimensionner la batterie pour se placer au point de puissance maximale, puisque sa tension U_{pmax} (tension correspondant à la puissance maximale) varie relativement peu avec l'éclairement.

Les régulateurs de charge :

Plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Le régulateur contrôle le flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaires) et décharges profondes (utilisateur). Il doit assurer la surveillance et la sécurité de l'installation. Les régulateurs de charge se caractérisent en trois groupes principaux :

- Les régulateurs série , qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge.
- Les régulateurs shunt , dont l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge.
- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (MPPT ou Maximum Power Point Tracking), qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteurs sa puissance maximale.

Les convertisseurs :

Suivant l'application, on devra souvent utiliser un convertisseur pour adapter la puissance générée à la charge. Il existe principalement les convertisseurs DC/DC qui fournissent à la charge une tension DC différente de la tension générée par les panneaux et les convertisseurs DC/AC qui produisent une tension alternative pour les charges correspondantes.

Les autres composants :

Les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome sont les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles. Comme les panneaux solaires sont des équipements généralement coûteux, ils doivent être protégés pour éviter toute dégradation. Les dangers sont multiples :

- Perturbations induites par les commutations des convertisseurs de puissance. Dans ce cas, on peut introduire des filtres de puissance pour éliminer les harmoniques.
- Fonctionnement en récepteur : les panneaux se détériorent rapidement quand ils

absorbent de la puissance. On peut utiliser des diodes pour empêcher le courant de circuler dans le mauvais sens foudre [7]

1.4.1 Cellule photovoltaïque :

La cellule a un rôle important dans la production d'énergie photovoltaïque. Son principe de fonctionnement dépend de la caractéristique du cristal du silicium.

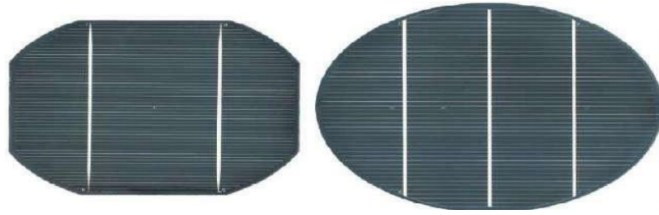


FIGURE 1.6 – type de cellule solaire.

Historique :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par A. Becquerel en 1839. Il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante-dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Les dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque sont :

- 1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet Photovoltaïque. [8]
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

- 1954 : trois chercheurs américains Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule Photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des Solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : une cellule avec un rendement de 9 des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'Université de Delaware.
- 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. Généralité Sur le système photovoltaïque 3
- Années 80 : Exploitation des systèmes PV pour l'électrification et le pompage d'eau dans les zones isolées.
- Fin des années 90 : Exploitation du PV pour la production de l'électricité injectée au réseau dans plusieurs pays développés (Japon, Allemagne).
- Années 2000 : Mise en place des politiques favorables pour le PV Réalisation des centrales PV ayant des puissances de dizaines de MW.

Constitution de la cellule photovoltaïque :

Avant tout, de quoi se compose une cellule photovoltaïque ? Dans la plupart des cas, une cellule photovoltaïque, ou solar cell en anglais, fonctionne avant tout grâce à son composé principal : le silicium. Il est obtenu à partir de la silice, l'un des matériaux les plus communs de notre planète. On le trouve dans le sable ou le quartz.

Une cellule solaire est grosso modo composée de couches minces de silicium posées les unes sur les autres. Son épaisseur est de l'ordre du millimètre, pourtant c'est suffisant pour absorber les rayons du soleil et générer le contact électrique. Une cellule en silicium est aussi dotée d'une couche anti-reflets en surface. La plupart des cellules photovoltaïques rencontrées dans le commerce sont issues de deux grandes familles :

- Le silicium poly cristallin : Le silicium multi cristallin (poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée (figure 1.7), elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène, son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14%. En revanche sa

fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus réduits.



FIGURE 1.7 – Silicium poly cristalline

- Le silicium monocristallin : Les cellules photovoltaïques monocristallines sont fabriquées à partir d'un unique cristal de silicium. On les distingue à leur aspect noir mat et uni en surface. Un module photovoltaïque monocristallin propose en général un bon rendement, au moins autour de 20 %. De ce fait, les panneaux solaires équipés de cellules monocristallines sont souvent les plus chers. Ce sont des cellules qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé (figure 1.8), du fait d'une fabrication compliquée

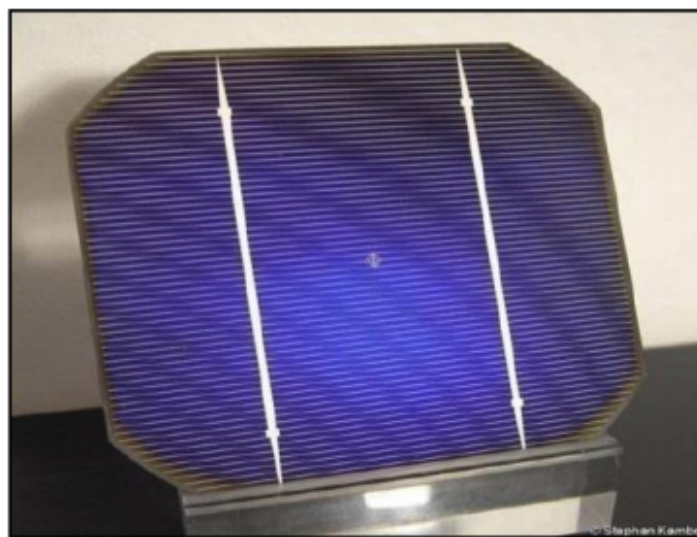


FIGURE 1.8 – Silicium monocristallin

1.4.2 L'effet photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P.

1.4.3 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque, est un composant optoélectronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution.

Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

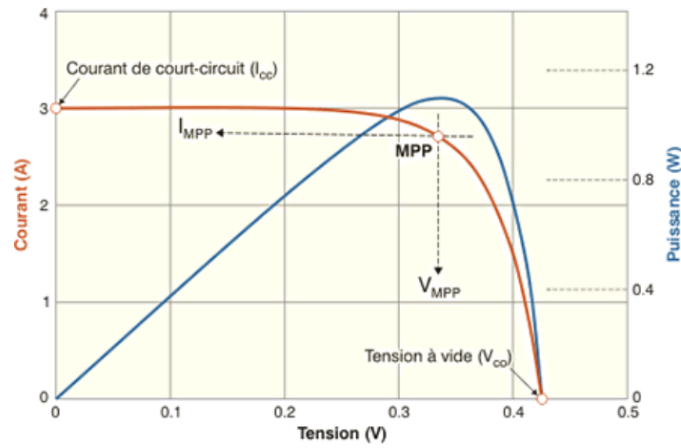


FIGURE 1.9 – Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

a) La résistance série R_s

L'effet de la résistance série est très faible et ne se fait remarquer que pour une valeur de la résistance parallèle proche de $R = 20 \, \Omega$. Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande ou que R_{sh} est faible.

b) Le courant de saturation I_s

Le courant de saturation de la diode interne d'une cellule solaire peut être assez bien estimé à l'aide de la formule 2. En effet, lorsque la cellule solaire est en circuit ouvert, le courant s'annule. Tout le courant fourni par le générateur de courant est compensé par la diode interne. On peut donc écrire, après simplification :

$$I_{cc} = I_s e^{\frac{V_{co}}{n \cdot V_T}}$$

On en déduit l'expression du courant de saturation :

$$I_s = \frac{I_{cc}}{e^{\frac{V_{co}}{n \cdot V_T}}}$$

La tension V_{co} (circuit ouvert) est donnée par le fabricant ou mesurée par des relevés sous un éclairage 1000 W/m^2 . La potentielle thermodynamique V_T est calculée à 300 K. Le facteur d'idéalité n est compris entre 1 et 2 : $1 \leq n \leq 2$

Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure (1.5) représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

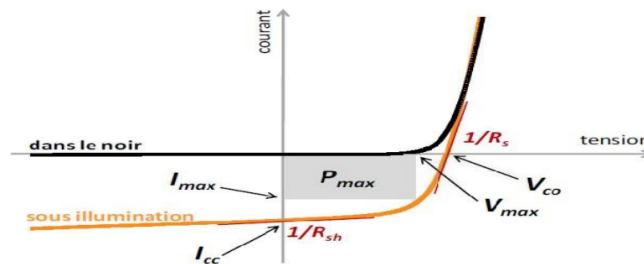


FIGURE 1.10 – Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque

a) Courant de court circuit (I_{cc}) :

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

b) Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction

Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

c) Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{OPT}V_{OPT}}{P_{inc}}$$

Avec P_{max} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.5 La protection des modules solaires

Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défaillante. Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode by-pass qui se place en dérivation d'un groupe de cellule pour ne pas limiter le courant en situation de déséquilibre. De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes quasiment incapables de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel de 0,6V environ qu'il faut prendre en compte dans le rendement des modules.

1.5.1 La diode anti-retour :

Une des fonctions du diode anti-retour est d'empêcher le courant de la batterie du module de cellule solaire ou du réseau carré d'être inversé vers le module ou le

réseau carré lorsqu'il ne produit pas d'électricité, ce qui ne consomme de l'énergie, mais amène également le module ou le réseau carré à chauffer ou même être endommagé. La deuxième fonction est d'empêcher le flux de courant entre les branches du réseau carré dans le réseau de batteries. En effet, la tension de sortie de chaque branche en série ne peut pas être absolument égale, il y a toujours une différence entre la tension haute et basse de chaque branche, ou la tension de sortie d'une branche est réduite en raison d'un défaut ou d'un ombrage, et le courant de la branche haute tension circulera vers la branche basse tension, ou même la tension de sortie du réseau carré total sera réduite. Ce phénomène peut être évité en connectant des diodes de charge anti-retour en série dans chaque branche.

Les diodes anti-retour PV doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Haute tension : il faut généralement dépasser 1 500 V, car le champ photovoltaïque maximum atteindra ou dépassera 1000 V.
- Faible consommation d'énergie, c'est-à-dire la résistance à l'état passant (l'impédance à l'état passant est aussi petite que possible, généralement inférieure à 0,8 – 0,9 V) : étant donné que le système photovoltaïque doit maintenir le rendement élevé de l'ensemble du système, la puissance la consommation de la diode anti-retour dans le boîtier de combinaison doit être la plus faible possible.
- Bonne capacité de dissipation thermique (une faible résistance thermique et une bonne dissipation thermique sont requises) : étant donné que l'environnement de travail du boîtier de combinaison photovoltaïque est généralement médiocre, la diode anti-retour doit avoir une bonne capacité de dissipation thermique et doit généralement également considérer les conditions climatiques telles que le Gobi et le plateau.

1.5.2 Les diodes by-pass :

Lorsqu'il y a plusieurs modules de cellules solaires connectés en série pour former un réseau de cellules carrées ou une branche d'un réseau de cellules carrées, une (ou 2 à 3) diodes doivent être connectées en parallèle inverse aux bornes de sortie positives et négatives de chaque batterie. Panneau. Les diodes connectées en parallèle aux deux extrémités du composant sont appelées diodes de dérivation. La fonction de la diode

de dérivation est d'empêcher un certain composant du réseau carré ou une certaine partie du composant d'être ombragé ou de fonctionner mal pour arrêter la production d'énergie. Une polarisation directe sera formée aux deux extrémités de la diode de dérivation du composant pour rendre la diode conductrice. Le courant de fonctionnement de la chaîne contourne le composant défectueux et traversera la diode, ce qui n'affecte pas la production d'énergie des autres composants normaux. Dans le même temps, il protège également le composant contourné contre les dommages causés par une polarisation directe élevée ou un échauffement dû à l'effet de point chaud. Les diodes by pass sont généralement installées directement dans la boîte de jonction. Selon la puissance des composants et le nombre de chaînes d'éléments de batterie, 1 à 3 diodes sont installées. Les diodes de dérivation ne sont nécessaires dans aucune situation. Lorsque les composants sont utilisés seuls ou en parallèle, il n'est pas nécessaire de les connecter à la diode. Dans les cas où le nombre de composants en série est faible et où l'environnement de travail est bon, il est également possible d'envisager de ne pas utiliser de diode de dérivation[8].

1.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. Les équations retenues de ce modèle sont[9] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \quad (1.1)$$

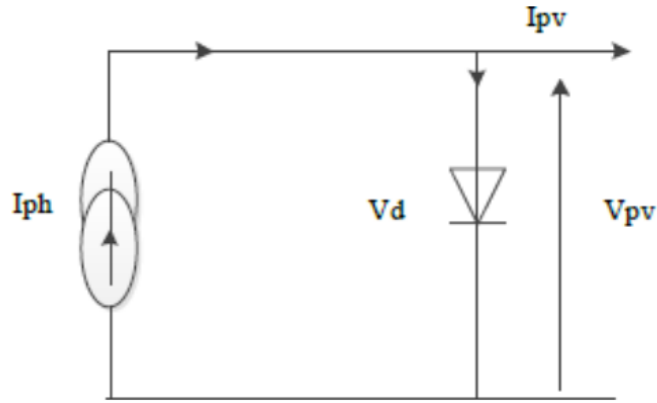


FIGURE 1.11 – Schéma équivalent d'une cellule idéale

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

$$I_{ph} = I_{sc} - \frac{E}{E_{ref}} \quad (1.2)$$

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (1.4)$$

1.6.1 Cas d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (1.8), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale

1.6.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (2.12). Ce schéma équivalent est

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

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple. Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque sem. et sous la

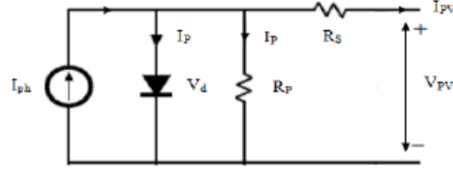


FIGURE 1.12 – Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

forme mathématique Suivante :

$$I_{pv} = I_{PH} - I_d - I_p \quad (1.5)$$

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

$$I_o = I_{or} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{B K} (1/T_n - 1/T) \right]} \quad (1.7)$$

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (1.8)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t} - 1} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1.9)$$

donc :

$$I_{ph} - I_o e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t} - 1} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (1.10)$$

1.7 Simulation de générateur photovoltaïque

Dans ce simulation nous utilise l'outil Proteus Isis, pour simule un GPV de 75 (w). La puissance généré par cette GPV est affecté par l'éclairement et la température, pour change l'éclairement nous utilise une source (Pwlin) et nous change la température dans lesparamètres de la diode. Nous avons acquis les caractéristique $I=f(v)$ et $P=f(v)$.

1.7.1 Plaque signalétique d'un générateur photovoltaïque 75 (w) :

Puissance Maximum (P max)	75 Wp +/- 10 %
Courant Max (Imax)	4.34 A
Tension Max (V max)	17.3 V
Courant Court Circuit(I cc)	4.67 A
Tension Circuit Overt(V oc)	21.6
Eclairement Standard G	1000W/m ²
Température Standard T	25°C

TABLE 1.1 – Plaque signalétiques d'un générateur photovoltaïque de 75(w)

1.7.2 Présentation générale de proteus :

Le logiciel PROTEUS est composé de trois modules :

- L'éditeur de schéma ISIS
- Le simulateur LISA
- L'outil de conception de circuit imprimé ARES

ISIS produit d'une part, une liste d'équipotentiels qui peut être utilisée par le simulateur LISA et l'outil de conception de circuit imprimé ARES, d'autre part, une liste de matériel et des rapports de contrôle des règles électriques.

LISA est un ensemble de modules de simulation lié à ISIS. Le noyau de simulation PROSPICE est basé sur la version 3F5 du moteur SPICE publié par l'université de Berkeley.

ARES est un module de conception de circuit imprimé compatible Windows, 982000 et XP. Il permet le placement des composants en mode automatique, manuel ou semi-automatique et le routage des liaisons sur plusieurs couches en mode automatique, manuel ou semi-automatique.

1.7.3 Schéma équivalent de (GPV) :

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Proteus est représenté par : Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par les

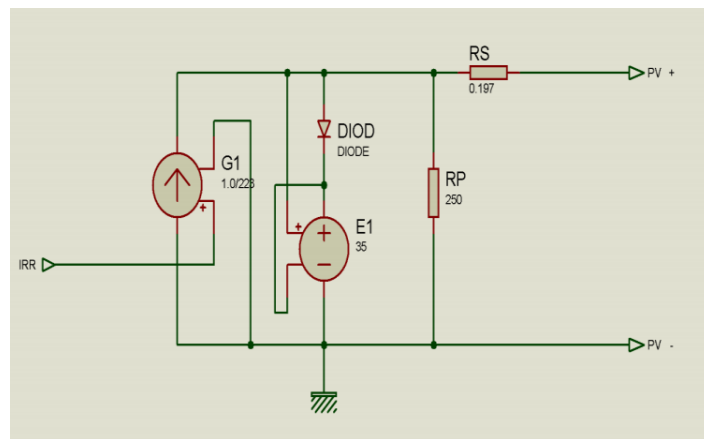


FIGURE 1.13 – Schéma équivalent de générateur photovoltaïque à l'aide de Porteuse

figures (1.13) à (1.16). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclairagements. Les figures (1.13) et (1.14) ci-dessous montrent que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire). Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (1.14) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible. Les figures (1.15) et (1.16) montrent l'influence de l'éclairagement sur les caractéristiques, courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une

fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique

1.7.4 L'influence de température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. La fig.(4a,4b) décrit le comportement du module sous un éclairement fixe de 1W/m^2 , et à des températures comprises entre 0°C et 75°C . Nous remarquons que le courant augmente avec la température ; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

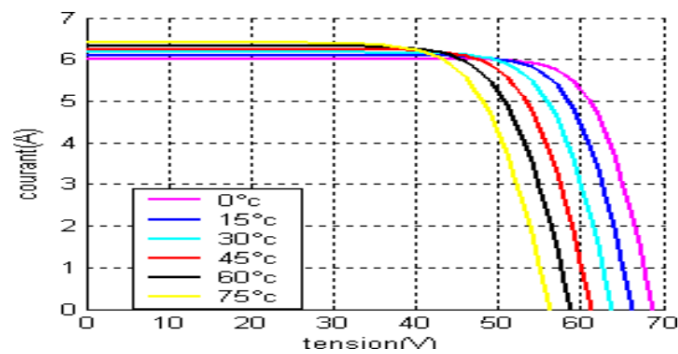


FIGURE 1.14 – Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température

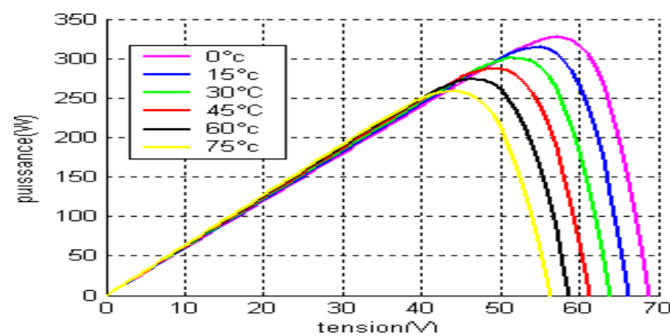


FIGURE 1.15 – Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température

1.7.5 L'influentes de l'éclairement :

Dans la fig. (1.15 ; 1.16), nous représentons les résultats concernant les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau à 25° obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement . Com-

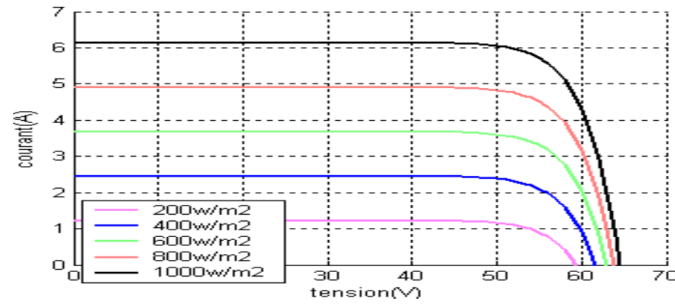


FIGURE 1.16 – Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement

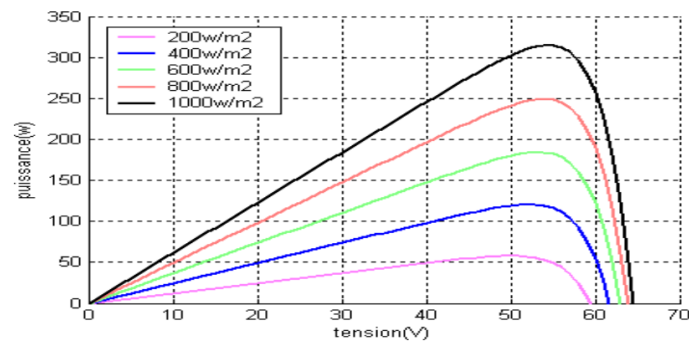


FIGURE 1.17 – Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement

parant avec les caractéristiques données par le constructeur, nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques expérimentales et celles déduites par simulation sous MATLAB. Pour chacune de différentes caractéristiques, correspond une puissance que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.

1.8 Avantages et inconvénients d'une installation PV :

1.8.1 Avantages :

- Energie solaire gratuite.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coût de maintenance bas
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5

1.8.2 Inconvénient :

- La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 une limite théorique pour une cellule de 28 compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions.

1.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque Et module photovoltaïque et influence de température et l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) , (P-V) dans la simulation de générateur photovoltaïque . on a constate que la tension a vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV , et l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale , ainsi que le courant de court-circuit d'un module photovoltaïque augmente régulièrement selon del'ensoleillement , et l'augmentation de l'éclairage se traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale .dans le chapitre prochaine , on présenter une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheur)

Convertisseur DC/DC

2.1 Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite Maximum Power Point Tracking (MPPT). Le but de ce chapitre est l'étude des quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC/DC. Les stratégies de gestion de l'énergie photovoltaïque et du système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration de l'efficacité. Parmi les stratégies, la méthode pour suivre la puissance maximale du GPV dite Méthode de suivi du Point de Puissance maximale (MPPT) et amplement utilisée. Elle permet de trouver automatiquement la tension maximale ou le courant maximal du module PV au cours de lesquelles il fonctionnera pour atteindre le maximum de puissance quel que soit les conditions météorologiques

(température et irradiation). On distingue de MPPT classiques et intelligents. D'habitude, la structure du système de conversion photovoltaïque est basée sur des blocs modulaires, comme le montre ci-dessous :

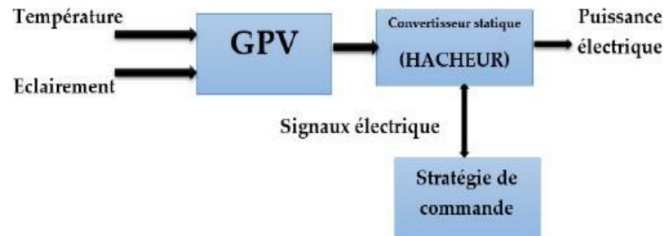


FIGURE 2.1 – La structure du système photovoltaïque.

Alors, nous allons présenter d'abord l'ensemble hacheur système de commande et étudier le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (MPPT)

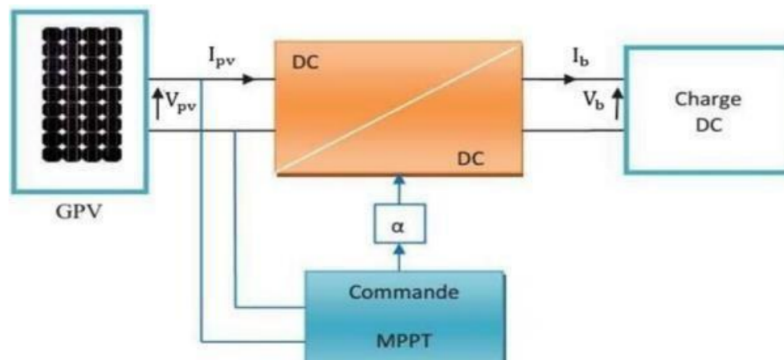


FIGURE 2.2 – fonctionnement du convertisseur statique

2.2 Convertisseur DC/DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à

effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. Dans ces études, l'interrupteur du convertisseur est attaqué par un signal MLI (Modulation Large Impulsion), avec une fréquence F_s fixe et un rapport cyclique D variable.

2.2.1 Définition de convertisseur DC/DC :

Un convertisseur DC/DC est un dispositif électronique conçu pour convertir une tension continue (DC) d'un niveau à un autre niveau souhaité. Il peut soit augmenter (Boost), réduire (Buck), inverser ou réguler la tension DC en fonction des besoins de l'application. Ces convertisseurs sont largement utilisés dans de nombreuses applications, y compris l'alimentation des appareils électroniques, la gestion de l'énergie solaire et éolienne, et les applications automobiles, entre autres.

2.2.2 Application de convertisseur DC/DC :

Les convertisseurs DC/DC sont largement utilisés dans une variété d'applications, notamment :

- Électronique de puissance : Ils sont utilisés dans les alimentations à découpage pour convertir une tension continue d'une valeur à une autre, généralement pour alimenter des appareils électroniques.
- Véhicules électriques : Les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour convertir la haute tension de la batterie principale en une tension plus basse nécessaire

pour alimenter les systèmes de bord, tels que les systèmes de climatisation, les systèmes de divertissement, etc.

- Énergies renouvelables : Dans les systèmes photovoltaïques, les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour optimiser l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en électricité utilisable.
- Télécommunications : Ils sont utilisés dans les équipements de communication pour convertir les tensions entre les différentes parties du système, ce qui permet une transmission efficace des signaux.
- Automobile : Les convertisseurs DC/DC sont utilisés dans les véhicules pour convertir la tension de la batterie principale (généralement 12 V ou 24 V) en une tension plus basse pour alimenter les systèmes de bord et les accessoires.
- Applications industrielles : Ils sont utilisés dans divers équipements industriels pour alimenter les capteurs, les actionneurs et d'autres composants électroniques.
- Informatique embarquée : Les convertisseurs DC/DC sont utilisés dans les appareils électroniques portables tels que les smart phones, les ordinateurs portables et les tablettes pour réguler la tension d'alimentation et prolonger la durée de vie de la batterie.
- Applications médicales : Ils sont utilisés dans les dispositifs médicaux pour alimenter les circuits électroniques critiques avec une tension précise et stable.

Ces applications ne représentent qu'une fraction des utilisations possibles des convertisseurs DC/DC, et leur polyvalence les rend essentiels dans de nombreux domaines de l'ingénierie électrique et électronique[10].

2.3 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire :

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandé (un transistor de puissance qui fonctionne en commutation ; 0 1) à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe de l'hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge

à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. Pour cela les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante[11]

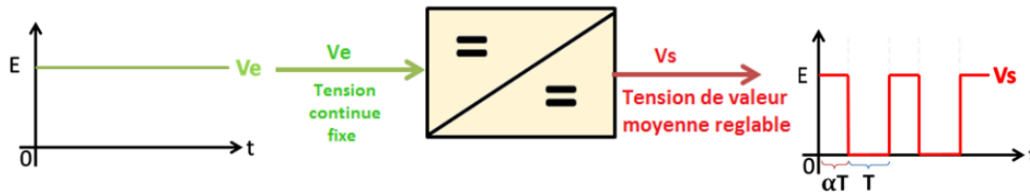


FIGURE 2.3 – Tensions V_e et V_s dans le convertisseur DC/DC

2.4 Composition du convertisseur :

2.4.1 Le transistor MOSFET :

Un convertisseur DC/DC est un dispositif électronique utilisé pour convertir une tension continue (DC) d'un niveau à un autre. La composition d'un convertisseur DC/DC peut varier en fonction de son type et de son application spécifique, mais généralement, il comprend les éléments suivants : Le MOSFET (Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor) est un transistor utilisé en commutation rapide. Il est représenté par le symbole ci-dessous (figure 2.4(A)) qui donne la représentation symbolique usuelle. La connexion partant de la borne reliée au substrat (bulk) B se termine par une flèche indiquant le sens passant des deux jonctions substrat - source et substrat - drain. D'ordinaire le substrat et la source sont reliés. La figure 2.4(A) indique les notations utilisées

Dans un semi-conducteur dopé de type P (figure II.5), on a diffusé deux zones de type N sur lesquelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. Une couche d'oxyde recouvre la zone P située entre la source et le drain ; sur cette couche est soudé le contact de grille (gate) G. C'est la succession Metal-Oxyde-Semi-conductors

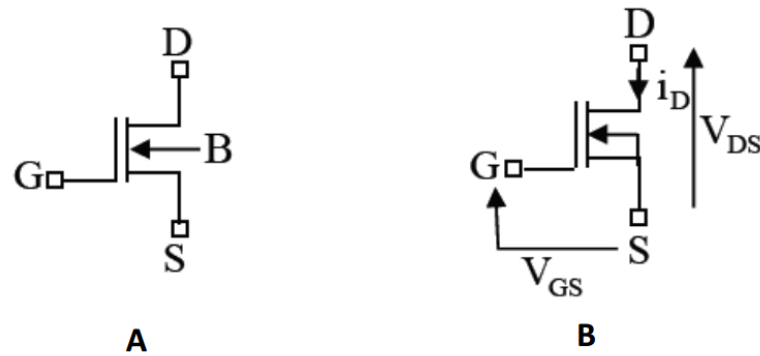


FIGURE 2.4 – Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N

qui donne le préfixe MOS utilisé pour caractériser ce type de transistor.

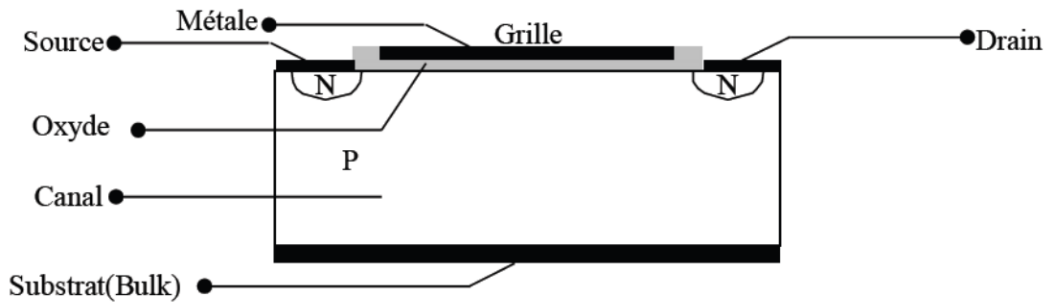


FIGURE 2.5 – Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance

L'utilisation du transistor MOSFET offre plusieurs avantages :

- Le bruit intrinsèque est toujours très faible.
- Ce type de transistor est simple à fabriquer et par la suite peu onéreux.
- La densité d'intégration autorisée par ce type de composant est très importante : on dépasse aujourd'hui le nombre de 107 transistors sur une seule puce.

2.4.2 Le condensateur :

Les condensateurs que nous rencontrons dans les alimentations à découpage remplissent deux rôles distincts : ils servent d'énergie lors des variations de commande ou de charge, mais aussi ils servent également de condensateur de découpage ou filtrage vis-à-vis du fonctionnement en haute fréquence de l'alimentation. Ce sont les condensateurs chimiques dits à faible résistance série qui présentent des valeurs de capacité

importantes, tout en présentant une excellente tenue en fréquence. Le condensateur se caractérise par des grandeurs physiques qui définissent ses domaines d'application. La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge électrique Q emmagasinée à la tension V appliquée entre ses armatures.

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{e}$$

Dans le cas simplifié d'un condensateur dont la surface S des armatures en regard est plane, l'expression de la capacité est :

$$C(F) = \frac{Q(C)}{V(V)}$$

2.4.3 L'inductance :

Le rôle d'une inductance est de stocker une énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. On peut naturellement réaliser des bobinages à air. Mais, l'utilisation de circuits magnétiques tels que présentés après permet :

- De diminuer l'encombrement, avec la même valeur de l'inductance.
- De confiner le flux magnétique dans un espace restreint et ainsi de limiter les rayonnements parasites.

Les inductances sont utilisées essentiellement dans des applications de filtrage, de conversion d'énergie (alimentations à découpage...), et d'interrupteurs magnétiques (inductances saturables). Le schéma électrique équivalent d'une inductance réelle L est le suivant :

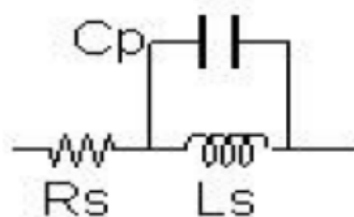


FIGURE 2.6 – Schéma équivalent d'une inductance réelle L

Où R_s représente la résistance série du fil bobiné et C_p les capacités parasites inter spires. La valeur de l'inductance est obtenue par :

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{s_e}{l_e} N^2$$

2.4.4 La diode Schottky :

La diode Schottky présente deux avantages par rapport aux diodes classiques :

- Caractéristique électrique : tension de blocage de 600 V.
- Tension de seuil plus faible ($V_s = 0,3V$).
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts (tr de 0,15 à 0.35 Us)
- Les diodes Schottky sont utilisées en basse tension dans les circuits nécessitant une grande vitesse de commutation, par exemple dans les montages hacheurs à haute fréquence que l'on rencontre dans les alimentations à découpage

[12]

2.5 Les type des convertisseurs DC/DC :

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont

- convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).
- convertisseur dévolteur (ou série).
- convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série-parallèle).

Dans notre travail, on se limite au convertisseur type survolteur qui est également connu sous le nom d'élévateur de tension.

2.5.1 Hacheur survolteur (Boost) :

Définition du Hacheur survolteur :

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type boost est présenté en figure (2.3). Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert UOC du générateur.

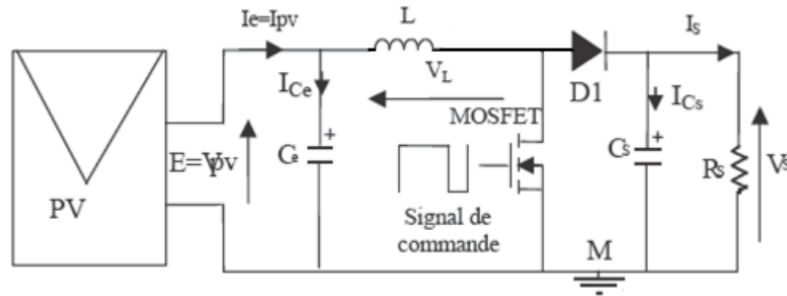


FIGURE 2.7 – Schémas d'hacheur de type élévateur.

Principe de fonctionnement du Hacheur survolteur :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure 2.3, représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).

Modèle mathématique équivalent du Hacheur survolteur :

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

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne : Pour la première période αT_s :

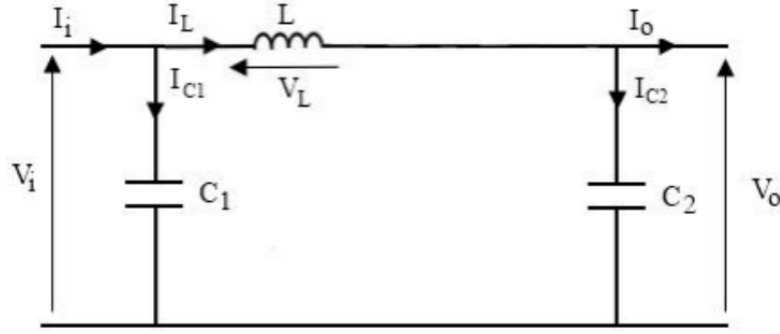


FIGURE 2.8 – Schéma électrique boost ouvert

$$\begin{aligned}
 I_{C1} &= C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \\
 I_{C2} &= C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_0 \\
 V_L &= L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)$ TS

$$\begin{aligned}
 I_{C1} &= C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \\
 I_{C2} &= C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_0 \\
 V_L &= L \frac{dI_L}{dt} = V_g - V_0 - R_L I_L
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

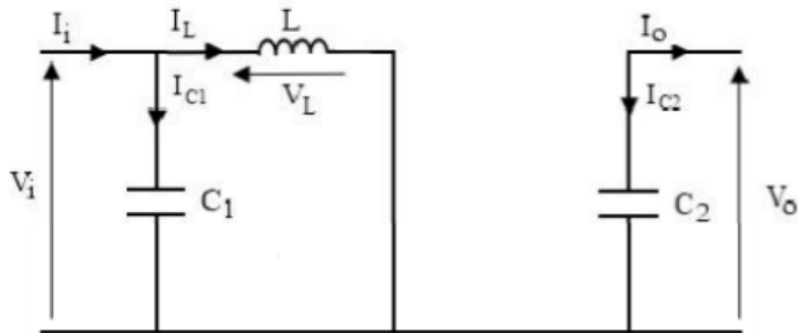


FIGURE 2.9 – Schéma électrique boost fermé

2.5.2 Hacheur dévolteur (Buck) :

Définition du Hacheur dévolteur

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type Buck est présenté en figure (2.5). Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert UOC du générateur

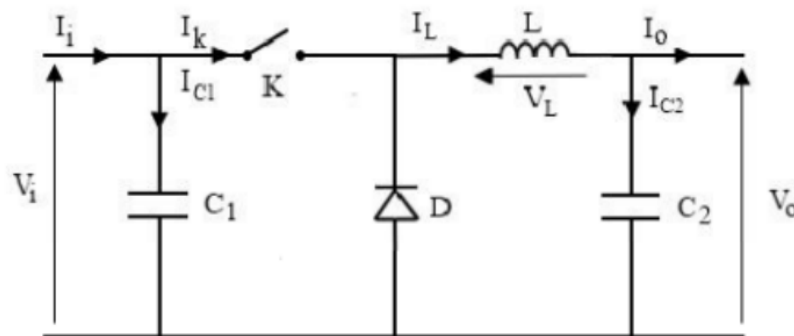


FIGURE 2.10 – Schémas d'hacheur de type dévolteur

Principe de fonctionnement du Hacheur dévolteur :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage. La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps t_e $[\alpha T_e, T_e]$ 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

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la (Fig.II.9) sont tracés 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 : $0 = \alpha$

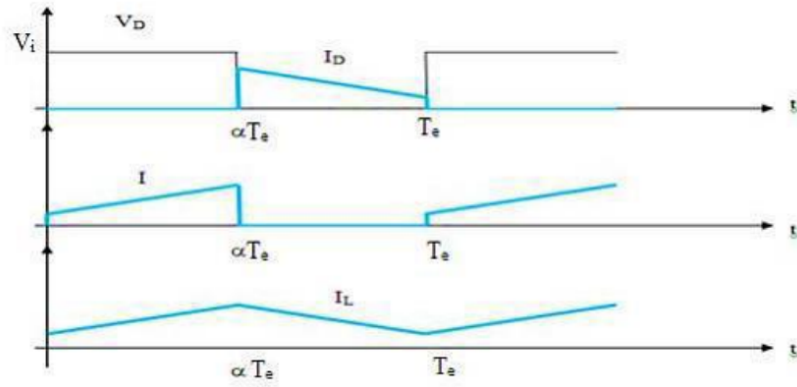


FIGURE 2.11 – : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

Modèle mathématique équivalent du Hacheur dévolteur :

Comme pour le hacheur boost nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (Figure 2.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que (Figure 2.7) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant

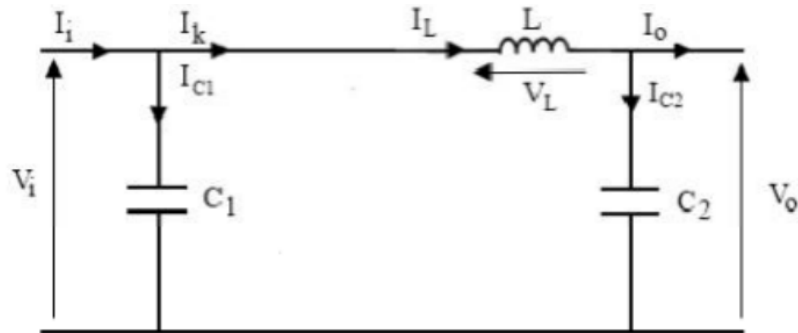


FIGURE 2.12 – Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

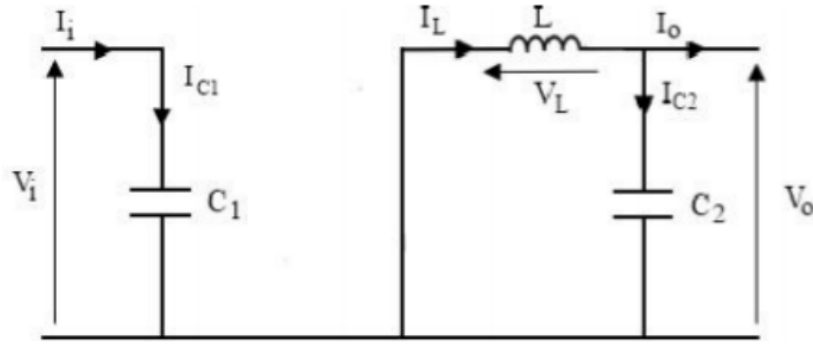


FIGURE 2.13 – Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

2.5.3 Hacheur dévolteur-survolteur :

Définition du Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré par la (figure 2.14)

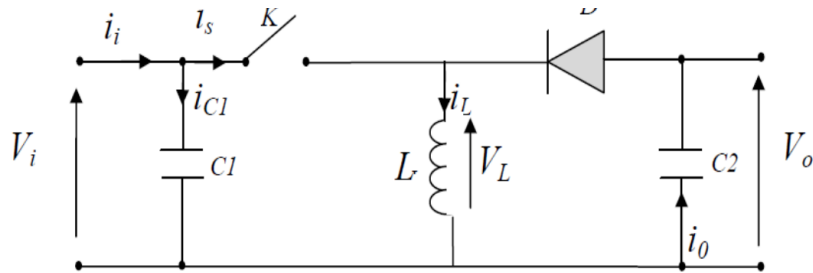


FIGURE 2.14 – Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur

La (figure 2.15) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements.

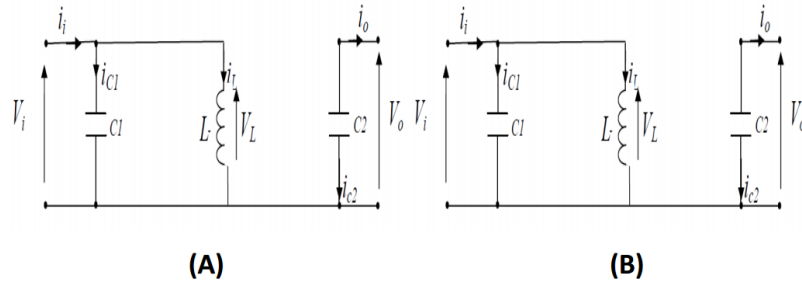


FIGURE 2.15 – Schémas équivalents du hacheur survolteur, (A) : K fermé, (B) : K ouvert

Modèle mathématique équivalent du Hacheur dévolteur-survolteur :

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteursurvolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient : Pour la première période d.Ts

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Pour la deuxième période $(1 - d)$.Ts :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_o(t)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

En appliquant la relation (I.7) sur les systèmes d'équations (I.5) et (I.6), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur.

$$\begin{aligned}
 I_L(t) &= \frac{1}{d} (I_i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt}) \\
 I_o(t) &= -(1 - d) I_L(t) - C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\
 V_i(t) &= \frac{1}{d} (-(1 - d) V_o(t) + L \frac{dV_i(t)}{dt})
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

2.5.4 Convertisseur Cuk :

Définition de Convertisseur Cuk :

Un convertisseur Cuk utilise un condensateur pour stocker l'énergie. Le convertisseur Cuk tient son nom de son inventeur ; et le premier à décrire cette topologie dans un article. Le Cuk est constitué de deux inductances, de deux condensateurs, d'un interrupteur (généralement un transistor) et d'une diode. Le schéma de base d'un convertisseur Cuk est représenté par la figure (II.14). Un inconvénient subsiste concernant l'inversion du signe de la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Par sa structure, le convertisseur Cuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée.

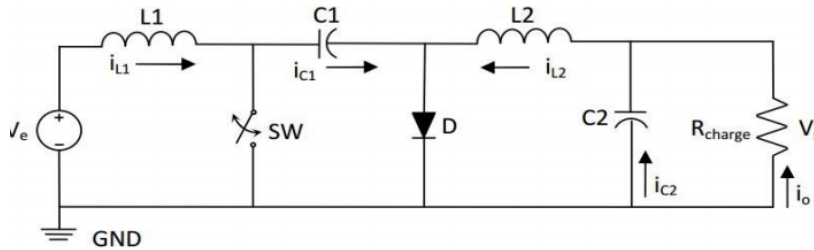


FIGURE 2.16 – Schéma de principe de convertisseur Cuk

Principe de fonctionnement du Convertisseur Cuk :

Durant chaque période de commutation, le convertisseur Cuk opère dans deux modes de fonctionnement : Mode 1 pendant la fermeture de l'interrupteur S (MOS-FET), nous avons.

- stockage d'énergie dans L1.
- transfert d'énergie du condensateur C1 vers l'inductance L2 et vers la charge R et le condensateur C2.

En conduction continue, la tension VC1 ne s'annule pas. La diode D est bloquée pendant cette phase.

$$-I_{C1} = I_{L2} \quad (2.8)$$

Mode 2 le blocage de l'interrupteur SW entraîne la conduction de la diode deroué libre D et la charge du condensateur C1. Le condensateur (C1) se charge par la tension d'entrée (V) à travers l'inductance (L1). L'énergie stockée dans l'inductance (L1) est transférée à la charge par la boucle constituée par α , C2, L2, IL2 et R. On peut écrire donc :

$$I_{C1} = I_{L1} = I \quad (2.9)$$

Comme le phénomène est périodique, le courant moyen du condensateur C1 est nul, de l'équation (II.8) et (II.9) :

$$I_{C1(S:ON)} = \alpha T + I_{C1(S:OFF)} * (1 - \alpha)T = 0 \quad (2.10)$$

$$-I_{L2} * \alpha T + I_{L1} * (1 - \alpha)T = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2.12)$$

Si le convertisseur est idéal :

$$P_{in} = P_{out} \quad (2.13)$$

$$V_{in} \cdot I_{L1} = V_{out} \cdot I_{L2} \quad (2.14)$$

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{I_{L1}}{I_{L2}} \quad (2.15)$$

D'après (2.12) et (2.15) :

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2.16)$$

2.5.5 Le Convertisseur SEPIC :

Définition du Convertisseur SEPIC :

Le convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) a été conçu à la fin des années 1970 par Slobodan Cuk. La structure du hacheur SEPIC se déduit du hacheur capacitif dit hacheur Cuk par permutation de la diode et de l'inductance de sortie. Il présente des caractéristiques similaires à celle du hacheur Cuk, à l'exception qu'il est non inverseur de tension. La tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur SEPIC est composé de deux inductances $L1$ et $L2$. Elles peuvent être bobinées sur le même circuit magnétique, cela permet de gagner de la place sur le PC et à tendance à coûter moins cher que deux inductances séparées. La tension de sortie dépend du rapport cyclique appliqué à l'interrupteur K . La topologie du SEPIC est appropriée pour les applications de charge de batteries et pour la correction du facteur de puissance (PFC) grâce à l'inductance en série avec la source.

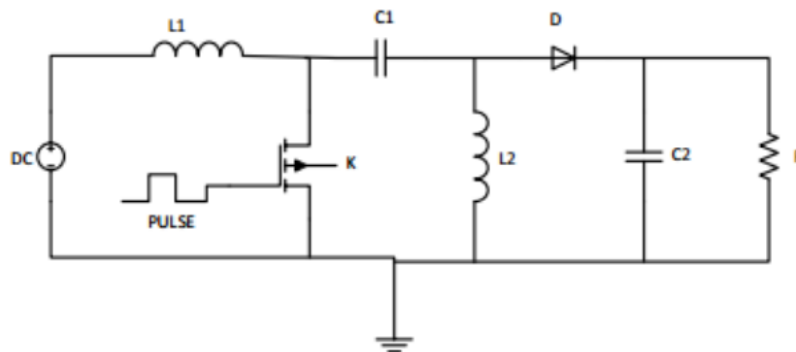


FIGURE 2.17 – Schéma de base d'un convertisseur Sepic

Principe de Fonctionnement de convertisseur SEPIC :

L'étude se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K

- De 0 à αT : Phase d'accumulation d'énergie On ferme l'interrupteur K . On applique aux bornes de l'inductance $L1$ la tension d'entrée V_e , le courant traversant $L1$ va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans $L1$. L'énergie contenue dans le condensateur $C1$ passe dans l'inductance $L2$, et celle du condensateur

C2 vers la charge. La tension est maintenue constante par le condensateur C2

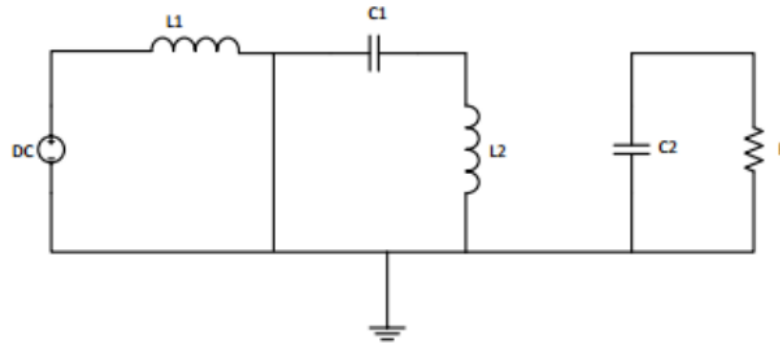


FIGURE 2.18 – SEPIC K fermé

— De αT à T : Phase de roue libre. On ouvre l'interrupteur K, ainsi la diode D se

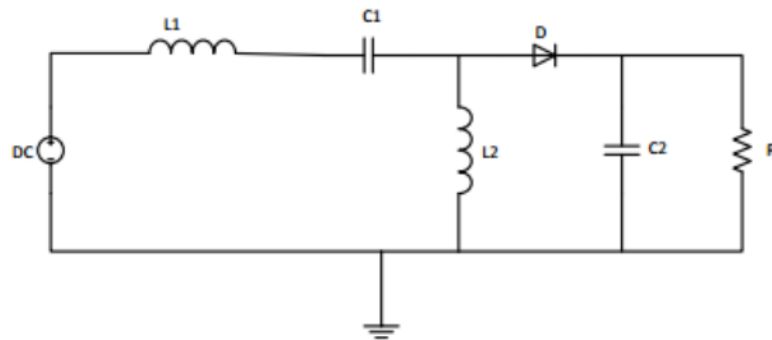


FIGURE 2.19 – SEPIC K ouvert

met à conduire. L'énergie emmagasinée dans l'inductance L1 est restituée dans le condensateur C1. L'énergie dans L2 est transférée vers C2.

2.6 : Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PMM, ces caractéristiques dépendent entre autre du 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 direct.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et 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 (3.2). 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. Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés. Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid en anglais). Dans certains cas, il n'y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un GPV. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC). L'étage d'adaptation (partie de puissance) se compose généralement d'un convertisseur statique, qui situé entre les panneaux solaires et la charge. Par définition un convertisseur statique est un montage permettant par une commande pertinente de un ou plusieurs interrupteurs à semi-conducteur de régler un transfert d'énergie entre une source et un récepteur. Usuellement, au sein d'un MPPT, deux types de convertisseurs statiques sont utilisés :

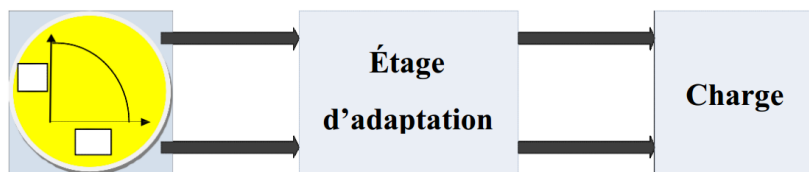


FIGURE 2.20 – Étage d'adaptation entre un GPV et une charge

- Des convertisseurs de type (Boost) : la tension en sortie (aux bornes de la batterie) est plus importante que celle en entrée (aux bornes du panneau solaire).
- Des convertisseurs de type (Buck) : la tension en sortie est alors plus faible que celle en entrée.

Il existe d'autres types d'adaptation comme l'utilisation des transformateurs et des

gérateur DC, mais sont moins utilisés par rapport aux hacheurs. Enfin, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α pour que d'un côté, le générateur puisse fonctionner à R_{opt} et d'un autre côté que la charge puisse varier à sa guise dans la mesure où le point d'intersection source-charge continue à exister.[13]

2.7 Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT) :

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique α de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT. Cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

2.8 Puissance des convertisseurs :

2.8.1 Définition :

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur. Nous adoptons la convention "générateur" pour le convertisseur et donc la convention "récepteur" pour le récepteur.

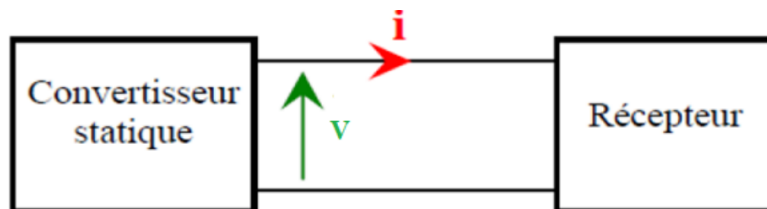


FIGURE 2.21 – Couplage de convertisseur avec un récepteur

2.8.2 Puissance instantanée :

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit "courant $\times$ tension". En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$P(t) = V(t).I(t)$$

2.8.3 Puissance active :

La puissance active P (watt) est la valeur moyenne de la puissance instantanée $P(t)$:

$$P(t) = P_{moy} = \langle V(t).I(t) \rangle$$

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on a :

$$P(t) = V.I.COS\varphi$$

2.8.4 Puissance apparente :

La puissance apparente S est définie par le produit " $V_{eff} \times I_{eff}$ ". C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$S = V.I$$

Facteur de puissance :

Pour évaluer ce phénomène, on définit le facteur de puissance k ($k \leq 1$) :

$$K = \frac{V(t).i(t)}{V_{eff}.I_{eff}}$$

Soit $K = P/S$

$$K = COS\varphi$$

2.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu général sur les différentes topologies et modes de fonctionnement des convertisseurs statiques (les hacheurs), en particulier le Hacheur Sepic, ce dernier est un convertisseur DC-DC indirect non réversible, à stockage capacitif qui permet d'abaisser ou d'élever la tension de sortie

Dans le chapitre suivant, on va faire une simulation d'un système PV pour voir l'évaluation de la tension et de la puissance en sortie du convertisseur.

Méthodes MPPT

3.1 Introduction

Le Maximum Power Point Tracking, ou MPPT, est une technologie cruciale dans le domaine de l'énergie solaire qui vise à optimiser la production d'électricité à partir de panneaux solaires. Son rôle est fondamental dans le contexte de la transition énergétique vers des sources renouvelables et durables. L'idée centrale derrière le MPPT réside dans sa capacité à ajuster dynamiquement la tension ou le courant aux bornes des panneaux solaires afin de maximiser la puissance électrique produite. Cette adaptation en temps réel permet de suivre le point de puissance maximale (MPP), qui varie selon les conditions environnementales telles que l'intensité lumineuse, la température et l'angle d'incidence des rayons solaires. En pratique, le MPPT se matérialise sous différentes formes et méthodes, allant des algorithmes simples comme la Perturbation et Observation (P O) aux approches plus sophistiquées comme l'Incrémental Conductance. Chaque méthode a ses avantages et ses limites, mais toutes visent le même objectif : maximiser l'efficacité énergétique des systèmes solaires. L'importance du MPPT réside dans sa capacité à accroître le rendement des installations solaires, ce qui se traduit par une production accrue d'électricité à partir de sources renouvelables, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et contribuant à la lutte contre le changement climatique. Dans notre étude, nous explorerons les principes fondamentaux du MPPT, sa commande essentielle, les méthodes de recherche du MPPT, la classification des algorithmes MPPT, et les méthodes indirectes utilisées pour maximiser le rendement

énergétique des installations solaires.

3.2 La commande MPPT :

La commande MPPT fait référence au Maximum Power Point Tracking, qui est un processus utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser la production d'énergie en ajustant en temps réel la tension ou le courant de sortie du panneau solaire pour maximiser sa puissance de sortie. C'est essentiellement un algorithme de suivi du point de puissance maximale qui permet au système de fonctionner de manière plus efficace en exploitant au mieux les conditions changeantes de luminosité et de température.

Dans le contexte des commandes ou des contrôles liés au MPPT, cela peut impliquer des ajustements automatiques des paramètres de fonctionnement d'un onduleur solaire ou d'un régulateur de charge afin de maintenir le panneau solaire à son point de puissance maximale, ce qui améliore les performances globales du système photovoltaïque.[14]

3.3 principe de la recherche du point de puissance maximal :

Le principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) consiste à trouver le point de fonctionnement où la puissance délivrée par un générateur est maximale. Cette optimisation est réalisée en continu en ajustant automatiquement la charge vue par le générateur. Cette adaptation de la charge est généralement effectuée à l'aide d'un convertisseur statique qui doit minimiser les pertes et peut également assurer la mise en forme de la sortie du générateur. Il existe différentes approches pour contrôler cet adaptateur, souvent appelé Recherche du Point de Puissance Maximum ou MPPT.

Dans une configuration simplifiée représentée dans la figure 5, une chaîne de conversion photovoltaïque est associée à un contrôle MPPT. Pour simplifier, une charge en courant continu (DC) est utilisée. Un convertisseur DC-DC peut être utilisé pour que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (GPV) corresponde à sa puissance

maximale ($P_{\max}$) et soit ensuite transférée directement à la charge.

La technique de contrôle couramment utilisée agit sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement, indépendamment des instabilités météorologiques ou des variations brutales de charges. La figure 6 illustre trois cas de perturbations où le point de fonctionnement peut basculer du point de puissance maximal (PPM1) vers un nouveau point (P1) plus ou moins éloigné de l'optimum en fonction du type de perturbation. Par exemple, en cas de variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du...

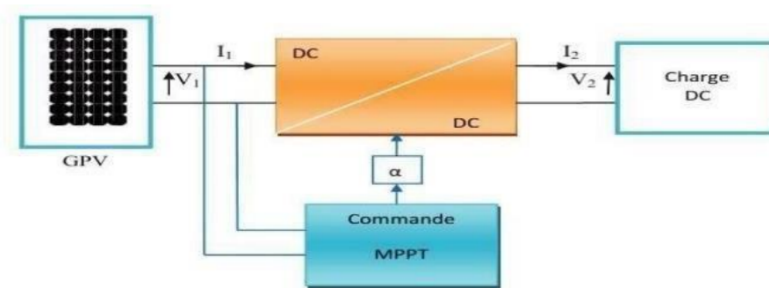


FIGURE 3.1 – Schéma de conversion photovoltaïque

Dans la figure, les courbes a, b et c représentent les caractéristiques courant-tension de différents circuits électriques sous des conditions variables :

- Courbe a : Cette courbe montre le comportement du circuit lorsque la température et la charge sont constantes, et comment la tension varie en fonction du courant.
- Courbe b : Elle illustre comment la tension varie de manière dynamique en raison d'un changement périodique de la charge tandis que la température reste constante.
- Courbe c : Elle montre les variations de tension dues à des changements périodiques de la température alors que la charge reste constante.

Chaque courbe présente une "caractéristique de charge" qui montre la variation de tension en fonction du courant dans des conditions de fonctionnement différentes. Ces graphiques sont essentiels pour comprendre les dynamiques électriques des circuits et montrent la relation entre la tension et le courant dans des conditions de fonctionnement variées. [13]

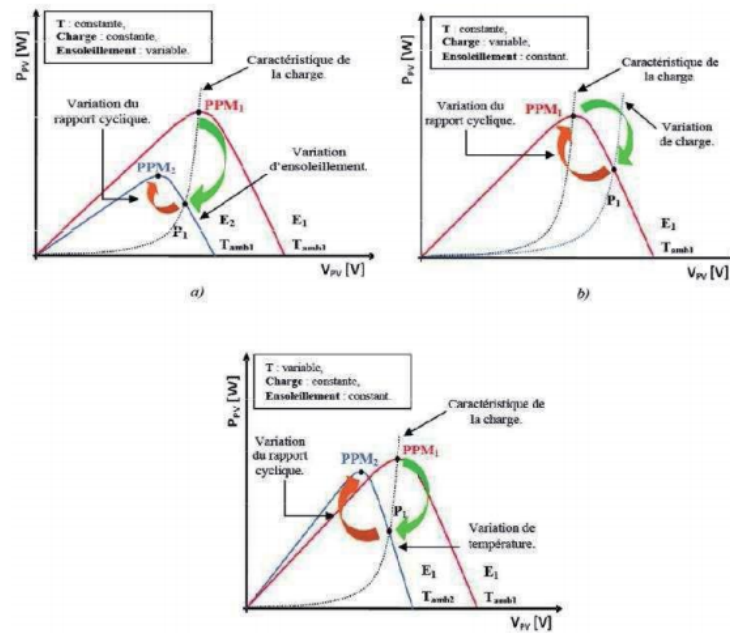


FIGURE 3.2 – Recherche et recouvrement du point maximal de puissance

3.4 classification de l'algorithmes du suiveur la puissance max :

La classification des algorithmes de suivi du point de puissance maximale peut être réalisée en se basant sur les techniques ou stratégies de commande employées, les classant ainsi en méthodes directes et indirectes. Cette classification offre une meilleure compréhension des diverses approches pour atteindre le MPP, en soulignant les distinctions entre les méthodes agissant directement sur les paramètres du système et celles utilisant des techniques plus sophistiquées et des modèles pour optimiser le fonctionnement des systèmes PV.

3.4.1 Méthodes Indirectes :

Ce type de commandes MPPT exploite la corrélation entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui sont facilement déterminables, et la position approximative du MPP (point de puissance maximale). De plus, il inclut les commandes basées sur une estimation du point de fonctionnement du GPV (générateur photovoltaïque) à partir d'un modèle paramétrique préétabli. Il existe également des commandes qui suivent la ten-

sion optimale en tenant compte uniquement des variations de température des cellules mesurées par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre. Elles sont principalement destinées à des systèmes peu coûteux et moins précis, adaptés aux régions où les variations climatiques sont peu importantes.

méthodes de la tension de circuit ouvert du générateur :

Cette technique de recherche du Point de Puissance Maximale (PPM) est relativement simple. Elle repose sur la comparaison entre la tension du panneau solaire (VPV) et une tension de référence correspondant à la tension optimale (Vopt) pour le fonctionnement optimal du système. L'erreur de tension est ensuite utilisée pour ajuster le rapport cyclique du circuit de commutation (CS), afin d'aligner ces deux tensions. La tension de référence (Vopt) est déterminée en utilisant la relation linéaire entre Vopt et la tension de circuit ouvert (VOC) d'un module photovoltaïque (PV), exprimée par l'équation :

$$V_{opt} = K_v * V_{oc} \quad (3.1)$$

où K_v est un facteur de tension variant généralement entre 0.71 et 0.78 pour les générateurs PV en silicium (Si), en fonction de leur température de fonctionnement. Cependant, cette méthode présente quelques inconvénients significatifs. Premièrement, elle nécessite des mesures périodiques de la tension de circuit ouvert (VOC), ce qui implique de déconnecter la charge du panneau solaire pendant ces mesures, entraînant ainsi une perte de transfert de puissance à chaque mesure. De plus, cette technique repose sur l'hypothèse que le coefficient K_v reste constant pour un générateur PV donné, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité, surtout pour les générateurs PV en silicium, où ce facteur peut varier d'au moins 10 % en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes, bien que simples et robustes, manquent aujourd'hui de la précision nécessaire pour être utilisées dans des systèmes de conversion modernes.

3.4.2 les méthodes directes :

La méthode MPPT Direct utilise les mesures de courant, tension ou puissance dans le système pour déterminer le point de fonctionnement optimal (MPP) du générateur photovoltaïque (GPV). Cette méthode permet de réagir aux changements imprévus dans le fonctionnement du GPV. Habituellement, elle repose sur un algorithme de recherche qui identifie le maximum de la courbe de puissance sans interrompre le fonctionnement. Pour ce faire, la tension du point de fonctionnement est progressivement ajustée par intervalles réguliers. Si la puissance de sortie augmente, la recherche continue dans la même direction ; sinon, elle est inversée. Cela permet au point de fonctionnement réel de converger autour du MPP. Certains algorithmes supplémentaires sont utilisés pour éviter les erreurs d'interprétation, comme une mauvaise direction de recherche causée par une augmentation rapide du niveau de rayonnement. Pour déterminer la puissance du GPV, essentielle pour trouver le MPP, il est nécessaire de mesurer la tension et le courant du générateur, puis de multiplier ces deux valeurs. D'autres algorithmes utilisent des variations sinusoïdales sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer les composantes alternative et continue de la tension du GPV, et ainsi placer le point de fonctionnement le plus proche possible du MPP. L'avantage de cette méthode réside dans sa précision et sa réactivité.

La méthode Perturbation et Observation (PO) :

La méthode Perturbation et Observation (P O) est largement utilisée dans le domaine de l'énergie solaire en raison de sa simplicité d'implémentation. Son principe repose sur la perturbation contrôlée de la tension de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV). Lorsque le GPV est connecté à un convertisseur de puissance, cette perturbation influence le rapport cyclique du convertisseur et, par extension, le niveau de tension.

La figure (3.3) illustre que lorsque la tension est ajustée, on observe une augmentation ou une diminution de la puissance produite par le système solaire, selon sa position par rapport au Point de Puissance Maximale (PPM). Lorsque la puissance augmente, la perturbation est maintenue pour atteindre le PPM optimal. En revanche, si la puissance diminue, la perturbation est inversée. Ce cycle se répète jusqu'à ce que le PPM

soit atteint, moment où le système oscille autour de cette valeur optimale. La taille de la perturbation affecte la stabilité de cette oscillation : une perturbation plus petite réduit les oscillations mais ralentit également le processus d'optimisation de puissance.

L'algorithme de la méthode (P & O) suit un organigramme présenté dans la figure 2.9. Il repose sur la mesure du voltage et du courant du GPV pour calculer la puissance, puis sur des ajustements de tension progressifs pour maximiser cette puissance.

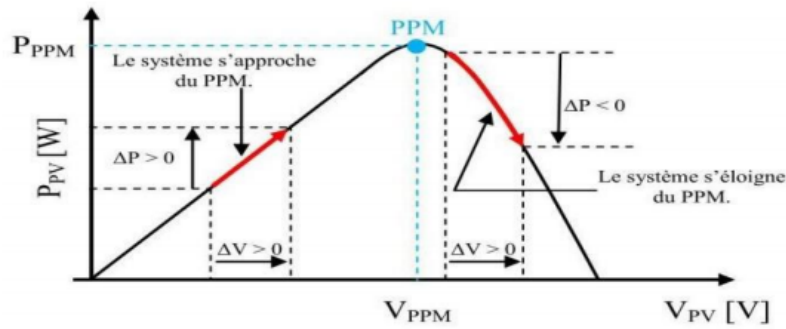


FIGURE 3.3 – Caractéristique P_{pv} (V_{pv} d'un panneau solaire).

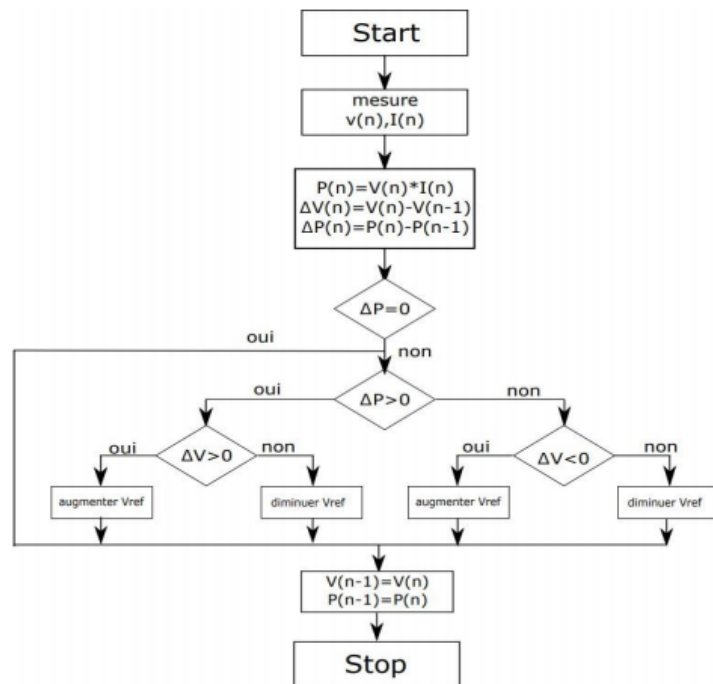


FIGURE 3.4 – Organigramme de la Methode P&O

Cependant, si l'irradiation solaire augmente de manière continue, le système peut s'éloigner du PPM et diverger vers des points de fonctionnement moins optimaux,

comme illustré dans la figure 2.10. Pour pallier cela, des ajustements continus sont nécessaires pour maintenir le système près du PPM malgré les variations de l'irradiation. En résumé, la méthode P&O offre une approche pratique et efficace pour maximiser la

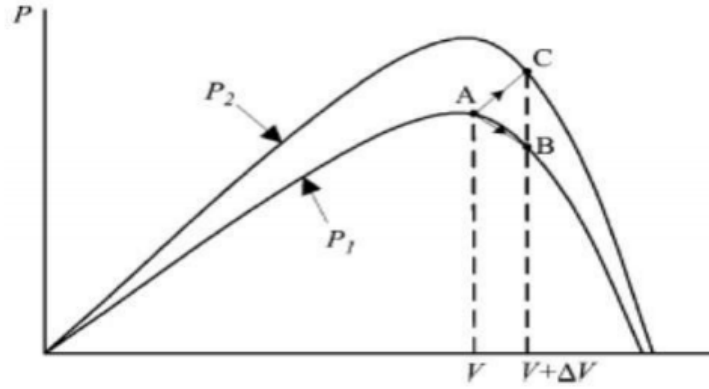


FIGURE 3.5 – Divergence de la divergence de la méthode P&O

puissance d'un système photovoltaïque en ajustant la tension de manière itérative en fonction des variations de puissance observées. Son utilisation nécessite généralement deux capteurs pour mesurer le voltage et le courant du GPV afin d'optimiser en temps réel son fonctionnement.

algorithme de increment de conductance (IncCond) :

Dans l'algorithme de conductance incrémentale (INC), le contrôleur utilise des mesures incrémentielles de la tension et du courant du panneau photovoltaïque (PV) pour prédire l'impact d'une variation de tension (Kriti, & Manju et al. 2018). Bien que cet algorithme requière des calculs plus complexes dans le contrôleur, il peut réagir de manière plus efficace aux changements rapides des conditions météorologiques par rapport à l'algorithme Perturb and Observe (P&O). Comme l'algorithme P&O, des oscillations peuvent se produire dans la puissance de sortie. La méthode INC utilise la conductance incrémentale ($\Delta I / \Delta V$) du champ photovoltaïque pour déterminer la variation de la puissance par rapport à la tension ($\Delta P / \Delta V$). L'algorithme INC identifie le point de puissance maximale en comparant la conductance incrémentale ($\Delta I / \Delta V$) avec celle du réseau (I / V). Lorsque ces deux valeurs sont égales ($\Delta I / \Delta V = I / V$), la tension de sortie correspond à celle du MPP. Le contrôleur ajuste alors cette tension

jusqu'à ce qu'il y ait un changement d'irradiation ou une réinitialisation du processus. L'algorithme INC se base sur le fait que $\Delta P / \Delta V = 0$ au point de puissance maximale, où $P = VI$. Il nécessite seulement deux capteurs, de tension et de courant, pour mesurer la sortie du dispositif PV. L'organigramme de mise en œuvre de l'algorithme INC est illustré à la figure (3.6). L'équation (3.2) qui décrit mathématiquement l'algorithme INC est exprimée comme suit :

$$P = V * I \quad (3.2)$$

Le fait que $P=V.I$ est la règle de la chaîne pour la dérivée des produits par rapport à la tension donnent l'équation (3.3) et (3.4) :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\Delta(VI)}{\Delta V} = \frac{I\Delta V}{\Delta V} + \frac{V\Delta I}{\Delta V} = I + \frac{V\Delta I}{\Delta V} \quad (3.3)$$

$$\frac{I}{V} * \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{1}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.4)$$

Dans les conditions normales, la tension de sortie d'une source est positive. La tâche principale de cet algorithme est donc de rechercher le point de fonctionnement en tension pour lequel la conductance est égale à la conductance incrémentale. Ces concepts sont exprimés par les équations (3.5), (3.6) et (3.7) et représentés graphiquement sur la figure 5. L'algorithme INC dépend de la pente de la courbe P-V. La pente devient nulle au MPP, augmente (positive) sur le gauche du MPP et diminue (négative) sur le côté droit du MPP. Les équations de base de cette algorithme sont les suivantes :

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0 \quad (3.6)$$

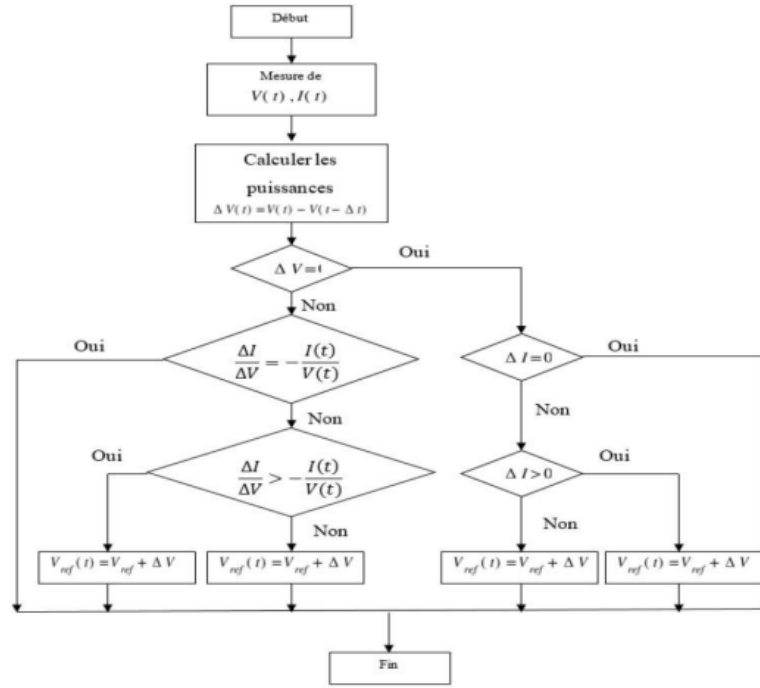


FIGURE 3.6 – Schéma bloc de l'algorithme INC

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0 \quad (3.7)$$

- avec l'équation (3.5) sur le coté gauche de MPP
- avec l'équation (3.6) au MPP
- avec l'équation (3.7) sur le droit gauche de MPP

La pente ($\Delta P/\Delta V$) peut être calculée à l'aide de la tension et du courant de sortie du module de sortie du module PV par rapport à la tension et en fixant le résultat à zéro. Par conséquent, la relation entre la conductance instantanée (I/V) et la conductance incrémentale (I/V) peut être calculée sur la base des équations (3.8), (3.9) et (3.10) comme suit :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \geq -\frac{1}{V} \quad (3.8)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{1}{V} \quad (3.9)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \leq -\frac{1}{V} \quad (3.10)$$

- avec l'équation (3.8) sur le coté gauche de MPP
- avec l'équation (3.9) au MPP
- avec l'équation (3.10) sur le droit gauche de MPP

optimisation d'essaim de particules (PSO)

La méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique fondée sur une population stochastique de points initialement répartis dans un domaine de recherche. Cette méthode, publiée pour la première fois par Kennedy et Eberhart en 1995, s'inspire fortement des comportements grégaires des oiseaux migrateurs qui doivent parcourir de longues distances tout en optimisant leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, par exemple en formant des configurations en V.

L'algorithme PSO

L'algorithme PSO génère un essaim de particules, chaque particule représentant une solution potentielle dans le problème d'optimisation. Ces particules se déplacent dans l'espace de recherche, influencées par leur meilleure solution locale et celle de leurs voisins. Chaque particule possède une position, une vitesse pour se déplacer, et un voisinage défini par un ensemble de particules qui interagissent directement avec elle. Au cours des itérations, chaque particule évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente, cherchant ainsi à converger vers une solution optimale

- $v(t+1)=v(t)+a(t+1)$
- $x(t+1)=x(t)+v(t+1)$

a , v , x et t sont l'accélération, la vitesse, la position et le temps (compteur d'itérations), respectivement. Chaque particule conserve en mémoire sa meilleure position visitée, celle de son meilleur voisin, et la valeur attribuée à la fonction objectif. Les équations qui décrivent le mouvement des particules sont basées sur l'accélération,

la vitesse, la position, et le temps (nombre d'itérations). Les particules ont également accès au meilleur emplacement global trouvé par l'ensemble de l'essaim.

L'accélération de chaque particule est calculée selon une formule qui prend en compte ses attracteurs personnels et globaux, ainsi que des facteurs aléatoires. Cette dynamique favorise la convergence vers une solution optimale tout en évitant la stagnation.

$$a_i = N [c\epsilon_1(pg - x_i) + c\epsilon_2(pi - x_i)] - (1 - N)v_i$$

Où ϵ_1 et ϵ_2 sont des vecteurs de nombres aléatoires tirés de la distribution uniforme sur $[0, 1]$, c et 2 est la constante de rappel et pi et pg sont les attracteurs personnels et global respectivement. Cette formulation de la dynamique des particules souligne le resserrement comme une force de frottement, de sens opposée et proportionnelle à la vitesse. les valeurs standard sont $c = 2.05$ et $N = 0.729843788$.

En résumé, l'algorithme PSO utilise un mécanisme d'essaim pour rechercher des solutions optimales en optimisant le mouvement et l'interaction des particules dans un espace de recherche défini

Commande MPPT directe en utilisant l'algorithme PSO

Dans cette approche de commande MPPT directe utilisant l'algorithme PSO, l'objectif est de trouver le point de puissance maximale (MPP) d'un générateur photovoltaïque en ajustant les rapports cycliques des composants du système. Pour commencer l'optimisation, un vecteur de solutions, représentant les rapports cycliques des N particules de l'essaim, est défini comme suit :

$$x^k = ag = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N] \quad (3.11)$$

Chaque particule maintient sa meilleure position individuelle ($P_{best,i}$) mise à jour si elle trouve une solution avec une puissance supérieure à celle enregistrée précédemment : où f est la fonction coût représentant la puissance de fonctionnement du générateur photovoltaïque. La variable $X_{best,i}$ mémorise donc le meilleur rapport cyclique trouvé par

chaque particule jusqu'à présent (équation 2.7), tandis que la variable G_{best} mémorise le meilleur rapport cyclique atteint parmi toutes les particules de l'essaim.

$$\begin{aligned} f(x^k) &\geq f(X_{best,i}) \\ X_{best,i} &= x^k \end{aligned}$$

Les paramètres PSO utilisés dans cette étude sont déterminés expérimentalement, avec $N = 3$, $c1 = 1$, $c2 = 2$ et $w = 0,5$, choisis après des simulations et des essais. L'algorithme de commande PSO directe est ensuite décrit, avec des étapes telles que l'initialisation aléatoire des particules dans l'espace de recherche, l'évaluation de la fonction coût de chaque particule, la mise à jour des meilleures valeurs individuelles et globales de la fonction coût et des positions actuelles, et enfin la vérification du critère de convergence pour décider de l'interruption du processus d'optimisation. En résumé, cette méthode combine l'algorithme PSO avec une technique de commande directe pour ajuster les rapports cycliques et trouver le MPP d'un générateur photovoltaïque, en utilisant des paramètres déterminés expérimentalement pour guider le processus d'optimisation vers une convergence efficace.

Organigramme du PSO

Le "Cuckoo Search" (CS) est un algorithme d'optimisation inspiré de la nature qui imite le parasitisme de certains oiseaux coucous. Utilisé dans le contexte du MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour les systèmes photovoltaïques, le CS est une technique qui cherche à trouver le point de puissance maximale (MPP) de manière efficace et précise, en tenant compte des variations des conditions environnementales.

Comportement des oiseaux coucous :

La convergence de la technique MPPT CSO dépend principalement de la fonction de vol de Levy et est inspirée par l'intelligence de essaim parasitaire des oiseaux coucous. Le parasitisme est réalisé par différents types d'oiseaux coucous. La recherche parasitaire impliquait trois étapes : intraspécifique, de prise de contrôle et coopérative. Certains oiseaux coucous imitent la couleur et la forme des oiseaux hôtes pour augmenter leur

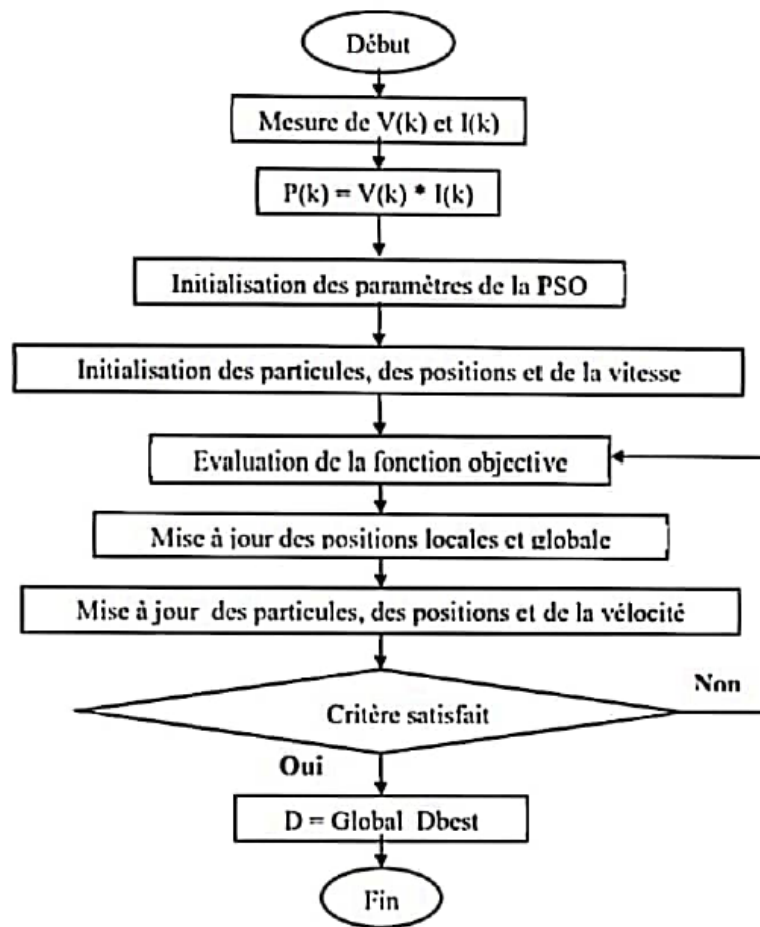


FIGURE 3.7 – Organigramme du PSO

capacité de production. La plupart des oiseaux couvent leurs propres œufs jusqu'à un certain temps. Par conséquent, les chances que les oiseaux hôtes occupent les œufs d'autres oiseaux sont moindres. L'implémentation de CS est donnée dans la figure 4.

Vol de Levy :

Trouver un nid particulier d'oiseaux hôtes est un critère important dans la recherche de coucou. La recherche du nid des oiseaux hôtes est similaire à celle des oiseaux cherchant de la nourriture. Les oiseaux chercheront de la nourriture de manière aléatoire. Le même concept est appliqué pour contrôler le rapport cyclique du convertisseur SEPIC. La recherche de nourriture dans une direction particulière peut être dérivée comme une équation mathématique. Levy est utilisé pour rechercher la taille de pas aléatoire des oiseaux coucous. Les œufs de coucou sont cassés par les oiseaux hôtes en trois étapes.

Dans cela, chaque oiseau donne un œuf à chaque fois. Dans la première itération, le coucou donne la qualité un, puis seulement il passera à l'étape suivante et la dernière est la valeur constante des nids d'oiseaux hôtes. L'implémentation du coucou est donnée dans la figure 4. Différents cycles de travail sont initiés de manière aléatoire au départ, après quoi chacun est donné au système photovoltaïque, et la tension et le courant générés sont utilisés pour estimer la puissance. Le cycle de travail est mis à jour jusqu'à ce que le meilleur cycle de travail optimal et la fonction de fitness soient atteints.[15]

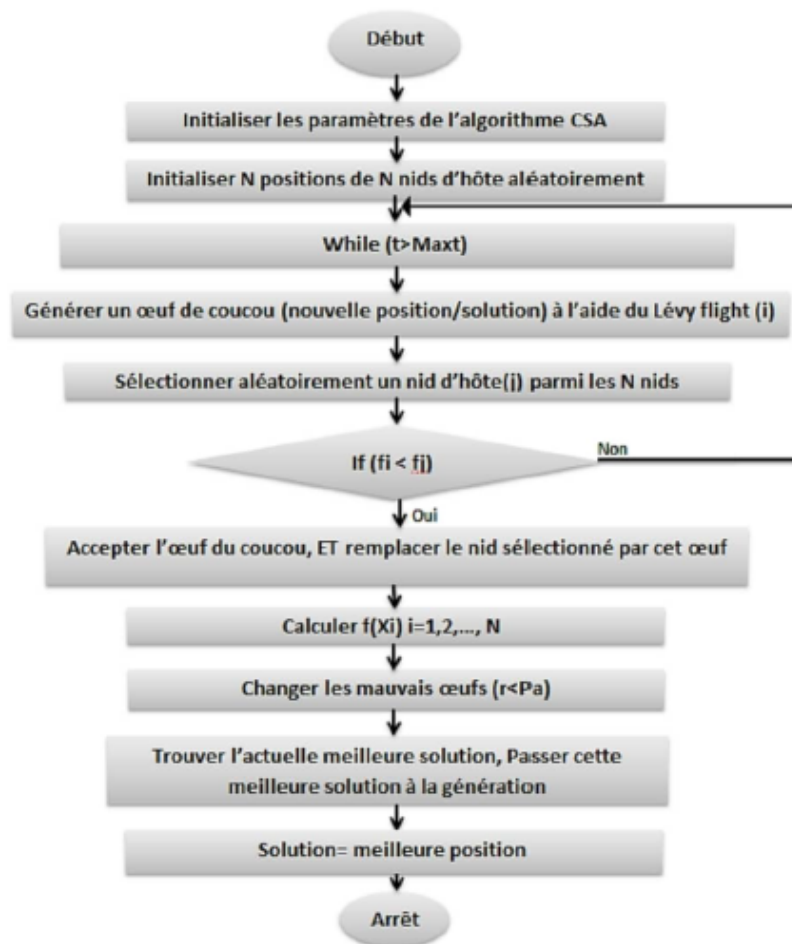


FIGURE 3.8 – Operation of cuckoo search technique

3.5 définitions des différents rendements d'une chaîne de conversion photovoltaïque

Afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie photovoltaïque, l'intégration de convertisseurs DC/AC favorise la réinjection d'énergie sur le réseau, tandis que l'incorporation de convertisseurs DC/DC permet un chargement efficace des éléments de stockage. Actuellement, diverses topologies de conversion d'énergie photovoltaïque sont disponibles, chacune présentant ses avantages et inconvénients spécifiques. Pour faciliter des choix éclairés, l'établissement de critères d'évaluation est essentiel pour permettre des comparaisons directes entre les différentes solutions. De plus, des normes de qualité en constante évolution sont devenues indispensables pour les produits destinés au grand public. Pour ce faire, nous suggérons de nous appuyer sur des critères de rendement pour évaluer les performances de nos étages d'adaptation par rapport aux solutions existantes. Par ailleurs, une chaîne de conversion est considérée optimale lorsque la puissance maximale générée par le générateur photovoltaïque peut être entièrement transférée à la charge sans aucune perte. Afin de tendre vers cet idéal, il est crucial d'identifier précisément les sources de pertes et de les minimiser. Dans cette optique, diverses définitions de rendement, propres à chaque composant de la chaîne (générateur PV, commande MPPT, étage de conversion), sont proposées dans la littérature. En analysant ces définitions et en les utilisant comme critères, nous proposons une chaîne de rendement comme illustré dans la figure (3.9). [16]

3.6 critères d'évaluation d'une commande MPPT :

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM. La puissance P_{in} effectivement délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe, ...). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance. En résumé cela donne la puissance maximale qu'il pourrait produire.

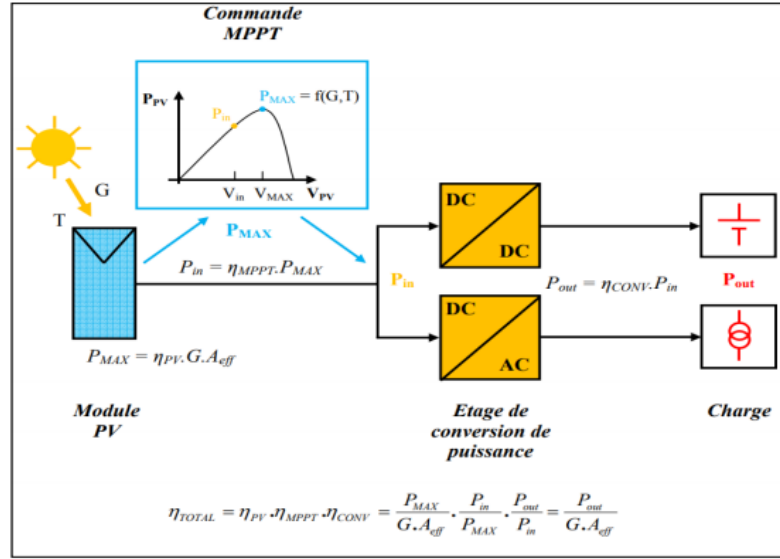


FIGURE 3.9 – Operation of cuckoo search technique

$$\eta_{mppt} = \frac{P_{in}}{P_{max}}$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour évaluer les qualités de ce type de commande.

3.6.1 Simplicité et Coût :

En plus de ses performances théoriques, il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré. En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire,

la commande aussi performante qu'elle soit en termes de rendement, présente trop de contraintes pour être choisie pour ce type d'application.

3.6.2 Réponse dynamique :

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

3.6.3 Flexibilité

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

3.6.4 Compétitive sur une large gamme de puissance :

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la phase essentielle et complexe de notre étude, celle de la recherche du point de puissance maximale (MPPT), tout en explorant les diverses classifications des commandes MPPT. Nous avons examiné en détail les différentes méthodes MPPT couramment citées dans la littérature. La diversité des

approches en matière de commandes MPPT souligne la constante évolution de ce domaine de recherche, où il est ardu de trouver des solutions universelles. Cette dynamique témoigne de la recherche perpétuelle de solutions optimales pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques. En outre, il convient de souligner l'importance croissante de l'intégration de critères de performance et d'efficacité dans l'évaluation des commandes MPPT. L'efficacité énergétique, la réactivité aux changements de conditions météorologiques, la stabilité du suivi du MPP et la minimisation des pertes sont autant d'éléments cruciaux à prendre en compte lors du choix d'une commande MPPT adaptée à un système spécifique. Enfin, il est nécessaire de noter que les avancées technologiques et les innovations continues dans le domaine des énergies renouvelables et de la conversion photovoltaïque ouvrent la voie à de nouvelles approches et à des améliorations constantes dans le domaine du suivi du point de puissance maximale.

Simulation de Système

4.1 Introduction

La simulation est un outil essentiel pour évaluer les performances théoriques d'un système. Cette section nous permettra de simuler un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC/DC et de tester les commandes MPPT. Grâce à cette approche, nous pourrions ajuster facilement les paramètres du système, tels que les conditions météorologiques, et observer l'impact de la commande sur le générateur photovoltaïque. Le logiciel MATLAB et son extension graphique SIMULINK, qui font partie d'un ensemble d'outils intégrés pour le traitement du signal, permettent de simuler des systèmes dans leurs états continus et discrets. Ils sont donc bien adaptés pour tester les commandes MPPT numériques. Ce chapitre est dédié à la simulation et à l'étude comparative des méthodes de commande afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

4.2 Simulation d'un système photovoltaïque :

Comme nous l'avons démontré dans le chapitre précédent, pour que le générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans des conditions optimales, il doit être équipé d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation s'effectue en recherchant automatiquement le point de puissance maximale (PPM) du générateur PV, ce qui est possible lorsque le système se trouve dans un environnement où les conditions météorologiques (ensoleillement, température) et la charge sont stables.

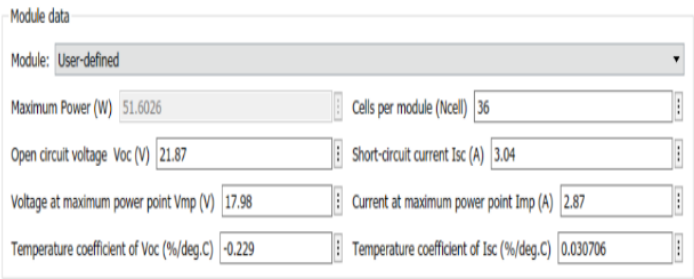


FIGURE 4.1 – Données sur les caractéristiques électriques du module PV

convertisseur buck-boost)	Valeurs
Capacité d'entrée (Cin)	100 μ F
Inductance (L)	0.018 mH
Capacitance (C)	100 μ F
Résistance à la charge (R)	30 Ω

4.3 Schéma du simulationde système photovoltaïque :

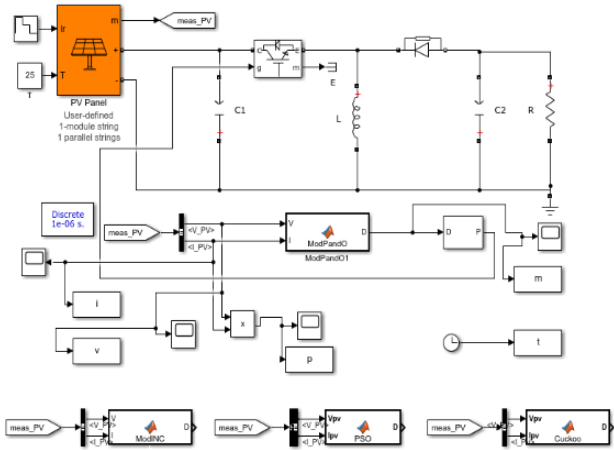


FIGURE 4.2 – Schéma Matlab/Simulink du système photovoltaïque.

4.4 Résultats de la simulation :

4.4.1 Algorithme PO :

a) stable radiation ($1000\text{w}/\text{m}^2$:)

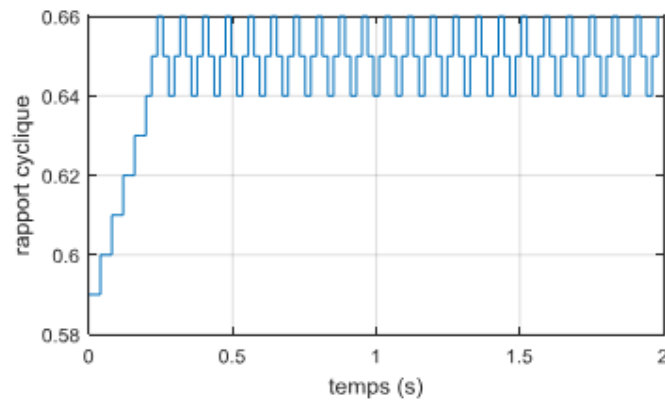


FIGURE 4.3 – Changement de rapport cyclique

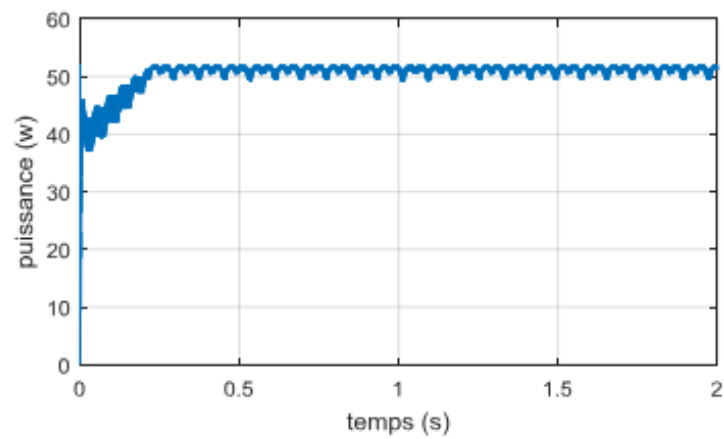


FIGURE 4.4 – Resultat de simulation de PV puissance.

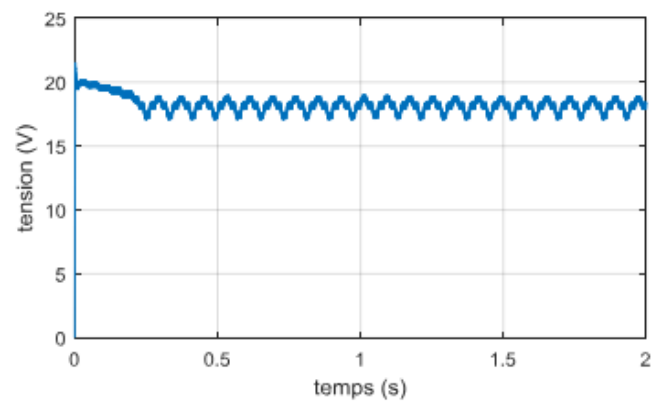


FIGURE 4.5 – Resultat de simulation de PV tension.

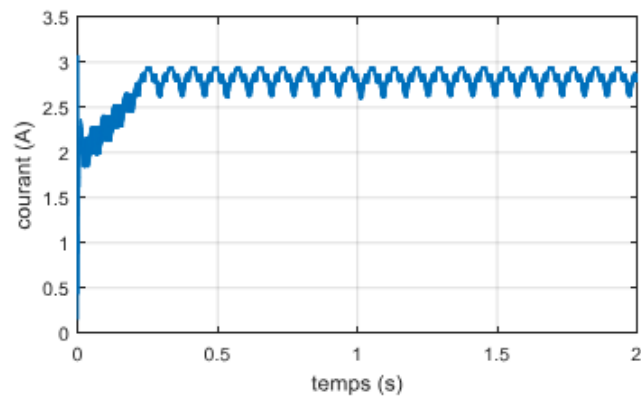


FIGURE 4.6 – : Resultat de simulation de PV courant.

b) variable radiation ($1000 - 750 - 500 \text{ w/ m}^2$) :

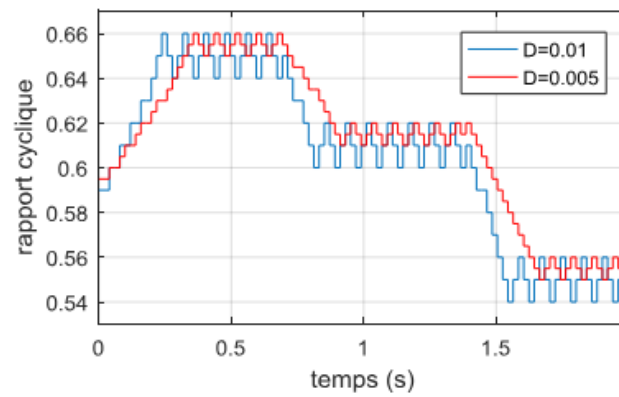


FIGURE 4.7 – Changement de rapport cyclique

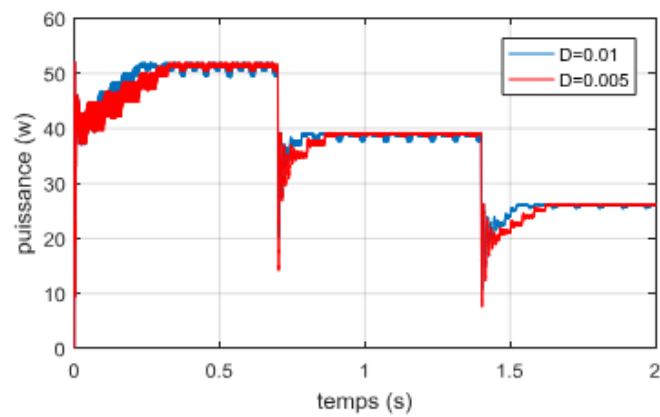


FIGURE 4.8 – Resultat de simulation de PV puissance.

4.4.2 Algorithme INC :

a) stable radiation ($1000 \text{ w}/\text{m}^2$) :

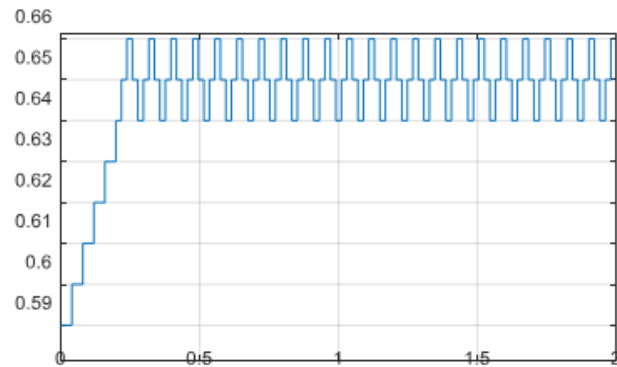


FIGURE 4.9 – Resultat de simulation de PV puissance.

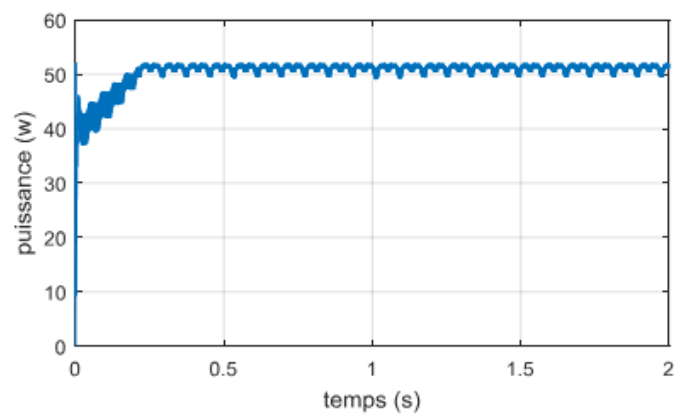


FIGURE 4.10 – La puissance de sortie panneau PV

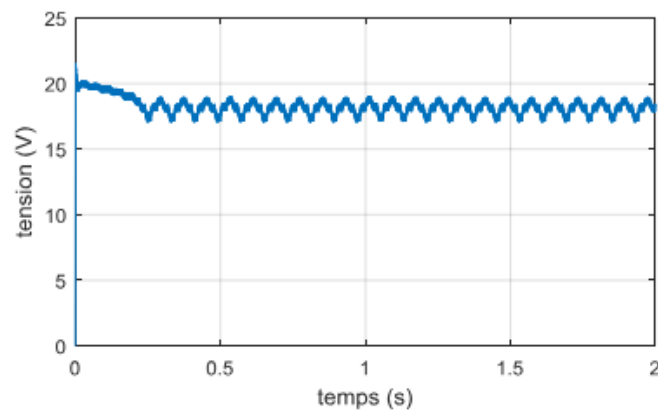


FIGURE 4.11 – Résultat de simulation de PV tension

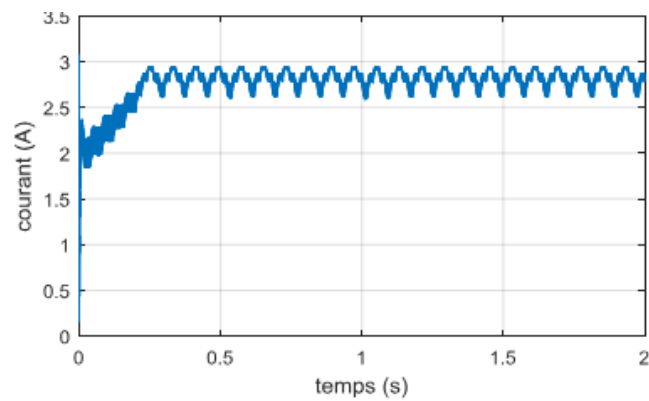


FIGURE 4.12 – Résultat de simulation de PV courant

b) variable radiation ($1000 - 750 - 500 \text{ w/ } m^2$) :

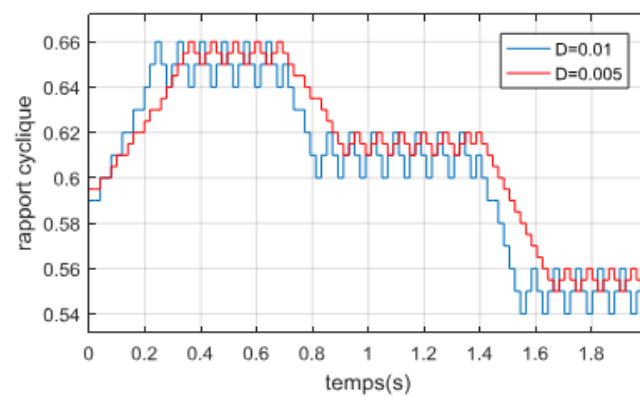


FIGURE 4.13 – Changement de rapport cyclique

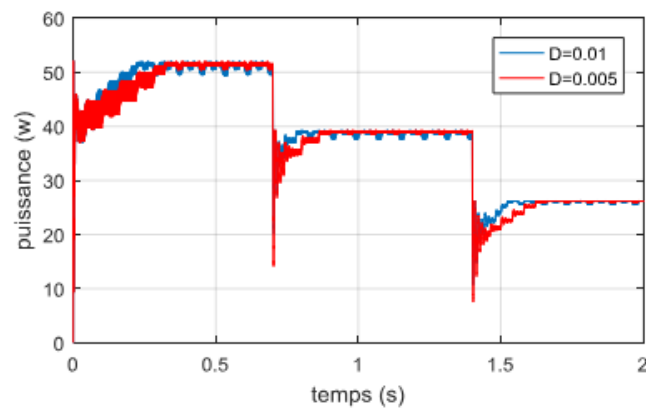


FIGURE 4.14 – Resultat de simulation de PV puissance.

4.4.3 Algorithme de PSO :

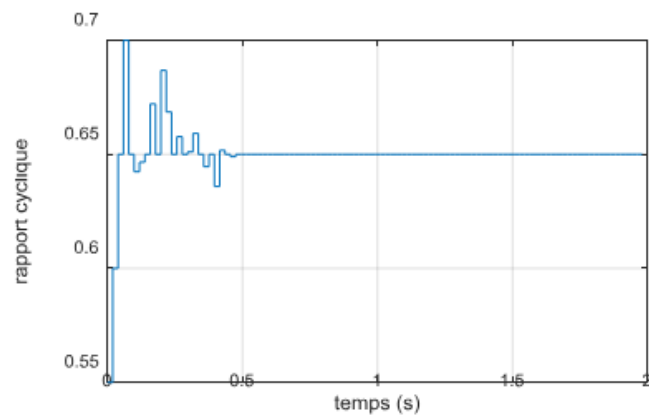


FIGURE 4.15 – Changement de rapport cyclique.

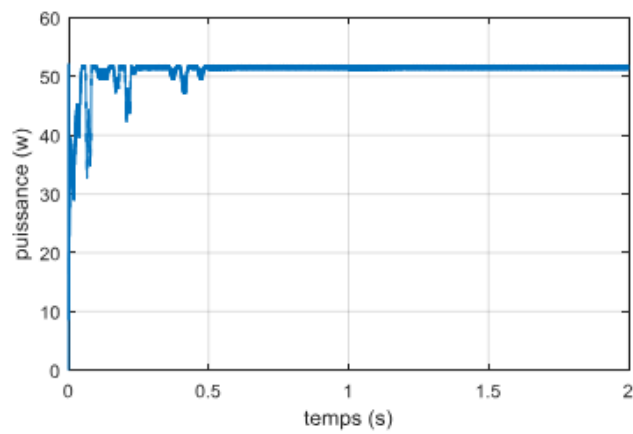


FIGURE 4.16 – Resultat de simulation de PV puissance.

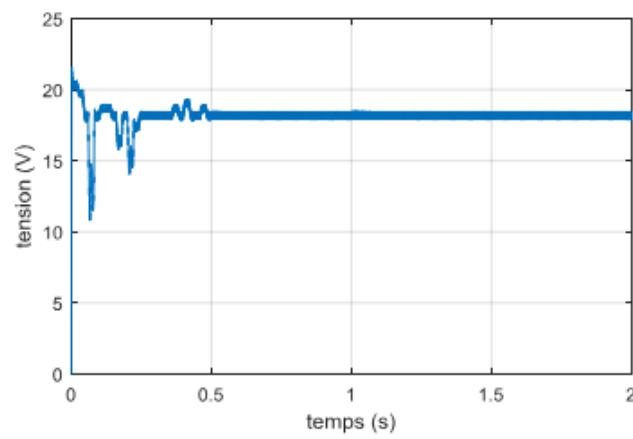


FIGURE 4.17 – Resultat de simulation de PV tension.

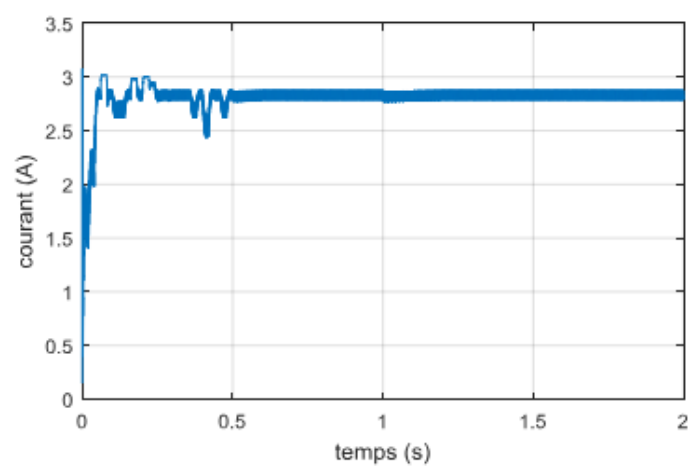


FIGURE 4.18 – Resultat de simulation de PV courant.

4.4.4 Algorithme de coucou search

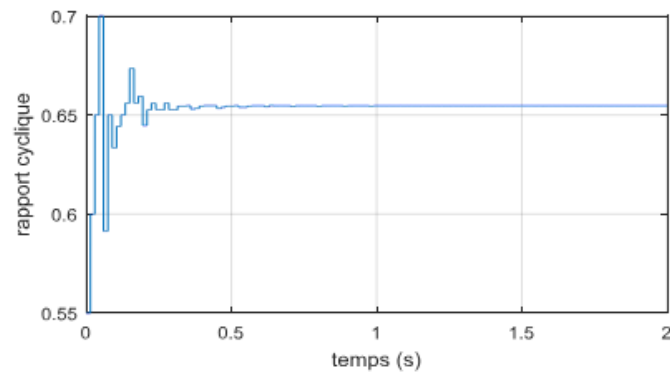


FIGURE 4.19 – Changement de rapport cyclique.

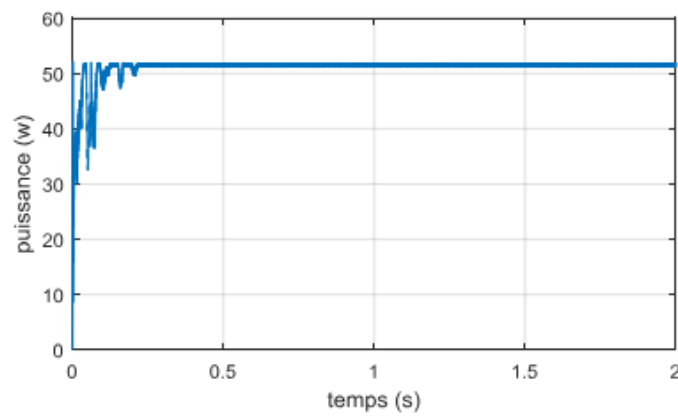


FIGURE 4.20 – Résultat de simulation de PV puissance.

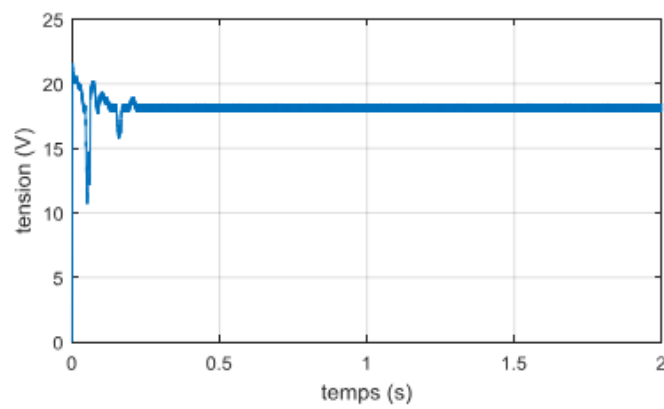


FIGURE 4.21 – Résultat de simulation de PV tension

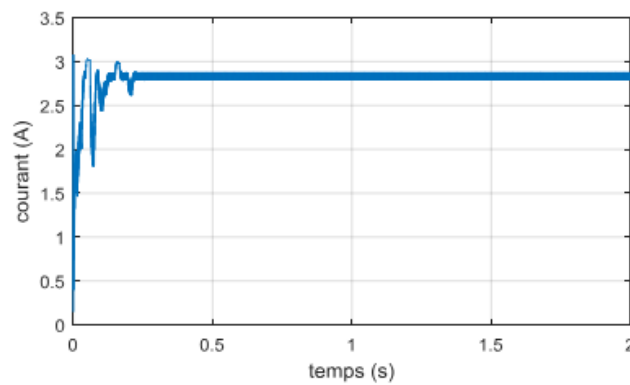


FIGURE 4.22 – Résultat de simulation de PV tension

4.5 Conclusion :

Ce chapitre est pour l'installation et la simulation sous matlab/simulink du système PV, nous avons contrôlé le système par différents types d'algorithmes MPPT, on peut conclure qu'en utilisant les algorithmes MPPT proposés, le panneau PV peut fournir la puissance maximale comme indiqué dans les résultats expérimentaux de PO, INC et CS et POS ont des résultats proches et bons, cependant, il a la capacité de réduire la tension perturbatrice lors de la reconnaissance du MPP. Cette procédure maintient directement une puissance de sortie plus stable par rapport au MPPT conventionnel où la puissance de sortie fluctue autour du MPPT. Selon la simulation, il peut être déduit à l'aide d'algorithmes professionnels, le panneau photovoltaïque peut économiser le maximum de puissance.

Conclusion Générale

La demande mondiale d'énergie reste plus importante qu'auparavant et ne cesse d'augmenter, et les ressources énergétiques naturelles telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent constamment et remarquablement en raison de la grande expansion et du développement industriels de ces dernières années. Pour couvrir les besoins énergétiques. Pour cela, nous recherchons d'autres moyens et ressources pour produire de l'énergie qui puisse répondre à la demande, ou plutôt se rapprocher de la satisfaction de la demande. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite, et surtout, elle est continue et non organisée. Le travail présenté porte sur une analyse de modélisation et de simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par commande numérique (contrôleur MPPT) qui assure le maintien de la puissance maximale fournie par le générateur PV à partir de l'énergie solaire. Dans un premier temps, nous avons fourni des informations générales sur les systèmes photovoltaïques, le principe de l'effet photovoltaïque et la cellule photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque et ses performances. Nous avons vu que l'effet de la température et du rayonnement sur les propriétés de (I-V), (P-V), et nous concluons que les performances du générateur se détériorent avec l'augmentation de la température, une diminution de l'intensité de l'éclairage. Nous avons examiné pour la deuxième fois certains types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ensuite, nous avons étudié les différentes manières de suivre le point de puissance maximale fourni par le générateur photovoltaïque et sa structure, et enfin les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de la commande MPPT peut améliorer considérablement les performances des installations photovoltaïques.

Bibliographie

- [1] Rim Berahab. Energies renouvelables en afrique : Enjeux, défis et opportunités. Policy Center for the New South : Rabat, Morocco, 2019.
- [2] Francis Meunier. Les énergies renouvelables. Le Cavalier bleu, 2008.
- [3] Anne Labouret and Michel Villos. Energie solaire photovoltaïque, volume 3. Dunod Paris, 2006.
- [4] Ghislain Gosse, Claude Varlet-Grancher, Raymond Bonhomme, Michel Chartier, Jean-Michel Allirand, and Gilles Lemaire. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. Agronomie, 6(1) :47–56, 1986.
- [5] J Horowitz. Contribution du rayonnement nucléaire au spectre continu γ accompagnant la radioactivité β . Journal de Physique et le Radium, 13(7-9) :429–430, 1952.
- [6] Paul Christopher Bagshaw. Automatic prosodic analysis for computer aided pronunciation teaching. PhD thesis, University of Edinburgh PhD thesis, 1994.
- [7] Ariane Neusser. Stand-alone photovoltaic system : study of a modular concept with distributed communication and control units ; systeme photovoltaïque autonome : etude d’une structure modulaire a gestion repartie. 2004.
- [8] Gilles Notton, Ionut Caluianu, Iolanda Colda, and Sorin Caluianu. Influence d’un ombrage partiel sur la production électrique d’un module photovoltaïque en silicium monocristallin. Journal of Renewable Energies, 13(1) :49–62, 2010.

- [9] Nourelhouda Bougoffa et al. Modélisation et simulation d'un système hybride de stockage énergétique dans un réseau autonome. PhD thesis, Université KASDI Merbah Ouargla.
- [10] Olivier Deleage. Conception, réalisation et mise en oeuvre d'un micro-convertisseur intégré pour la conversion DC/DC. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009.
- [11] Ahmad Ghamrawi, Jean-Paul Gaubert, and Driss Mehdi. Contrôleur stabilisant incluant un nouvel algorithme mppt pour un convertisseur dc-dc quadratique dédié aux systèmes solaires photovoltaïques. In Symposium de Génie Electrique, 2018.
- [12] MMC Merlin, TC Green, PD Mitcheson, DR Trainer, DR Critchley, and RW Crookes. A new hybrid multi-level voltage-source converter with dc fault blocking capability. 2010.
- [13] Cedric Cabal. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [14] Elmahdi Elgharbaoui, Ahmed Essadki, and Tamou Nasser. Mppt commands for a photovoltaic generator using the incremental conductance method and the fuzzy logic command. In 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), pages 1–6. IEEE, 2014.
- [15] Youssra Rais, Alia Zakriti, and Abdellatif Khamlichi. Recherche du point maximum de puissance d'un module photovoltaïque. PUBLIC CIBLE.
- [16] LAU Bernard. Les systemes a concentration dans la conversion photovoltaïoue bii. an et perspectives.

LISTE DES SYMBOLS ET ABRÉVIATIONS

E : Eclairement (W/m^2).

Λ : vitesse spécifique

H : Constante de PLANCK [J/s]

E_{pv} : L'énergie de photon [eV]

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I : Le courant généré par la photopile (A).

I_s : Le courant de saturation (A).

I_{sc} : le courant du court-circuit (A).

I_L : Le courant de l'inductance du hacheur (A).

I_{pv} : Courant délivré par le générateur PV (A).

V : la tension aux bornes de la

q : La charge de l'électron $=1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

R_s : La résistance série (Ω).

R_{sh} : La Résistances shunt (Ω).

T : La température de fonctionnement en Kelvin. **A** : le facteur de qualité de la cellule.

V_{th} : La tension thermique.

V_{oc} : La tension de circuit ouvert(V).

P : La puissance caractéristique(W).

P_{max} : La puissance maximale(W). **FF** : Facteur de forme.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A) **η** : Rendement de la cellule

η_{mpp} : Rendement du MPPT

MPPT : maximum power point tracking

PPM : point de fonctionnement optimale

G : L'éclairement de référence (1000 W/m^2).

C : Condensateur de filtrage de sortie du hacheur

[F].L : Inductance du hacheur.

Q : L'interrupteur CS : convertisseur statique.

D : Rapport cyclique.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

PO : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

DC-DC : conversion continue-continue.

PSO : Optimisation d'essaim de particules.

Inc : Incrément de conductance.

CS : Coucou search du hacheur.

Résumé:

Ce travail présente une étude de commande, modélisation et simulation des systèmes PV autonomes. L'objectif de ce travail est de comparer entre les différentes commandes MPPT, qui sont assurés la poursuite du point de puissance maximale. Cette comparaison est basée sur le rendement, la complexité, la convergence, les types de capteurs et l'influences de l'éclairement et de la température sur les systèmes PV autonomes. Des résultats de simulation sont présentés pour valider cette comparaison des différentes commandes MPPT. Mots clés : Générateur PV, survolteur, MPPT, Système PV autonome, conditions climatiques.

الملخص:

يقدم هذا العمل دراسة التحكم والنمذجة والمحاكاة للأنظمة الكهروضوئية المستقلة. الهدف من هذا العمل هو المقارنة بين أوامر MPPT المختلفة، والتي تضمن السعي وراء أقصى نقطة طاقة. تعتمد هذه المقارنة على الإنتاجية والتعقيد والتقارب وأنواع المستشعرات وتأثيرات الإشعاع الضوئي ودرجة الحرارة على الأنظمة الكهروضوئية المستقلة. يتم تقديم نتائج المحاكاة للتحقق من صحة هذه المقارنة لأوامر MPPT المختلفة. الكلمات المفتاحية: مولد كهروضوئي، محول معزز، MPPT، نظام كهروضوئي مستقل، ظروف مناخية.

Abstract

This work presents a of control, modeling and simulation of stand-alone PV systems. The objective of this work is to compare between the different MPPT algorithms, which are ensured the tracking of the maximum power point. This comparison is based on efficiency, complexity, speed of convergence, sensor types, and irradiance and temperature influences on stand-alone PV systems. Simulation results are presented to validate this comparison of the different MPPT controls. Keywords: PV generator, Boost, MPPT, Stand-alone PV system, Climatic conditions.