

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



FACULTE DE TECHNOLOGIE DOMAINE : Génie électrique
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE FILIERE : Electrotechnique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Intitulé

**Commande Backstepping d'un système
photovoltaïque alimente un site isolé**

Proposé et dirigé par:
CHEBABHI Ali

Présenté par :
MAALMI djamel
NOUI houssam eddine

Soutenu devant le jury composé de :

Dr : CHERIF BILAL Djamel Eddine Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Président

Dr : CHEBABHI Ali Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Rapporteur

Dr : ROUABHIRiyadh Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Examineur

Année Universitaire : 2021 – 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- A mes la famille Noui et La famille Maalmi
- A mes chers amis
- A mes professeur encadré Ali chebabha
- Au professeur qui nous a aidé à travailler, M. dia

Remerciements

- Tout d'abord, nous remercions Allah, et tous ceux qui nous ont donnés la force et la patience pour accomplir cette tâche modeste
- A la fin de ce travail, nous remercions sincèrement monsieur **Dr. CHEBABHA Ali** ,pour ses remarques, ses conseils considérables et ces critiques constructives.
- Nous remercions de tous nos cœurs **Dr. Daia eddine mohamed cherif** pour sa disponibilité et pour son soutien.
- Nous remercions tous les enseignants qui nous ont encadré durant notre cursus universitaire et tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont toujours soutenus par leurs respects et leurs gentillesse

Résumé:

Le générateur photovoltaïque est une source caractérisée par un seul point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions climatiques. Une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge permet de diminuer le coût de l'installation de tels systèmes. Une utilisation optimale de l'énergie fournie par le générateur solaire nécessite l'utilisation des moyens techniques permettant d'assurer cette tâche.

L'objectif de cette mémoire est de contribuer à l'optimisation d'une chaîne de conversion PV. Dans ce mémoire, nous avons étudié un système de production de l'énergie photovoltaïque. Simulations ont été étudiées à savoir la maximisation de puissance MPPT par la technique 'perturbe et observe' (P&O) et backstpping pour assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque à l'aide du convertisseur boost classique, Les résultats de la simulation obtenue sont très encourageants.

ملخص

النقطة وفقاً للظروف المناخية. ويقلل التكيف الملائم بين المولد الشمسي والحمل من تكلفة تركيب هذه النظم. يتطلب الاستخدام الأمثل للطاقة التي يوفرها المولد الشمسي استخدام الوسائل التقنية لضمان هذه المهمة الغرض من هذه الذاكرة هو المساهمة في تحسين سلسلة تحويل الكهروضوئية. في هذا الموجز، درسنا نظاماً لإ «perturbe et observer» بواسطة MPPT نتاج الطاقة الكهروضوئية. تمت دراسة عمليات المحاكاة، أي تعظيم طاقة لضمان استمرار الطاقة القصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي backstping وتقنية (P&O) «observer» باستخدام محول التعزيز التقليدي، نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية.

Mots clés : Système photovoltaïque, Convertisseur boost, Commande MPPT, P&O.

Notations

MPPT Maximum Power Point Tracking

PV Photovoltaïque

P&O Perturbation et observation

MPP Pointe de puissance maximale

I.	CHAPITRE 1: L'Énergie Solaire Photovoltaïques	5
I.1	Introduction	6
I.2	L'énergie solaire	6
I.3	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	7
I.4	Rayonnement Solaire	8
I.5	Les différents types de rayonnement solaire	9
I.6	Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire	10
I.6.1	Les avantages	10
I.6.2	Les Inconvénients	10
I.7	Types des cellules PV	11
I.7.1	Cellules mono-cristallines :	11
I.7.2	Cellules poly-cristallines :	12
I.7.3	Cellules amorphes :	13
I.8	Potentiel solaire en Algerie	14
I.9	Le générateur photovoltaïque :	16
I.10	Paramètres de la cellule photovoltaïque :	17
I.11	Modèle mathématique d'une cellule solaire:	18
I.12	Modèle mathématique d'un panneau solaire de Ns cellules en série :	20
I.13	Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque :	22
I.14	Conclusion	22
II.	CHAPITRE 2: Convertisseurs DC/DC (hacheurs)	24
II.1	Introduction	25
II.2	Les convertisseurs statiques	25
II.3	Les différents types de convertisseurs statiques :	25
II.4	Convertisseurs DC/DC (hacheur)	26

II.4.1	Différents types d'hacheurs.....	27
II.4.2	Convertisseur buck.....	27
2.1.1	Convertisseur Boost.....	30
I.2.2	Convertisseur Buck-Boost :.....	33
II.5	Analyse et choix du convertisseur.....	36
II.6	Avantage de convertisseur BOOST.....	37
II.7	CONCLUSION.....	37

III.	Chapitre 3:Technique de poursuites du point de puissance maximale basé sur PI régulateur.....	38
III.1	Introduction :.....	39
III.2	La Commande par le régulateur PI.....	39
III.3	Caractéristiques des régulateurs [26].....	41
III.3.1	Stabilité.....	41
III.3.2	Précision.....	41
III.3.3	Rapidité.....	41
III.4	Modélisation d'un convertisseur boost.....	41
III.5	Techniques de commande MPPT.....	48
III.5.1	Méthodes indirectes.....	49
III.5.2	Méthodes directes.....	49
III.6	Méthode de perturbation et observation (P&O).....	50
III.7	Avantages et inconvénients de P&O.....	56
III.7.1	Avantages.....	56
III.7.2	Inconvénients.....	56
III.8	Conclusion.....	56

IV.	Chapitre 4:La Commande par backstepping	57
IV.1	Introduction	58
IV.2	La Commande par backstepping	58
IV.3	A. commande backstepping	59
IV.4	Résultat de simulation	61
IV.5	Conclusion	71
V.	Bibliography	76

Liste des Figures

Figure I 1	Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	8
Figure I 2	Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes[9].....	9
Figure I 3	Courbes d'ensoleillement typique par heure [9].....	9
Figure I 4	Les différentes composantes du rayonnement solaire [DIAS, 2.1][10].....	10
Figure I 5	Module Monocristallin de silicium.....	12
Figure I 6	Module de silicium polycrystallin.....	13
Figure I 7	Vue en coupe schématique d'une cellule amorphe de film mince de Si.....	14
Figure I 8	Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet).....	15
Figure I 9	Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I 10	Energie moyenne reçue en Algérie.....	16
Figure I 11	Groupement de panneaux solaires photovoltaïques.....	17
Figure I 12	Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV.....	18
Figure I 13	Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	19
Figure I 14	Groupement de Ns cellules.....	20
Figure I 15	Matrice solaire formée de plusieurs groupes de colonnes solaire formant une generateur photovoltaïque.....	22
Figure II 1	Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.....	26
Figure II 2	Principe de base d'un hacheur.....	27
Figure II 3	Schéma de base d'un convertisseur Buck.....	27
Figure II 4	Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck [21].....	28
Figure II 5	Circuit équivalent du Buck quand l'interrupteur est fermé.....	28
Figure II 6	Circuit équivalent du Buck quand l'interrupteur est ouvert.....	29
Figure II 7	La fonction hacheur Boost.....	30
Figure II 8	Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [21].....	31
Figure II 9	Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	31
Figure II 10	Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.....	32
Figure II 11	Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost.....	33
Figure II 12	Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-boost.....	34

Figure .	II 13 Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est fermé	34
Figure .	II 14 Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est ouvert	35
Figure .	II 15 Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique [24].	36
Figure	III 1 exemple de regulation utilisant le controlleur PI	40
Figure.	III 2 Schéma synoptique de la commande PI	40
Figure.	III 3 Convertisseur boost switch ON	42
Figure.	III 4 Convertisseur boost switch OFF	42
Figure.	III 5 la stratégie de commande proposer	44
Figure.	III 6 commande d'un système photovoltaïque par régulateur PI	45
Figure	III 7 comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur PI	46
Figure	III 8 le courant référence dans les deux cas	47
Figure	III 9 Courant de PV en fonction du temps	47
Figure	III 10 la puissance de PV en fonction du temps	48
Figure.	III 11 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P _{MAX} du GPV.	49
Figure.	III 12 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	51
Figure.	III 13 Comportement de l'algorithmme P&O sous un changement de l'éclairement	51
Figure.	III 14 Organigramme de la méthode P&O	53
Figure.	III 15 Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation	55
Figure	IV 1 schéma commande backstepping avec la Commande mppt	58
Figure	IV 2 représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié.	62
Figure	IV 3 Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB	63
Figure	IV 4 Schéma bloc du GPV dans SIMULINK/MATLAB	63
Figure	IV 5 Schéma bloc du la-strategie-de-commande	64
Figure	IV 6 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V	65
Figure	IV 7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V	65
Figure.	IV 8 Effet de la température sur la caractéristique I-V	66
Figure.	IV 9 Effet de la température sur la caractéristique P-V	66
Figure.	IV 10 le profile de simulation de condition atmosphérique	67
Figure.	IV 11 le profile de simulation de condition atmosphérique	67

Figure. IV 12 comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur PI
68

Figure. IV 13 comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur
Backstepping..... 68

Figure IV 14 courant référence dans les deux cas..... 69

Figure. IV 15 le courant référence dans les deux cas..... 69

Figure . IV 16 Courant de PV en fonction du temps..... 70

Figure IV 17 la puissance de PV en fonction du temps..... 70

Liste des Tableaux

Table I 1 Potentiel solaire en Algéri..... 14

Table II 1 Comparaison entre les structures DC/DC basse tension non-isolé [25]..... 37

Table IV 1 Paramètres du système photovoltaïque étudié..... 61

Table IV 2 paramètres du convertisseur hacheur boost..... 61

Table IV 3 comparaison entre les contrôles PI et backstepping..... 71

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années la production et la demande énergétique mondiale de source fossile est un défi de grande importance pour répondre à l'accroissement de la population et à la hausse du niveau de confort de nos sociétés modernes et la demande des niveaux d'énergie dans les sociétés industrialisées continue d'augmenter. Les sources d'énergie fossiles (Pétrole, gaz, charbon et l'uranium ...). D'autre part, la consommation élevée de ces sources non renouvelables donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution et effrayante réduit les réserves de ce type d'énergie pour les générations future[1] [2].

Aujourd'hui, la science s'est intéressée nouvelles sources énergies appelle énergies renouvelables, le secteur de ces derniers est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et à exploiter des sources de plus en plus facilement, décentralisées l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie, la biomasse, l'énergie solaire. Qui sera étudiée dans ce mémoire l'énergie solaire photovoltaïque [3].

La production d'énergie sur la base de l'énergie solaire photovoltaïque nécessite de grandes capacités ainsi qu'à toutes les sources d'énergies renouvelables disponibles. Elle est propre et silencieuse, gratuit et disponible dans la plupart des régions du monde . Il a été développé à une échelle plantaire de plus de centaines de gigawatts et pourrait devenir la principale source d'électricité à l'avenir [4].

L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet PV. Les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque (PV) qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé [5]. En raison des fortes caractéristiques électriques non linéaires des cellules photovoltaïques , leur combinaison peut améliorer l'efficacité du système photovoltaïque en utilisant les solutions suivantes technologie de recherche de point de la puissance maximal (appelée technologie MPPT), ou via un convertisseur

DC- DC.

Comprendre que l'objectif fondamental de toute recherche est l'amélioration globale des performances du système de conversion photovoltaïque (PV). Lorsque le générateur photovoltaïque fournit une charge, quelle que soit sa nature, cela ne signifie pas nécessairement que la rentabilité de l'ensemble du système est faible, mais l'équivalence est acceptable. Le rendement et le coût moyen d'exploitation déterminent l'efficacité de l'utilisation de l'énergie solaire. Afin d'avoir une bonne adaptabilité et un rendement élevé, plusieurs normes et techniques d'optimisation du rendement des systèmes photovoltaïques ont été appliquées. Parmi ces techniques, on retrouve la technique "poursuite de point de Puissance Maxima le " MPPT ("Maximum power point Tracker" en anglais).

Concernant ce travail, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement, à l'étude et développement de l'étage d'adaptation pour obtenir point de puissance maximale parfait d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelles que soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite amélioration de convertisseur DC- DC.

Ce travail comporte trois chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion sont organisées.

Dans le premier chapitre, après avoir présentons différentes sources d'énergie Énergie renouvelable actuelle, nous nous concentrons sur la production Photovoltaïque. Et étudient le système photovoltaïque et leurs composants, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Et dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les convertisseurs et étudié convertisseur hacheur et ses types boost, buck, boost buck, et nous avons étudié convertisseur boost plus en profondeur.

Le troisième chapitre, présente la simulation du panneau PV et le dimensionnement des différents paramètres du hacheur élévateur utilisé, le système étudié et les résultats de la simulation sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK) de l'ensemble générateur photovoltaïque, hacheur élévateur, charge commande MPPT, pour une température variable et un éclairage

variable, et nous appliquons la commande MPPT (Technique PI et backstepping) pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale parfaite.

I. CHAPITRE 1: L'Énergie Solaire Photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire est disponible partout sur la planète en des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. Son apport est variable, au gré des jours et des saisons, mais elle est relativement prévisible. Même si elle est relativement diluée, son rapport énergétique annuel pourrait répondre à la consommation énergétique de la plupart des pays.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais des capteurs fabriqués avec des matériaux semi-conducteurs, à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe). Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce chapitre décrit les concepts de base de systèmes photovoltaïques et de production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque [6].

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie de rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière prévenante sur la surface de la terre après filtrage par l'atmosphère terrestre. Cette énergie produite par l'homme en captant le rayonnement émis par le soleil principalement sous forme électrique ou thermique, c'est l'une des principales formes d'énergies renouvelables.

Dans une maison solaire, l'apport solaire permet de faire de l'économie importante. Cetype de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordé au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. L'énergie solaire permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un cout proportionnel quasi nul [14].

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre $150 \cdot 10^6$ km. La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à $90 \cdot 10^{15}$ GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que $180 \cdot 10^6$ GW. Avant d'arriver à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dut principalement aux phénomènes

d'absorption et de diffusion. Aussi, on introduit la notion de l'éclairement qui est la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteint 1 kW/m pour un site situé au niveau de la mer.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et ce malgré une atténuation importante à la traversée de l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante, quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [4].

1.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le mot photovoltaïque est composé du terme photo, qui signifie lumière et de voltaïque dont l'origine est le nom du découvreur de la pile électrique Volta. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière (photons) génère une tension électrique (Volt) donc basée sur l'effet photovoltaïque qui se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique du type continu directement utilisable [7]. Le courant obtenu est un courant continu et la tension obtenue est de l'ordre de 0.5 V.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir engendrant ainsi un pair électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule ; l'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique. Les cellules PV (photovoltaïques) sont assemblées pour former des modules.

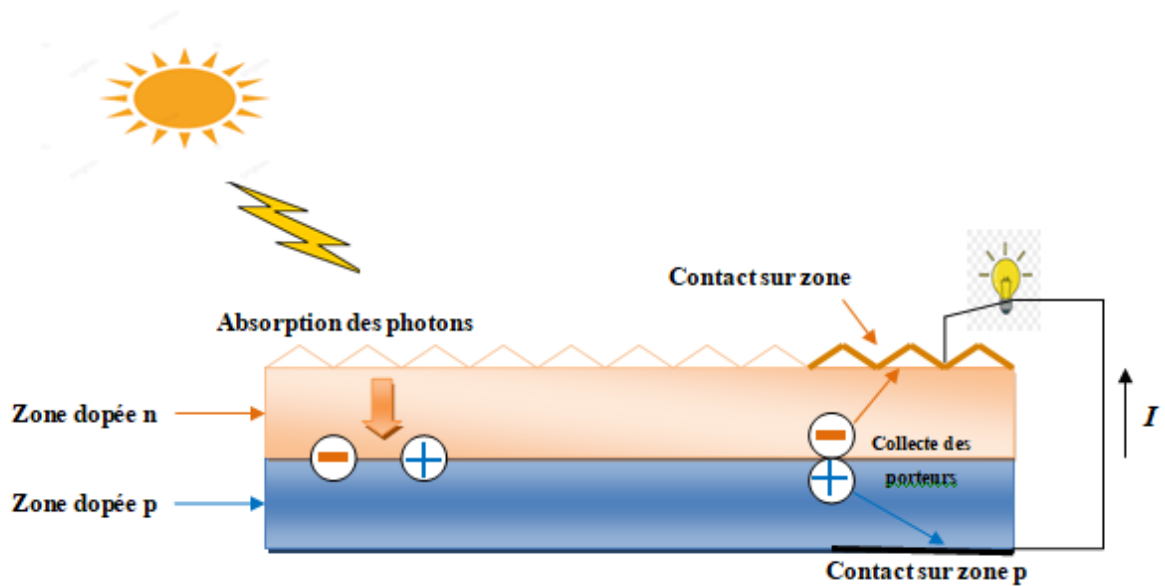


Figure 11 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

1.4 Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire transmis dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m^2 [6]. 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 [6-7].

En résumé, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivante [9]:

- 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 I.2 et I.3).

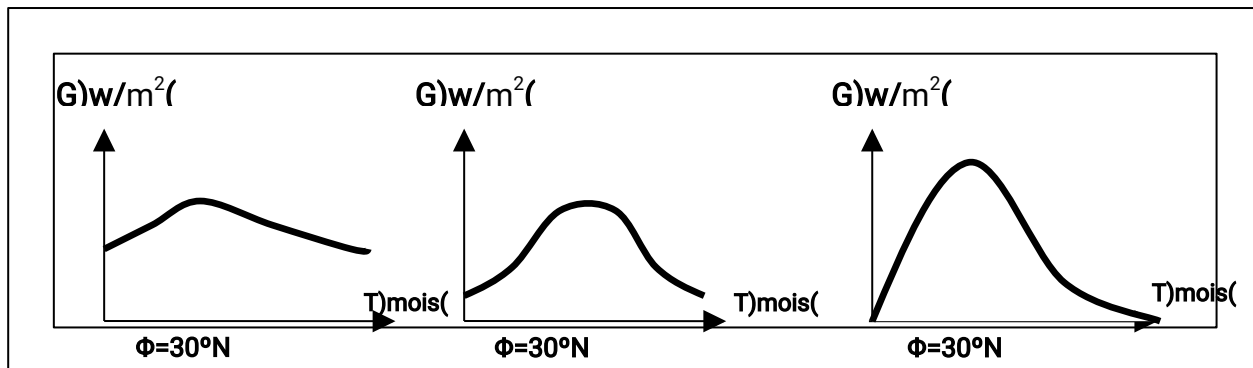


Figure I.2 Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes[9]

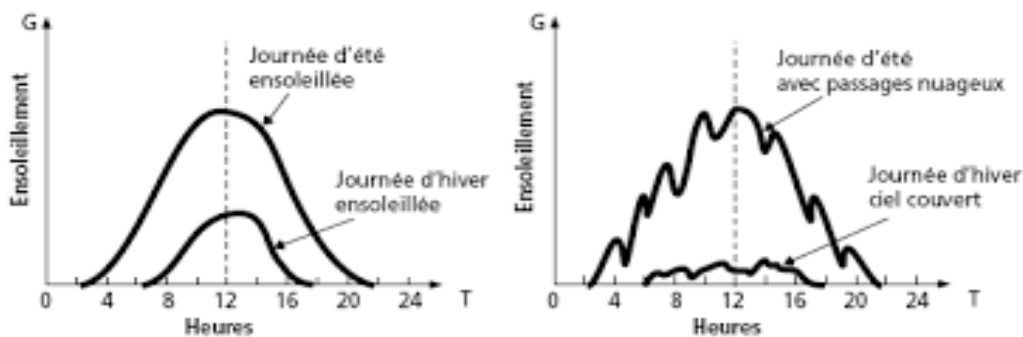


Figure I.3 Courbes d'ensoleillement typique par heure [9]

I.5 Les différents types de rayonnement solaire

Le gisement solaire ou "mine d'énergie" qu'est le soleil est à l'origine directement de la forme d'énergie photovoltaïque disponible sur la terre. La puissance émise par le soleil est estimée à $1.7 \cdot 10^{23}$ kW dont une très petite partie atteint le globe terrestre; elle est de l'ordre de $8.5 \cdot 10^{13}$ kW [8]. Uniquement 70% (environ $6 \cdot 10^{13}$ kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère.

Le rayonnement solaire arrive au sol, soit directement soit après certaines atténuations ou déperditions résultant des phénomènes d'absorption et/ou de diffusion par les aérosols (poussières de diverses origines), les molécules d'eau et les différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...) présents dans l'atmosphère. On décompose le rayonnement global ou rayonnement total terrestre (Figure I.4) (en rayonnement direct, rayonnement provenant directement du soleil et en rayonnement diffus, rayonnement

CHAPITRE 1 : L'Énergie Solaire Photovoltaïques

provenant de l'atmosphère ou de la voûte céleste [10]

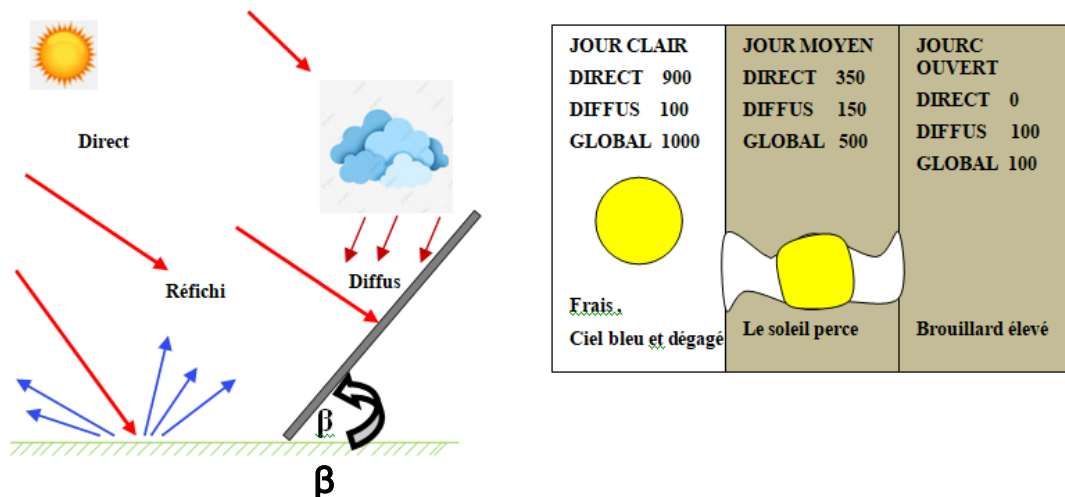


Figure . 14 Les différentes composantes du rayonnement solaire [DIAS, 2.1][10]

1.6 Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire

1.6.1 Les avantages

La technique photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.[11]

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technique photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.6.2 Les Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.[11]

CHAPITRE 1 : L'Énergie Solaire Photovoltaïques

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associées soient judicieusement choisis.

1.7 Types des cellules PV

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [9].

1.7.1 Cellules mono-cristallines :

La pile solaire de silicium monocristallin est faite d'un grand monocristal de silicium pur. Ce monocristal est en grande partie fabriqué par la méthode de Czochralski.

Il se compose de la fonte de grande pureté de silicium semi-conducteur ayant seulement quelques ppm d'impuretés dans un creuset à 1425 degrés Celsius. Pendant ce procédé de fonte, des atomes d'impuretés se dopant tels que le bore (pour le semi-conducteur de type p) ou les phosphores (pour le semi-conducteur de type n) sont ajoutés au silicium fondu pour doper le silicium ; pour des cellules PV le dopant préféré est le bore. La deuxième étape consiste à plonger un cristal en tige dans le silicium fondu servant d'initiateur de cristallisation. Le cristal a ainsi une orientation bien définie. Ensuite, la tige du cristal est soigneusement retirée et simultanément tournée. Les gradients de température, la vitesse d'extraction et la vitesse de rotation doivent être contrôlés avec précision. Le résultat est ainsi un monocristal, cylindrique de grande taille. Le procédé de fonte a besoin à la fois d'une atmosphère inerte (par exemple l'argon) et d'une chambre inerte (par exemple quartz).

Les inconvénients du procédé de fonte classique sont la basse vitesse de production et les coûts de production car grands consommateurs d'énergie. En outre le lingot doit être scié afin de produire le disque mince pour donner une cellule solaire.

Ce procédé est long, et en outre a comme conséquence la perte de matériau précieux. Beaucoup d'efforts de R&D sont entrepris par l'industrie du PV afin d'améliorer le procédé de fabrication. L'aspect du monocristal de silicium est en grande partie noir (voir la Figure I. 5)

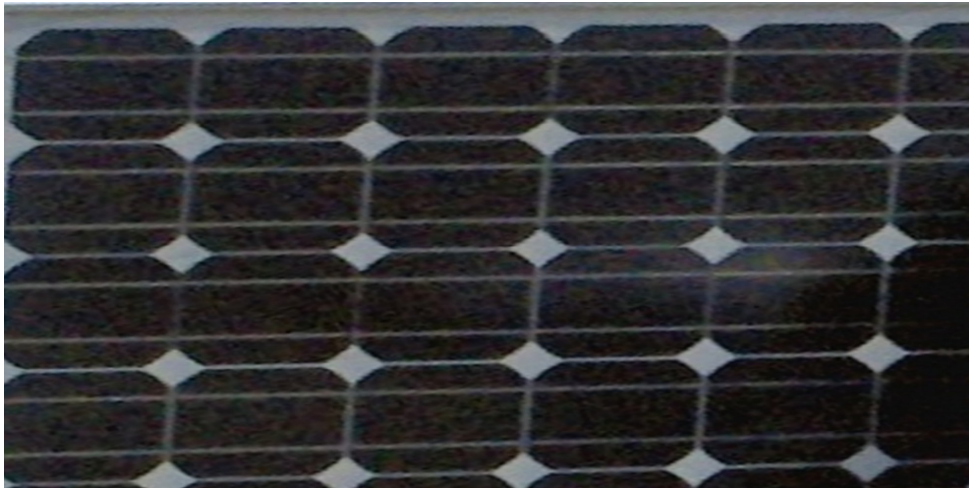


Figure . I 5 Module Monocristallin de silicium

I.7.2 Cellules poly-cristallines :

Le silicium polycristallin sont très proches des modules monocristallins. La même théorie s'applique ; la principale différence est le procédé de fabrication. Les cellules poly-SI sont fabriquées avec du SI fondu pur dans un moule de section carrée ; le refroidissement est une étape essentielle parce qu'il détermine la grosseur du grain et la distribution des impuretés.

Les lingots obtenus sont coupés dans les barres avec une section transversale de 15.6 cm x 15.6 cm ; finalement ils sont sciés pour obtenir les disques minces.

Ce procédé de fabrication donne une structure cristalline multi-grain. Comparé au SI monocristallin, la structure est moins idéale avec pour résultat une perte d'efficacité (environ de 1% comparé à du mono-SI) [8], mais cet inconvénient est surmonté par des coûts inférieurs de production des disques. Un deuxième avantage est l'agencement des modules de cellules qui sont en général rectangulaires, plutôt que le «pseudo carré» du mono-SI, ainsi ils peuvent être rangés très étroitement dans les modules. L'aspect du poly-SI est distinctement bleu (voir la Figure I. 6) dû à l'absorption manquante des

photons de plus haute énergie. En fait, ces photons de haute Énergie de la partie supérieure du spectre visible sont reflétés.



Figure . 16 Module de silicium polycrystallin

I.7.3 Cellules amorphes :

Le silicium amorphe (aie-Si) est la forme non cristalline du silicium. Des panneaux de silicium amorphe sont fabriqués en utilisant le procédé de dépôt de vapeur pour créer une couche mince de matériau de silicium d'environ $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur déposé sur un matériau de substrat tel que le verre ou le métal.

Le principal avantage ici est la possibilité de déposer le silicium amorphe aux températures très basses. La forme de base consiste en ordre unique de p-in (voir la Figure I. 7). Les couches de p-in sont employées afin de créer un champ électrique qui aide à déménager les transporteurs ; en fait le silicium amorphe a une mobilité très faible d'environ $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [10] comparés à la mobilité de plus de $1000 \text{ cm}^2/\text{vs}$ en silicium monocristallin.

Un inconvénient réputé des films minces amorphes de silicium est la dégradation significative de leur puissance de sorties une fois exposées au soleil (dans l'intervalle 15 -35%). La stabilité peut être améliorée en utilisant des couches plus minces. Cependant, en faisant ainsi, l'absorption de la lumière sera réduite aussi bien que l'efficacité de conversion de cellules.

Un contournement consiste en l'utilisation de tandem et même de couches triples

qui contiennent des cellules de p-in empilées les unes sur les autres. Ils sont séparés par les jonctions minces de tunnel (non affichées sur la Figure I. 7). Chaque couche de cellules p-in a des atomes supplémentaires particuliers afin d'ajuster le domaine d'énergie.

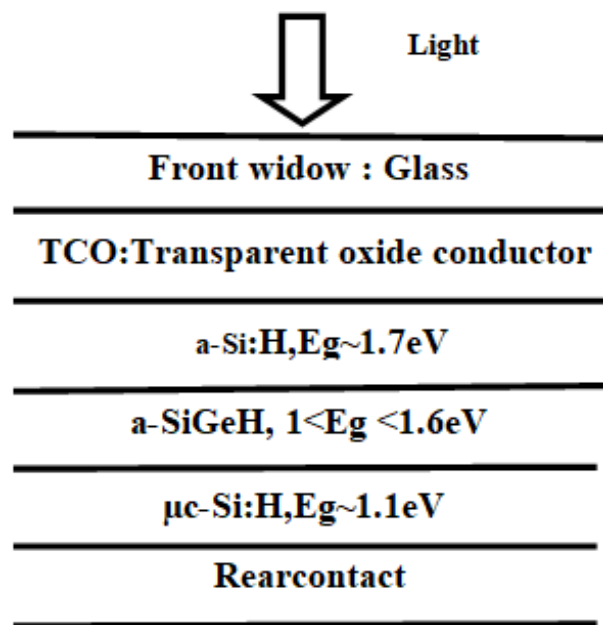


Figure . I 7 Vue en coupe schématique d'une cellule amorphe de film mince de Si

1.8 Potentiel solaire en Algérie

Part sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [7]

Table I 1 Potentiel solaire en Algéri

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne	1700	1900	2650

CHAPITRE 1 : L'Énergie Solaire Photovoltaïques

reçue (KWh/m ² /an)			
-----------------------------------	--	--	--

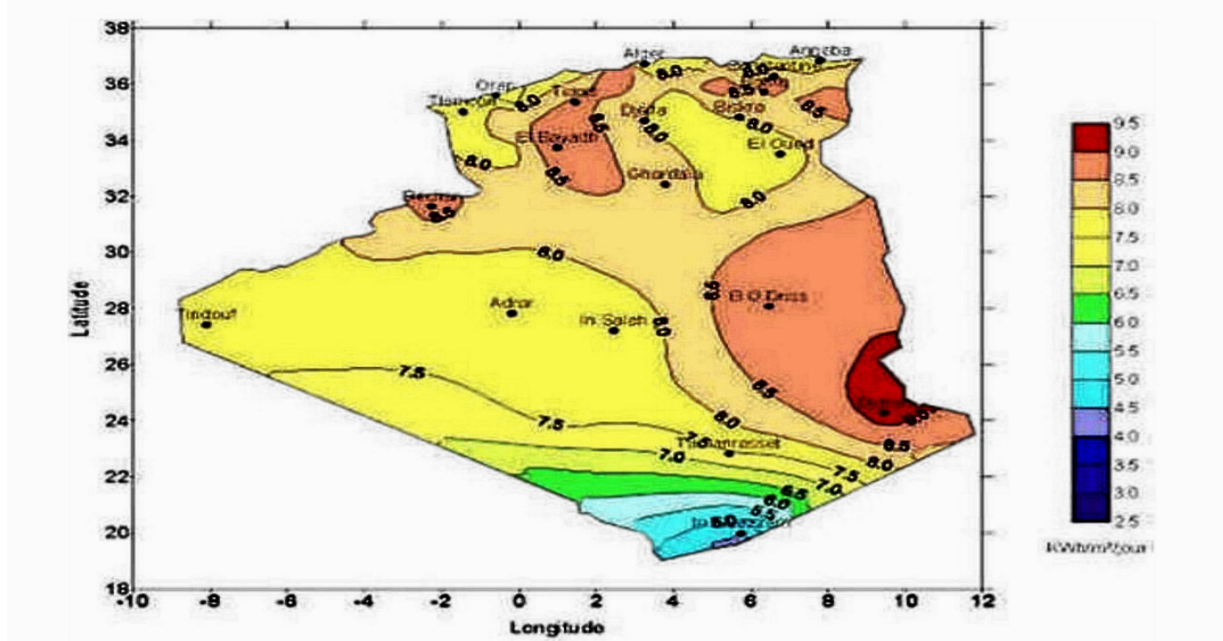


Figure . I 8 Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)

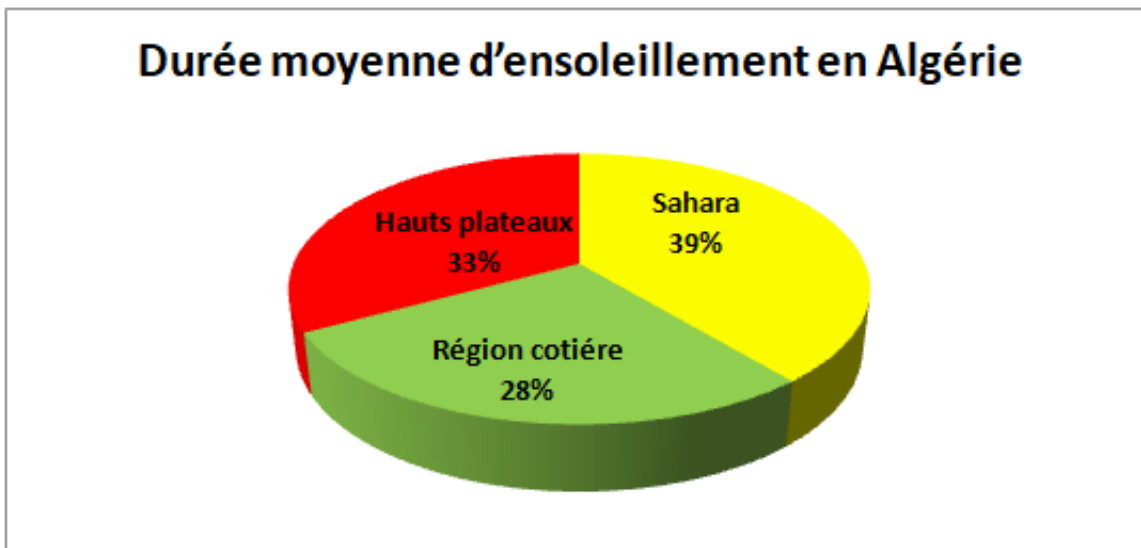


Figure .I-9 Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie

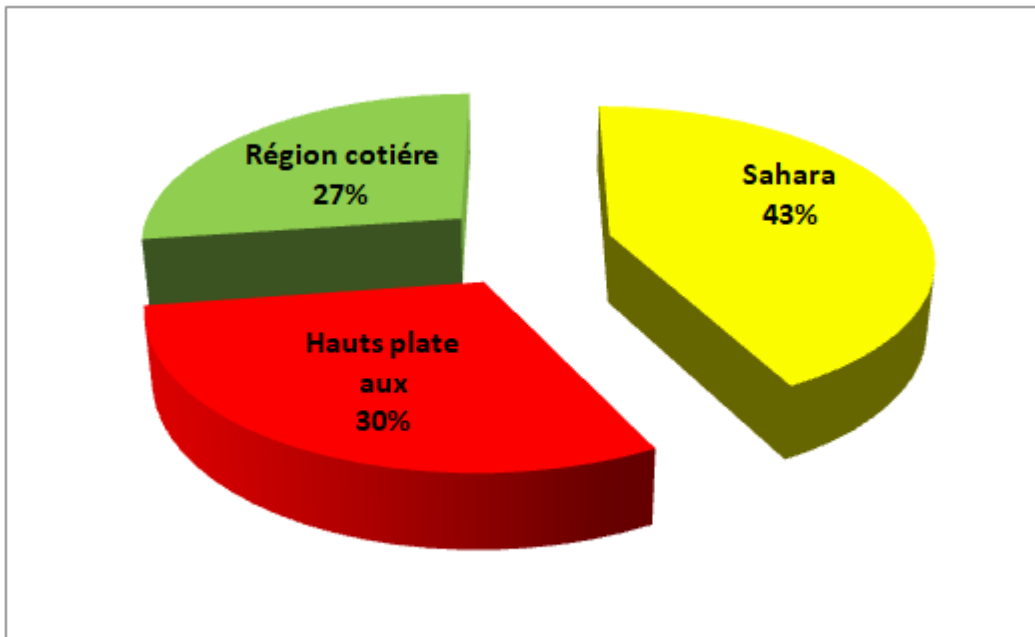


Figure . 19 Energie moyenne reçue en Algérie

1.9 Le générateur photovoltaïque :

Dans des conditions d'ensoleillement standard ($1000\text{W}/\text{m}^2$, 25°C , AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W sous une tension de 0.5V . Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Le générateur photovoltaïque est donc constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques. Lorsque les panneaux solaires sont assemblés en série (groupement de N_s panneaux en série) les tensions s'additionnent, alors que le courant les traversant reste le même, par contre s'ils sont montés en parallèle (groupement de N_p panneaux solaires en parallèle), les courants s'additionnent, alors que la tension reste la même. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur photovoltaïque aux caractéristiques

souhaitées. Les cellules qui constituent le panneau doivent avoir les mêmes caractéristiques.

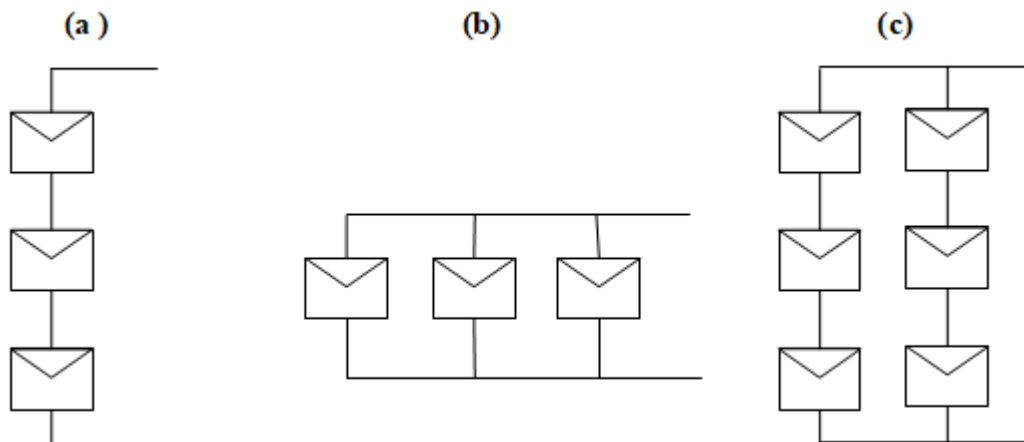


Figure I 10 Groupement de panneaux solaires photovoltaïques

a) Série b) Parallèle c) Série/Parallèle

I.10 Paramètres de la cellule photovoltaïque :

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres qui seront décrits comme suit, figure I.12 :

- **Tension de circuit ouvert V_{co}** : C'est la tension continue obtenue aux bornes d'un panneau PV sous un ensoleillement constant sans aucune circulation de courant. On appelle cette tension la tension de circuit ouvert.
- **Courant de court-circuit I_{sc}** : C'est le courant qui circule dans la cellule lorsque la tension appliquée aux bornes de la cellule est nulle. Sa valeur nous informe sur le niveau d'ensoleillement auquel la cellule est exposée.
- **Puissance maximale** : C'est l'expression de la puissance au point maximale de puissance de la courbe $P(V)$:

$$P_m = V_m \times I_m$$

Où V_m est la tension au point maximal de puissance et I_m le courant correspondant.

- **Facteur de forme** : Il est défini comme étant le rapport entre une puissance maximale fournie par la cellule et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit ouvert, il est donné par :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{sc}} \quad 12$$

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le module est performant.

- **Rendement de la cellule η** C'est le rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par la cellule photovoltaïque et la quantité d'énergie solaire reçue.

$$\eta = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{sc}} \quad 13$$

Où :

P_m : Puissance électrique délivrée par le panneau photovoltaïque (W)

S : Surface effective du panneau photovoltaïque (m²)

G : Irradiation (W/m²).

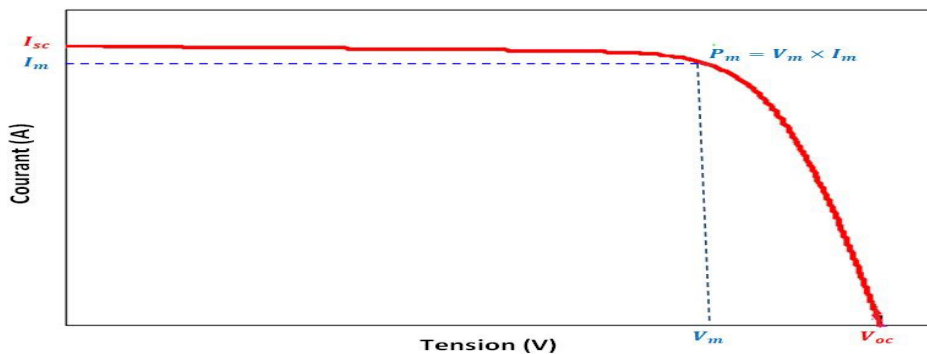


Figure 111 Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV

1.11 Modèle mathématique d'une cellule solaire:

La figure 1.13, représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode, celle-ci est composée d'une diode, une source de courant une résistance en série et une résistance en parallèle [14-18]. Le courant d'obscurité de la diode (I_L) est une fonction de l'irradiation solaire incidente et de la température de la cellule.

La jonction p-n de la cellule PV est représentée par la diode. La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. De plus, une résistance shunt (R_p) qui est due à un courant de fuite au niveau de la jonction.

Ce modèle n'est pas universel, de nombreux auteurs [19], ont proposé des modèles plus sophistiqués qui présentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque. On recense ainsi deux autres modèles:

- Le modèle à deux diodes: cette diode supplémentaire permettant de reproduire dans le schéma équivalent les effets chimiques de recombinaison des électrons.
- Le modèle à trois diodes: la troisième diode incluant dans le schéma équivalent les effets non pris en compte dans les autres modèles (ex: courant de fuites liées aux diodes). Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision. Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la cellule photovoltaïque sont basées sur le caractéristique courant-tension. Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la première loi de Kirchhoff :

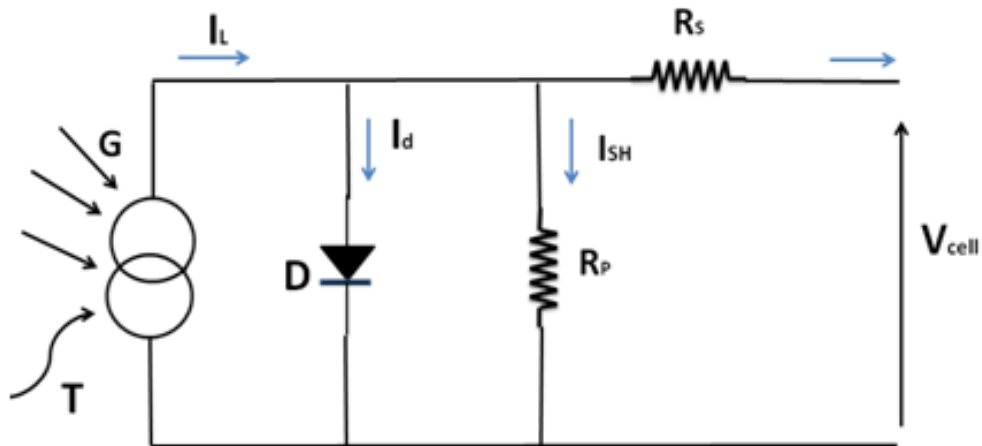


Figure 112 Circuit équivalent d'une cellule solaire

$$I_{cell} = I_L - I_d - I_{sh} \quad 14$$

$$\text{OU } I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{nV_t}} - 1 \right) \quad 15$$

$$I_{sh} = V_d / R_p \quad 16$$

$$V_d = V_{cell} - R_s I_{cell} \tag{17}$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \tag{18}$$

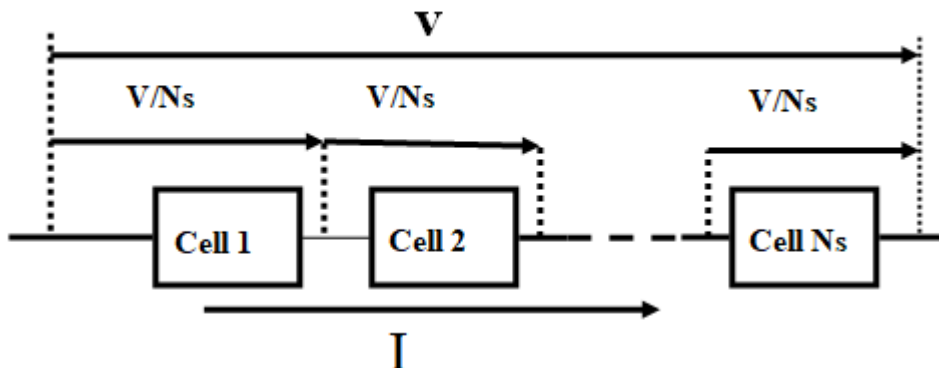
I_{cell} et V_{cell} sont le courant de sortie et la tension de sortie de la cellule PV respectivement, V_t est la tension thermique, I_0 est le courant de saturation de polarisation inverse de la diode, q est la charge élémentaire (1.6×10^{-19} C), k est le Constant de Boltzman (1.38×10^{-23} J/°K), T est la température de la cellule (°K), et n n'est pas le facteur d'idéalité de la diode.

Ainsi les caractéristiques de la cellule PV sont données par :

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{nV_t} \tag{19}$$

1.12 Modèle mathématique d'un panneau solaire de N_s cellules en série :

Le panneau solaire photovoltaïque est par définition un ensemble de cellules photovoltaïques assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une cellule photovoltaïque élémentaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0.5 et 1.5V selon les techniques. Il faut presque toujours plusieurs cellules en série pour avoir une tension utilisable [20].



CHAPITRE 1 : L'Énergie Solaire Photovoltaïques

Figure I 13 Groupement de N_s cellules

Un panneau photovoltaïque est composé de N_s cellules solaires en série, il a le même courant de sortie et l'équation de la tension de sortie est donnée par :

$$V = N V_{\text{cell}} \quad \text{I 10}$$

L'équation de la caractéristique *I-V* est alors :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_i N_s}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad \text{I 11}$$

A partir de l'équation *I-V*, pour $V=0$, l'expression du courant de court circuit I_{sc} du panneau photovoltaïque est ainsi obtenue :

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{R_s I_{sc}}{n V_i}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_p} \quad \text{I 12}$$

Pour une cellule solaire idéale ($R_s \rightarrow 0$, $R_p \rightarrow \infty$) nous pouvons écrire :

$$I_L = I_{sc} \quad \text{I 13}$$

Alors l'équation *I-V* devient:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V + N_s R_s I}{n V_i N_s}} - 1 \right) - \frac{V + N_s R_s I}{N_s R_p} \quad \text{I 14}$$

La valeur instantanée du courant de court circuit peut être trouvée en utilisant l'équation suivante [21]:

$$I_{sc} = (I_{sc, \text{stc}} + \alpha(T + T_{\text{stc}})) \cdot \frac{G}{G_{\text{stc}}} \quad \text{I 15}$$

Où $I_{sc, \text{stc}}$ est le courant de court-circuit dans les conditions standard du module photovoltaïque qui est fourni par le fabricant de ce module photovoltaïque, G et G_{stc} sont respectivement l'instantané et la condition standard d'irradiation solaire du module photovoltaïque, T et T_{stc} sont respectivement les températures instantanées et la condition standard du module photovoltaïque et α le coefficient de température du court-circuit d'une cellule photovoltaïque. Puisque $G_{\text{stc}} = 1000 \text{ W/m}^2$ et l'effet de la variation de

CHAPITRE 1 : L'Énergie Solaire Photovoltaïques

la température sur la valeur es I_{sc} est négligeable (moins de 1%), nous pouvons écrire :

$$I_L = \frac{G}{1000} I_{sc, stc} \quad \text{I 16}$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{N_s R_p}}{e^{nV_t N_s} - 1} \quad \text{I 17}$$

Où V_{oc} est la tension de circuit ouvert du module photovoltaïque.

I.13 Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque les panneaux photovoltaïques sont groupés en série-parallèle en formant ainsi un générateur photovoltaïque. La tension V_A fournie par ce générateur, le courant I_A et la puissance P_A sous irradiation uniforme peuvent être obtenus à partir de la tension V et le courant I du module photovoltaïque comme suit :

$$\begin{cases} V_A = N_{ss} \times V \\ I_A = N_{pp} \times I \\ P_A = V_A \times I_A = N_{ss} \times N_{pp} \times V \times I \end{cases} \quad \text{I 18}$$

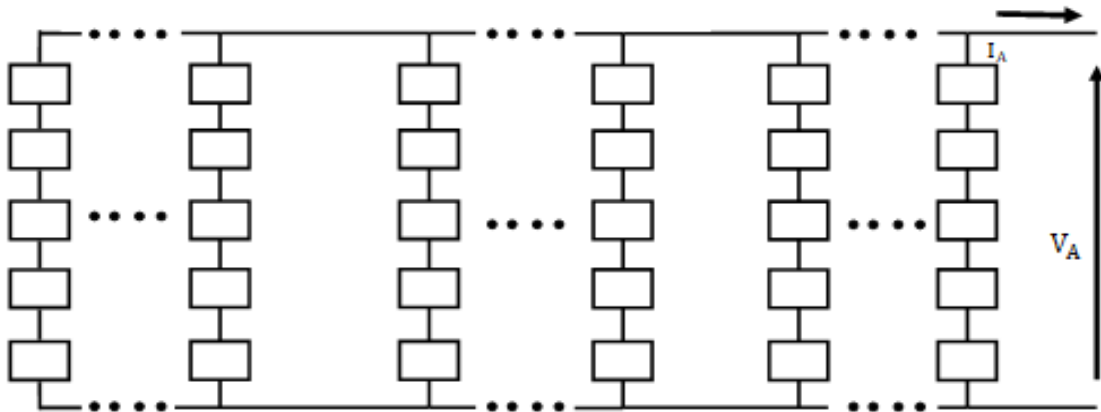


Figure I 14 Matrice solaire formée de plusieurs groupes de colonnes solaire formant une generateur photovoltaïque

Où N_{ss} et N_{pp} sont respectivement le nombre de panneaux PV en série et parallèles du générateur photovoltaïque

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté rappelé quelques notions d'énergie

CHAPITRE 1 : L'Énergie Solaire Photovoltaïques

solaire en considérant que l'énergie solaire est l'énergie de future.

Et nous avons étudié, principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque, ainsi les types des cellules photovoltaïques, caractéristique cellule PV, association de module PV, chaine conversions de cellule PV et présenter le Constitution et caractéristiques d'un module de photovoltaïque, Nous avons également modélisé le générateur photovoltaïque.

II. CHAPITRE 2:Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

II.1 Introduction

Le présent chapitre traite de la conversion DC/DC, qui a pour but d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu.

Pour ce type de convertisseur statique, la gamme de puissance que l'on peut « traiter » s'étend de quelques watts, à une trentaine de kilowatts environ. Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants, tout comme la définition de nouvelles structures (multi niveau en particulier), permettent d'envisager le traitement de puissances plus élevées. Nous distinguons deux types de convertisseurs continus/continus :

- ✓ les convertisseurs appelés ((hacheurs)), qu'ils soient abaisseurs, élévateurs ou bien dévolteurs {survolteurs, qui correspondent aux applications moyennes et fortes puissances,
- ✓ les alimentations à découpages, qui correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC/DC

II.2 Les convertisseurs statiques

Les éléments de puissance (tels que transistor, diode, thyristor etc....) permettant de réaliser des montages concrets pour convertisseur d'énergie basée sur des systèmes statiques appelés convertisseurs.

En définitive les convertisseurs statiques ne sont que des composants électriques à base de semi-conducteurs capables de notifier la tension ou la fréquence de l'onde électrique comme on l'habitude de distinguer deux sortes de tension :

- source de la tension continue.
- Source de la tension alternative.

II.3 Les différents types de convertisseurs statiques :

Il ya quatre types de convertisseurs :

CHAPITRE 2 : Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

Convertisseur alternatif-continu : Redresseur.

Convertisseur continu-continu : Hacheur.

Convertisseur continu-alternatif : Onduleur.

Convertisseur alternatif-alternatif : Gradateur

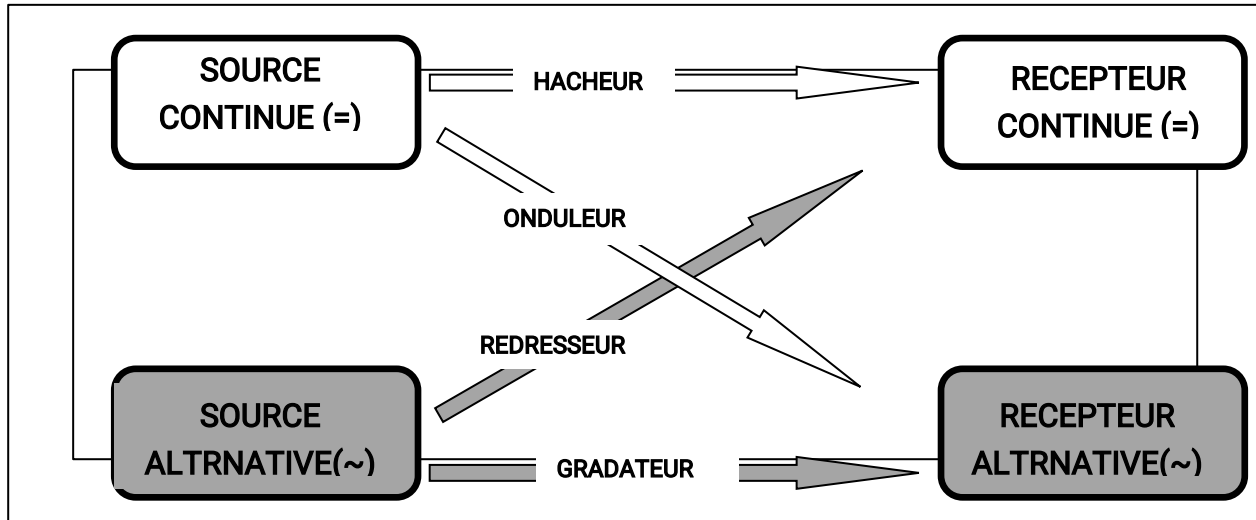


Figure . II 1 Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

❖ Nous avons parlé de trois types de Transformateurs (gradateur, redresseur, onduleur). Et maintenant, nous allons parler de d'Adaptateur DC-DC (hachuer).

Nous allons donner une vue plus profonde de hacheur puisque notre travail est basé sur le convertisseur DC-DC.

II.4 Convertisseurs DC/DC (hacheur)

Le convertisseur DC-DC permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe.

On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs.

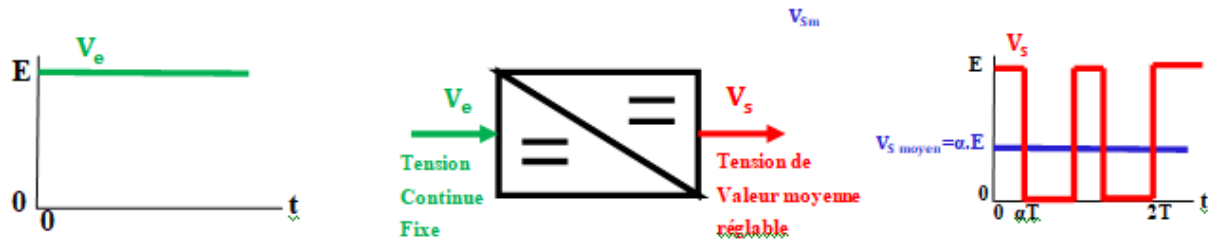


Figure . II 2 Principe de base d'un hacheur

II.4.1 Différents types d'hacheurs

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de

tension peut être réalisée :

- ❖ abaisseur de tension « Buck »
- ❖ élévateur de tension « Boost »
- ❖ abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost »

II.4.2 Convertisseur buck

Un convertisseur buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [20].

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur buck. La Figure II.3 illustre le principe de fonctionnement de ce convertisseur. Ainsi, la Figure II.4 donne les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des courants (à Gauche) et tensions (à droite).

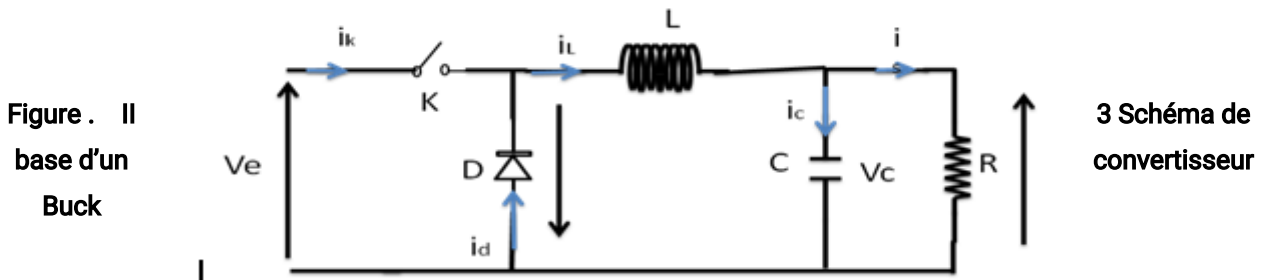


Figure . II base d'un Buck

3 Schéma de convertisseur

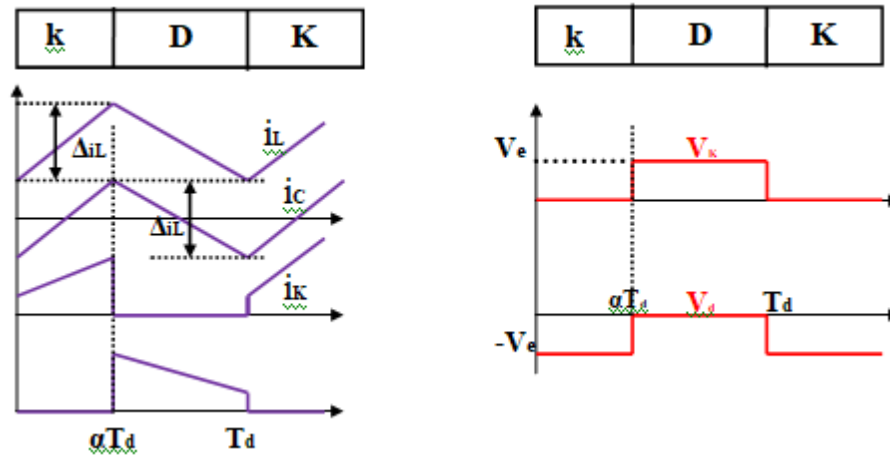


Figure . II 4 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck [21]

Lorsque K est fermé et D est ouvert durant l'intervalle $[0 \alpha T_d]$, le circuit électrique du convertisseur est présenté dans la Figure I I.5

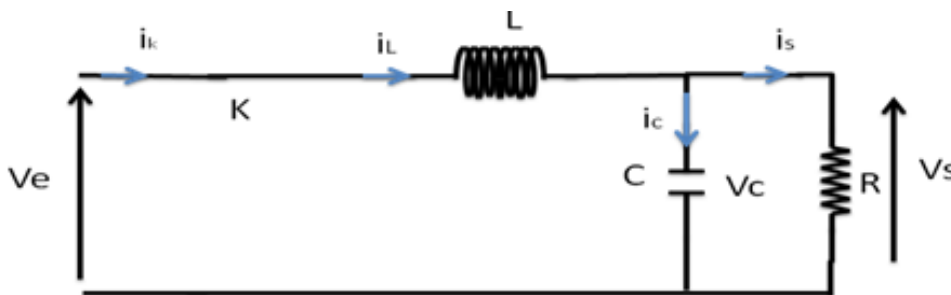


Figure . II 5 Circuit équivalent du Buck quand l'interrupteur est fermé

On présente les équations II.1 et II.2 comme suit :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} + V_s \quad \text{II 1}$$

$$i_L = i_{min} + \frac{V_e - V_s}{L} t \quad \text{II 2}$$

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

$$i_{max} = i_{min} + \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T_d \quad \text{II 3}$$

CHAPITRE 2 : Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

Lorsque K est ouvert et D est fermée durant l'intervalle $[\alpha T_d \quad T_d]$, le circuit électrique devient alors, voir la Figure I I.6:

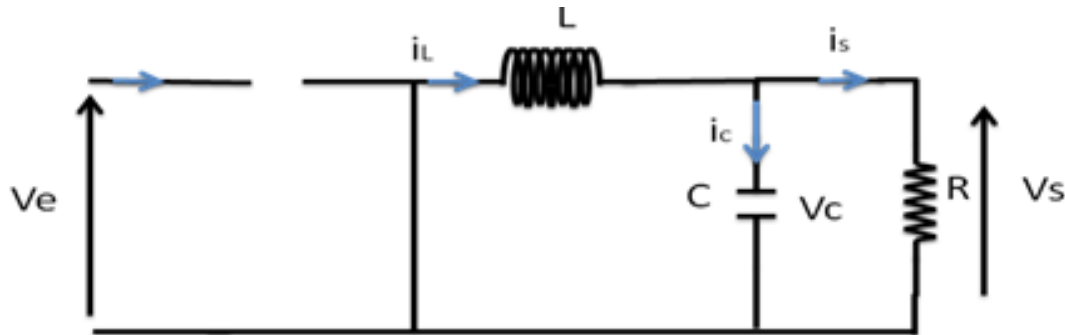


Figure . II 6 Circuit équivalent du Buck quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_s \quad \text{II 4}$$

$$i_L = i_{\max} \times \frac{V_s}{L} (1 - \alpha T_d) \quad \text{II 5}$$

à l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale i_{\min} exprimé Comme suit :

$$i_{\min} = i_{\max} - \frac{V_s}{L} (1 - \alpha T_d) \quad \text{II 6}$$

Avec $\Delta i_L = i_{\max} - i_{\min}$: représente l'ondulation du courant dans l'inductance L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.2) et (II.6) donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \alpha V_e \quad \text{II 7}$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance

$$i_L = i_s \quad \text{II 8}$$

Donc le convertisseur est abaisseur en tension.

2.1.1 Convertisseur Boost

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur du type Boost.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est du type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [22].

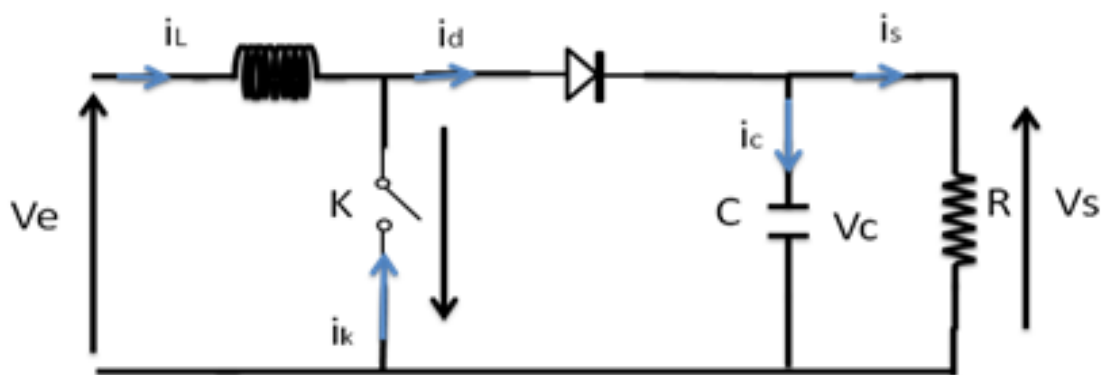


Figure . II 7 La fonction hacheur Boost

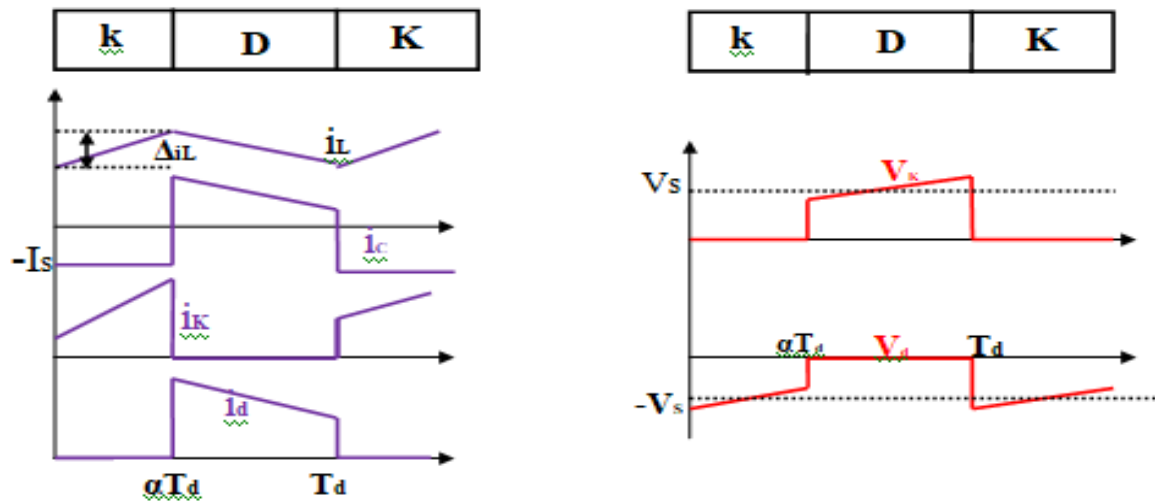


Figure . II 8 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost [21]

Lorsque K est fermée et D est ouvert durant l'intervalle $[0 \alpha T_d]$, le circuit électrique du Convertisseur est présenté dans la figure (II.9) :

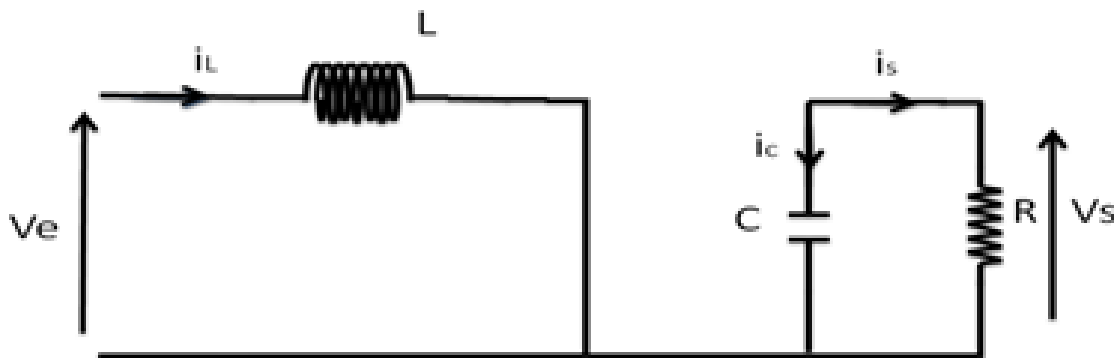


Figure . II 9 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$V_e = -L \frac{di_L}{dt} \quad \text{II 9}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \quad \text{II 10}$$

I_{min} représente la valeur minimale de courant dans l'inductance. On a à l'instant $t = \alpha T_d$, le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance I_{max} suivant la formule (II.3)

:

CHAPITRE 2 : Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d$$

II 11

Lorsque K est ouvert et D est fermée durant l'intervalle $[\alpha T_d, T_d]$, le circuit électrique devient alors, voir la figure II.10:

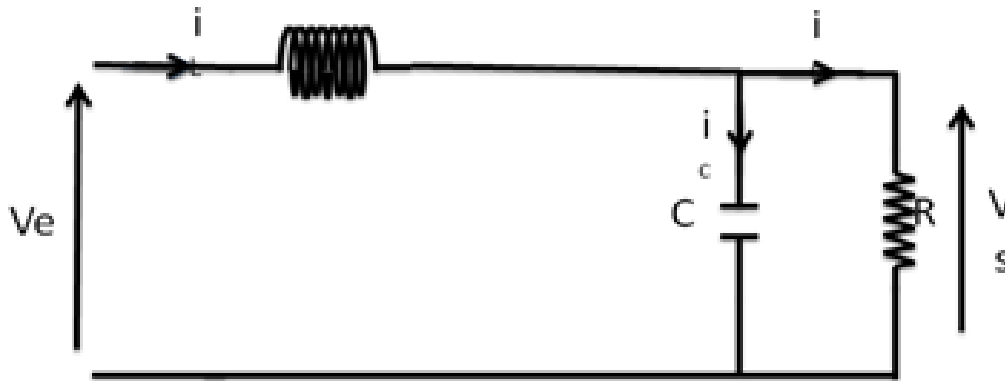


Figure . II 10 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

On a les équations II.11 et II.12 comme suit :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s$$

II 12

$$I_L = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d)$$

II 13

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

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha) T_d$$

II 14

Avec $\Delta I_L = I_{\min} - I_{\max}$: représente l'ondulation du courant dans l'inductance

Ceci dit, l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.3) et (II.6) donne la valeur

Moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e$$

II 15

D'après l'équation (II.14) on peut contrôler la valeur moyenne de la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

1.2.2 Convertisseur Buck-Boost :

Hacheur inverseur, dévolteur- survolteur, de type buck-boost. Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

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 sur la Figure II.11. [23]

L'interrupteur K_1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage)

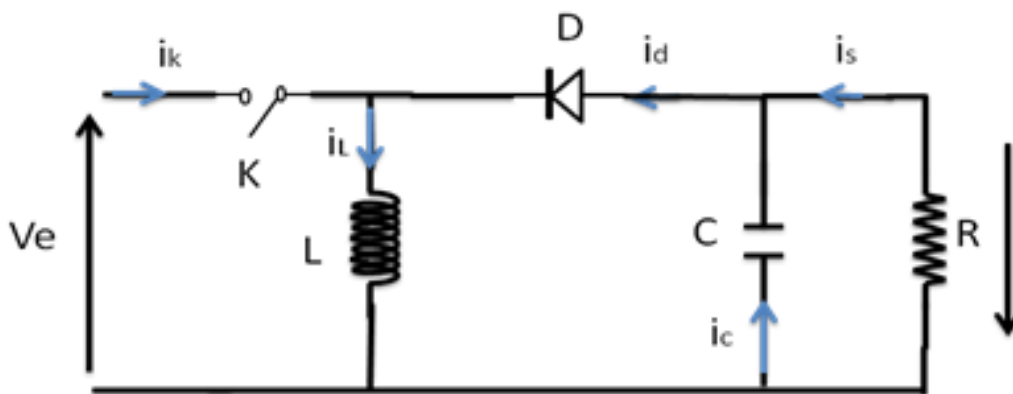


Figure . II 11 Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost

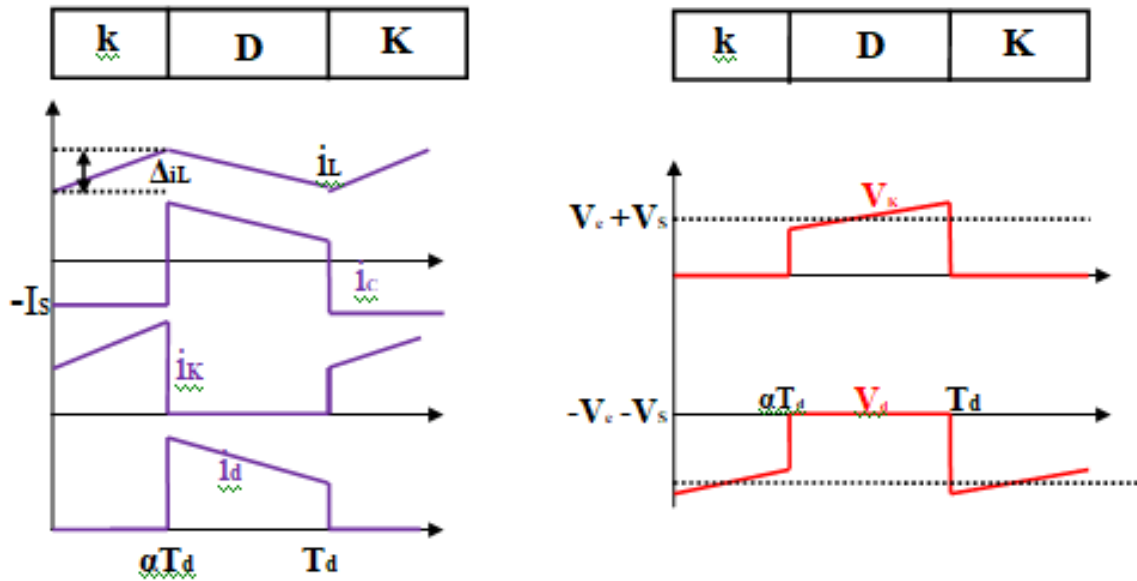


Figure . II 12 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-boost [21]

Lorsque K est fermé et D est ouvert durant l'intervalle $[0 \alpha T_d]$, le circuit électrique du convertisseur sera comme montré dans la figure II.13:

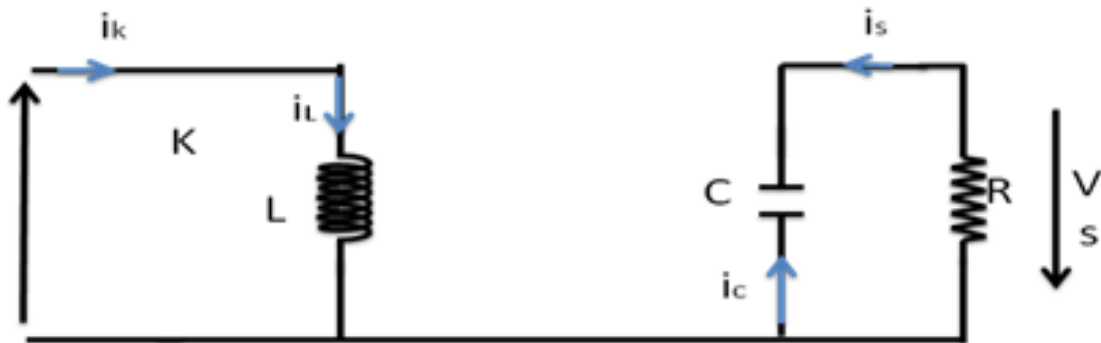


Figure . II 13 Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est fermé

On a les équations qui régissent le système comme suit :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt}$$

II 16

CHAPITRE 2 : Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

$$I_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L}t \quad \text{II 17}$$

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

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L}\alpha T_d \quad \text{II 18}$$

Lorsque K est ouvert et D est fermée durant l'intervalle $[\alpha T_d \quad T_d]$, le circuit électrique devient II.14.

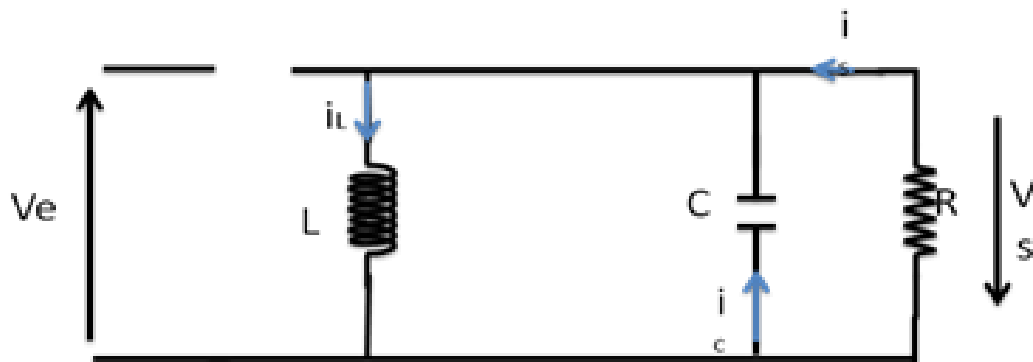


Figure . II 14 Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est ouvert

On prend maintenant les nouvelles équations :

$$\frac{Ldi}{dt} = V_s \quad \text{II 19}$$

$$I_L = I_{\max} + \frac{V_s}{L}(t - \alpha T_d) \quad \text{II 20}$$

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

$$I_{\min} = I_{\max} - \frac{V_s}{L}(1 - \alpha)T_d \quad \text{II 21}$$

Ainsi que l'ondulation du courant dans l'inductance est exprimée comme suit :

$$\Delta I_L = I_{\max} - I_{\min} \quad \text{II 22}$$

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.18) et (II.21) donne la valeur Moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha)} \quad \text{II 23}$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance comme suit:

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad \text{II 24}$$

La tension de sortie du convertisseur buck-boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension [21]

II.5 Analyse et choix du convertisseur

Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continue basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, la structure buck-boost et élévatrice pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices [24].

CHAPITRE 2 : Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

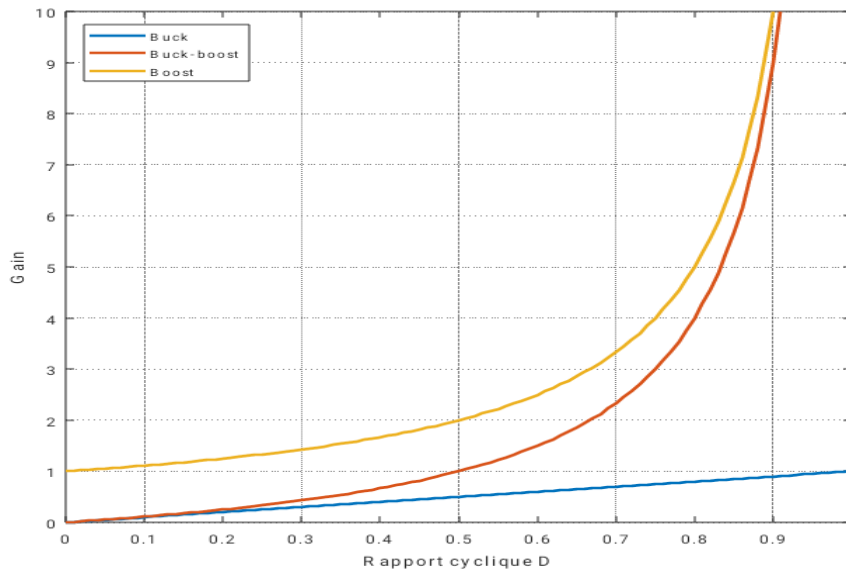


Figure . II 15 Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique [24].

Le tableau suivant représente une comparaison entre les différentes topologies des convertisseurs DC/DC basse tension non isolé [Cha18]

Table II 1 Comparaison entre les structures DC/DC basse tension non-isolé [25].

Structures	Complexité	Taille	Ondulation de courant	Gain en Tension
BOOST	Basse	Moyenne	Elevée	Basse
BUCK BOOST	Basse	Moyenne	Elevée	Basse
BUCK	Moyenne	Moyenne	Elevée	Haut
IBC	Moyenne	Moyenne	Basse	Basse

II.6Avantage de convertisseur BOOST

Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes

CHAPITRE 2 : Convertisseurs DC/DC (hacheurs)

avec des Sources de puissance conventionnelles, le convertisseur Boost peut-être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de Puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de Sortie [24]

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types des convertisseurs DC - DC, comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et mixte (dévolteur - survolteur), et leur principe de fonctionnement. Nous avons étudié le convertisseur DC-DC boost le choix de ce convertisseur est dû à la raison de sa structure simple et son rapport de transformation en tension la plus élevée par rapport aux autres topologies

III. Chapitre 3: Technique de poursuites du point de puissance maximale basé sur PI régulateur

III.1 Introduction :

L'objectif principal de la commande est de maîtriser l'évolution d'une ou plusieurs grandeurs physiques à partir d'une ou plusieurs variables de contrôle et ceci dans un environnement perturbé. Ces perturbations sont de nature externe (perturbation sur la mesure, perturbation sur la commande...). Ou interne au système (erreur du modèle, incertitude paramétrique) et généralement non mesurable. La commande de processus se fait par l'introduction dans la chaîne de commande d'un algorithme de contrôle ayant des performances satisfaisantes pour s'affranchir des perturbations. Cet algorithme de contrôle est appelé un correcteur ou parfois un régulateur.

III.2 La Commande par le régulateur PI

En agissant avec une force proportionnelle à l'écart entre l'ambiance et la consigne, un écart subsiste en permanence. On décide dès lors que la force d'intervention aura deux composantes. La première, c'est la force proportionnelle à l'écart, comme dans la première solution ci-dessus. Mais une deuxième force la complète : une force proportionnelle à l'intégration de l'écart dans le temps, c'est-à-dire proportionnelle à la somme de tous les écarts mesurés en permanence.

Si la température se stabilise à 19°C, malgré la composante proportionnelle, un écart de 1°C subsiste. Tous les "pas de temps", le régulateur mesure cet écart et l'ajoute à la valeur d'une case "mémoire". L'ouverture de la vanne sera donnée par la somme des 2 composantes. Tant que la consigne ne sera pas atteinte, la composante intégrale augmentera, la vanne s'ouvrira un peu plus, jusqu'à atteindre cette fois la consigne.

Une fois celle-ci atteinte, l'écart est nul et la composante intégrale n'est plus modifiée (puisque ex dolo malo non oritur "0"). Si la consigne change, l'écart sera négatif et la composante intégrale diminuera.

Dans le fond, cette composante intégrale ne pourrait-elle travailler seule ? Non, elle est trop lente pour réagir efficacement à des variations de la demande thermique. Il faudrait diminuer son pas de temps (diminuer le "temps d'intégration") mais alors à nouveau le système devient instable.

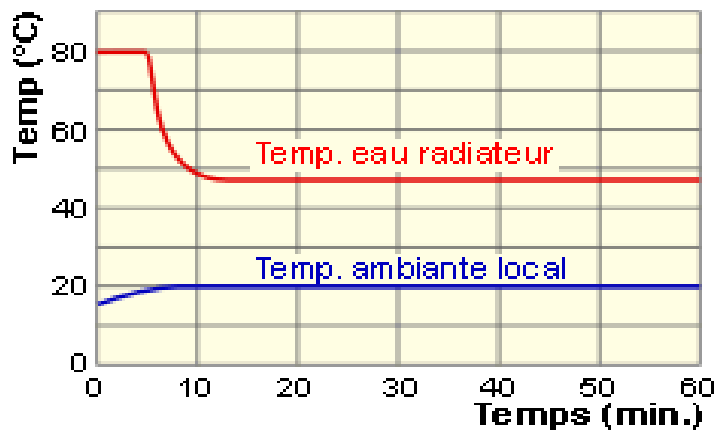


Figure III 1 exemple de regulation utilisant le controlleur PI

C'est bien le mariage des 2 actions (P et I) qui est le plus adéquat pour répondre à la demande : la composante P fait le gros du travail, puis la composante le affine dans Le temps. C'est le mode de régulation souvent rencontré dans les systèmes thermiques à eau.

À nouveau le logiciel peut vous permettre de tester la régulation l'et PI avec diverses valeurs des paramètres de réglage.

La fonction de transfert dans le domaine de Laplace du régulateur PI exprimée par :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{III 1}$$

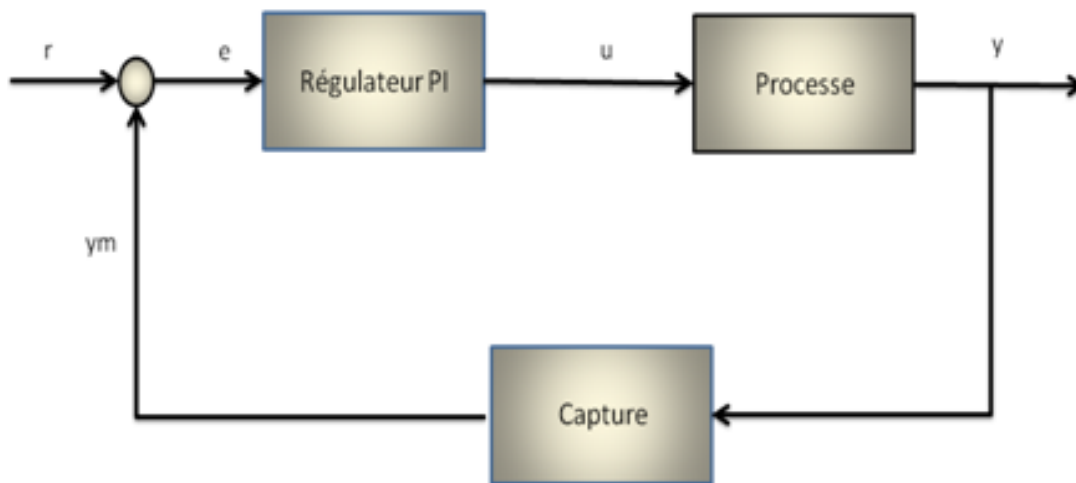


Figure. III 2 Schéma synoptique de la commande PI

- Action proportionnelle

- Si K_p est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.
- Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risques d'oscillations.

• Action intégrale

L'action intégrale régit, lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne. Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste l'action $u(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

III.3 Caractéristiques des régulateurs [26]

III.3.1 Stabilité

Un système bouclé doit être stable. Si seulement si les réactions du système de régulation soient énergétiques sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger. Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité.

III.3.2 Précision

En régulation, la précision obtenue par l'implantation d'intégration dans la boucle.

III.3.3 Rapidité

En général, un système bouclé doit répondre rapidement à la variation de sa consigne (poursuite) et effacer rapidement les perturbations (régulation). Le temps de réaction est bien entendu en relation étroite avec l'inertie propre du processus.

III.4 Modélisation d'un convertisseur boost

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté en fig.) I I I.3 . I I I.4(et par rapport au régime de fonctionnement.

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu, où I_L est le courant dans la bobine L , V_{pv} est la tension d'entrée, V_o est la tension de sortie et u est la commande.

Si switch on:

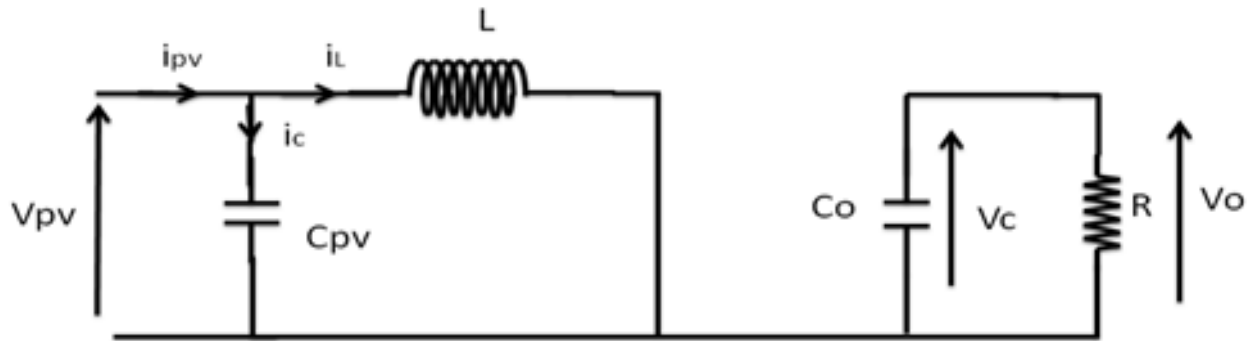


Figure. III 3 Convertisseur boost switch ON

$$C_{pv} \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \quad \text{III 2}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{pv} \quad \text{III 3}$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = \frac{-v_c}{R} \quad \text{III 4}$$

Si switch off:

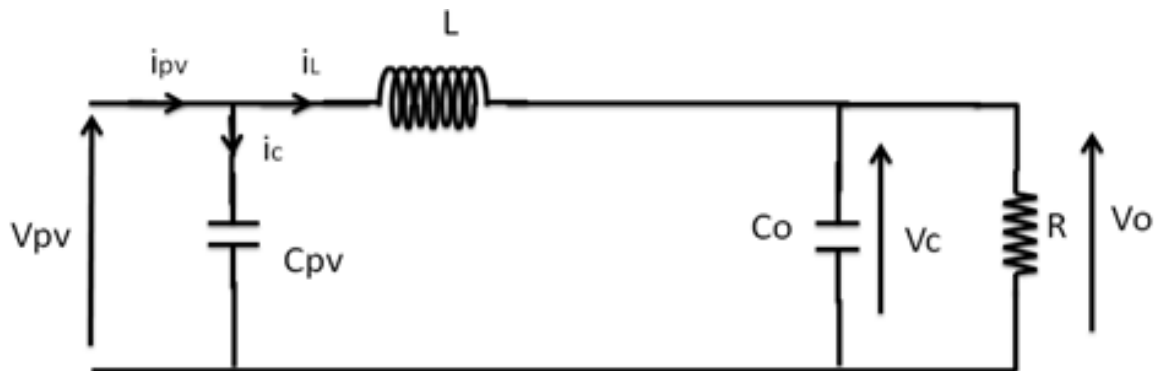


Figure. III 4 Convertisseur boost switch OFF

$$\left\{ \begin{array}{l} C \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \quad \text{III 5} \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{pv} - v_c \quad \text{III 6} \\ C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{v_c}{R} \quad \text{III 7} \end{array} \right.$$

Le model moyenne du convertisseur boost est :

$$\left\{ \begin{array}{l} C \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \quad \text{III 8} \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{pv} - (1-d)v_c \quad \text{III 9} \\ C \frac{dv_c}{dt} = i_L(1-d) - \frac{v_c}{R} \quad \text{III 10} \end{array} \right.$$

Où : d est la valeur de rapport cyclique

- La fonction de transfert ouvert de la tension ou bornes du panneau solaire est :

$$FO_v = \frac{v_{pv}(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{C_{pv}s} \quad \text{III 11}$$

$$\text{Ou : } U_1 = i_{pv} - i_L \quad \text{III 12}$$

- La fonction de transfert ouvert de la courant de la bobine est:

$$FO_i = \frac{i_L(s)}{U_2(s)} = \frac{1}{Ls} \quad \text{III 13}$$

$$\text{Ou: } U_2 = v_{pv} - (1-d)v_c \quad \text{III 14}$$

- La stratégie de commande est composée de deux parties essentielles :

- 1) MPPT: l'algorithme de suivi du point de puissance maximale est une technique qui permet le système PV de fonctionner à son point de puissance maximale (PPM).
- 2) Le contrôleur PI à double boucle se compose d'une boucle fermée externe pour contrôler la tension du panneau via un régulateur PI qui modifie la référence du

courant de la bobine pour suivre la référence de tension fournie par l'algorithme MPPT.

Aussi, une boucle fermée interne pour contrôler le courant de la bobine à l'aide d'un régulateur PI qui ajuste le rapport cyclique (d).

La figure ci-dessus illustre la stratégie de commande proposée.

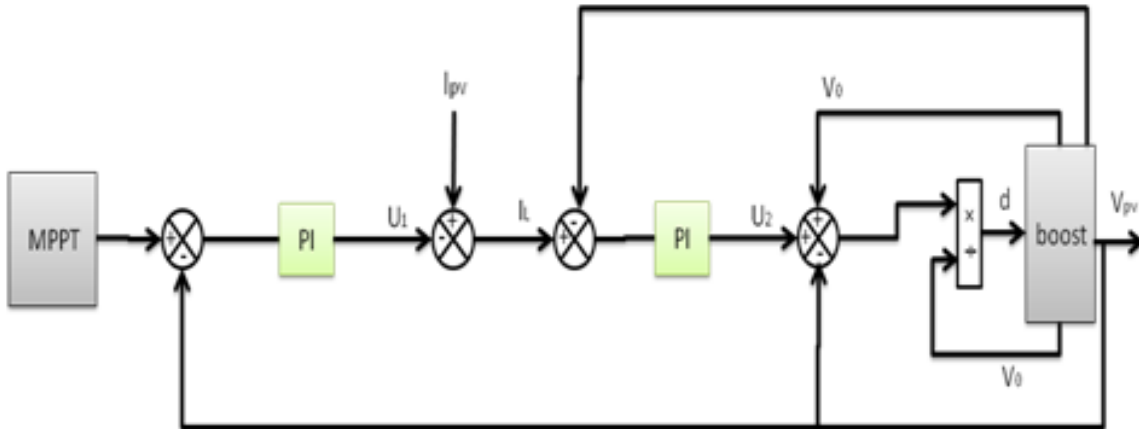


Figure. III 5 la stratégie de commande proposée

- La boucle fermée de la fonction de transfert de la boucle de régulation intérieure et extérieure exprimée dans les fonctions suivantes:

$$FBF_i = \frac{\frac{k_{pi}}{L}s + \frac{k_{li}}{L}}{s^2 + \frac{k_{pi}}{L}s + \frac{k_{li}}{L}} \quad \text{III 15}$$

$$FBF_e = \frac{\frac{k_{pv}}{C_{pv}}s + \frac{k_{lv}}{C_{pv}}}{s^2 + \frac{k_{pv}}{C_{pv}}s + \frac{k_{lv}}{C_{pv}}} \quad \text{III 16}$$

Les paramètres des régulateurs PI calculés par la comparaison des coefficients des fonctions de transfert avec la forme canonique du système d'ordre deux et choix des paramètres

Selon le cahier des charges

La forme canonique du système d'ordre deux s'écrit comme suit:

$$G = \frac{k}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad \text{III 17}$$

Ou : ξ : coefficient d'amortissement
 ω : pulse naturelle

Alors, on peut calculer les paramètres utilisant les équations suivantes:

$$\text{B.I} \quad \begin{cases} K_{pi} = 2\xi\omega_i L \\ K_{ii} = L\omega_i^2 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{III 18} \\ \text{III 19} \end{matrix}$$

$$\text{B.E} \quad \begin{cases} K_{pv} = 2\xi\omega_v c_{pv} \\ K_{vi} = c_{pv}\omega_v^2 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{III 20} \\ \text{III 21} \end{matrix}$$

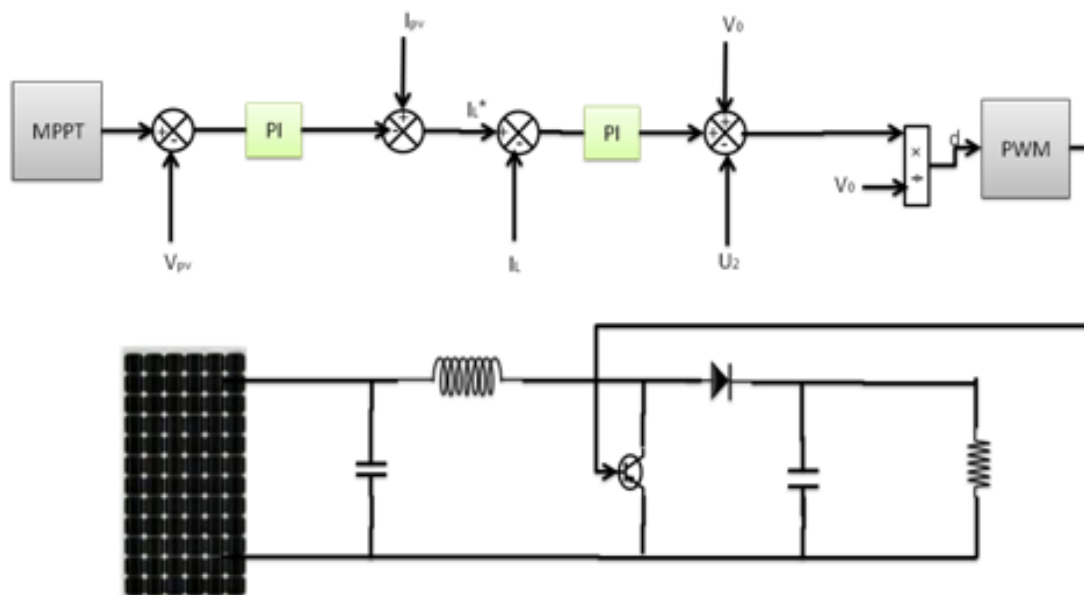


Figure. III 6 commande d'un système photovoltaïque par régulateur PI

Les figures suivantes représentent comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur PI A travers les courbes suivantes, nous observons les

Chapitre 3 Technique de poursuites du point de puissance maximale basé sur PI

variables V_{pv} et V_{mpp} en fonction du temps, Il y a dépassement in V_{pv} Toutes les 0,1 seconde Quand ça change radiation solair .

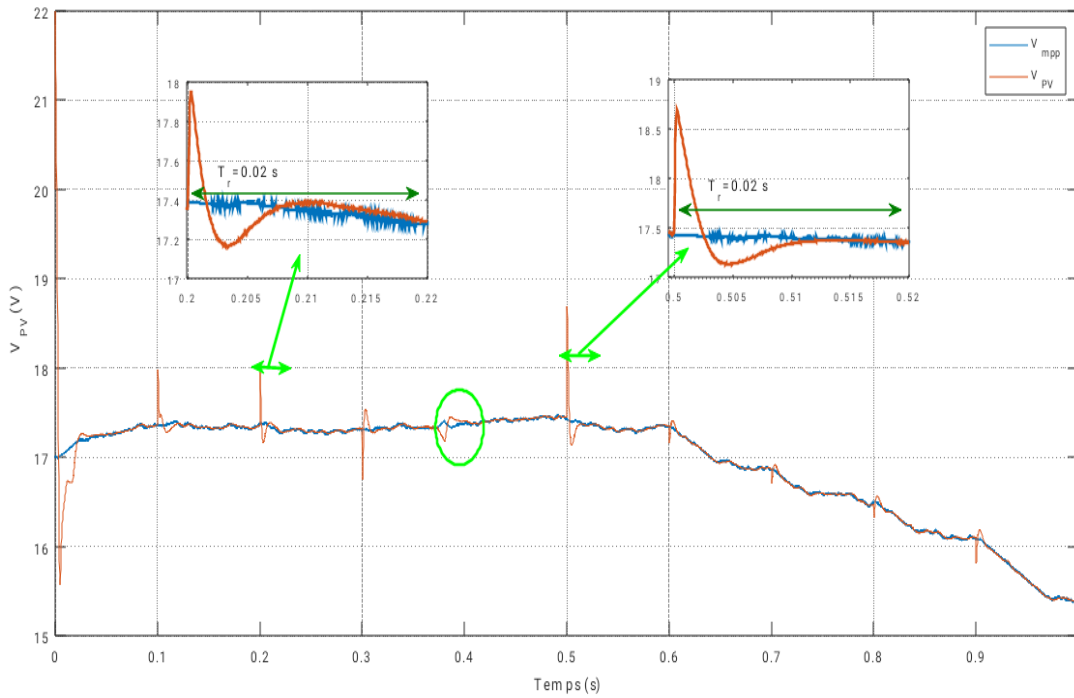


Figure III 7 comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur PI

Le courant de la bobine suivre le courant référence dans les deux cas

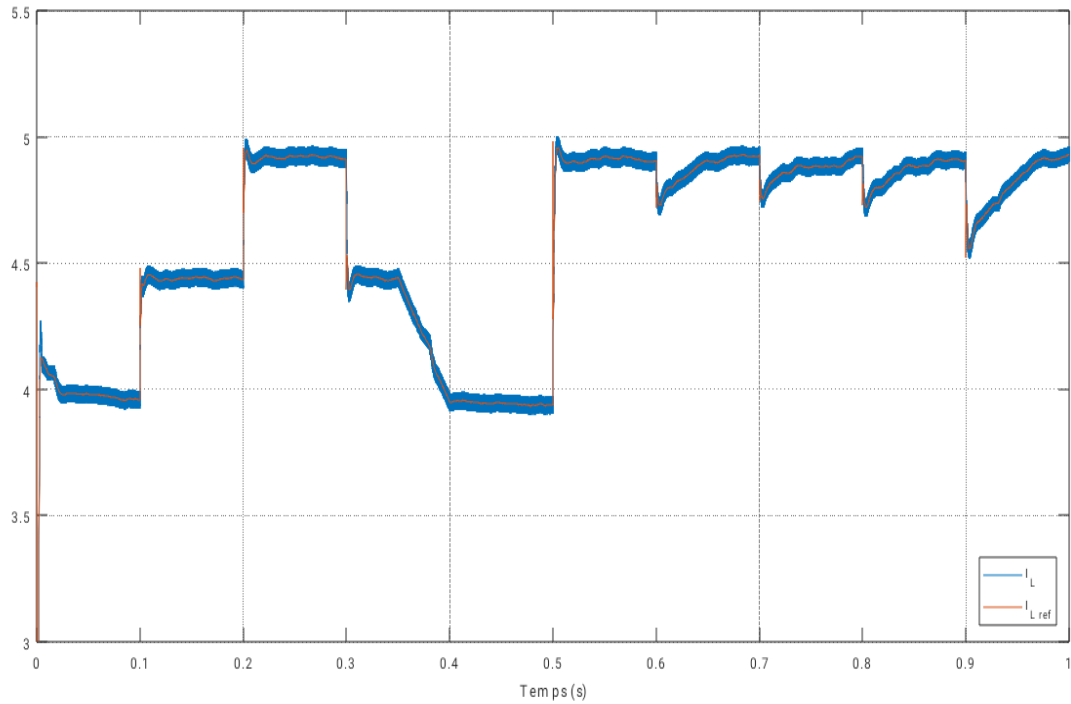


Figure III 8 le courant référence dans les deux cas

résultats PI , la puissance de PV en fonction du temps.

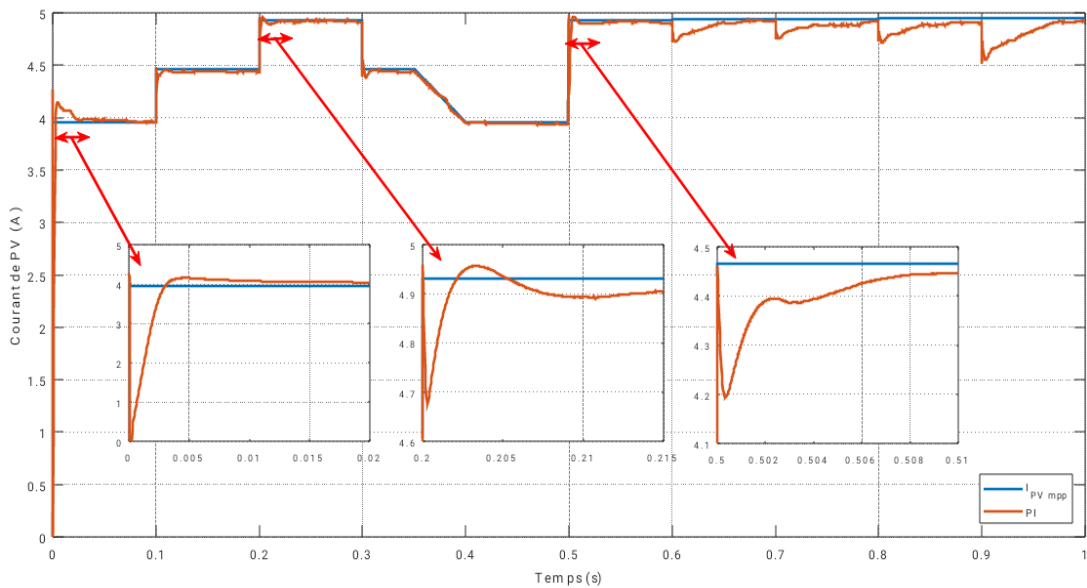


Figure III 9 Courant de PV en fonction du temps

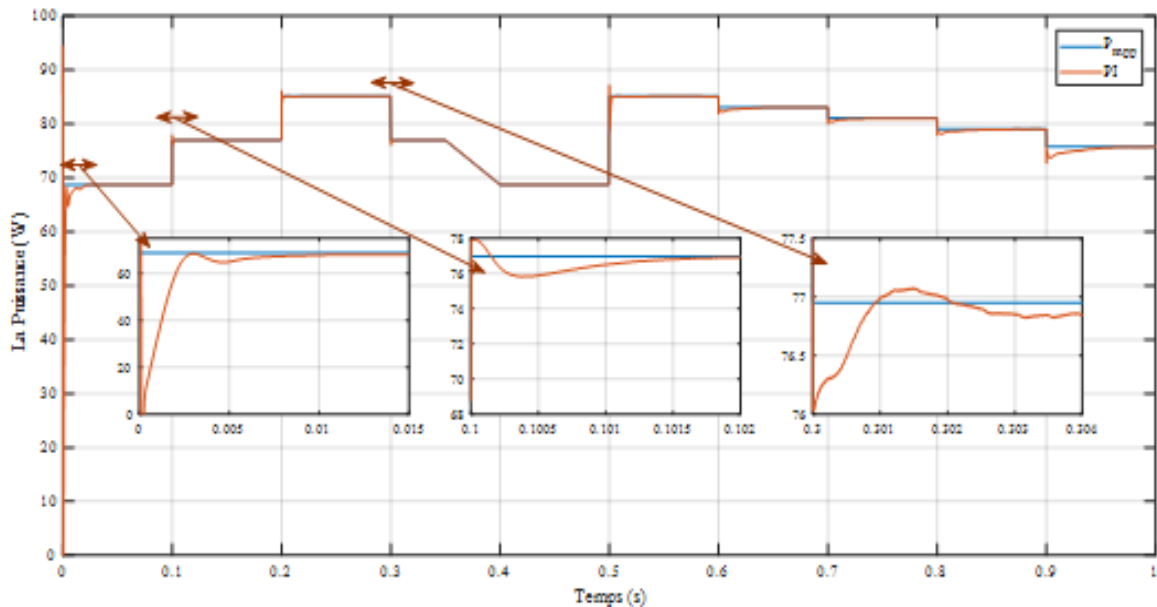


Figure III 10 la puissance de PV en fonction du temps

III.5 Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres [13].

La classification des algorithmes de suivi peut être basée sur la fonction de la technique ou de la stratégie de contrôle utilisée. Ainsi, deux catégories peuvent être proposées : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

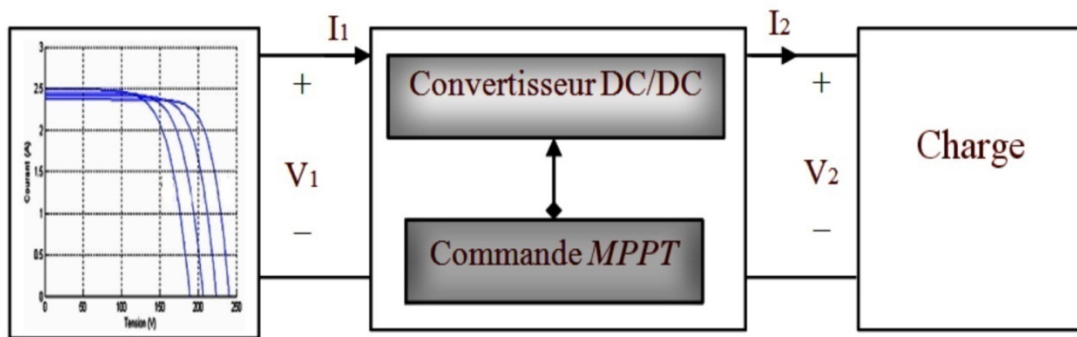


Figure. III 11 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de PMAX du GPV.

III.5.1 Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{co}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis pouvant fonctionner dans des zones géographiques où il y'a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.[14].

III.5.2 Méthodes directes

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

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement.

Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de

recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une haute puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc...[14].

III.6 Méthode de perturbation et observation (P&O)

Le principe des commandes MPPT du type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} . Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [15,16]. Par conséquent, comme le montre la Figure III.8, nous pouvons en déduire que si une augmentation positive de la tension entraîne une augmentation de la puissance, cela signifie que le point de fonctionnement est à gauche du PPM. À l'inverse, si la puissance est réduite, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être fait lorsque la tension est réduite. À partir de ses différentes analyses de l'effet de la variation de tension sur la caractéristique $P(v)$, il est facile de trouver le point de fonctionnement associé au PPM et de commander à ce dernier de converger vers la puissance maximale avec une commande appropriée. perturbations, La puissance photovoltaïque augmente et la direction des perturbations reste inchangée. Sinon, il est inversé pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

La Figure III.12 montre l'algorithme de la méthode P&O. Le principal inconvénient de cette technique est que dans le cas de conditions atmosphériques changeant rapidement (telles que les jours nuageux et ensoleillés), cette méthode déplacera le point de fonctionnement dans la mauvaise direction et la perte de puissance peut être plus importante. Ce réglage incorrect se poursuivra jusqu'à ce que le changement d'éclairage ralentisse ou se stabilise, et le convertisseur statique doit fonctionner en régime permanent avant que de nouvelles perturbations puissent être générées, c'est pourquoi cette méthode est considérée comme trop lente pour trouver une nouvelle

raison de travail pour le point.

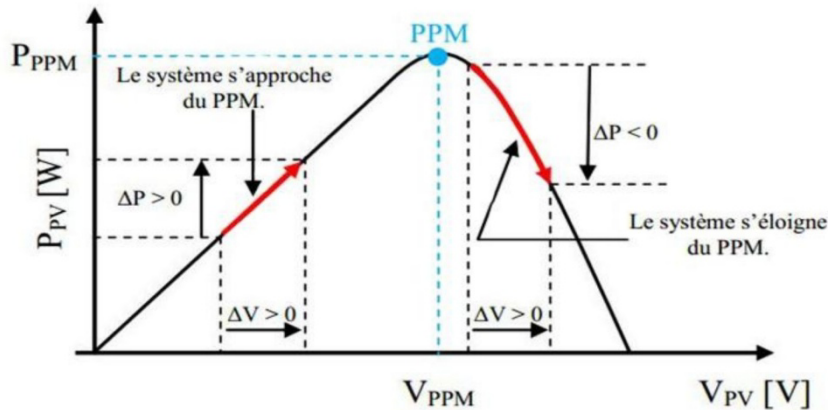


Figure. III 12 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

Sur la (Figure III.13) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce si nous amène à $\Delta P > 0$ avec $[\Delta P = P(K) - P (K-1)]$ le MPPT continu à perturber les tensions dans la même direction c'est-à-dire vers le point B2.

Si l'éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point C1 de la courbe (3) au lieu du point B2 sur la courbe (2) alors le MPPT a toujours $\Delta P > 0$ et il déplace le point de fonctionnement vers le point C2.

A partir des points A → B1 → C1 → C2 l'algorithme P&O continu à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminué.

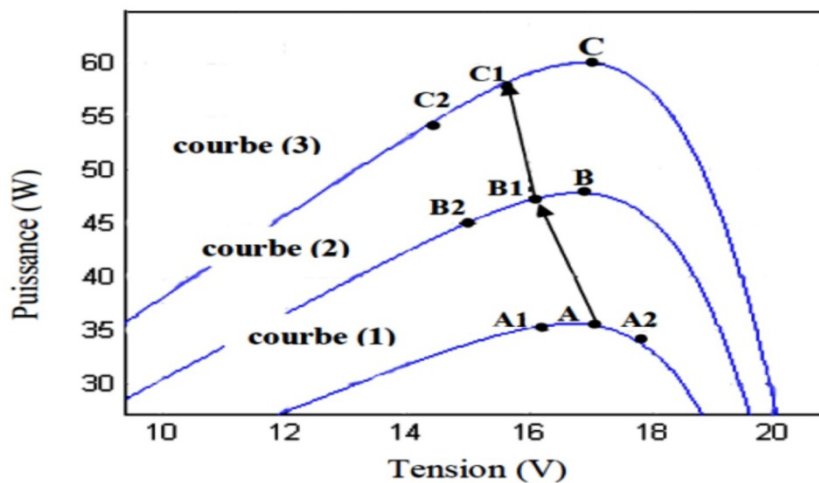


Figure. III 13 Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement

La Figure III.13 représente l'algorithme classique associé à la commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

La méthode P&O est maintenant largement utilisée en raison de sa facilité de mise en œuvre, mais elle pose quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle génère en régime permanent, car le processus de recherche de PPM doit être répété périodiquement, forçant ainsi le système au PPM, une fois atteint ce dernier.

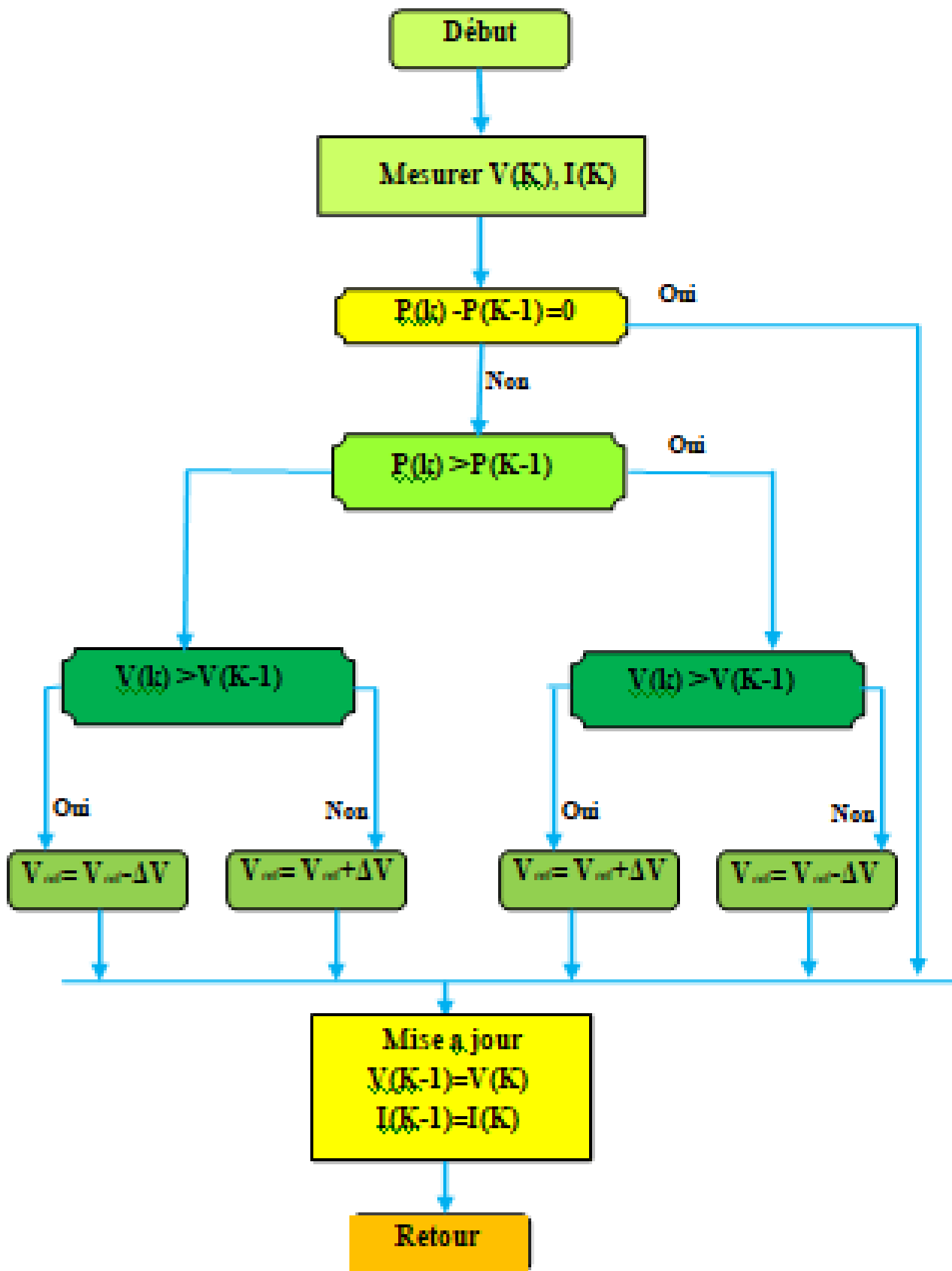


Figure. III 14 Organigramme de la méthode P&O

Chapitre 3 Technique de poursuites du point de puissance maximale basé sur PI

Ce problème a été mis en évidence [17], où la recherche de PPM utilise deux valeurs d'incrément fixes (le deuxième incrément est le double du premier incrément), à partir des formes d'onde proposées, la puissance nécessaire pour atteindre le nouveau PPM lors de changements de puissance de l'ordre de 8 W. Le temps est de 200 ms pour le premier incrément, et l'incrément de valeur haute est divisé par 2. Ce dernier, en revanche, entretient des oscillations autour du PPM.

Malheureusement, la qualité des lectures ne permet pas d'évaluer la précision statique du MPPT obtenu avec ces deux incréments proposés par les auteurs, et d'autres incréments ne peuvent pas non plus être sélectionnés si la technologie du panneau change. Par contre, une étude comparative entre différents algorithmes de recherche [18].

Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de tests qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Les principes de recherche analysés sont, outre la méthode P&O, l'incrément de conductance et une méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert (VOC), détaillées toutes deux dans la suite du document.

Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée, basée sur le principe P&O, affiche un rendement MPPT de l'ordre de 96,5 %. Cependant, aucune indication n'est fournie par l'auteur sur la valeur de la variable d'incrément et si cette valeur est une valeur moyenne ou une valeur liée aux conditions climatiques. En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la Figure III. 14.

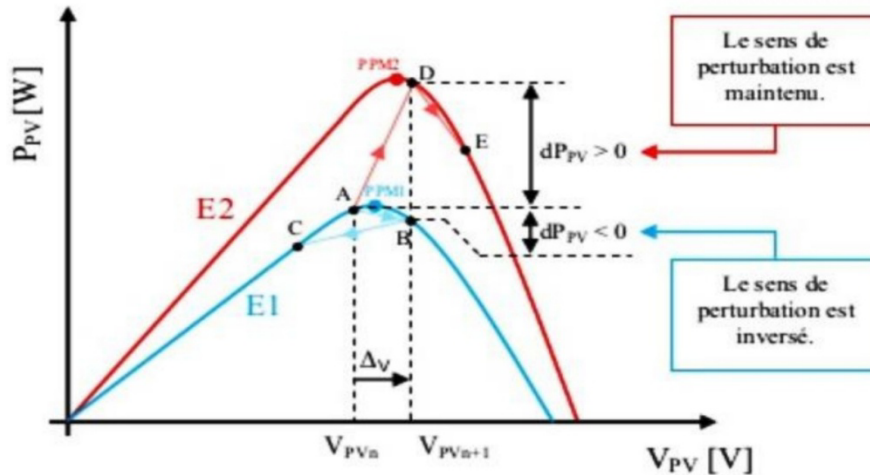


Figure. III 15 Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation

Pour plus de clarté, prenons l'exemple d'un éclairement donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur ΔV , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairement, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques $P(V)$ (E1 à E2)), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une nonoptimisation de la puissance direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non-optimisation de la puissance et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables, de fortes lacunes au niveau de la commande.

Ce cas de figure est d'ailleurs [19], à l'aide de simulations. Pour mettre en évidence ce désagrément, il analyse le comportement de la commande P&O lorsqu'une variation d'ensoleillement, correspondant à une évolution linéaire de l'irradiation de 125

W/m² à 800 W/m², se produit sur une durée de 25 secondes.

Contrairement à la perturbation, la recherche du PPM ne se fait pas linéairement, la commande a tendance à s'éloigner momentanément du PPM, pour converger par la suite vers ce dernier. Dans cet essai, le temps de recouvrement de la commande MPPT s'effectue au bout de 40 secondes, soit 15 secondes après que l'éclairement se MPPT s'effectue au bout de 40 secondes, soit 15 secondes après que l'éclairement de 94,5% pour une durée de fonctionnement de 100 secondes. Ici, comme précédemment, aucune indication n'est formulée sur la valeur de la variable d'incrément utilisée ; il est donc difficile d'évaluer les performances réelles de cette commande.

Pour remédier aux différents problèmes liés à la commande P&O, on a introduit d'autres types de commandes.

Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable perturbatrice. Cependant, des valeurs delta inférieures ralentissent la recherche PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Cela rend la commande difficile à optimiser

III.7 Avantages et inconvénients de P&O

III.7.1 Avantages

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduisent

III.7.2 Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

III.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'étude sur régulateur pi Pour sélectionner le point de puissance maximum avec la commande MPPT, techniques sont appliqué aux convertisseurs DC-DC boost le choix des gains de la commande pour obtenir des hautes performances. De plus, ces commandes présentent la facilité d'implantation en pratique, et nous avons modélisé le convertisseur boost

IV. Chapitre 4:La Commande par backstepping

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous fournirons une comparaison entre les commandes PI et

backstepping La commande MPPT nous donne de tension reference V_{ppm} , Et nous prenons bref à régulateur ce qui est régulateur pi ou backstepping, régulateur Fait fonctionner le maximum point dans le système pour suivre en V_{ppm}

IV.2 La Commande par backstepping

la commande par backstepping est combine la notion de fonction de contrôle de Lyapunov (fcl) avec une procédure récursive de conception. Cela permet de surmonter l'obstacle de la dimension et d'exploiter la souplesse de conception dans le cas scalaire pour résoudre les problèmes de commande pour des systèmes d'ordre plus élevé. Ne faisant pas nécessairement appel à la linéarisation, le backstepping permet, quand il y en a, de conserver les non-linéarités utiles qui, souvent, aident à conserver des valeurs finies du vecteur d'état. Cette technique suppose que l'on soit en mesure de trouver, au moins pour un système scalaire, une loi de commande et une fonction de contrôle de Lyapunov qui stabilisent son origine

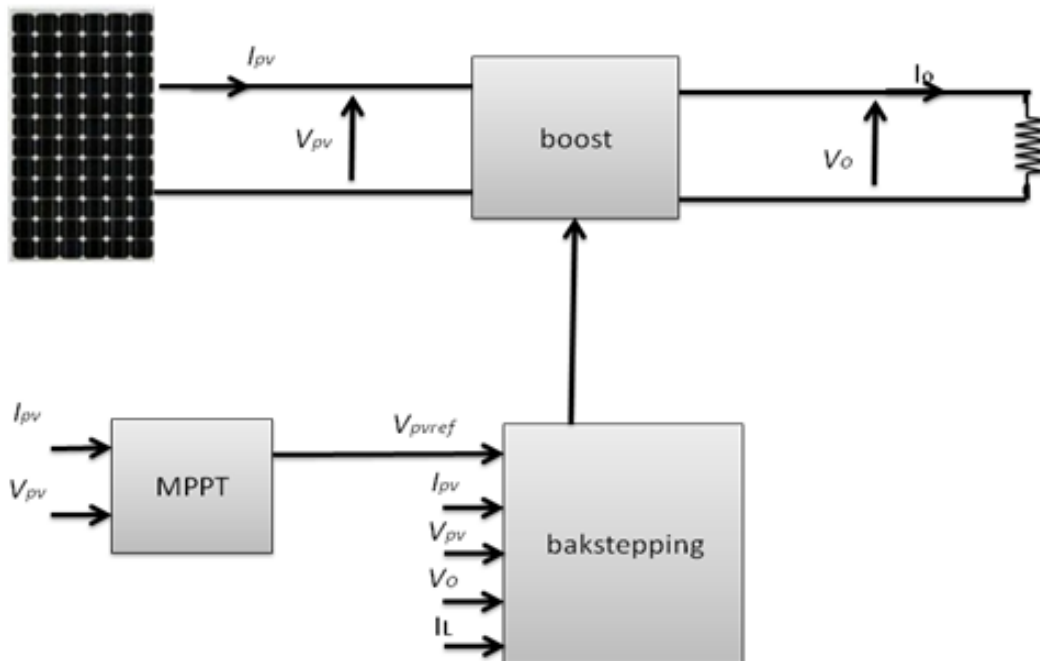


Figure IV 1 schéma commande backstepping avec la Commande mppt

IV.3 A. commande backstepping

Les équations modélisant le convertisseur de suralimentation nécessaire pour. synthèse

Chapitre 4 La Commande par backstepping

de contrôle de backstepping dans le ci-dessus:

- **Étape 1**

La première variable d'erreur de suivi est

$$Z_1 = (V_{pv} - V_{pvref}) \quad \text{IV 1}$$

En utilisant les équations dynamiques du boost, nous concluons à la mauvaise dérivée.

$$\dot{z}_1 = (V_{pv} - V_{pvref}) = \frac{1}{C_p} (I_{pv} - I_L) - V_{pvref} \quad \text{IV 2}$$

La fonction Lyapunov suivante est considérée :

$$V_1(z_1) = V_1 = \frac{1}{2} Z_1^2 \quad \text{IV 3}$$

La dérivée par rapport au temps à l'aide de l'équation (IV 2) est :

$$\dot{V}_1 = Z_1 \dot{Z}_1 = Z_1 \left(\frac{1}{C_p} (I_{pv} - I_L) - V_{pvref} \right) \quad \text{IV 4}$$

La sélection judicieuse de a_1 permet d'écrire

$$Z_1 = -K_1 Z_1 \quad \text{IV 5}$$

et ferait :

$$\dot{V}_1 = -K_1 Z_1^2 \leq 0 \quad \text{IV 6}$$

Assurez-vous donc que le sous-système décrit dans les équations dynamiques du convertisseur boost est stable

Où k_1 est une constante positive qui représente une conception. Paramètre du contrôleur de backstepping.

La fonction de stabilisation est ensuite définie donnée par :

$$a_1 = I_{pv} + C_p (K_1 Z_1 - V_{pvref}) \quad \text{IV 7}$$

D'où la stabilité asymptotique du système (IV 2) à l'origine.

- **Étape 2**

Chapitre 4 La Commande par backstepping

La deuxième variable d'erreur qui représente la différence. entre la variable d'état I_L et sa valeur souhaitée α_1 est. Défend par :

$$Z_2 = I_L - \alpha_1 \quad \text{IV 8}$$

Ensuite, les équations système dans l'espace des erreurs (Z_1, Z_2) sont Dédut:

$$Z_1 = -\frac{1}{C_p}(\alpha_1 + Z_2) + \frac{1}{C_p}i_{pv} - V_{pvref} \quad \text{IV 9}$$

$$Z_2 = \frac{1}{L}(V_{pv} - (1 - U_1) \cdot V_o) - \alpha_1 \quad \text{IV 10}$$

La nouvelle fonction Lyapunov :

$$V_2(Z_1, Z_2) = V_1 + \frac{1}{2}Z_2^2 \quad \text{IV 11}$$

Le dérivé peut être exprimé par :

$$V_2(Z_1, Z_2) = V_2 = Z_1 Z_1 + Z_2 Z_2 \quad \text{IV 12}$$

$$V_2(Z_1, Z_2) = Z_1 \cdot \left(-\frac{1}{C_p}Z_2 - K_1 Z_1 \right) + Z_2 \cdot \left(\frac{1}{L}(V_{pv} - (1 - u_1) \cdot V_o) - \alpha_1 \right) \quad \text{IV 13}$$

$$V_2 = -K_1 Z_1^2 + Z_2 \cdot \left(-\frac{1}{C_p}Z_1 + \frac{1}{L}(V_{pv} - (1 - u_1) \cdot V_o) - \alpha_1 \right) \quad \text{IV 14}$$

Dans cette commande d'étape u_1 est choisi de manière à obtenir l'expression. suivante :

$$-K_2 Z_2 = \left(-\frac{1}{C_p}Z_1 + \frac{1}{L}(V_{pv} - (1 - u_1) \cdot V_o) - \alpha_1 \right) \quad \text{IV 15}$$

D'où l'expression de la commande U_1 à produire par le contrôleur backstepping

$$: U_1 = 1 - \frac{1}{V_o} \left[V_{pv} - L \alpha_1 - L \left(\frac{1}{C_p} Z_1 - K_2 Z_2 \right) \right] \quad \text{IV 16}$$

Avec $K_2 > 0$ conduit à dérivé négatif de la fonction Lyapunov. ;

$$V_2 = -K_1 Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \leq 0 \quad \text{IV 17}$$

Ce qui garantit que les variables d'erreur (Z_1, Z_2) convergent asymptotiquement à l'origine, ce qui implique que I_L converge asymptotiquement à l'origine V_{pvref} ainsi l'extraction de la. puissance maximale de la matrice PV est effectuée.

C. Tension de référence de puissance maximale

Le rôle de l'algorithme MPPT est de calculer la tension de sortie optimale du panneau photovoltaïque appelé V_{pvref} permettant au système photovoltaïque de fonctionner à son MPP. Pour cela, le algorithme bien connu de incrémentielle conductance algorithme est utilisé.

IV.4 Résultat de simulation

Les paramètres électriques du système étudié sont consignés dans le tableau

Table IV 1 Paramètres du système photovoltaïque étudié

Coefficient de température de (K_i)	0.0039
Constante de boltzmann (K)	1.38e-23
Facteur d'ajustement de la courbe (n)	1.3
Courant de court-circuit (I_{sc})	5.33A
Tension à circuit-ouvert (V_{oc})	21.83V
Charge de l'electron (q)	1.6e-19
Energie de band gab ($Eg0$)	1.1
Température de reference de la cellule (Tn)	298
Resistance shunt (R_{sh})	445
Resistance shunt (R_s)	0.25
Nombre de cellules en série (Ns)	36

paramètres du convertisseur hacheur boost

Table IV 2 paramètres du convertisseur hacheur boost

$L = 0.01h$
$C_o = 220uf$

$C_{pv} = 100\mu f$
$R = 70\Omega$

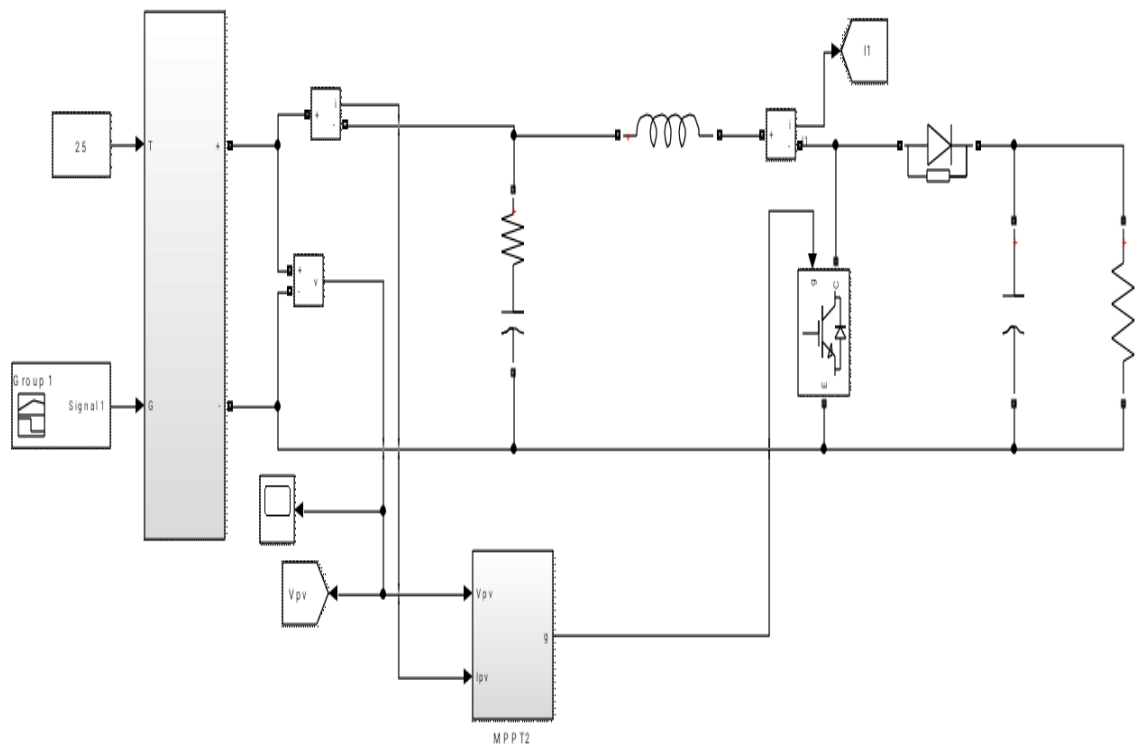


Figure IV 2 représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié.

- Figure IV 2:représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié sous Matlab/Simulink.

Chapitre 4 La Commande par backstepping

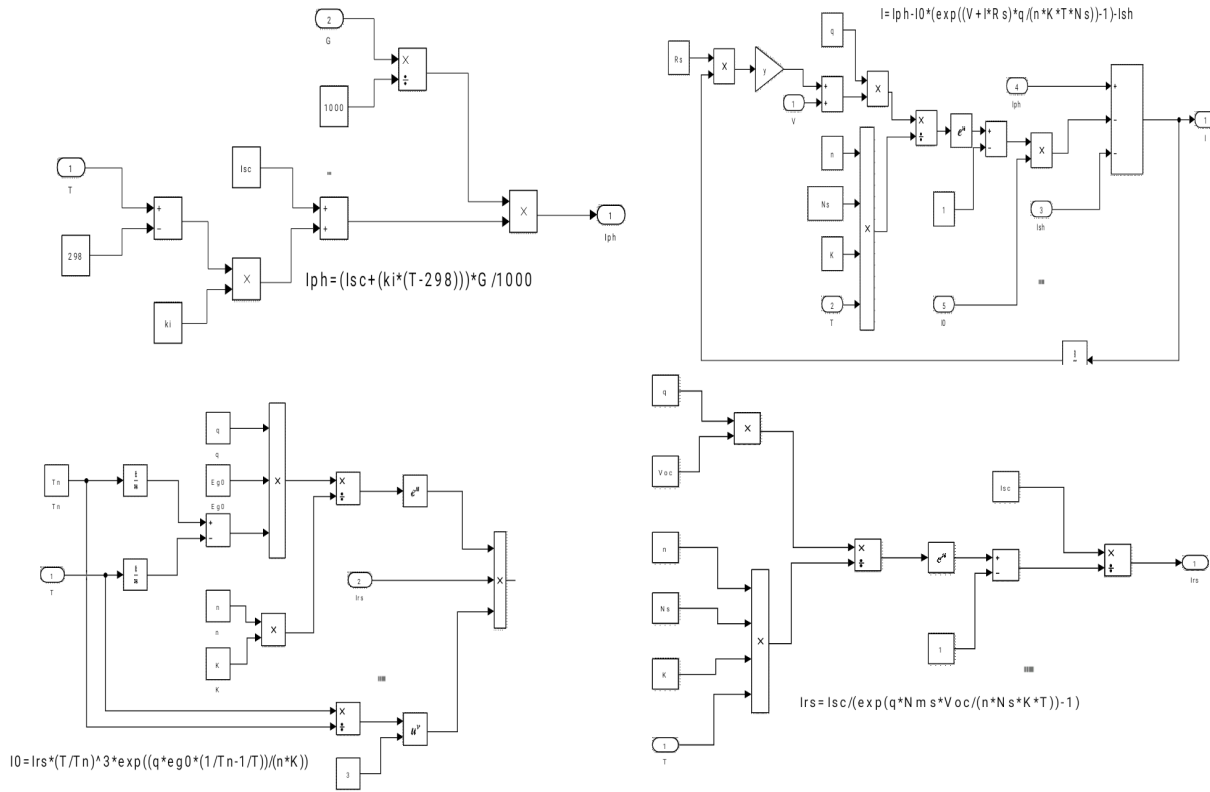


Figure IV 3 Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB

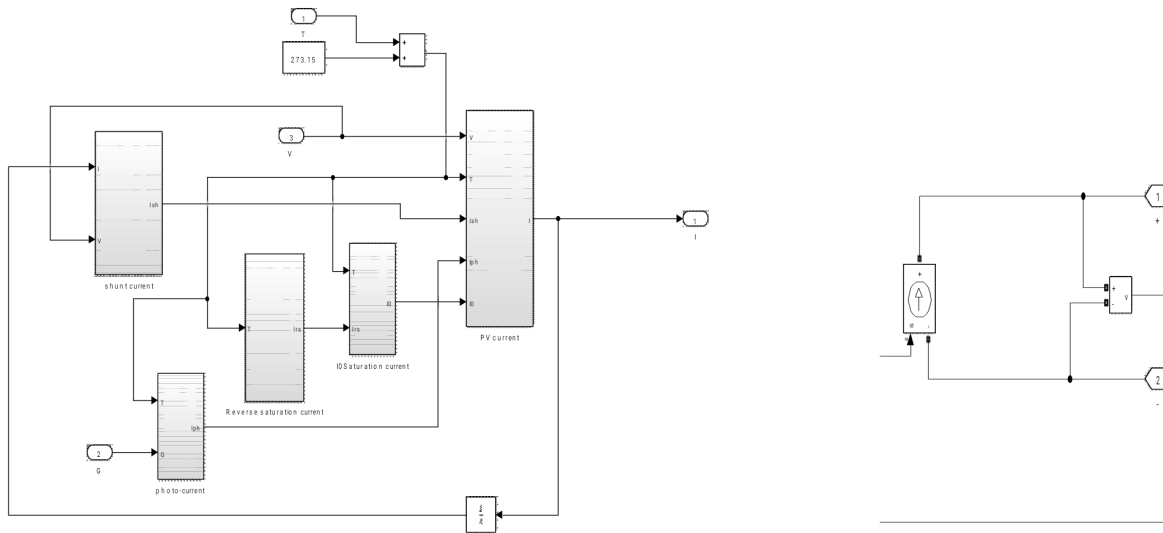


Figure IV 4 Schéma bloc du GPV dans SIMULINK/MATLAB

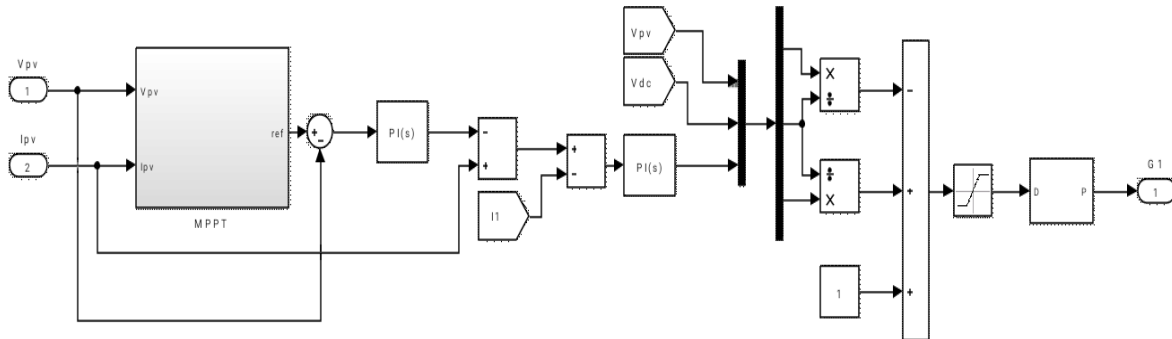


Figure IV 5 Schéma bloc du la-strategie-de-commande

Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques:

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par un 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_{cc} . 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})

Influence de l'éclairement sur notre module PV

En fixant la température pour différents éclairements figure (IV 6) et (IV 7), on remarque pour Figure IV 6 que pour l'éclairement de 1000 w/m2 et un courant $I_{cc}=5.4A$, et pour $G=800w/m2$ avec un courant $I_{cc} = 4.3A$, et pour $G=600w/m2$ avec un courant $I_{cc} = 3.2A$, on peut voir que le courant subit une variation importante. L'éclairement augmente le courant de court -circuit, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté Figure (IV 7)

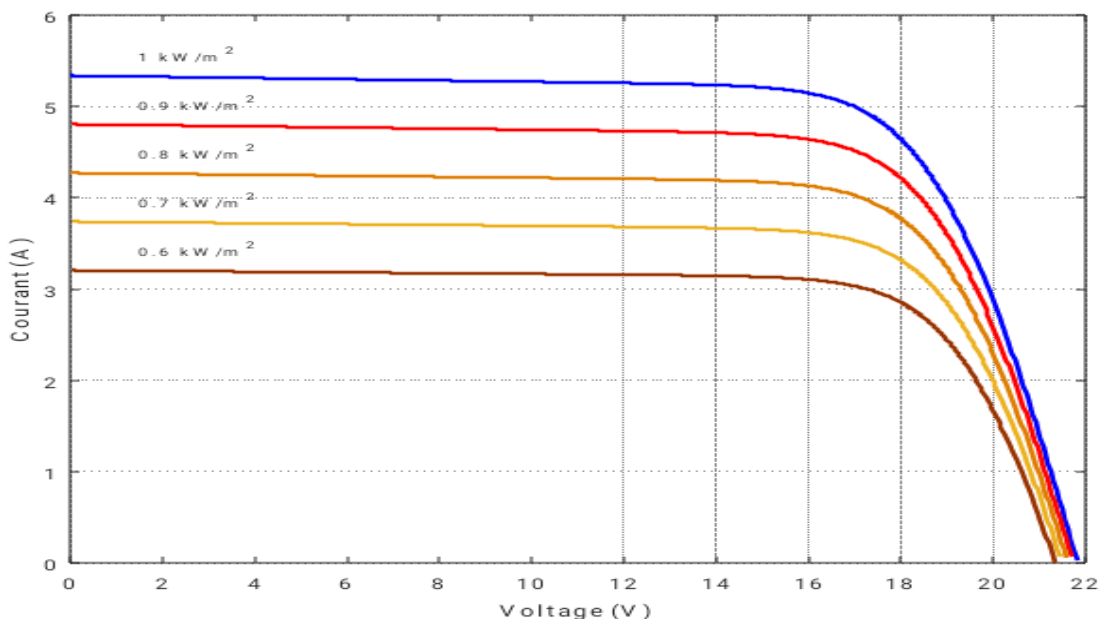


Figure IV 6 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

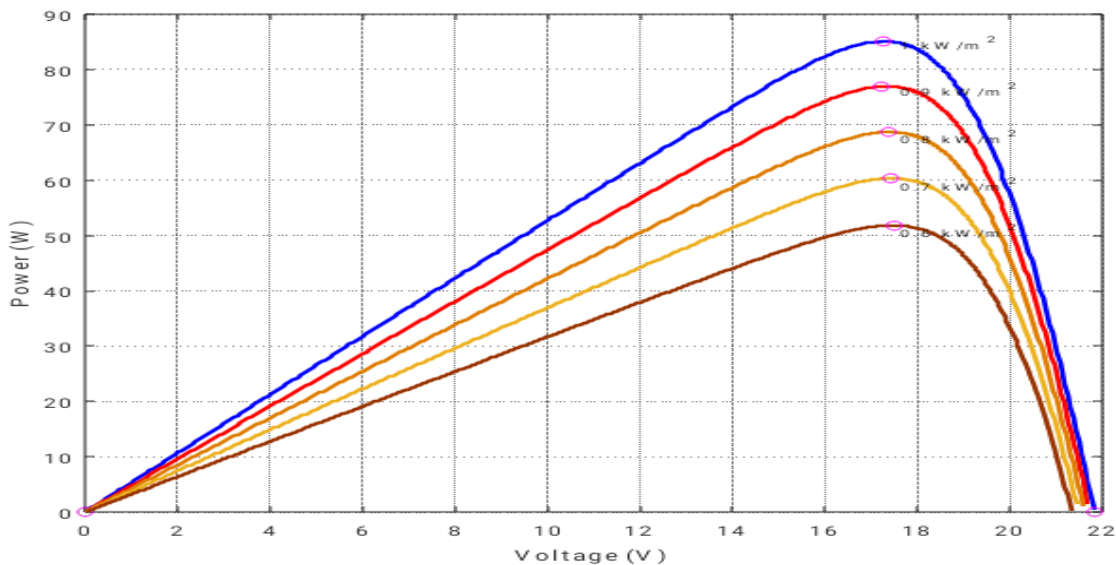


Figure IV 7 Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V

Influence de la température sur notre module PV

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques (I-V) et (P-V) Figure (IV 8) et (IV 9) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour

différentes températures : pour la figure (IV 8), nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (IV 9)

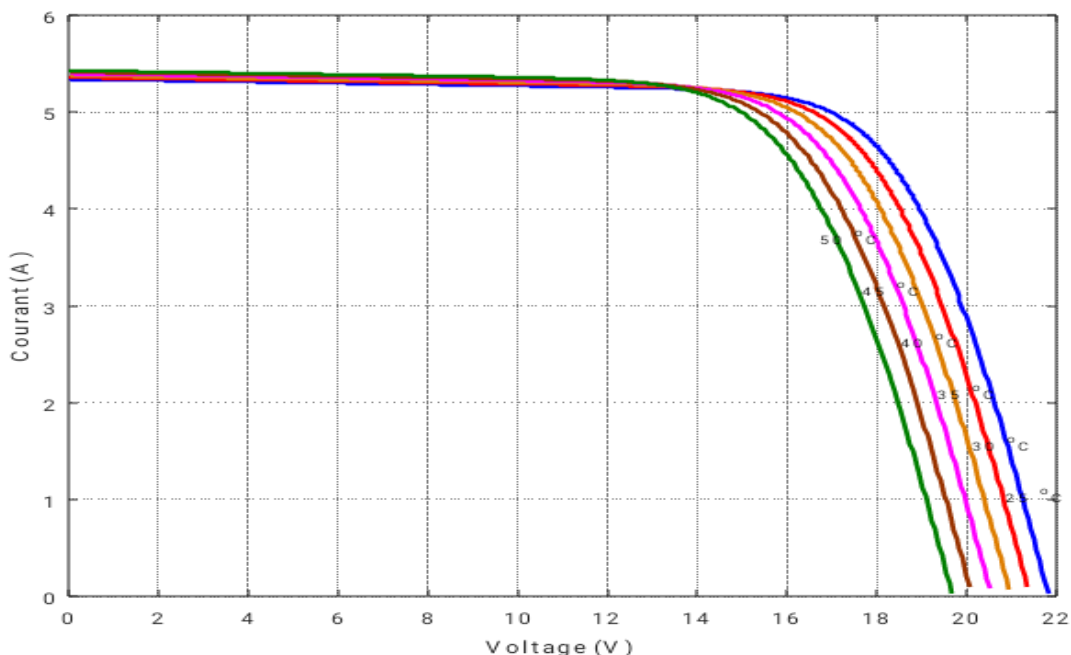


Figure. IV 8 Effet de la température sur la caractéristique I-V

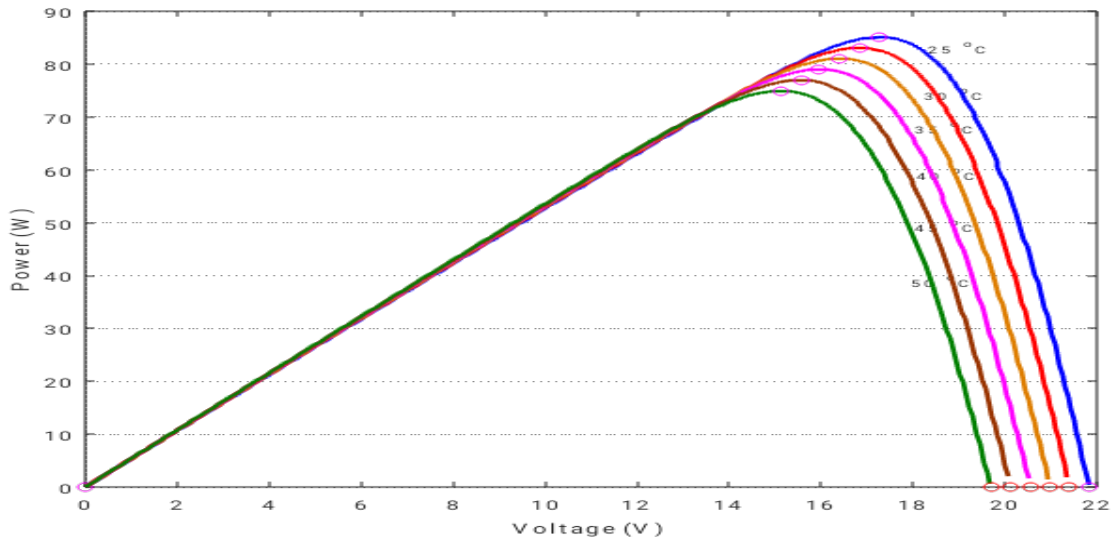


Figure. IV 9 Effet de la température sur la caractéristique P-V

Cette le profile de condition atmosphérique pour utilisation à simulation

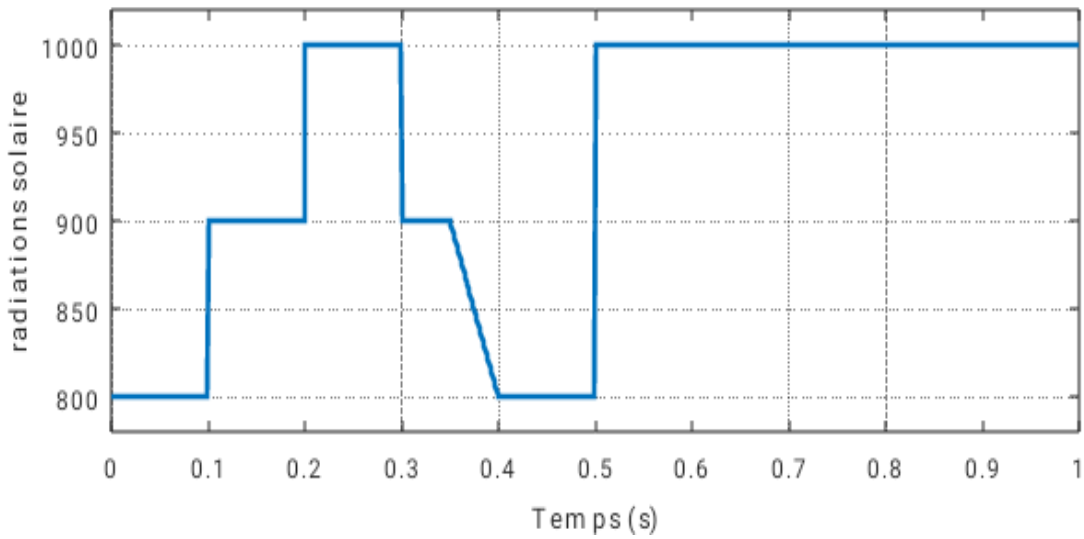


Figure. IV 10 le profile de simulation de condition atmosphérique

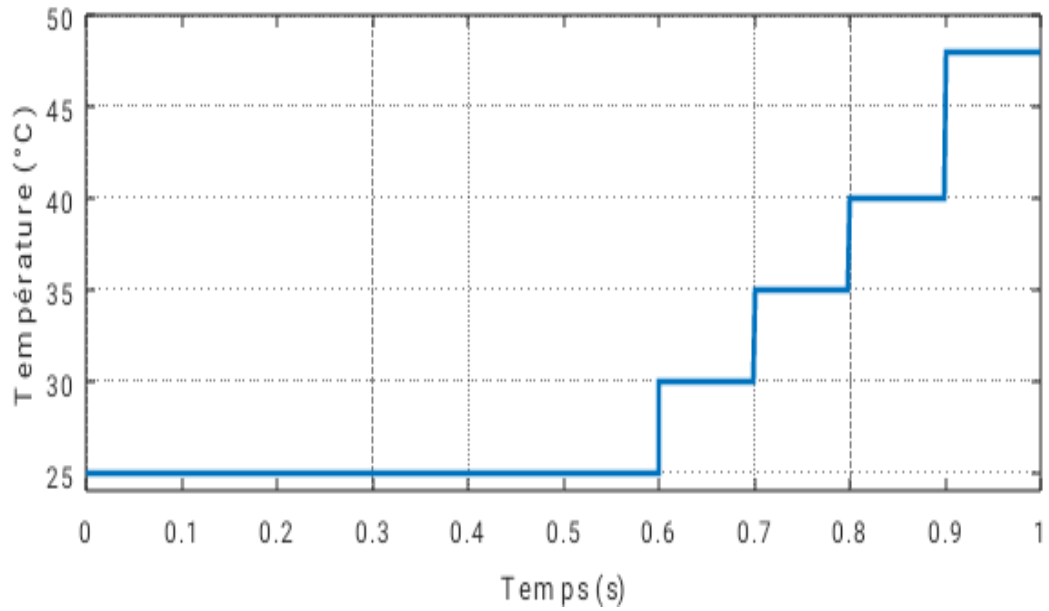


Figure. IV 11 le profile de simulation de condition atmosphérique

Les figures suivantes représentent comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur PI A travers les courbes suivantes, nous observons les variables V_{pv} et V_{mpp} en fonction du temps, Il y a dépassement in V_{pv} Toutes les 0,1 seconde Quand ça change radiation solair .

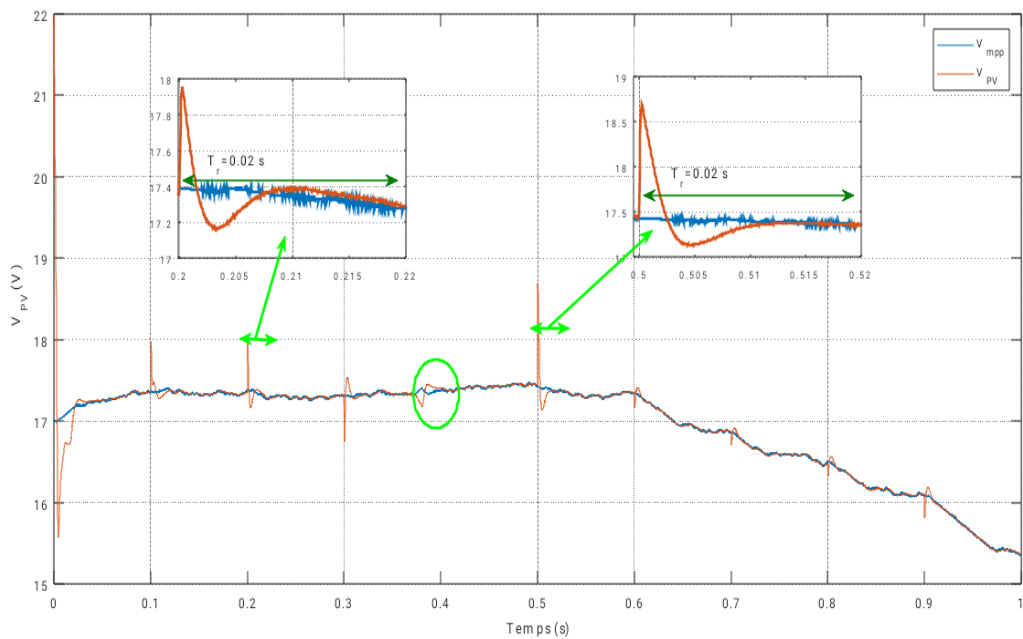


Figure. IV 12 comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur PI

Chapitre 4 La Commande par backstepping

Les figures suivantes représentent le comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur backstepping. À travers les courbes suivantes, nous observons les variables V_{pv} et V_{mpp} en fonction du temps. Il y a un dépassement dans V_{pv} , mais ses résultats sont bien meilleurs que Pi, car il est plus rapide de répondre, et moins de dépassement.

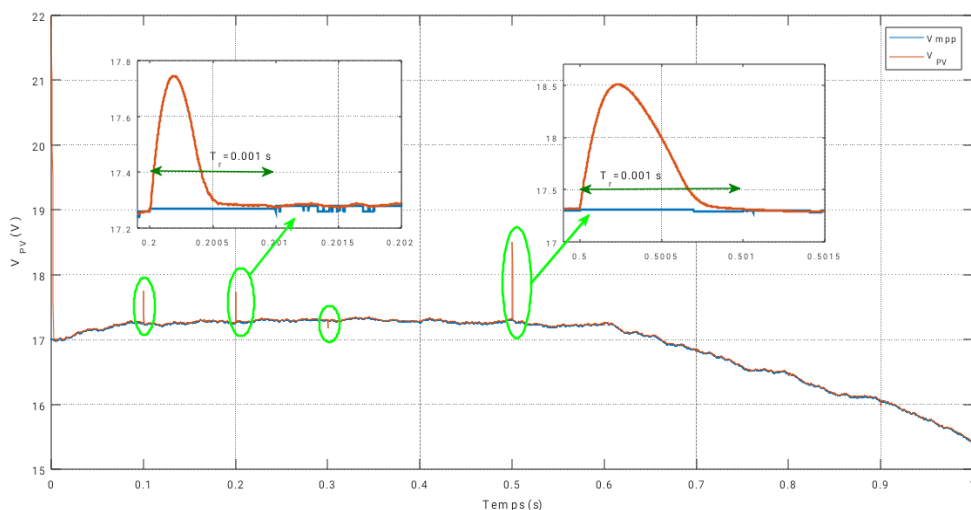


Figure. IV 13 comportement de la tension de panneau solaire utilisant le contrôleur Backstepping

Le courant de la bobine suit le courant référence dans les deux cas

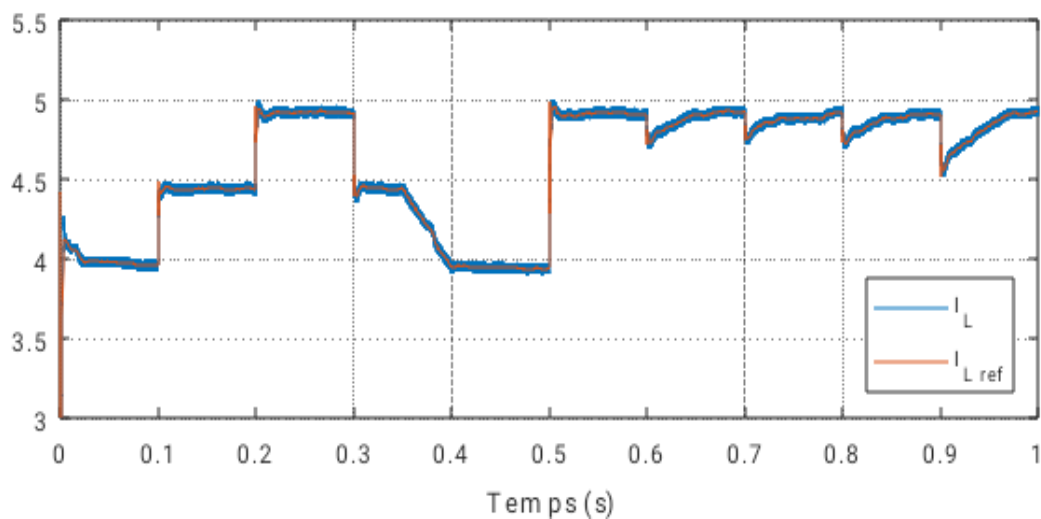


Figure IV 14 courant référence dans les deux cas

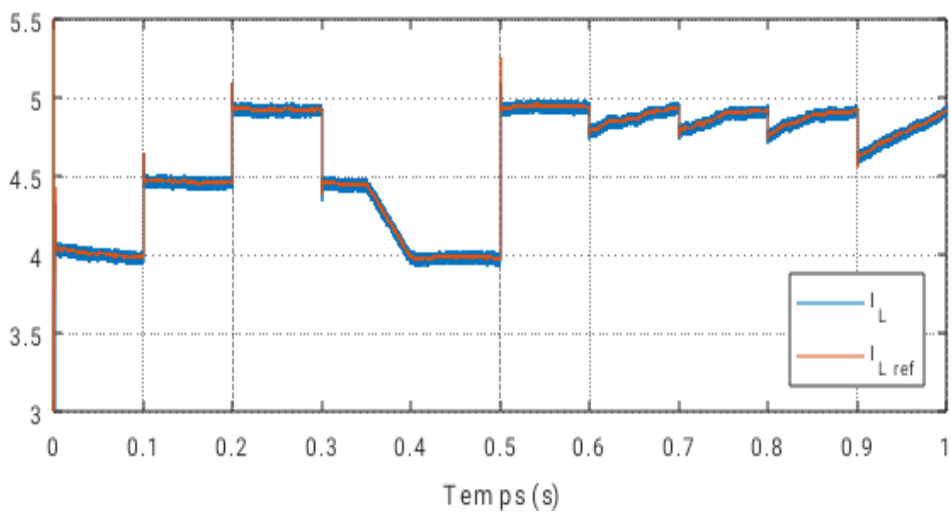


Figure. IV 15 le courant référence dans les deux cas

résultats backstepping sont bien meilleurs que Pi, car il est plus rapide de répondre, Et moins dépassement.

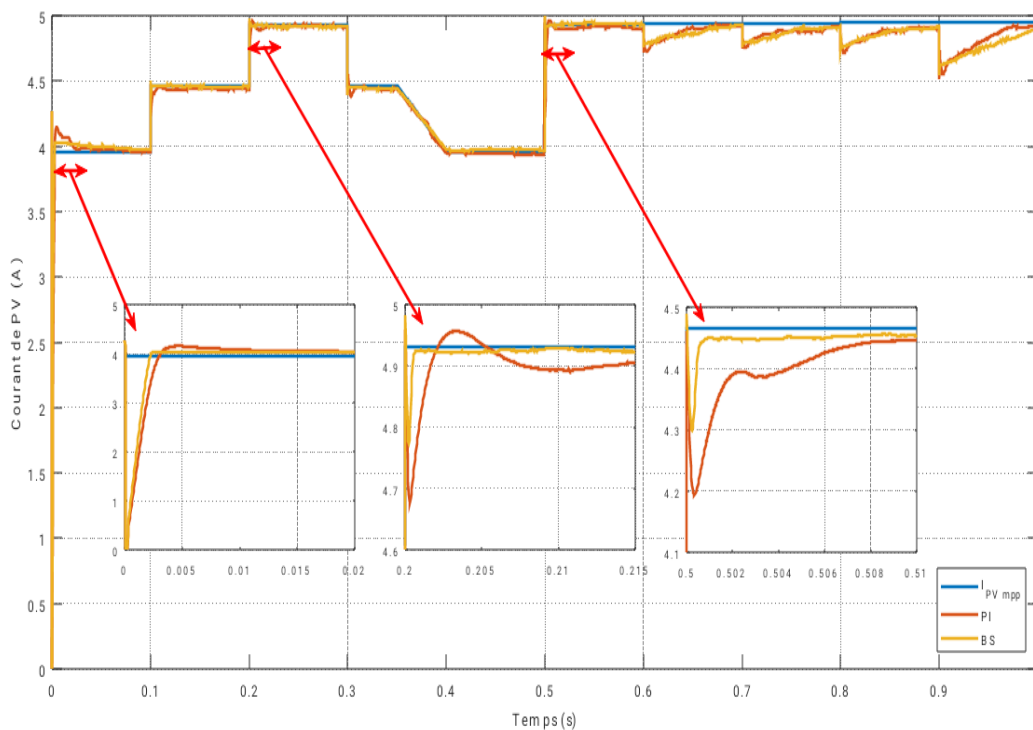


Figure . IV 16 Courant de PV en fonction du temps

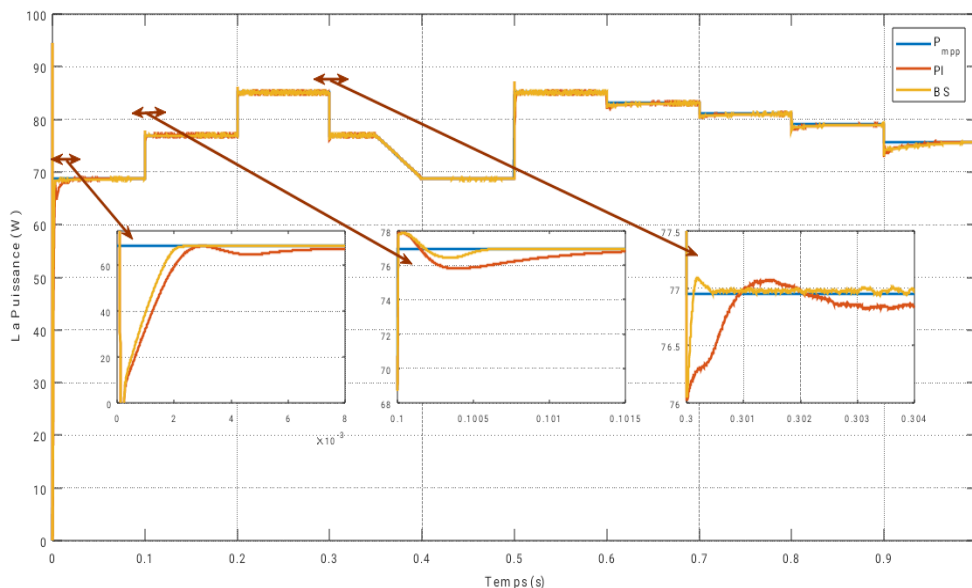


Figure IV 17 la puissance de PV en fonction du temps

Le tableau suivant représente comparaison entre les contrôles PI et backstepping, nous observons résultats backstepping sont bien meilleurs que PI, car il est plus rapide de répondre, Et moins dépassement.

Table IV 3 comparaison entre les contrôles PI et backstepping

	MPPT base sure controlleur PI	MPPT base sure controlleur BS
Temps de response)s(0.02	0.001
Dépassement	Elever	Moyenne
Rendement	99.4%	99.78%
Ondulation	0.06%	0.1%
IAE)Integral Absoute Error of power(0.216	0.2
RMSE)Root Main Square Error of power (2.03	1.86

IV.5 Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion de convertisseurs statiques (généralement un convertisseur DC-DC) entre le générateur et la charge. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs minimisent l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous avons appliqué commandes MPPT avec PI et commande MPPT avec backstepping

Nous avons ensuite présenté des résultats de simulation pour une variation de la température et de l'éclairement. Les résultats de simulation montre un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV en utilisant la commande MPPT-PI. et backstepping , résultats backstepping sont bien meilleurs que Pi, car il est plus rapide de répondre , Et moins Dépassement.

Conclusion générale

Conclusion générale

De par sa situation géographique, l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays

ensoleillés dans le monde et grâce à son Sahara qui constitue un gisement solaire immense peut devenir le premier pays bénéficiant de ce type d'énergies renouvelables. Quoique la maîtrise du caractère aléatoire de cette source d'énergie reste l'un des défis à surmonter afin de mieux l'exploiter.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'Optimisation énergétique de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Qui vise à améliorer les performances de fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) contrôlé par la technologie MPPT, assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le champ photoélectrique.

Dans le premier chapitre, nous avons représenté le principe de conversion photoélectrique et la chaîne de conversion photoélectrique. Nous avons constaté que les performances du module du générateur photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, en particulier le rayonnement solaire et la température. Pour faire fonctionner un générateur photovoltaïque avec une efficacité optimale, il faut insérer des transformateurs statiques entre le générateur et le récepteur. Pour s'assurer que le générateur PV fonctionne à son point de puissance maximum, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés au suivi PPM afin de réduire l'erreur entre la force de manœuvre et la puissance de référence variable maximale en fonction des conditions climatiques.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons la modélisation de la cellule, du générateur photoélectrique et du convertisseur qui est contrôlé par la méthode de suivi de puissance maximale qui est l'algorithme de Perturbation & Observation, et présentons

certain types de convertisseurs DC-DC, est introduite pour faire correspondre la source avec la charge.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté des simulations de deux types de hacheurs boost permet de déterminer la puissance maximale en fonction des changements de conditions Météorologie (rayonnement solaire et température ambiante). Grâce à la simulation du système et à l'étude des résultats, nous avons conclu ce qui suit :

- Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire une adaptation entre la source (GPV)

et la charge pour avoir un transfert maximal de puissance. Ceci est possible en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.) ;

- Un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est atteint en utilisant

la commande MPPT

Nous avons appliqué deux commandes PI et backstepping, Nous avons vu les résultats backstepping sont bien meilleurs que PI, car il est plus rapide de répondre, et moins de dépassement.

De plus, à l'avenir, vous pourrez compléter l'étude en utilisant d'autres techniques

hybrides de maximisation de puissances MPPT et des autres types de convertisseur DC-DC,

comme le convertisseur SEPIC et le convertisseur boost à trois niveaux que nous aurions aimé utiliser mais nous n'avons plus le temps.

V. Bibliography

- [1] **Saloux Etienne**, « Optimisation Structurale des Systèmes Énergétiques », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de philosophie doctor, école polytechnique de montréal, juin 2014.
- [2] **Sofiane Abada**, « Étude et Optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.), Université Laval Québec, 2011.
- [3] **Mohamed Amarouyache**, « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de Doctorant, Université Constatine1, 2014
- [4] **Rafika Khezzar**, « Optimisation de Chaîne de Conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1, 2017.
- [5] **Yassine Lasmi**, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Mémoire de Magister, Université Ferhat ABBAS Sétif-1 2013.
- [6] R. Lakehal « Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres » mémoire de master université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [7] Belakehal, S. (2010). Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables.
- [8] Sofia, B. L. (2015). Cours Energie Solaire Photovoltaïque. *Université A. MIRA de BEJAIA, Année universitaire 2014.*
- [9] Zimmer, T. Types de cellules photovoltaïques. *Université de bordeaux, France.*
- [10] TP01
mesure_du_rayonnement_solaire_ur_batna2_2019

- [11] Y. BOUVIER and S. PEHLIVANIAN, "Une histoire à écrire: le photovoltaïque."
- [12] Cherifi, S., & Haddad, M. (2019). L'énergie solaire: Un moteur du développement durable en Algérie. *les cahiers du cread*, 35(3), 95-127.
- [13] M. F. Shraif, "Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique." Toulouse 3, 2002.
- [14] E. Lakhdar and C. Khalid, "Etude et Optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximal (MPPT)," 2020.
- [15] N. Kacimi, S. Grouni, A. Idir, and M. Seghir Boucherit, "New improved hybrid MPPT based on neural network-model predictive control-kalman filter for photovoltaic system," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 20, no. 3, p. 1230, 2020.
- [16] N. Khaehintung, T. Wiangtong, and P. Sirisuk, "FPGA implementation of MPPT using variable step-size P&O algorithm for PV applications," in 2006 International Symposium on Communications and Information Technologies, 2006, pp. 212–215.
- [17] W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'sullivan, "A new maximum power point tracking system," in Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference-PESC'93, 1993, pp. 833–838.
- [18] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," Prog. photovoltaics Res. Appl., vol. 11, no. 1, pp. 47–62, 2003
- [19] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Improved MPPT algorithms for rapidly
- [20] ACHOUR Abderraouf, « Analyse et commande d ' un hacheur Buck-boost», mémoire de master: Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [21] Mr : Belkaid Abdelhakim, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome», Doctorat en sciences: Université Ferhat Abbes - Sétif, 2015.
- [22] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », , octobre 2001, EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.http://leiwwww.epfl.ch/cours/cvs_dc/dc.pdf
- [23] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.
- [24] ZianiSeyfeddine et OuldMammar Mohamed,«Etude et simulation d'un

hacheur

Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) », Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2017.

[25] Lasgaa Habib Chaouki, «Commande d'un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible», Université Mohamed Khider de Biskra

[26] SAHRAOUI M , "Contrôle robuste des systèmes non linéaires par les approches de l'intelligence artificielle", DOCTORAT EN SCIENCES, Université d'Oran 1 A. Ben Bella, 2016.