

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

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Electronique



Projet de fin d'études

**Pour l'obtention du titre
d'Ingénieur d'Etat en Electronique**

THEME :

**OPTIMISATION D'UN GENERATEUR
PHOTOVOLTAÏQUE AVEC UNE COMMANDE
MPPT NUMERIQUE**

Présenté par :
M.ZEGGAOUI Said

Encadré par :
M. C.LARBES (ENP)

Promotion : 201 3
Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hacem Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu de m'avoir donné la patience de terminer ce travail.

*Mes remerciements les plus particuliers vont à mon encadreur
Monsieur **LARBES Cherif**
pour son rôle majeur dans l'élaboration
de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions
pertinentes, qu'il trouve ici mon vif témoignage en reconnaissance de
son
rôle important dans l'amélioration du manuscrit de ce mémoire.
Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de
participer au jugement de ce travail.*

*Je tiens à témoigner toute ma gratitude à Monsieur
HADDADI Mourad
Et Monsieur*

AIT-CHEIKH Salah Mohamed

*Je réserve une pensée toute particulière à mes chers parents qui
m'ont toujours soutenu et guidé tout au long de mes études. Qu'ils
trouvent, en ce mémoire, le modeste témoignage de ma profonde
reconnaissance.*

*Enfin, j'aimerais remercier ma famille, ainsi que mes amis qui m'ont
aidé et encouragé tout au long de mon travail.*

Résumé

Ce mémoire présente une étude d'un chargeur de batterie solaire avec un suiveur du point de puissance maximale (MPPT) qui a été introduit en vue d'obtenir un rendement énergétique maximal.

L'interface entre le panneau solaire et la batterie a été réalisée en utilisant un convertisseur DC-DC SEPIC commandé par un microcontrôleur « PIC 18F1220 ».

Grâce à la méthode Perturb & Observ (P&O) l'algorithme MPPT mesure périodiquement la tension et le courant du panneau solaire pour calculer la puissance délivrée par ce dernier. Suivant le résultat obtenu, l'algorithme ajustera le rapport cyclique du convertisseur pour amener le système vers le point de fonctionnement à puissance maximale.

Mots clés :

- MPPT - photovoltaïque - SEPIC

Abstract

This thesis presents a study on a solar battery charger with a tracker of the maximum power point tracking (MPPT) which was implemented in order to optimize the energy efficiency. The interface between the solar panel and the battery was carried out using a SEPIC DC-DC Converter controlled by a "PIC18F1220" the microcontroller.

With the method Perturb & Observ (P&O), the MPPT algorithm senses the solar panel voltage and current to calculate the power. Using the obtained result, the MPPT algorithm adjusts the converter duty cycle to bring the system to maximum power operating point.

Keywords:

- MPPT - Photovoltaic - SEPIC

ملخص

هذه المذكرة تقدم دراسة شاحن البطارية الشمسية مع أتباع أقصى نقطة طاقة (MPPT)، الذي قدم من أجل تحقيق أقصى قدر من الكفاءة في استخدام الطاقة.

تم تنفيذ واجهة بين الألواح الشمسية والبطارية باستخدام محول DC-DC SEPIC يسيطر عليها متحكم "الموافقة المسبقة عن علم 1220F18".

بفضل طريقة (P & O) و خوارزمية MPPT يقيس دوريا الجهد والتيار من الألواح الشمسية لحساب طاقة هذا الأخير. اعتمادا على النتيجة، الخوارزمية يضبط دورة العمل من المحول لجلب النظام إلى نقطة عملية في الطاقة القصوى.

كلمات البحث:

- MPPT - فوطوضئية - SEPIC

Sommaire

Sommaire.

Liste des figures.

Introduction générale	01
Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque	
I-introduction.....	05
I-1-Généralité sur soleil.....	06
I-1-1- Rayonnement solaire.....	06
I-1-2- Spectre du rayonnement.....	06
I-1-3- Différents types de rayonnement.....	07
I-1-4- Orientation et inclinaison	09
I-2- Les systèmes photovoltaïques.....	10
I.2-1- L'isolé	10
I.2-2- Le connecté au réseau.....	11
I-3- Générateur photovoltaïque.....	12
I-3-1-Semi-conducteur	13
I-3-2-La jonction N-P.....	13
I-4- Les cellules photovoltaïques.....	14
I-4-1-Principe de fonctionnement.....	16
I-4-2-Les différentes types des cellules photovoltaïques.....	17
a) Silicium monocristallin.....	17
b) Silicium poly (ou multi-) cristallin	18

Sommaire

c) Silicium amorphe	19
I-4-3-Paramètres des cellules photovoltaïques.....	20
a) Courant de court-circuit ICC	20
b) Tension à circuit ouvert VCO	20
c) Puissance maximale	21
d) Rendement d'une cellule.....	21
e) Le facteur de remplissage.....	22
I-4-4- Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque..	22
I-5- Le module photovoltaïque.....	24
I-5-1-Association des modules photovoltaïques	25
I-5-2 Le panneau solaire.....	27
I-6- Système de conversion.....	28
I-6-1 Le convertisseur continu-continu	28
I-6-2 Le convertisseur continu- alternatif.....	28
I-7- Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	29
a) Avantages	29
b) Inconvénients.....	30
I-8- Conclusion.....	30
 Chapitre II: Modélisation et commande des systèmes	
II-1-Introduction.....	32
II -2 MODELE DE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	32

Sommaire

II -2 -1- Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	32
a) Rayonnement direct.....	32
b) Rayonnement diffus.....	33
c) Rayonnement réfléchi.....	33
d) Rayonnement global	33
II -3- LA MODELISATION DU CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE	33
II -3 -1- La modélisation d'une cellule solaire	33
a- Cas idéal	33
b- Cas réel	34
II -3 -2- Groupement des cellules solaires.....	37
II -3-2-1 - Module photovoltaïque.....	37
II -3-2-2 Panneau photovoltaïque.....	38
II -4- Modèle de la température.....	38
a) Température de jonction.....	38
b) Température ambiant.....	38
c) Variation du courant de saturatio.....	39
d) Variation du courant court circui.....	39
e) Variation de la tension à circuit ouver.....	40
II.5 Influence de l'éclairement & la température.....	41
II.5.1 Influence de l'éclairement.....	41
II.5.2 Influence de la température.....	41

Sommaire

II -6 SYSTEME DE CONVERTESSEUR	43
II -6-1 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire.	43
II.6.2 LE CONVERTISSEUR SEPIC	34
II.6.2.1 Fonctionnement du SEPIC	45
II.6.2.2 Dimensionnement du SEPIC	48
II.7 Conclusion.....	52

CHAPITRE III: Recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV

III-1 Introduction	54
III-2 Point de puissance maximale (MPP)	54
III-3 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	56
III-4 Techniques de commande MPPT	57
III-5 Principe de la commande P&O extrêmele	59
III-6 Gestion de la MPPT.....	60
III-7 Conclusion.....	62

CHAPITRE IV : Montage d'un système PV complet et implantation de la

Command MLI

IV-1 Le processeur	64
IV-2 Implantation du système de commande dans le pic.....	65
IV-3 Montage du système photovoltaïque complet.....	68
IV-3-1 Partie commande.....	68
IV-3-2 Partie alimentation.....	73

Sommaire

IV-3-3 Partie puissance.....74

IV.4 Résultat de Simulation.....78

IV.5 Conclusion81

Conclusion générale.....82

Bibliographie

ANNEXE

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Étude et présentation d'un système photovoltaïque

Fig. (I -1) : Système photovoltaïque autonome.....	05
Fig. (I -2) : Le spectre du rayonnement solaire.....	07
Fig. (I -3) : Composants du rayonnement solaire	08
Fig. (I -4): Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	11
Fig. (I -5): Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau.....	12
Fig. (I -6): Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si)	14
Fig. (I -7): Les différentes technologies.....	15
Fig. (I -8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	17
Fig. (I -9) : Cellule en silicium monocristallin.....	17
Fig. (I -10): Cellule en silicium polycristallin.....	18
Fig. (I -11): Cellule silicium amorphe.....	19
Fig. (I -12): Courbe I(V) à T=25°C et un éclairement de 1000W/m ²	21
Fig. (I -13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un GPV	23
Fig. (I -14): Un module photovoltaïque.....	24
Fig. (I -15): Association des modules photovoltaïques	26
Fig. (I -16): Composants d'un champ de modules PV.....	27

Chapitre III : Modélisation et commande des systèmes

Fig. (II - 1) : Cellule solaire idéale.....	34
Fig. (II - 2) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	35

Liste des figures

Fig. (II- 3) : Caractéristique $I_C(V_C)$ d'une cellule photovoltaïque...	36
Fig. (II.4) : Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements.....	41
Fig. (II.5) : Influence de la température sur la caractéristique électrique.....	42
Fig. (II-6) : Principales configurations de convertisseurs DC-DC.	44
Fig. (II-7) : Schéma du convertisseur SEPIC.....	45
Fig. (II-8) : Formes d'ondes de tensions d'un convertisseur SEPIC.....	46
Fig. (II-9) : Formes d'ondes de courants d'un convertisseur SEPIC.....	46
Fig. (II.10) : SEPIC pendant la phase de conduction.....	47
Fig. (II-11) : SEPIC pendant la phase de récupération.	48
Fig. (II-10) : Ondulation de la tension de sortie.....	50
 CHAPITRE III :RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE D'UN GPV	
Fig. (III.1):Courbes de I-V et de puissance de sortie pour un module pv.....	54
Fig. (III.2):Le point de puissance maximale par la méthode des rectangles.....	55
Fig. (III.3): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	56
Fig. (III-4) : Schéma du principe de la méthode P&O.....	57
Fig. (III-5) : Algorithme de la méthode Perturb & Observ.....	58
Fig. (III-6): Principe de la méthode P&O Extrémale.....	59
Fig. (III-7) : Algorithme de la méthode P & 0 Extrémale.....	60
Fig. (III-8): Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale.....	61

Liste des figures

CHAPITRE VI : MONTAGE D'UN SYSTEME PV COMPLET ET IMPLANTATION DE LA COMMANDE MPPT

Fig. (IV-1) : Diagramme fonctionnel du système PV étudié.....	64
Fig. (IV-2) : Vue des entrées du microcontrôleur PIC 18f1220.....	65
Fig. (IV-3) : Diagramme fonctionnel de MPPT implanté sur le PIC.....	66
Fig. (IV-4) : Schéma du TS555.....	69
Fig. (IV-5) : Schéma du modulateur MLI utilisant le LM311.....	70
Fig. (IV-6) : Circuit externe du PIC 18F1220.....	71
Fig. (IV-7) : Vue d'ensemble de la partie commande.....	72
Fig. (IV-8) : Structure du bloc d'alimentation 5V.....	73
Fig. (IV-9) Vue d'ensemble du capteur de courant MAX4173.....	75
Fig. (IV.10) : Vue d'ensemble du driver TC4420	76
Fig. (IV.11) : Vue d'ensemble de la partie puissance.....	77
Fig. (IV.12) : Capture de l'oscilloscope pour la sortie du TS555 (pin 2-6).....	78
Fig. (IV.13) : Signal généré Alpha.....	79
Fig. (IV.14) : Signal MLI généré dans le cas où la dérivée est positive.....	79
Figure IV.15 Signal MLI généré dans le cas où la dérivée est négative.....	80
Figure IV.15 Relevés des tensions.....	81

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La production de l'énergie est un grand défi pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, l'épuisement rapide et l'instabilité des prix des fossiles à l'échelle mondiale ont nécessité une recherche urgente pour de nouvelles sources d'énergie pour répondre aux exigences actuelles.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant leur efficacité.

Une deuxième méthode consiste à développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion nucléaire qui, éventuellement, pourrait être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont pas assurés.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, abaisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

Depuis plusieurs décennies, de nouvelles énergies apparaissent telles que l'énergie éolienne ou l'énergie photovoltaïque. Cette dernière, découverte en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel, possède un grand potentiel car elle est non polluante et non bruyante.

"Photovoltaïque" vient du grec 'photos' qui signifie lumière et de 'Volta', éminent savant connu pour avoir découvert l'énergie animale et inventé la pile.

Le principe de l'énergie photovoltaïque consiste en la transformation directe de la lumière émise par le soleil en énergie électrique. En plus d'être inépuisable, l'énergie solaire est extraordinairement abondante, puisque l'irradiation que le Soleil fait parvenir sur la Terre chaque année représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d'énergie primaire, toutes formes et tous usages confondus.

Par rapport à d'autres sources d'énergie, l'énergie solaire est une bonne option car elle est disponible pendant les périodes de pointe énergétique, à la différence du vent qui produit souvent plus d'énergie la nuit que le jour. La nuit, la demande d'énergie est deux fois moins importante que le jour. Dans le passé, le coût de l'énergie solaire était d'environ trois fois le coût de l'électricité issue de sources conventionnelles, ce qui a nui à son développement. La hausse des coûts de l'électricité et le problème du réchauffement climatique ont fait que toutes les autres sources d'énergie sont en train d'être examinées de plus près.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis quelques décennies, les panneaux solaires photovoltaïques ont un grand succès chez les particuliers et ils peuvent facilement être installés.

Des programmes de recherche et développement en énergie solaire sont créés dans l'industrie, les universités et les laboratoires. Dans une industrie solaire en plein essor, les progrès de la technologie ne peuvent être que l'accroissement de l'efficacité qui réduira le coût de l'énergie solaire et permettra sa plus grande expansion. Les objectifs qui doivent être remplis dans ce projet sont:

- Étudier le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et le convertisseur DC-DC dans la production et la conversion de l'énergie électrique.

- Analyser et concevoir un système d'énergie solaire photovoltaïque autonome.

- Étudier expérimentalement ce système générateur photovoltaïque et valider la simulation à l'aide des mesures expérimentales.

La structure du mémoire est comme suit:

Le premier chapitre se concentre sur le bilan des différentes filières technologiques Photovoltaïques. Nous précisons également dans ce chapitre les différentes caractéristiques des panneaux solaires qui nous donnerons une vision sur la suite de l'étude.

Dans le deuxième chapitre nous abordons les architectures du convertisseur DC-DC utilisées pour la conversion de l'énergie solaire. Pour cela, on va se concentrer sur le convertisseur SEPIC qui semble le mieux adapté pour l'application.

Le troisième chapitre étudiera les différentes architectures de gestion photovoltaïque possibles visant à optimiser la production énergétique. On étudie aussi les méthodes de recharge du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT).

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude simulation de la performance du système générateur photovoltaïque.

Chapitre I :
Etude et présentation d'un
système photovoltaïque

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

Introduction :

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. [1]

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque autonome « stand - alone » et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

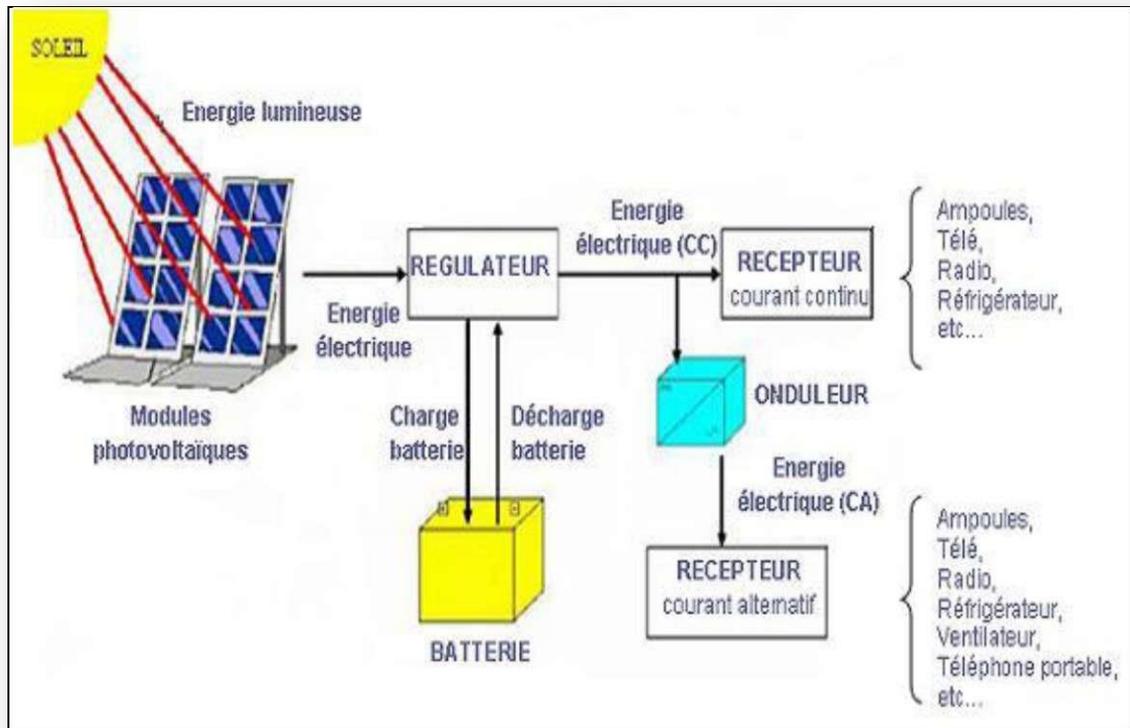


Fig. (I -1) : Système photovoltaïque autonome [2].

I -Généralité sur le soleil:

I -1-Rayonnement solaire:

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène - hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de **300000km/s**, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5p,m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [3] :

✚ Diamètre de soleil $D_s = 1.39 * 10^9$ m

✚ Diamètre de la terre $D_t = 1.27 * 10^7$ m

✚ Distance moyenne soleil- terre $L_{ts} = 1.5 * 10^{11}$ m

I -1-1-Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante:

$$E = h\nu = hc/X \quad (1.1)$$

$h = 6,62 * 10^{-34} JS^{-1}$ est la constante de Planck.

$C = 3 * 10^8 mS^{-1}$ étant la vitesse de propagation.

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en : [4].

- ✚ Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4%
- ✚ Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%
- ✚ Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6%

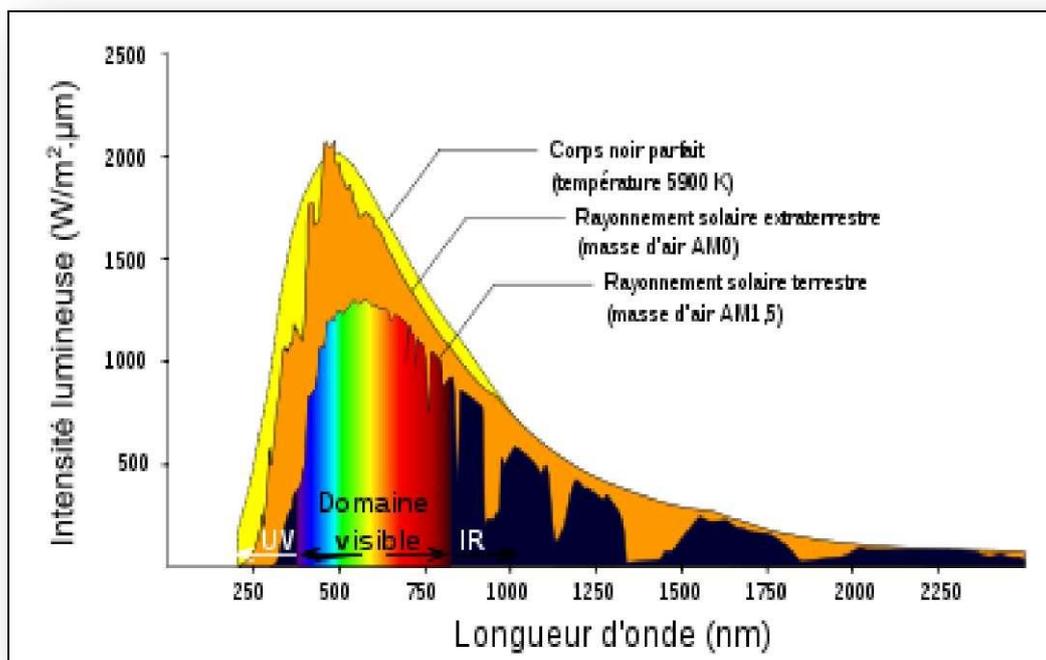


Fig. (I -2) : Le spectre du rayonnement solaire [5].

I-1-3-Différents types de rayonnement:

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

✚ *Le rayonnement direct :*

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

✚ *Le rayonnement diffus :*

Est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

✚ *L'albédo :*

Est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

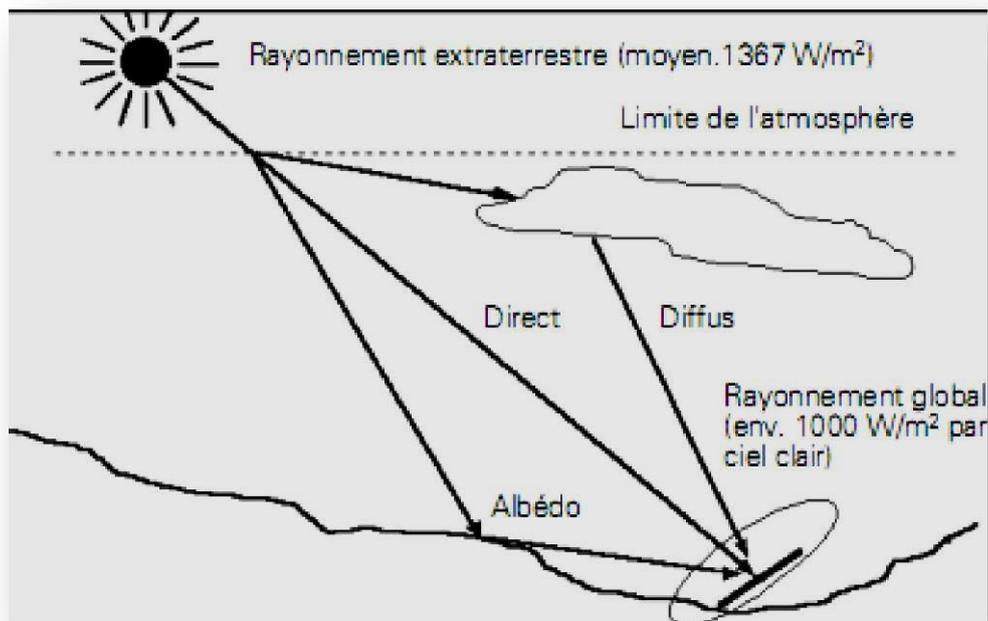


Fig. (I -3) : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale=direct diffus +albédo [6].

I.I.4. Orientation et inclinaison:

La question qui vient immédiatement à l'esprit est: comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ?

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement.

En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante:

Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle = Latitude du lieu + 10°

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus [7].

		ORIENTATION				
		O	SO	S	SE	E
INCLINAISON	0° —	93%	93%	93%	93%	93%
	30° /	90%	96%	100%	96%	90%
	45° /	84%	92%	96%	92%	84%
	60° /	78%	88%	91%	88%	78%
	90°	55%	66%	68%	66%	55%

Fig. (I -3): L'orientation et l'inclinaison (Alsace-Lorraine) [8].

I.2. Les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée:

- ✚ Systèmes isolés et autonomes.
- ✚ Systèmes raccordés au réseau.

I.2-1. L'isolé :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs qui se situent dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.4) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

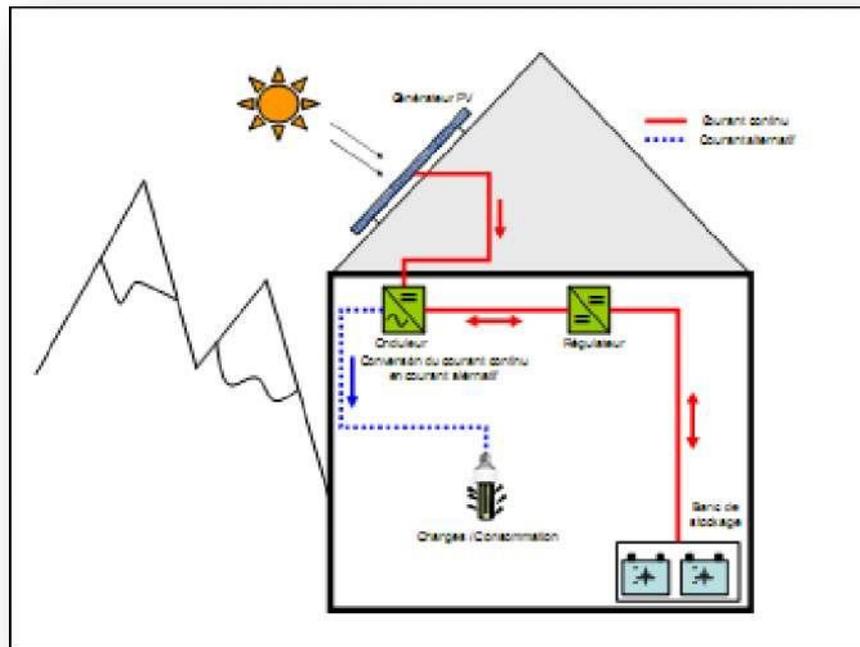


Fig. (I -4): Exemple de la structure d'un système PV autonome.

I.2-2. Le connecté au réseau :

La Figure (I.5) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les Charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation Instantanée est injecté sur le réseau. Le réseau est utilisé en appoint à la production PV.

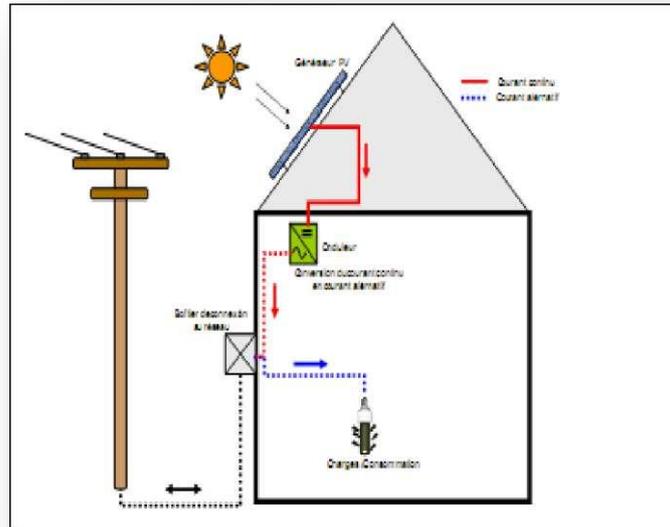


Fig. (I -5): Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [9]

I-3-Générateur photovoltaïque (PV) :

I-3-1-Semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de **0 K (-273°C)** chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

Par exemple, à la température de **300 K (27°C)**, il y a **$1.45 \cdot 10^{10}$** paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur [10].

I-3-2- La jonction N-P :

La jonction **N-P** est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée **N** et l'autre dopée **P**, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région **N** au pôle négatif d'un générateur et la région **P** au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région **N**, ainsi que les trous libres de la région **P**, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région **P** et les trous dans la région **N**. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse.

Les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction **N-P** joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région **P** ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région **P** ; ils le font au bout d'un temps t appelé durée de vie des porteurs minoritaires [11].

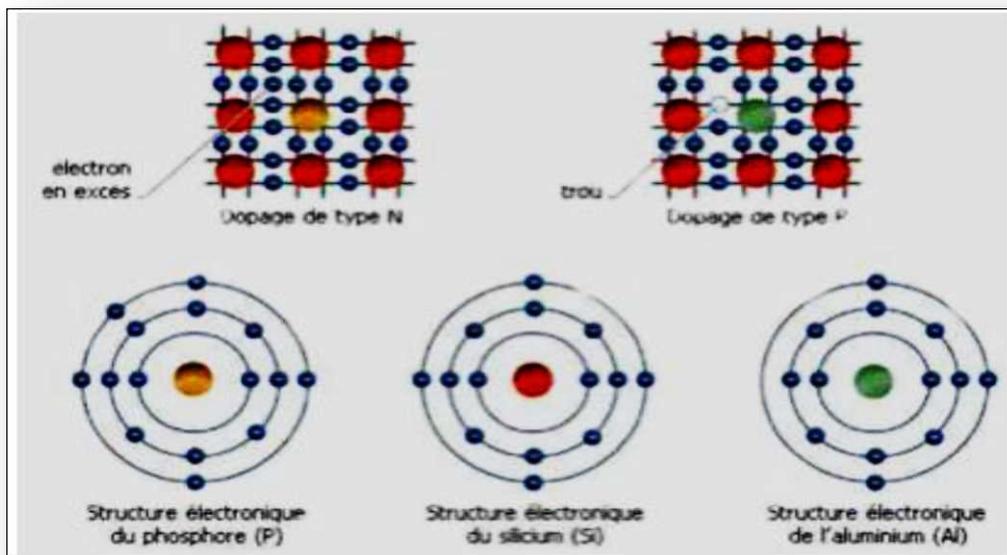


Fig. (I-6): Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) [12].

I-4-Les cellules photovoltaïques:

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », ont été découvertes par **E. Becquerel en 1839** [13]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [14].

Les matériaux les plus connus sont:

- ✚ le silicium (Si)
- ✚ le sulfure de cadmium (Cds)
- ✚ l'arséniure de gallium (As Ga)

-  tellure de cadmium (Cd Te)
-  le germanium (Ge)
-  le phosphore d'indium (InP)

La figure suivant représente les différentes technologies des cellules PV :

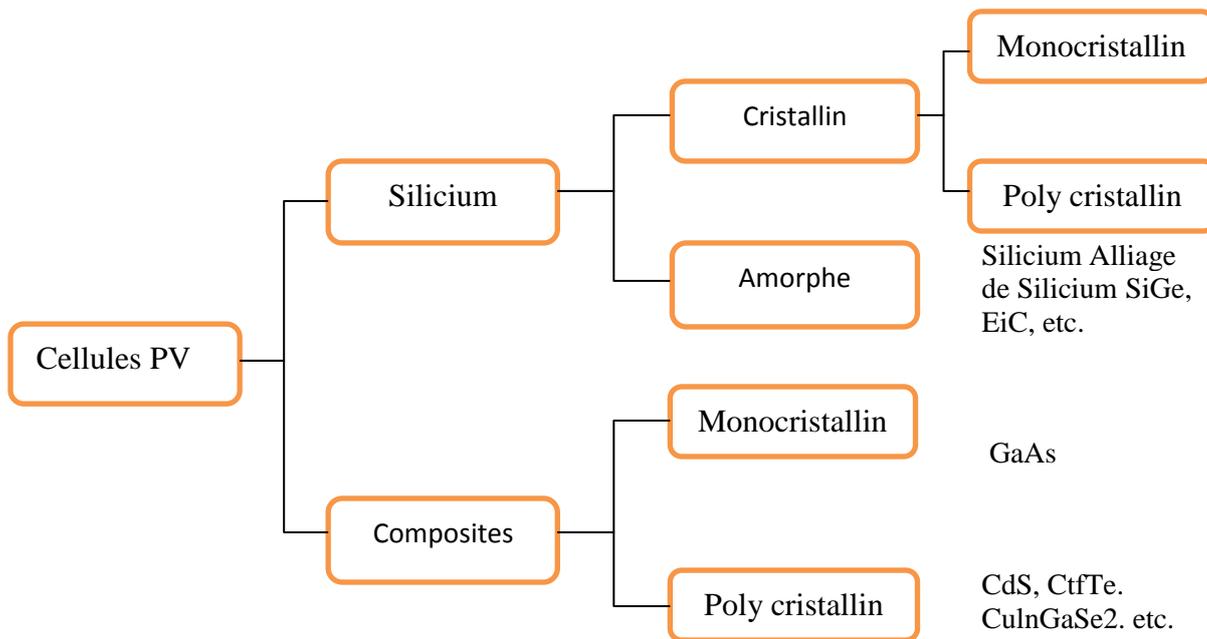


Fig. (I-7):Les différentes technologies [15].

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

I-4-1-Principe de fonctionnement:

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

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 et un courant électrique qui circule. Figure (I -8) [16].

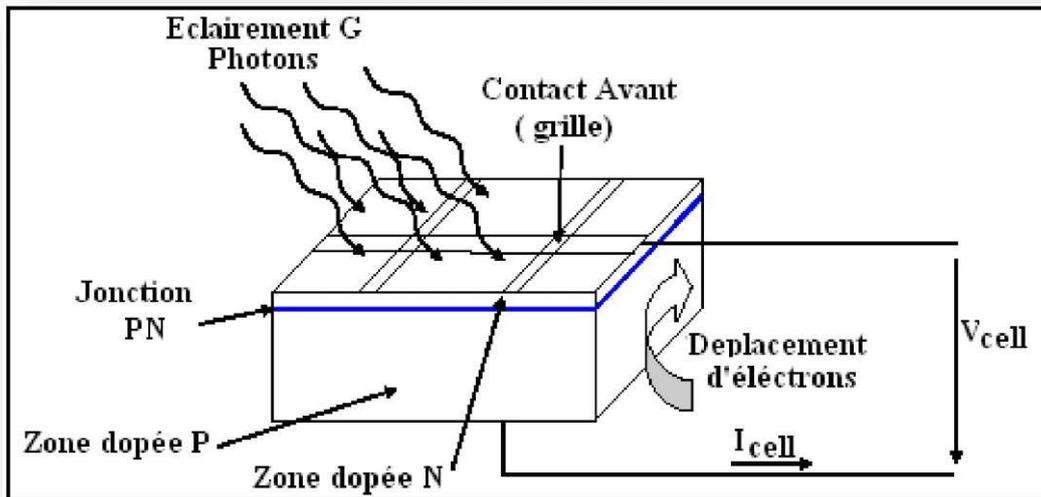


Fig. (I -8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [17].

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de **0.6 V**) [18].

I-4-2-Les différents types des cellules photovoltaïques:

Il existe trois types principaux des cellules :

a) Silicium monocristallin :

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairage, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

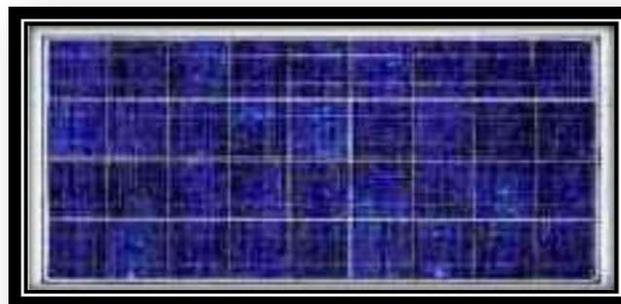


Fig. (I -9) : Cellule en silicium monocristallin [19].

Avantages :

- ✚ Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.
- ✚ Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- ✚ Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- ✚ Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- ✚ Première génération de photopiles.
- ✚ Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- ✚ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

b) Silicium poly (ou multi-) cristallin :

Cousin germain du précédent (composés de multicristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclaircements modérés, et également moins onéreux.

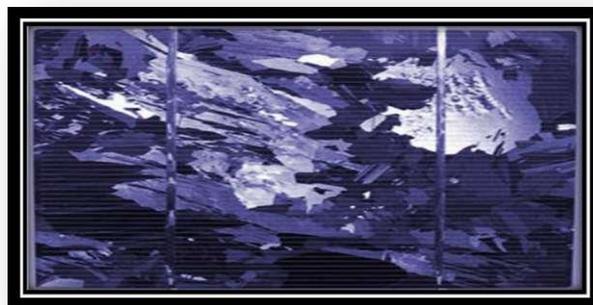


Fig. (I -10): Cellule en silicium polycristallin [19].

Avantage :

- ✚ Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC.
- ✚ Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- ✚ Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².
- ✚ Usage identique à celui du silicium cristallin.

Inconvénients:

- ✚ Rendement faible sous un faible éclairement.

c) Silicium amorphe :

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclaircements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

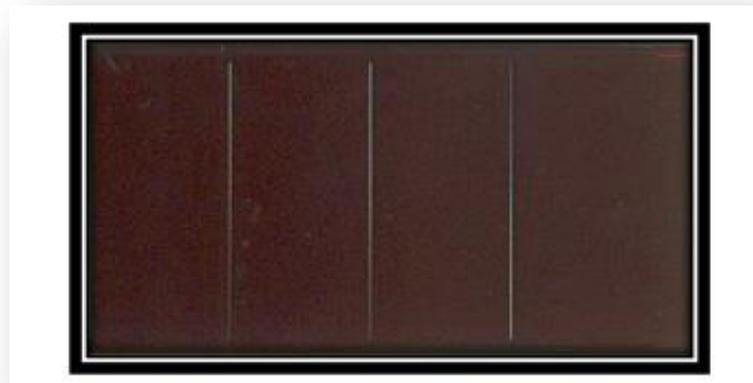


Fig. (I -11): Cellule silicium amorphe [19].

- ✚ Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi jonctions »).
- ✚ Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.
- ✚ Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc.
- ✚ Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).
- ✚ Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.

I-4-3- Paramètre des cellules photovoltaïques :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , P_{max} , A , ff et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

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

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V = 0$) Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire : $I_{cc} (V = 0) = I_{ph}$

b) Tension à circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse :

On peut écrire :

$$V_{co}(I=0) = AU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (1.4)$$

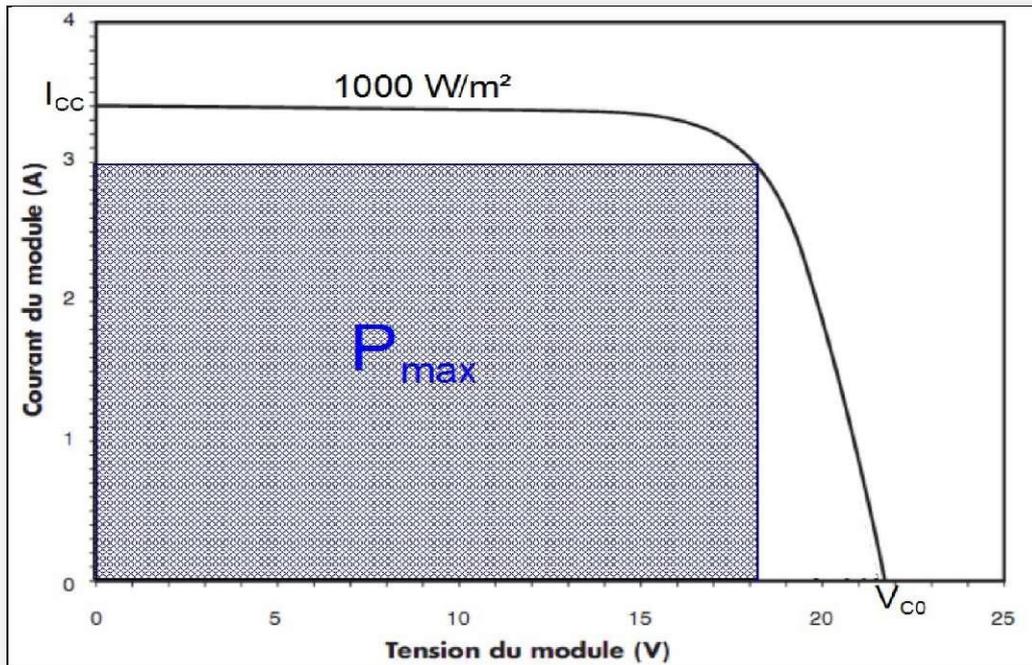


Fig. (I -12): Courbe I(V) à $T=25$ et un éclairement de 1000 W/m^2

c) Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(I_{max}, V_{max})$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}).

d) Rendement d'une cellule :

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente

$$\text{Avec :} \quad \eta = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{\text{solaire}}} \quad (1.5)$$

P_s : est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1., une température de 25°C , et un éclairement de 1000 W/m^2 .

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

e) Le facteur de remplissage :

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit $V_{co} \cdot I_{cc}$, correspondant à la puissance maximale idéale.

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.6)$$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de **10 à 20%**. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium **AsGa** donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%. D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

✚ Le courant de court-circuit **I_{cc}**, soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photo courant **I_{ph}**.

✚ La tension de circuit ouvert **V_{co}**, soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

✚ Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance **P_{max}** ou **MPP** (Maximum Power Point).

I-4-4- Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de

fonctionnement, seule la courbe **I = f (V)** est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (1.4.3) représente trois zones essentielles :

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

a) **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) **La zone (2)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **La zone (3)**: qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

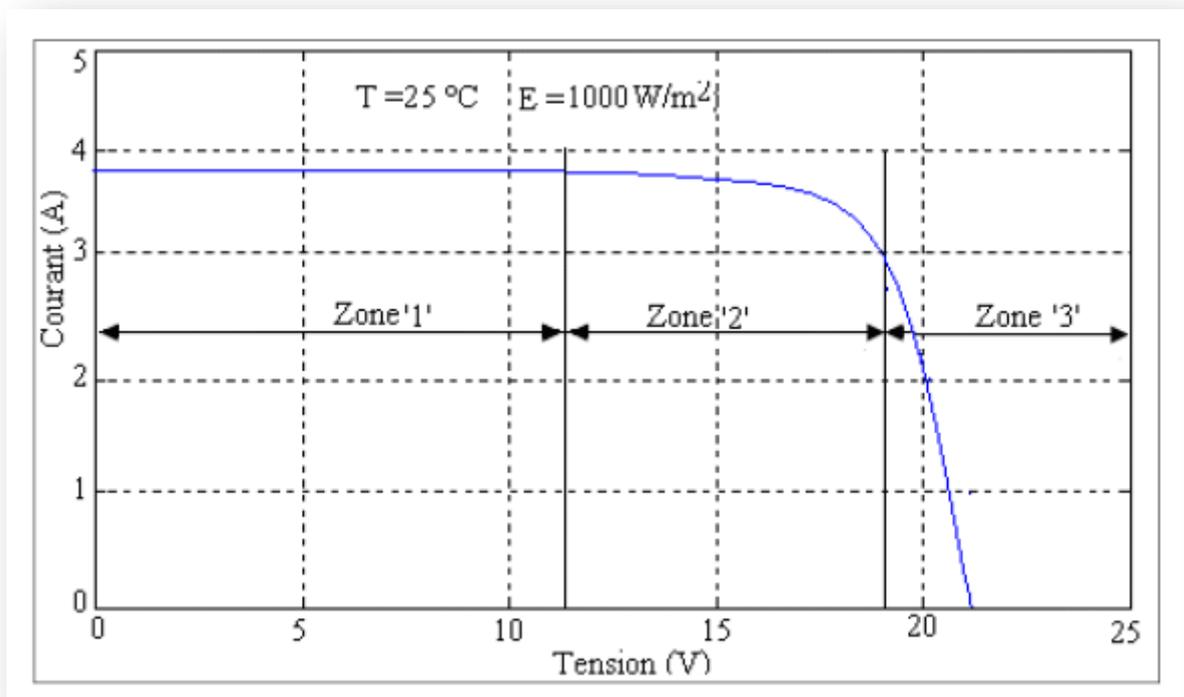


Fig.(I -13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque [20].

1-5-Le module photovoltaïque:

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires. Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. en effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies .Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [21].

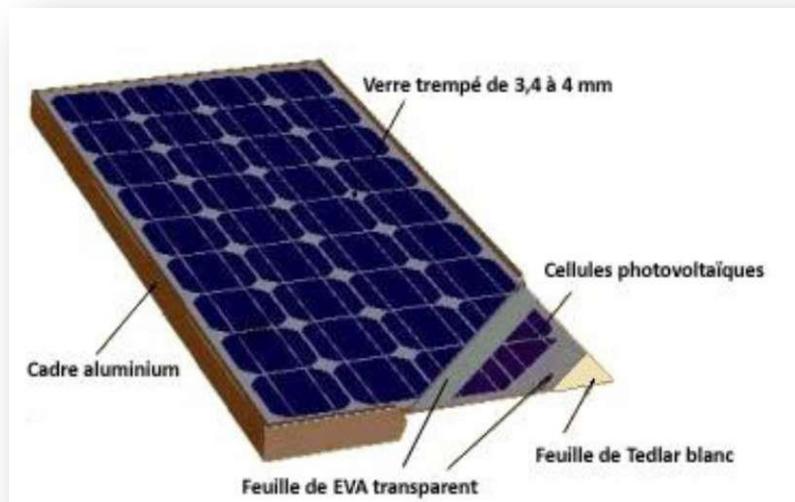


Fig. (I -14): Un module photovoltaïque [22].

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), polycristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100 Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [23].

b.1) Caractéristiques d'un module :

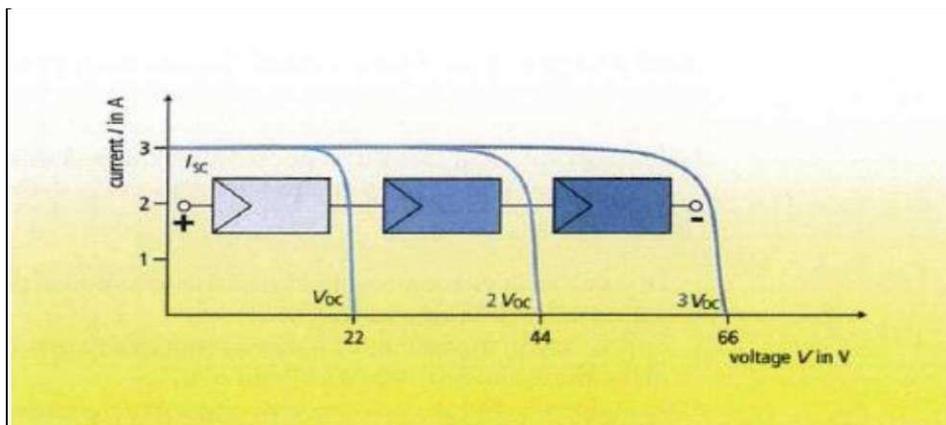
Voici la description des paramètres d'un module:

- ✚ **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- ✚ **La caractéristique $I(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ✚ **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ✚ **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil ".
- ✚ **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- ✚ **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ✚ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$ [24].

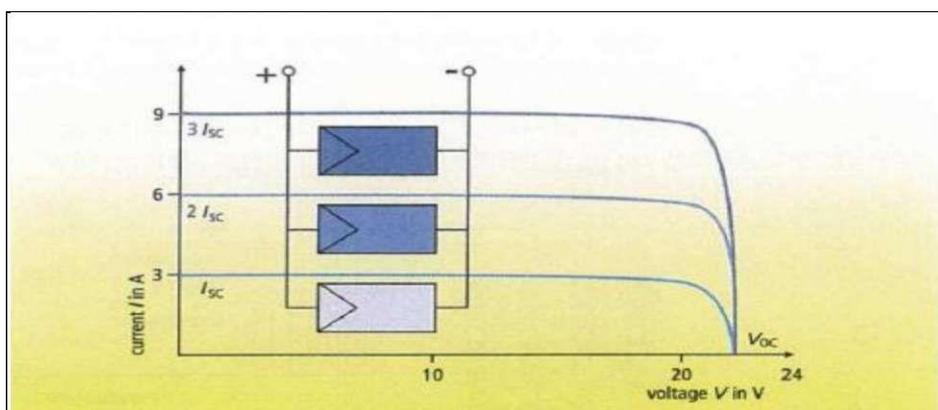
I-5-1-Association des modules photovoltaïques :

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur on associe " N_p " modules en parallèle comme montré dans les figures (I.15-b) et (I.15-a). Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur on associe " N_s " modules en série comme le montrent les figures précédentes.

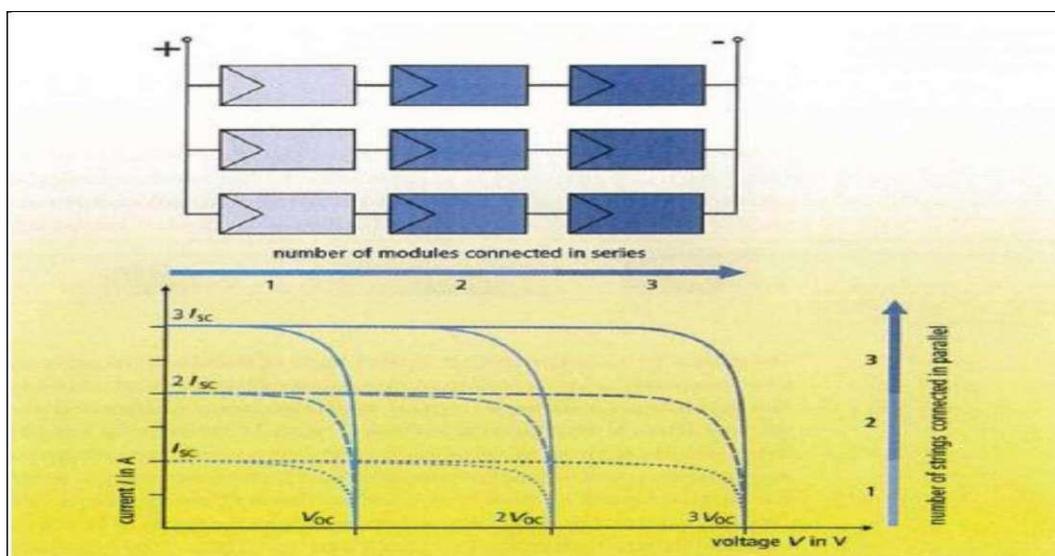
Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (I.15-c). [25].



a) Association en série



b)-Association en parallèle



c) Association mixte (Série + Parallèle)

Fig. (I -15): Association des modules photovoltaïques.

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

I-5-2 Le panneau solaire:

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [26].

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure [27].

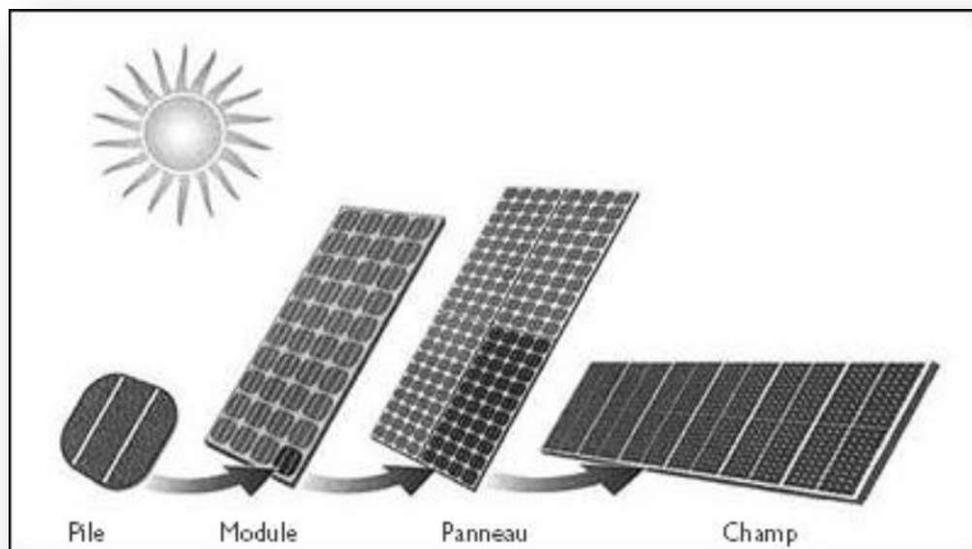


Fig. (I -16): Composants d'un champ de modules PV

I -6- Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.

I -6-1 le convertisseur continu-continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

I -6-2 Le convertisseur continu- alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

Chapitre I : Etude et présentation d'un système photovoltaïque

• **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide [28].

I-7- Avantages et inconvénients d'une installation PV [29] :

a) Avantages :

✚ D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent 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.

✚ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

✚ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b) Inconvénients :

- ✚ 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, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. • Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

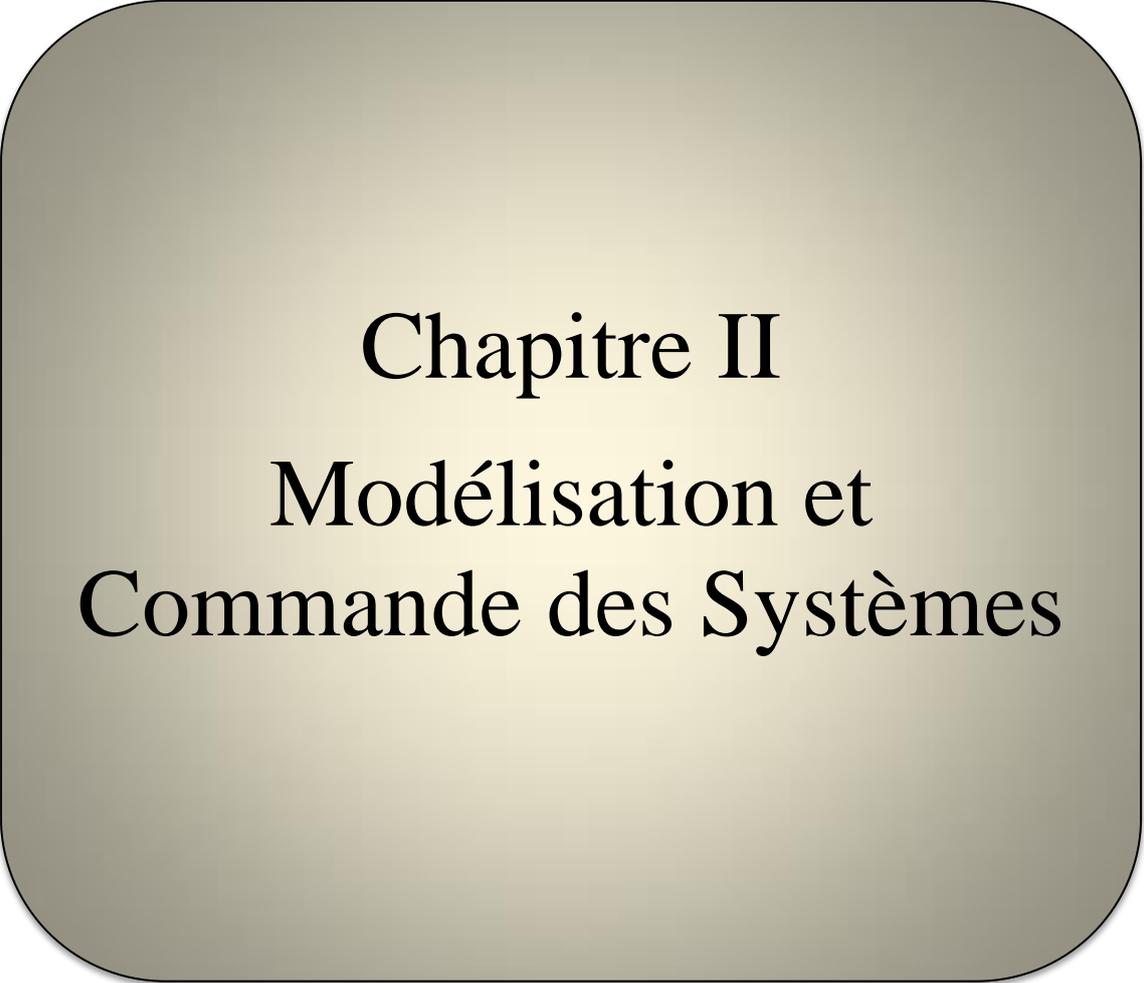
- ✚ Tributaire des conditions météorologiques.

- ✚ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

- ✚ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

I-8- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Et une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs associations.



Chapitre II
Modélisation et
Commande des Systèmes

II -1- Introduction :

Après avoir étudié et cité les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous représenterons d'abord le modèle d'un générateur photovoltaïque, le modèle de l'hacheur et du système.

II -2 MODELE DE RAYONNEMENT SOLAIRE :**II-2-1 Rayonnement solaire sur un plan horizontal :**

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

a) Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Après des mesures pour des heures (i) nous avons l'équation statique pour le rayonnement direct.

$$S_H(t) = 1369 \cdot C(j) \cdot \sin[h(i)] \cdot \exp\left(\frac{TL}{0,9 \cdot 9,41 \cdot M(i)}\right) \quad (\text{II -1})$$

Avec :

S_H : Flux direct horizontal.

$C(j)$: La correction de la distance terre soleil.

$h(i)$: Hauteur du soleil.

T_L : Facteur de trouble

$M(i)$: Nombre d'aire masse.

b) Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. Pour un observateur le rayonnement diffus (D) par l'heure i est statistiquement donné par.

$$D_H(i) = \frac{1367}{3} * C(j) - \sin[h(i) - 2 * \exp[-0,5 * \log^2(\frac{T_C}{22 * M(i)^{-0,65}})]] \quad (\text{II.2})$$

c) Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ζ) : $0 < \zeta < 1$

d) Rayonnement global (Φ_G) :

un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [30]:

$$\phi_G = S + D + R \quad (\text{II.3})$$

II -3 LA MODELISATION DU CHAMP PHOTOVOLTAIQUE :

II -3-1 la modélisation d'une cellule solaire :

a- Cas idéal :

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme [31]:

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0(e^{qV/KT} - 1) \quad (\text{II.4})$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

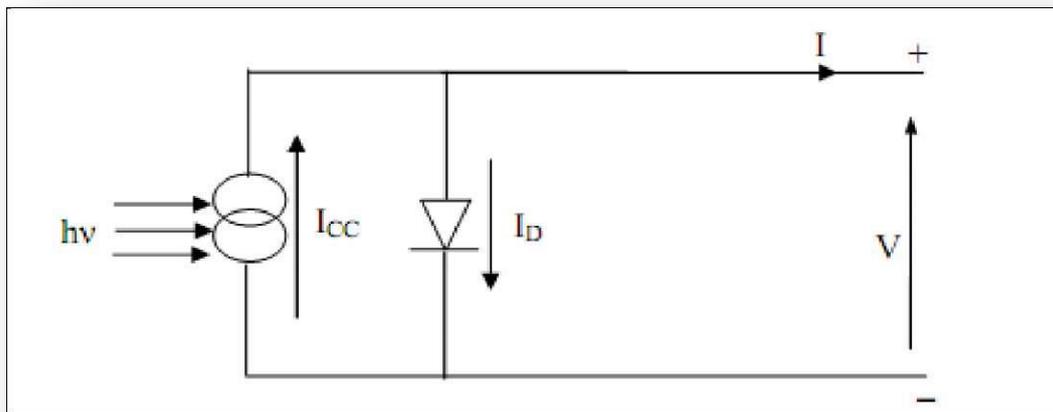


Fig. (II - 1) : Cellule solaire idéale

I, V : Courant et tension fournis par la cellule.

I_D : Courant de diode donnée par [32]:

$$I_D = I_0(e^{qV/KT} - 1) \quad (\text{II.5})$$

b- Cas réel :

La figure suivante (figure II-2) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s . la première diode D1 décrit les propriétés de semi-conducteur de la cellule et la seconde D2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [33].

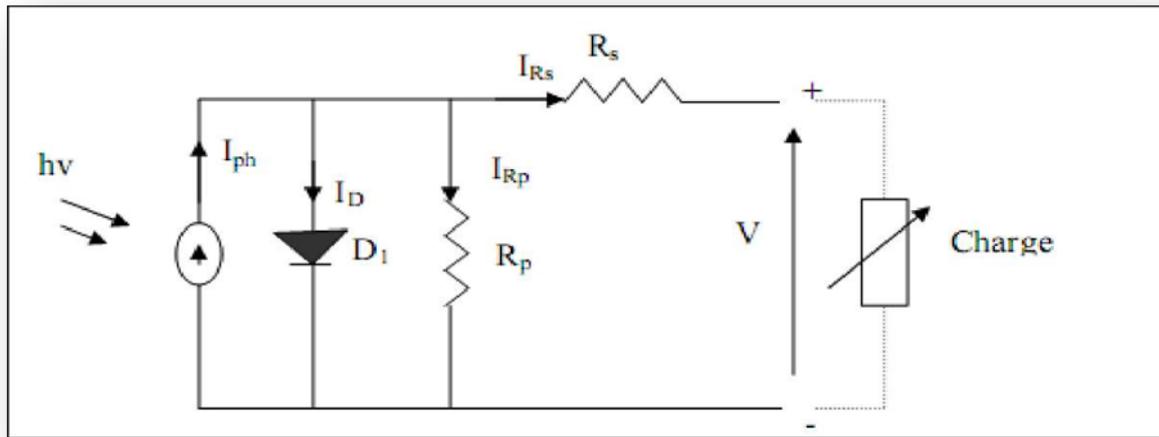


Fig. (II - 2) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation [34]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\left(e^{C_1(V+R_s I)} - 1 \right) \right] - \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

avec :
$$C_1 = \frac{q}{A \cdot K \cdot T_c}$$

A : le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

I_{ph} : photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I₀ : courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

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

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

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

K : constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

T_c : température de jonction (K).

La figure montre la caractéristique Courant- tension pour une cellule photovoltaïque .ainsi, si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique ($I_c - V_c$) de la cellule avec la courbe de la charge .pour une charge résistive .la courbe de charge est une droite avec la pente $1/R$. par conséquent, si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe .le courant I_c varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court- circuit).la cellule se comporte comme un générateur de courant. d'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CD .dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I_c :la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement.

A vide, dans la région BC sur la courbe. La cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant .ni par une source de tension. est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et température.

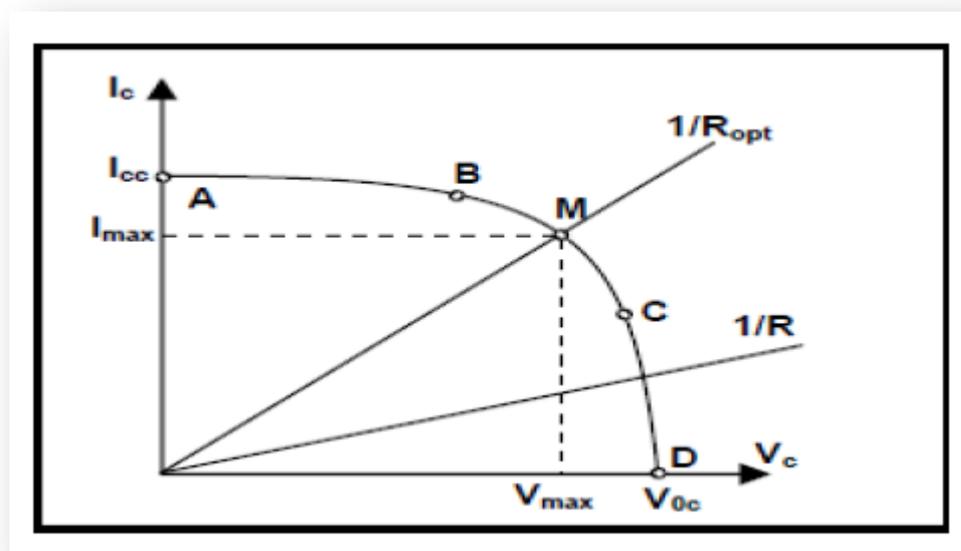


Fig. (II - 3) : caractéristique $I_c(V_c)$ d'une cellule photovoltaïque

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux présents aussi dans la figure (II-3).

- ✚ **Le courant de court-circuit** : $I_{CC}=I_{ph}$ est proportionnel à l'éclairement et présente le courant maximal généré par la cellule .il est produit dans des conditions de court-circuit ($v_C =0$)
- ✚ **La tension à vide** : correspond à la chute de tension sur la diode. Quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_D =I_{ph}$), $I_c =0$.cette tension peut être exprimée mathématiquement par :

$$V_{tv} = \frac{mKT_e}{e} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} \right] = V_t \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} \right] \quad (\text{II.7})$$

$$\text{OU: } V_t = \frac{mKT_e}{e}$$

V_t : est la tension thermique et T_c est la température absolue de la cellule.

- ✚ **Le point de puissance Maximale** : est le point de fonctionnement M (V_{max} , I_{max}) dans la figure , pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale [35].

II -3-2 groupement des cellules solaires :

II -3-2-1 Module photovoltaïque :

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante :

$$I_{module} = I_{ph} - I_0 \exp\left[\frac{q}{nAKT} (V + R_{se}I) - 1\right] - \frac{V + IR_{se}}{R_{pe}} \quad (\text{II.8})$$

Avec R_{se} et R_{pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = nR_s \quad \text{et} \quad R_{pe} = n.R_p$$

II -3-2-2 Panneau photovoltaïque :

La modélisation d'un panneau composé de N_s modules en série et N_p modules en parallèle est :

$$I_{panneau} = N_p \cdot I_{ph} N_p \cdot I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{nAKTN_s}(V + R_s I_{mod}) - 1\right) - N_p \frac{I_{mod} R_{se}}{R_{pe}} \right] \quad (\text{II.9})$$

Avec : R_{se} et R_{pe} résistance série et parallèle du module défini par [36]:

$$R_{se} = n \cdot (N_s / N_p) \cdot R_s \quad \text{et} \quad R_{pe} = n \cdot (N_p / N_s) \cdot R_p$$

II -4 Modèle de la température :**a) Température de jonction :**

La température du jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivant [37] :

$$T_C = T_a + \frac{NOCT-20}{800} E_G \quad (\text{II.10})$$

Avec NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating Celle temperature) et T_a est La température ambiante.

b) Température ambiante :

Le modèle de la température ambiante est représenté grâce aux données de température maximale et minimale de la journée .Nous supposons que la température maximale se produit toujours deux heures après midi et la température minimale quand il commence à faire jour (levé de soleil). Entre ces deux points extrêmes, une fonction a été utilisée pour caractériser la variation de cette température.

Le profil journalier de température ambiante est déterminé à partir des températures minimale et maximale de la journée, cette température s'exprime à une heure TL de la journée par l'équation suivante [38] :

$$T_a = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left[\frac{14 - TL}{14 - TL_L} \pi\right] + T_{moy} \quad (\text{II.11})$$

TL_L : l'heure du lever de soleil et T_{moy} : la température moyenne journalière

T_{max} : la température maximale journalière et T_{min} : la température minimale journalière

cette relation valable avec les grandeurs moyennes mensuelles d'un site.

c) Variation du courant de saturation :

Le courant de saturation I_0 dépend de la température de jonction et peut être exprimé par La relation suivant [38] :

$$I_0 = A_0 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{KT_e}\right) \quad (\text{II.12})$$

Pour le silicium monocristallin $A_0 = 2.110 \cdot 10^3$

e) Variation du courant court-circuit :

La variation de courant de court-circuit I_{cc} dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante [38] :

$$I_{cc} = K_j \cdot G \cdot [1 + K_2(G - G_0) + K_3(T_c - T_0)] \quad (\text{II.13})$$

Avec :

G₀ : l'éclairement de référence (**1000 w/m²**)

T₀ : la température de référence (**298 K**)

K1, **K2** et **K3** sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

e) Variation de la tension à circuit ouvert :

La variation de la tension de circuit ouvert dépend de la température du module et de l'éclairement, elle donnée par l'équation suivant [38] :

$$V_{CO} = V_{CO0} + \beta \Delta T + \alpha(G - G_0) \quad (\text{II -14})$$

Avec :

V_{CO}: la tension à circuit ouvert de référence (V).

α: coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température (A/C°).

β : coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température (V/C°).

ΔT : la variation de la température (C°).

II.5 Influence de l'éclairement & la température

II.5.1 Influence de l'éclairement

La figure II.4 présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement

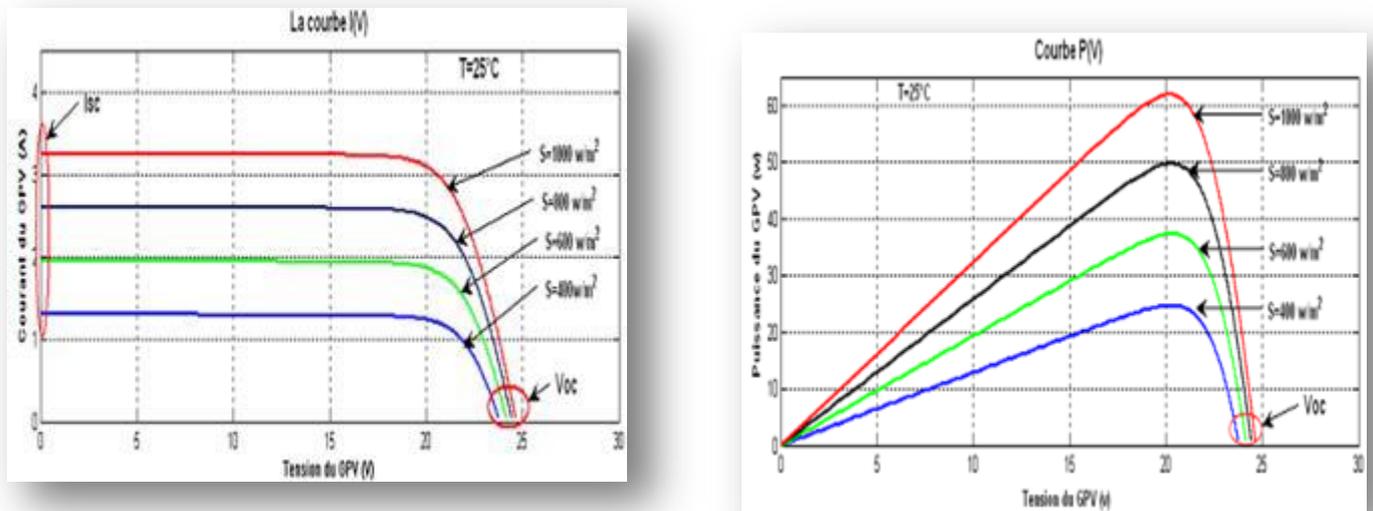


Figure II.4 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque pour différents éclaircements

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

II.5.2 Influence de la température

La figure II.5 présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV

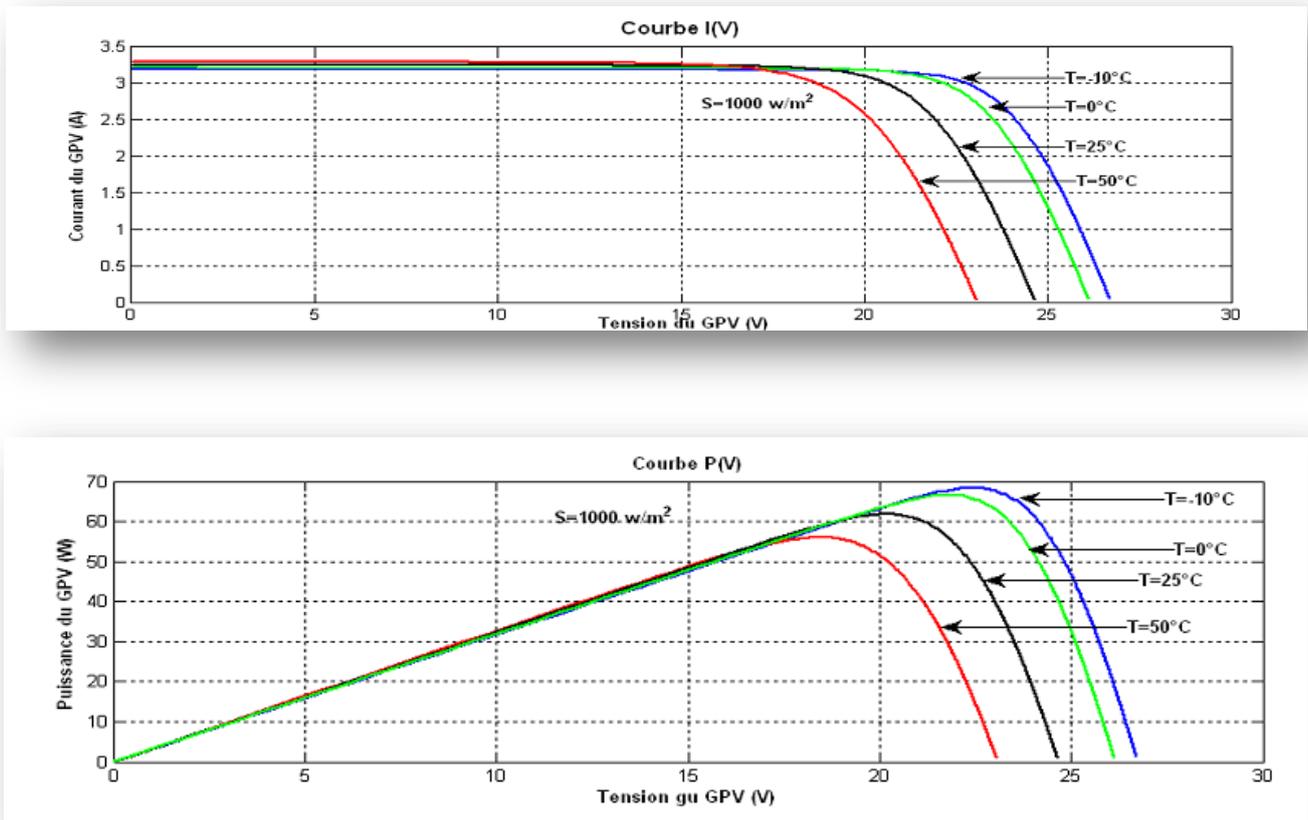


Figure II.5 Influence de la température sur la caractéristique électrique

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit.

Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte car elle a une relation avec la température des cellules. Il est important de savoir que la puissance du module diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C .

II -6 SYSTEME DE CONVERTESSEUR :

II -6-1 Convertisseurs DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire.

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaire ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable (figure II.6).

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

Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source.

a) Non isolés de la source :

Quatre configurations de base sont :

- ✚ Convertisseur abaisseur « BUCK ».
- ✚ Convertisseur élévateur « BOOST ».
- ✚ Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST ».
- ✚ Convertisseur «SEPIC».

b) Isolés de la source : Comme te convertisseur Flyback

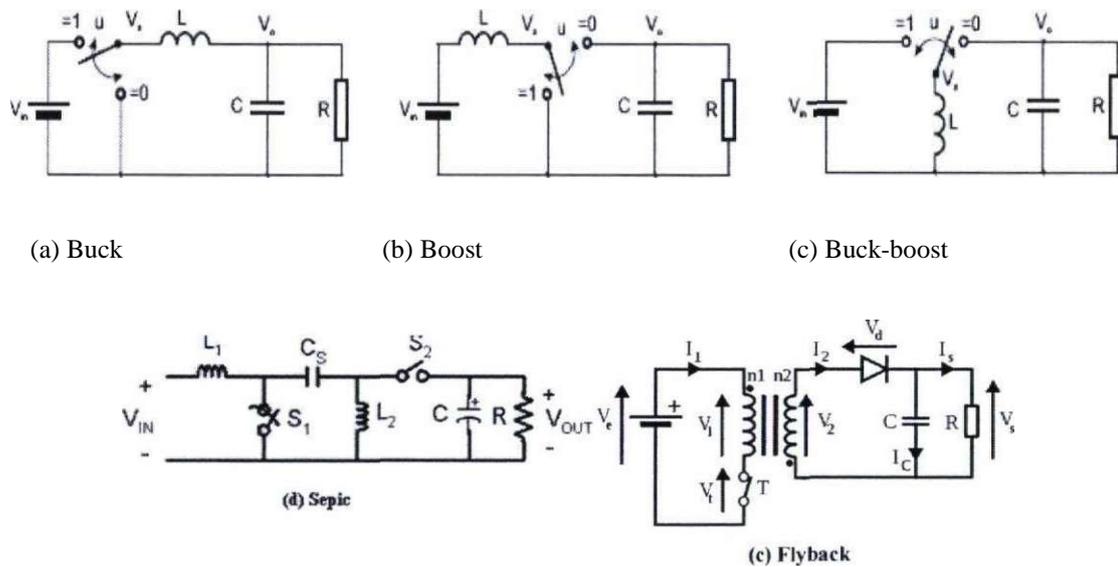


Figure II.6 : Principales configurations de convertisseurs DC-DC.

II.6.2 LE CONVERTISSEUR SEPIC

Introduction

Dans ce projet, nous utilisons un générateur photovoltaïque constitué d'un module PV de 12V destiné à charger une batterie d'accumulateurs avec une tension nominale de 12V. Vu les changements d'ensoleillement et pour avoir un meilleur rendement de notre panneau solaire, nous avons choisi d'utiliser un convertisseur SEPIC.

Les avantages du convertisseur SEPIC dans les applications solaires sont nombreux :

- ✚ il peut fonctionner comme élévateur ou abaisseur de tension.
- ✚ il contient peu de composants.
- ✚ la commande du transistor se réfère à la masse.
- ✚ l'ondulation du courant d'entrée est limitée.

✚ il n'y a pas de liaison entre entrée et sortie en continu, grâce à la transmission d'énergie en série à travers un condensateur. Un court-circuit de la charge n'est donc pas répercuté sur l'entrée.

II.6.2.1 Fonctionnement du SEPIC :

SEPIC est un convertisseur DC-DC qui permet de convertir une tension continue en une autre tension continue de valeur différente (plus faible ou plus grande).

Le Sepic est semblable au buck-boost mais a l'avantage d'avoir une sortie non inversée (la tension de sortie est de la même polarité que la tension d'entrée). Ce montage a été mis au point par Slobodan Cuk à la fin des années 1970. Le schéma de base est illustré à la Figure II-7.

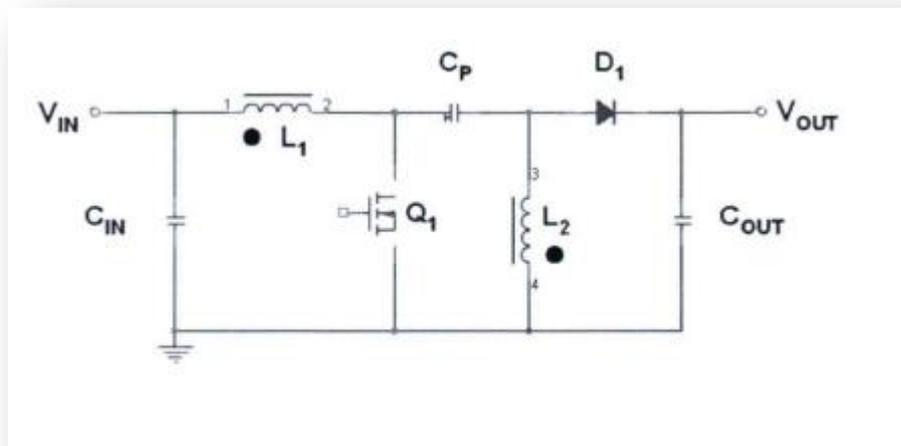


Figure II.7 : Schéma du convertisseur SEPIC.

Les formes d'ondes de tensions et de courants du convertisseur SEPIC sont montrées aux figures II.8 et II.9, respectivement [39].

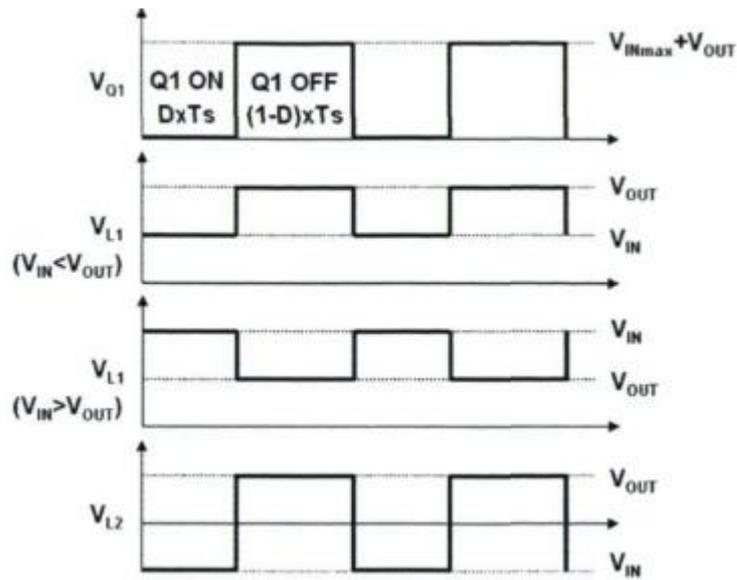


Figure II.8 : Formes d'ondes de tensions d'un convertisseur SEPIC.

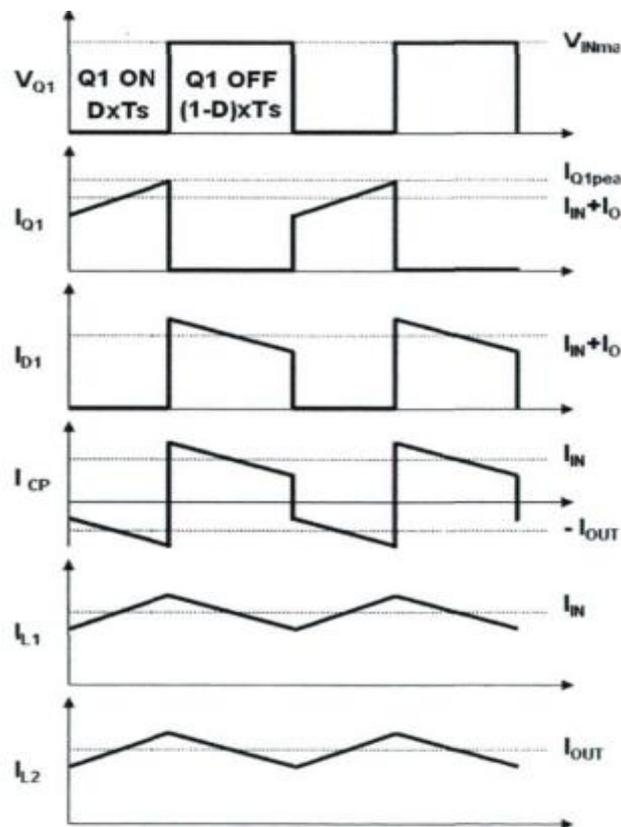


Figure II.9 : Formes d'ondes de courants d'un convertisseur SEPIC.

Les deux phases de fonctionnement du convertisseur SEP1C, qui correspondent aux deux états du transistor QL sont la phase de conduction et la phase de récupération.

a) Phase de conduction

Pendant la phase de conduction, Q1 est en état passant (ON), la tension aux bornes de l'inductance L1 est égale à V_{in} , le condensateur C_p est connecté en parallèle avec L2 et la tension aux bornes de L2 est la même que la tension du condensateur = $-V_{in}$. (Figure II.10).

La diode D1 est en polarisation inverse donc bloquée. Le courant de la charge est fourni par le condensateur C_{out} .

Pendant cette période le courant est stocké en L1 par l'entrée et en L2 par C_p .

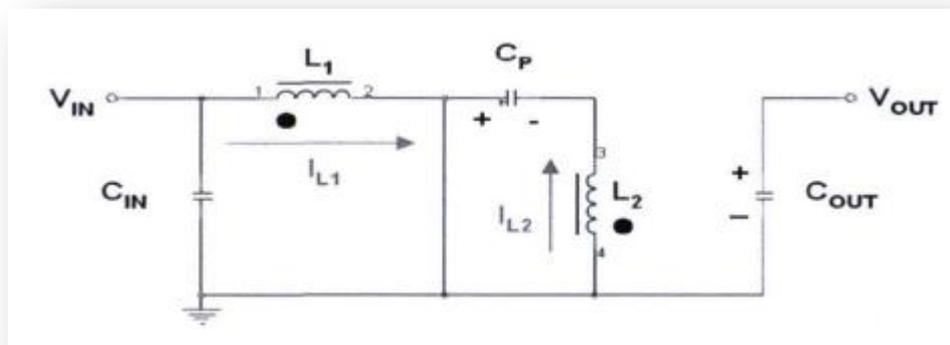


Figure II.10 : SEPIC pendant la phase de conduction.

b) État de récupération

Pendant la phase de récupération, Q1 est en état bloqué (OFF), le courant dans L1 continue à circuler à travers C_p et la diode D1 puis dans le condensateur C_{out} , dans l'intervalle le condensateur C_p est chargé et prêt pour le prochain cycle

Aussi le courant emmagasiné dans L_2 circule dans C_{out} et la charge, rendant C_{out} prêt pour le prochain cycle. (Figure II.11).

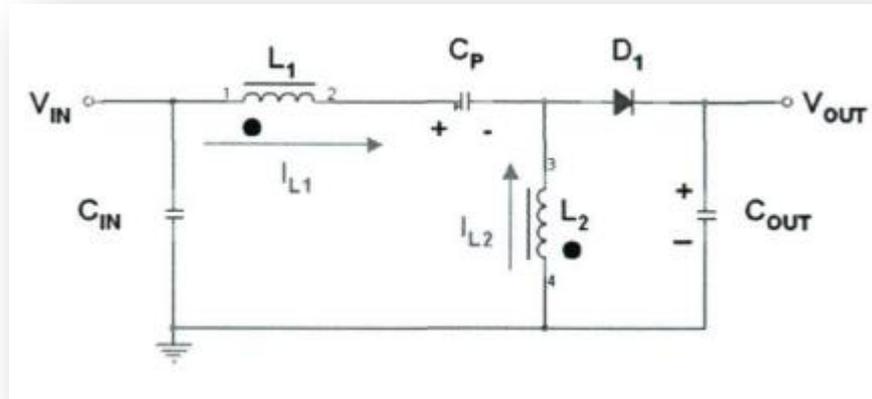


Figure II.11 : SEPIC pendant la phase de récupération.

II.6.2.2 Dimensionnement du SEPIC [39] [40]

a) Calcul du rapport cyclique

En supposant un rendement de 100% on aura la relation suivante :

$$D = \frac{V_{out} + V_D}{V_{IN} + V_{out} + V_D} \quad (\text{II.14})$$

Avec V_D : la chute de tension de la diode D

Le rapport cyclique maximum est :

$$D_{MAX} = \frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(MIN)} + V_{out} + V_D} \quad (\text{II.16})$$

Le rapport cyclique minimum est :

$$D_{MIN} = \frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(MAX)} + V_{out} + V_D} \quad (\text{II.17})$$

b) Choix des inductances

Pour la détermination de l'inductance on calcule ΔI_L , avec 20 à 40 % du courant d'entrée maximum.

$$\Delta I_L = I_N * 40\% = I_{OUT} * \frac{V_{out} + V_D}{V_{MIN} * \eta} * 40\% \quad (\text{II.18})$$

Les courantes crêtes des inductances :

$$I_{L1(PEAK)} = I_{OUT} \left(\frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(MIN)}} \right) \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) \quad (\text{II.19})$$

$$I_{L2(PEAK)} = I_{OUT} \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) \quad (\text{II.20})$$

Avec deux bobines séparées l'inductance est donnée par :

$$L_1 = L_2 = L = D_{MAX} \frac{V_{IN(MIN)}}{\Delta I_L * 2F_{SW}} \quad (\text{II.21})$$

Où F_{sw} est la fréquence de découpage.

c) Choix des condensateurs

Condensateur de sortie Cout

Dans le convertisseur SEP1C, lorsque l'interrupteur Q1 est en conduction, l'inductance L1 est en charge et le courant de sortie est fourni par le condensateur Cout de sortie. Donc, Cout doit avoir une capacité suffisante pour minimiser les ondulations dans la tension de sortie.

On a :

$$I_{CUUT(RMS)} = I_{OUT} \sqrt{\frac{V_{OUT} \cdot V_D}{V_{IN(MIN)}}} \quad (\text{II.22})$$

Alors, la valeur de C out doit satisfaire la condition suivante :

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{\Delta V_{RIPPLE} \cdot F_{SW}} \quad (\text{II.23})$$

Où ΔV_{RIPPLE} : Ondulation de la tension de sortie qui est définie par l'exigence de la conception.

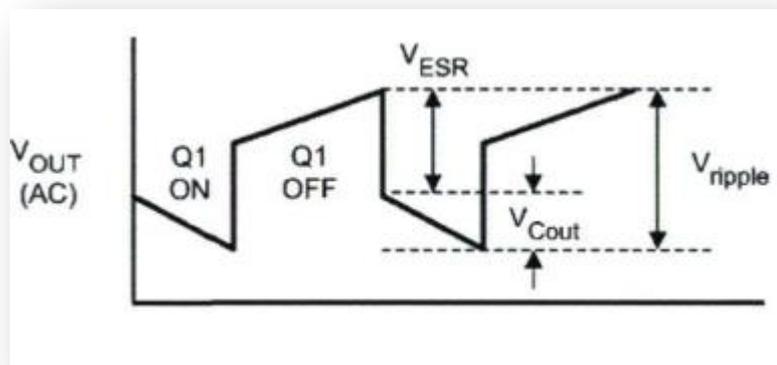


Figure II.12 : Ondulation de la tension de sortie

Condensateur de couplage C_P

$$I_{CP(rms)} = \frac{I_{OUT} * (V_{OUT} + V_D) * \sqrt{1 - D_{MAX}}}{V_{IN(MIN)} * \eta * D_{MAX}} \quad (\text{II.24})$$

$$C_P = \frac{I_{out} * D_{MAX}}{\Delta V_{cp} * f_S} \quad (\text{II.25})$$

ΔV_{CP} : L'ondulation de la tension aux bornes de C_P .

c) Choix du MOSFET

Le transistor doit être sélectionné en prenant en considération la tension et le courant de crête.

$$I_{Q1Peak} = \frac{I_{OUT} * (V_{OUT} + V_D)}{V_{IN(MIN)} * \eta} + I_{OUT} + \Delta I_L \quad (\text{II.26})$$

$$I_{QIRAS} = \frac{I_{OUT} * V_{OUT}}{V_{IN(MIN)} * \eta * \sqrt{D_{MAX}}} \quad (\text{II.27})$$

e) Choix de la diode de sortie

La diode de sortie D1 doit être capable de supporter le même courant de crête que Q1. La diode doit également être capable de supporter une tension inverse supérieure à la tension maximum de Q1 pour tenir compte des transitoires. Aussi elle doit avoir un pouvoir de dissipation égale ou supérieure à :

$$P_{D1} = I_{OUT} * V_D$$

II.7 Conclusion

Le SEPIC est le convertisseur idéal pour la recharge des batteries possédant une tension de sortie positive contrairement au buck - boost.

Ce chapitre a présenté une analyse du fonctionnement du convertisseur SEPIC et ses performances ainsi que des directives d'optimisation de sa conception qui vont nous aider pour le montage de notre convertisseur.

CHAPITRE III
RECHERCHE DU POINT DE
PUISSANCE MAXIMALE
(MPPT) D'UN GPV

III-1 Introduction

Des méthodes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximaux de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles sont les raisons de ce changement.

Pour le cas de sources énergétiques comme notre panneau solaire cela se traduit par des points de puissance maximale.

Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

III-2 Point de puissance maximale (MPP)

On peut visualiser le point de puissance maximale par 2 méthodes différentes

Méthode 1

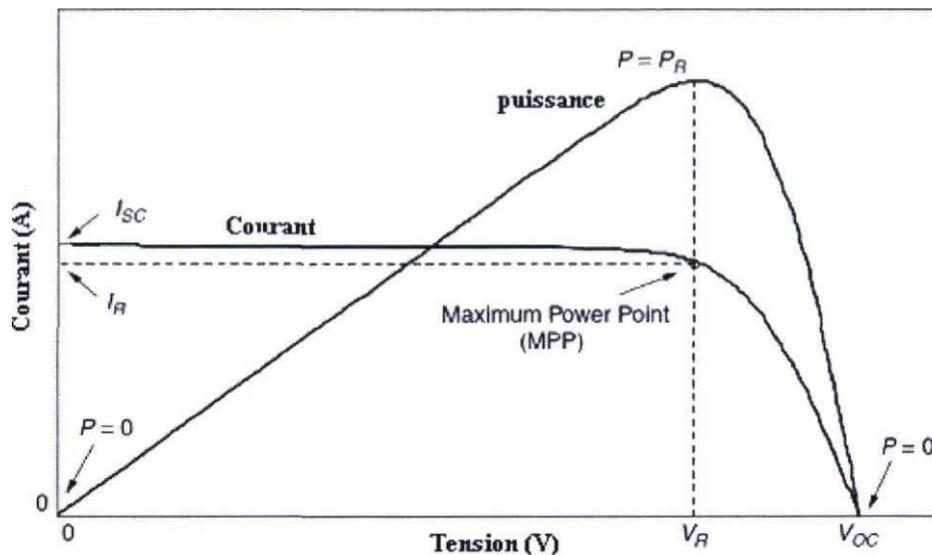


Figure III.1 : Courbes de I-V et de puissance de sortie pour un module photovoltaïque.

Dans la figure III.1 la courbe I-V montre plusieurs paramètres notamment la tension en circuit ouvert V_{oc} et le courant en court-circuit I_{sc} . La courbe 'puissance' représente le produit de la tension et du courant qui est la puissance de sortie délivrée par le module. Aux deux extrémités de la courbe I-V, la puissance de sortie est zéro puisque soit le courant ou la tension est nulle à ces points.

Le point de puissance maximum est le point sur la courbe où le produit du courant et de la tension atteint son maximum. La tension et le courant à la **MPP** sont souvent désignés comme V_m et I_m dans le cas général. Ces valeurs sont désignées aussi comme V_R et I_R (pour la tension nominale et courante nominal) dans des circonstances particulières qui correspondent aux conditions d'essai idéal.

Méthodes 2

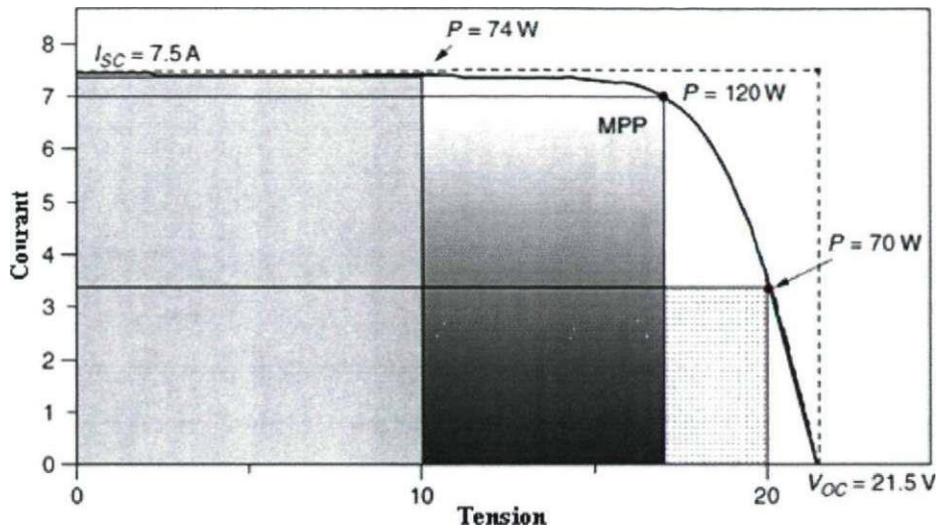


Figure III.2 : Le point de puissance maximale (MPP) par la méthode des rectangles.

La deuxième méthode pour visualiser la location du point de puissance maximale (MPP) et de trouver le plus grand rectangle qui peut passer sous la courbe I-V, comme le montre la Figure III.2. Les côtés du rectangle correspondent au courant et à la tension dont le produit représente la puissance $P=V*I$.

D'après la figure on peut définir une caractéristique du module qui est le facteur forme :

$$ff = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}} \tag{III.1}$$

où $V_m * I_m$: Puissance au point puissance maximum

Remarque :

Le facteur de forme est aux alentours de 70-75% pour les modules solaires en silicium cristallin tandis qu'il est proche de 50-60% pour les modules en silicium multi-jonction.

III-3 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La figure III.3 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Comme présenté sur la figure, la commande MPPT est associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de faire une adaptation entre le GPV et la batterie. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC, dans notre cas un SEPIC, pour que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la batterie.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les fluctuations atmosphériques. [41]

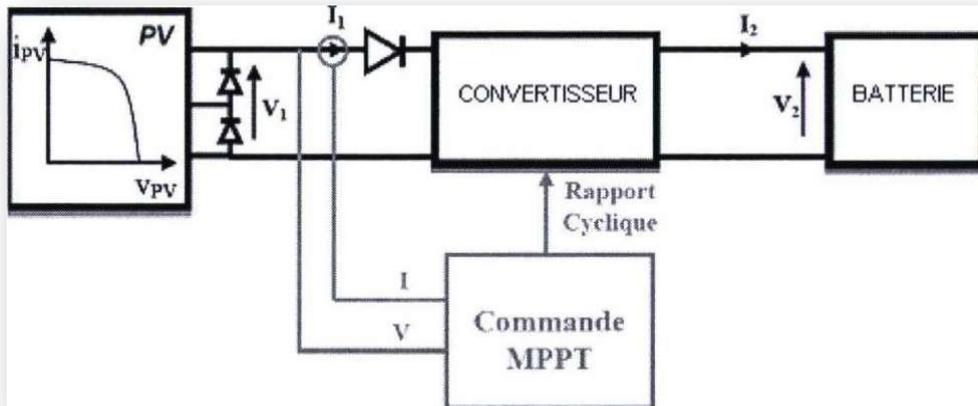


Figure III.3: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

III-4 Techniques de commande MPPT

Dans la littérature, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale (PPM) [42]. Les trois méthodes les plus utilisées sont : **Hill Climbing**, **Perturb & Observ (P&O)** et **l'incrément de conductance (IncCond)**.

Dans ce travail, nous utilisons la méthode Perturb & Observe (**P&O**) qui est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation. Elle consiste à perturber la tension (V_{pv}) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance (P_{pv}) qui en résulte. [43].

Comme illustré à la figure III.4, on peut observer que si une incrémentation positive de la tension (V_{pv}) engendre un accroissement de la puissance (P_{pv}), le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Au contraire, si la puissance décroît, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique (P_{pv}/V_{pv}), on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de le faire converger vers le maximum de puissance en imposant une valeur appropriée au courant de sortie du module PV.

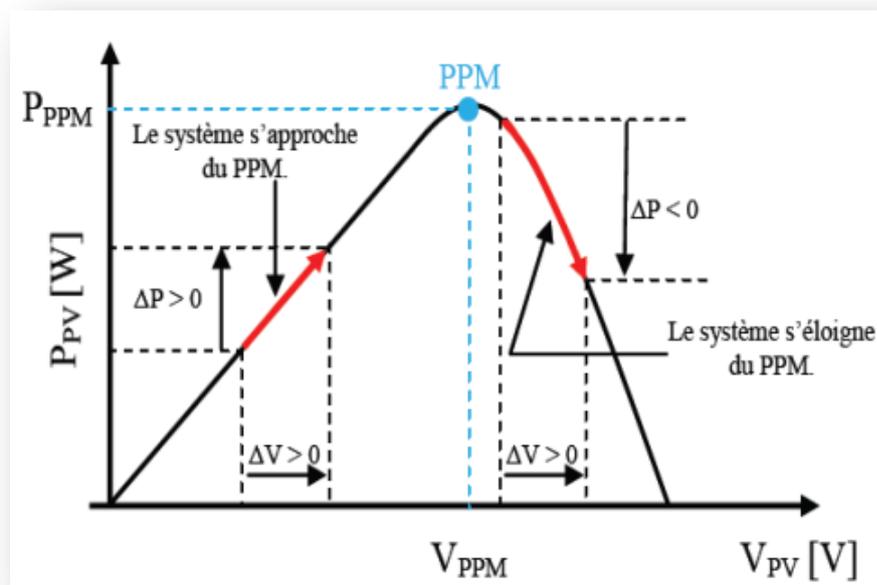


Figure III.4 : Schéma du principe de la méthode P&O.

La figure III.5 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

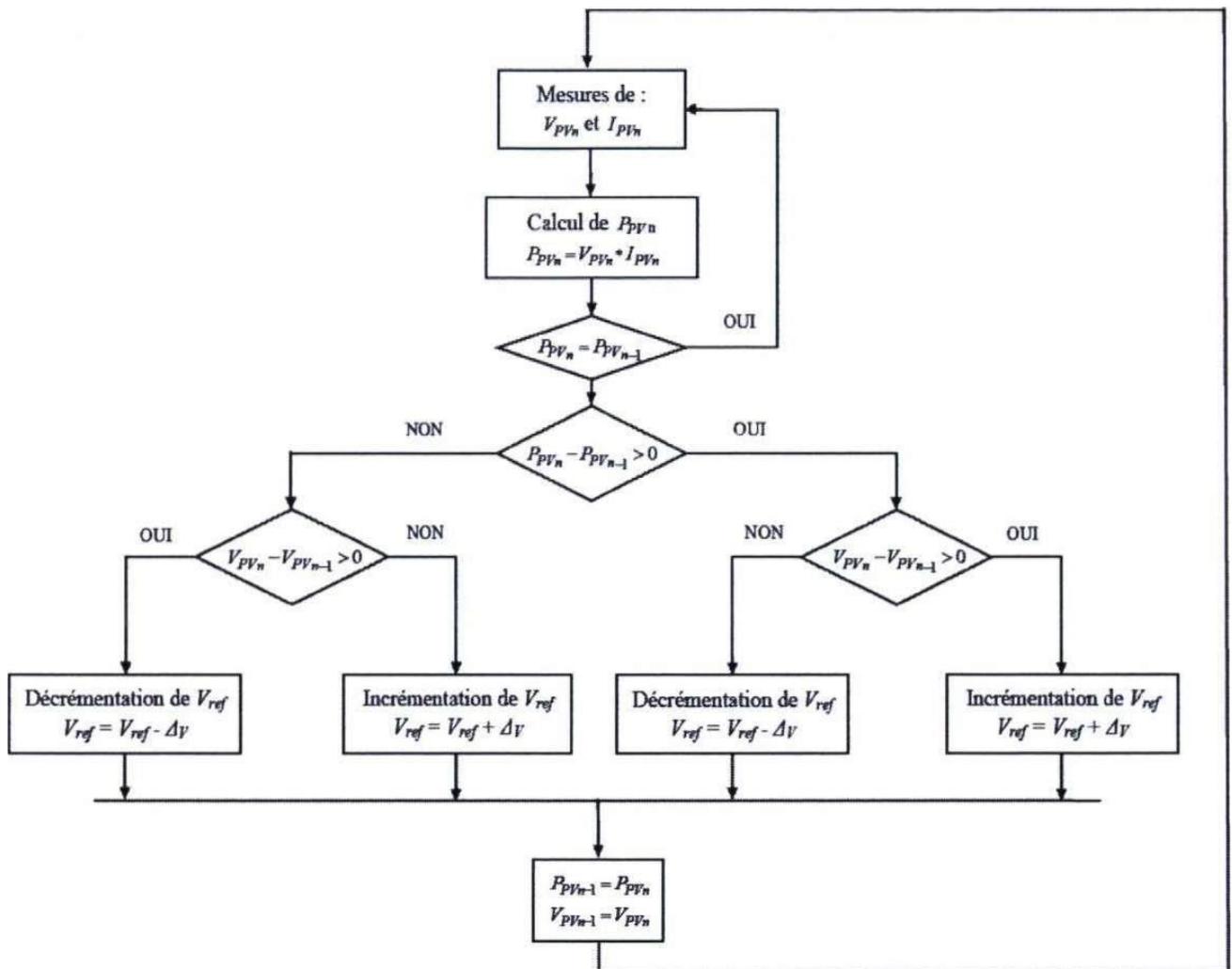


Figure III.5 : Algorithme de la méthode Perturb & Observ.

III.5 Principe de la commande P&O extrême

Le principe de cette commande a été théoriquement et expérimentalement démontré dans les publications [44]. Les différentes étapes illustrant le principe de cette méthode MPPT sont représentées sur la figure III.6.

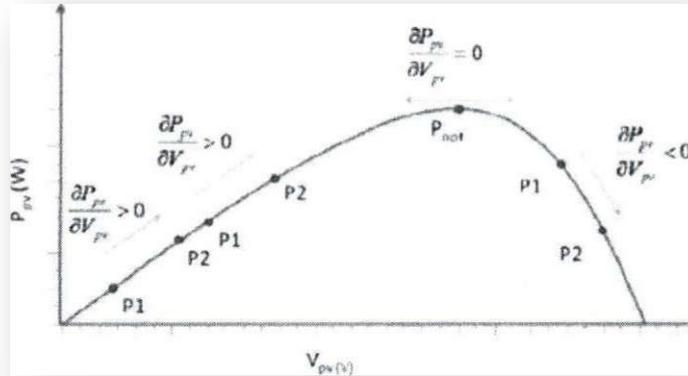


Figure III.6 Principe de la méthode P&O Extrême.

La figure III.7 montre l'organigramme de l'algorithme MPPT utilisé dans ce projet.

Le commande extrême appliquée aux photovoltaïques montre que lorsque la dérivée de la puissance et la tension est égale à zéro ($\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$) le point de puissance de fonctionnement correspond à la MPP.

L'algorithme obtient la tension V_{PV} et le courant I_{PV} aux bornes du générateur photovoltaïque pour calculer la puissance fournie par le GPV en effectuant une multiplication, il calcule ensuite la dérivée de la puissance.

Si la dérivée est positive ($\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0$), le système se rapproche de la MPP.

Par contre, si la dérivée est négatif ($\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0$), le système s'éloigne de la MPP.

Alpha est une variable binaire, de valeur 0 ou 1. Dans ce projet, si a est égale à 1, la recherche se fait de gauche à droite et si a est égale à 0, la recherche se fait de droite à gauche.

Après un intervalle de temps fixé auparavant, la variable H déterminera si la direction de la recherche maximale doit être maintenue ou changée.

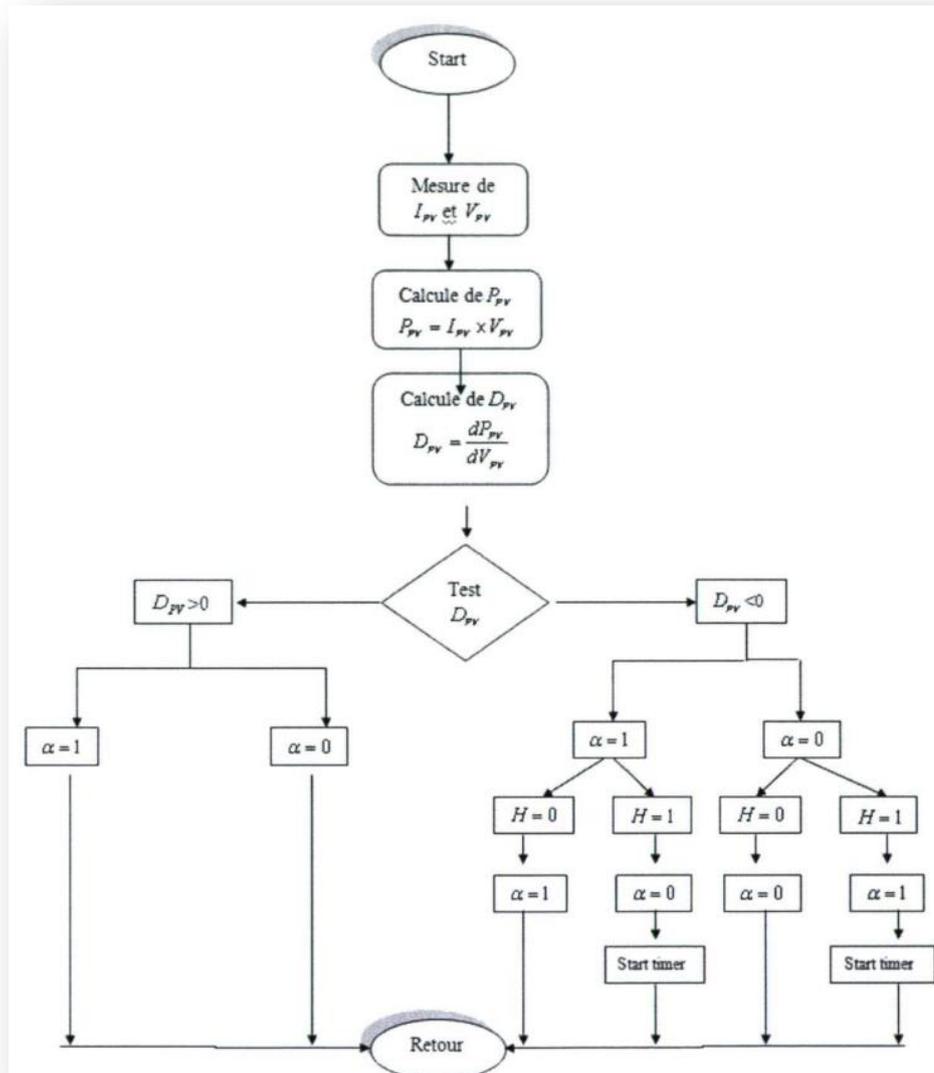
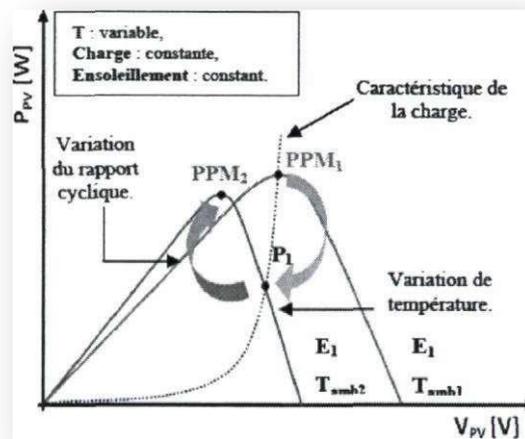
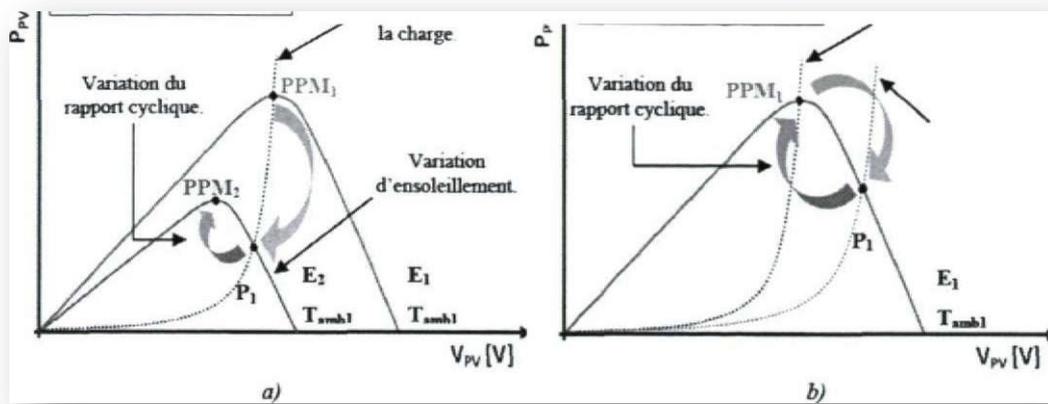


Figure III.7 : Algorithme de la méthode P & O Extrémale.

III.6 Gestion de la MPPT

La figure III.8 montre trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point PI de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans le cas a, pour une variation d'ensoleillement, il faut réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.



c)

Figure III.8 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale [41] a) suite à une variation d'enseuillement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température [41]

Dans le cas b, pour une variation de charge, on peut constater une modification du point de fonctionnement vers une nouvelle position optimale grâce à l'action de la commande. Et enfin d'après le cas c, la variation du point de fonctionnement est lié aux variations de la température de fonctionnement du panneau solaire. Bien qu'il faille également réajuster la valeur du rapport cyclique, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur afin d'atteindre le PPM du panneau solaire.

III.7 Conclusion

La caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire. Il existe un MPP (Maximum power point) où la puissance est maximale. On utilise donc des régulateurs qui font la poursuite de ce point (MPPT) afin de délivrer le plus de puissance possible à batterie.

Cette fonction est souvent réalisée par microcontrôleurs. Dans une boucle, l'algorithme mesure la tension et le courant du générateur pour calculer la puissance fournie, puis fait varier le signal MLI du régulateur à découpage afin de maximiser la puissance délivrée par le panneau solaire à la batterie.

CHAPITRE IV
MONTAGE D'UN SYSTEME
PV COMPLET ET
IMPLANTATION DE LA
COMMANDE MPPT

Dans ce chapitre le montage d'un système PV complet (GPV+SEPIC+MPPT+Batterie) est décrit. La figure IV.1 montre le diagramme fonctionnel du système étudié.

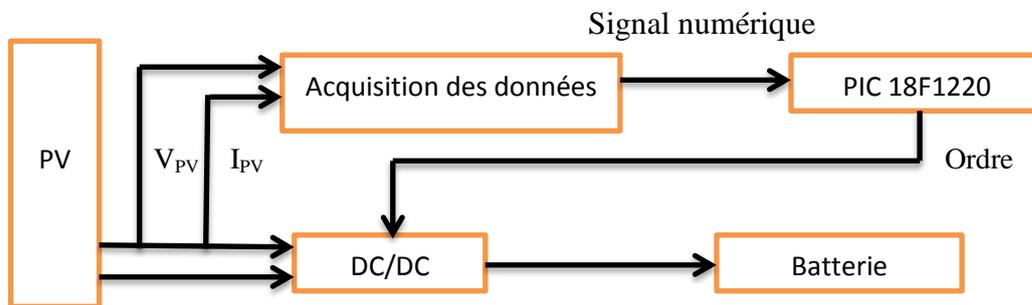


Figure IV.1 : Diagramme fonctionnel du système PV étudié.

IV.1 Le processeur

Le processeur PIC 18F1220 (Programmable Interface Controller) est un circuit intégré fabriqué par MICROCHIP Technology. C'est une unité de traitement de l'information de type microprocesseur à laquelle on a ajouté des périphériques internes permettant de réaliser des montages sans nécessiter l'ajout de composants externes

Son boîtier est un DIL (Dual In Line) de 2x9 pattes (Fig. IV.2)

Ses principales caractéristiques sont :

- Sa consommation d'énergie est faible (0.1 microampères) en mode veille.
- Horloge de surveillance de faible courant 2.1 uA
- Démarrage à deux vitesses d'oscillateur
- Oscillateur Timer1 : 1.1 uA, 32 kHz, 2 V
- Une, deux ou quatre sorties de PWM
- Grand choix de tension d'opération : 2.0 V à 5.5 V

Toutes ces caractéristiques le rendent bien adapté pour la gestion de l'énergie électrique, instruments de mesure, surveillance de l'environnement, les télécommunications et les applications de vidéo.

PIC 18F1220 est capable de générer un signal MLI pour commander le convertisseur DC-DC.

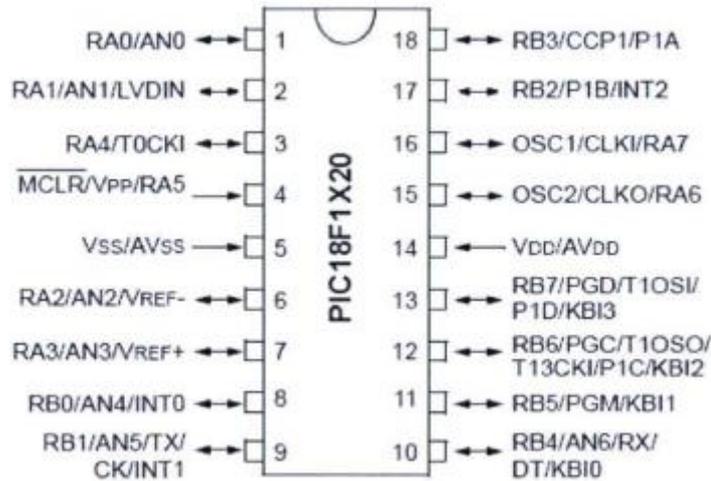


Figure IV.2 : Vue des entrées du microcontrôleur PIC 18f1220.

IV.2 Implantation du système de commande dans le PIC

L'algorithme de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) a été implanté dans le microcontrôleur PIC 18F1220.

Le diagramme fonctionnel de la figure IV.3 montre les différentes fonctions de l'algorithme MPPT. Les signaux I_{pv} et V_{pv} sont filtrés et ensuite multipliés pour obtenir la valeur de la puissance moyenne.

Le bloc suivant calcule la dérivée basée sur la variation de puissance en fonction de la tension.

Le signal alpha est généré en fonction de la dérivée et H. Enfin le signal alpha est intégré pour produire le signal PWM pour le convertisseur DC-DC.

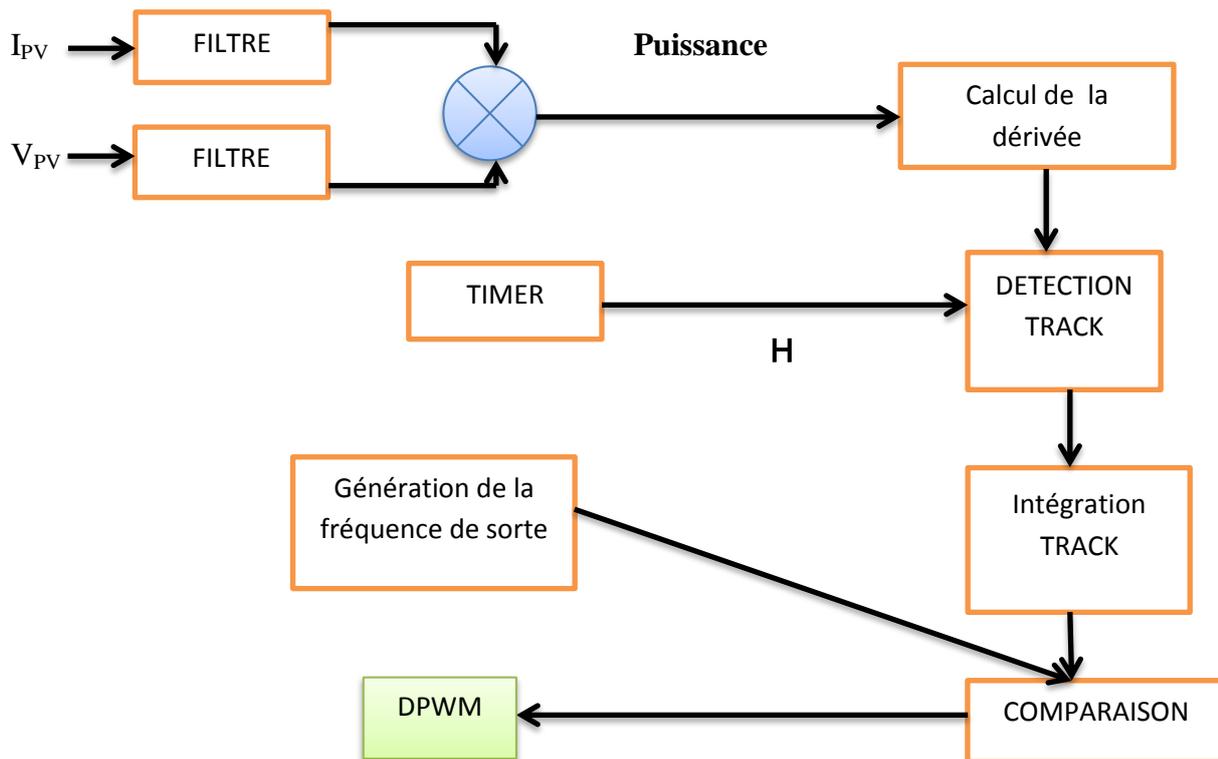


Figure IV.3 Diagramme fonctionnel de l'algorithme MPPT implémenté sur le PIC.

Les détails du programme basé sur la méthode Perturbation et Observation (P&O) sont décrits à l'Annexe

🚦 Variables globales

Ces variables sont celles qui sont actives pendant toute l'exécution du programme

🚦 Fonction de conversion du courant

Pour la conversion du courant nous déclarons 3 variables :

`high_intensity, high_total_intensity, low_intensity.`

Nous effectuons un petit retard pour mieux acquérir l'intensité du GPV et convertir la valeur du courant à la tension de référence du pic, en configurant le registre ADCON0 du PIC 18F1220. En premier nous chargeons le registre avec la valeur 0x07 pour initialiser la conversion. La conversion est terminée lorsque le registre prend la valeur 0x05.

Les valeurs de conversion sont mémorisées automatiquement dans les registres ADRESH et ADRESL.

Le résultat final de la conversion est enregistré dans la variable `intensity_converted` où nous avons les 10 bits de la conversion qui est le résultat renvoyé de la fonction `intensidad()` après son appel.

Fonction d'interruption du Timer 0

Le Timer 0 génère une interruption quand il déborde. Avec cette interruption nous activons la variable H qui indique la fin du Timer 0. Nous initialisons le drapeau d'interruption à 0 et nous arrêtons le Timer 0.

Fonction de configuration des registres du PIC

C'est la fonction d'initialisation de tous les registres du PIC pour assurer le bon fonctionnement du système.

Fonction de conversion de la tension

La conversion de la tension du GPV s'effectue de façon identique à la conversion du courant .La conversion sur le canal 1 est initiée par la configuration du registre ADCON0 du PIC.

Fonction de calcul de la valeur de la puissance

Après avoir obtenue les valeurs converties de la tension et du courant, nous calculons ensuite la valeur de la puissance en faisant le produit de ces deux variables.

Ceci est réalisé à l'aide de la fonction `power calculation ()` qui fait appel aux fonctions: `voltage ()` et `intensity()`.

Fonction de calcul de la puissance moyenne

Une fois la valeur de la puissance obtenue nous effectuons le calcul de la puissance moyenne à partir de plusieurs échantillons de puissance.

Fonction de calcul de la dérivée

En ayant la puissance moyenne, nous pouvons maintenant définir le signe de la dérivée de cette puissance grâce à la fonction `derived_power ()`.

La méthode de cette fonction consiste à comparer deux valeurs de puissance moyenne : la valeur ancienne et la valeur qui vient d'être calculée. Si la dérivée est positive nous mettons le bit RB0 du port de sortie B à « 1 » Par contre Si elle est négative nous le mettons à « 0 ».

Programme principal MPPT

Le programme de l'algorithme MPPT se trouve dans programme principal `main ()` qui fait appel à la fonction `set records ()`

Résumé

Dans notre programme avons besoin de déterminer en permanence la dérivée de la puissance fournie par le module PV pour savoir si nous nous approchons ou nous nous éloignons du PPM. Pour ce faire, nous devons mesurer la tension et le courant du module PV pour effectuer la multiplication. Pour obtenir une bonne valeur de la puissance moyenne nous effectuons plusieurs échantillons de la puissance instantanée.

Pour chercher le point de puissance maximale, nous comparons un point de puissance (P2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P1) mesuré à l'instant (t-1). Si $P1 < P2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous rapprochons du point de puissance maximal. Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale.

Pour éviter de perdre le point de puissance maximale, lors de changements brutaux d'éclairement et lors des transitoires du convertisseur SEPIC, l'algorithme de recherche inverse le sens de poursuite si un certain temps s'est écoulé après le dernier changement. Ce temps est fixé préalablement à une valeur constante.

Si le signe de la dérivée de puissance est positif, le sens de poursuite reste inchangé. Si les deux conditions Timer 0 écoulé et dérivée négative sont réunies, le sens de poursuite est automatiquement inversé (paramètre alpha). Ce temps d'attente est effectué à l'aide du Timer 0 qui génère une interruption lorsque celui-ci déborde modifiant ainsi la valeur de la variable H.

IV.3 Montage du système photovoltaïque complet

IV.3.1 Partie Commande

a) TS555

Le TS555 (voir Annexe 2) est couramment utilisé pour générer des impulsions de synchronisation précises. Il s'agit d'un Timer IC 8 broches et a principalement deux modes de fonctionnement: monostable et astable. En mode astable, la fréquence et le rapport cyclique sont commandés par deux résistances externes $R_A = 1K$ et $R_B = 2.5K$ et un condensateur $C=1$ nF . Avec ces valeurs on obtient un signal triangulaire de 250 kHz et un rapport cyclique de 0.41.

La fréquence et le rapport cyclique sont donnés par les relations suivantes :

$$\text{Fréquence : } F = \frac{1}{T} = \frac{1.49}{C(R_A + 2R_B)} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Rapport cyclique : } D = \frac{R_B}{R_A + 2R_B} \quad (\text{IV.2})$$

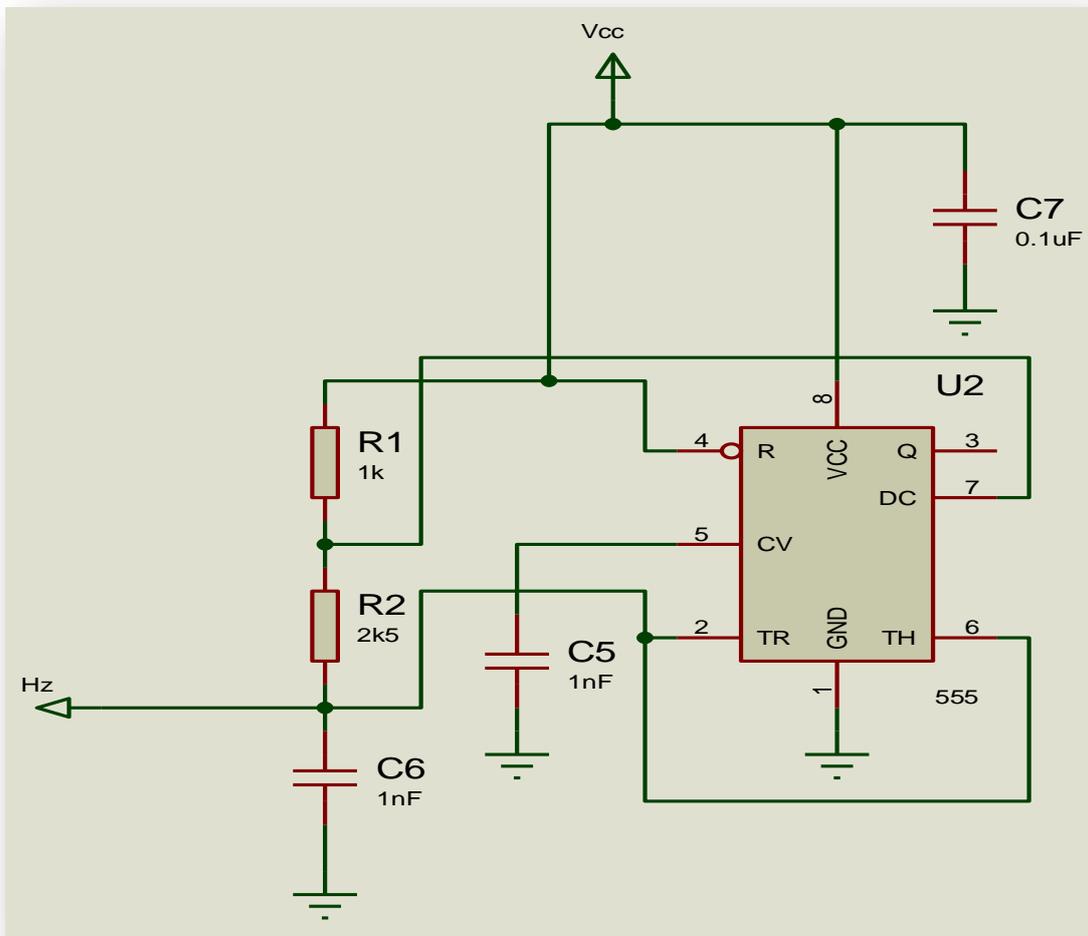


Figure IV.4 : Schéma du TS555.

Le signal triangulaire est compris entre $\frac{1}{3} V_{cc} = 1.67 V$ et $\frac{2}{3} V_{cc} = 3.3V$. (Figure IV.12)

b) LM311

Le LM311 (voir annexe), est un comparateur de tension utilisé pour comparer le signal triangulaire 250 kHz du TS555 avec le signal de la PIN RB1 du PIC18F1220. Le signal de sortie (PIN 7) est un signal MLI contrôlé par le signal de consigne provenant du PIC18F1220. (Figure IV.5)

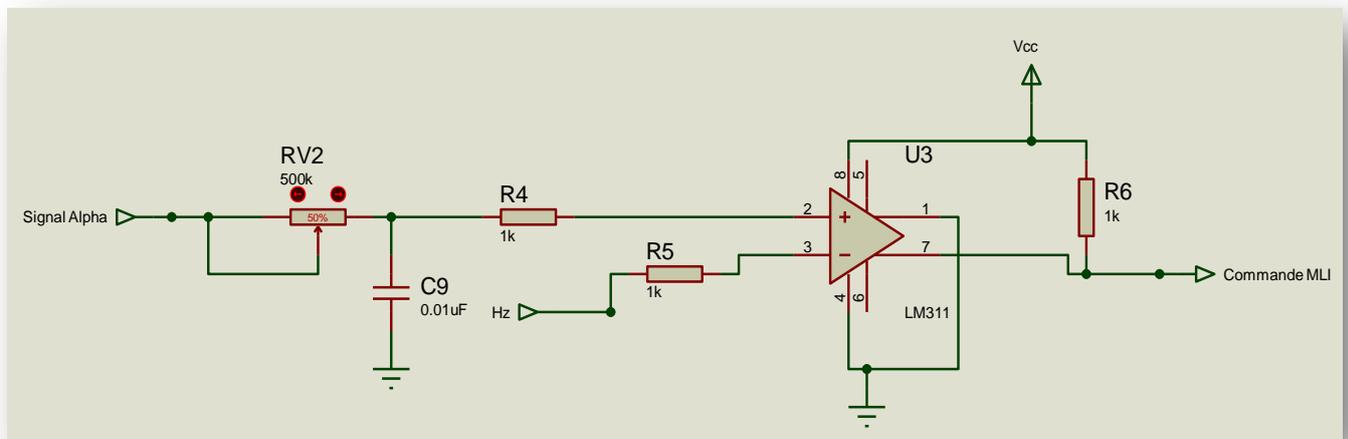


Figure IV.5 : Schéma du modulateur MLI utilisant le LM311.

C) PIC18F1220

La figure IV.6 illustre le circuit interne du PIC18F1220. Il est constitué essentiellement des composants suivants :

- Un Quartz 20 MHz avec deux condensateurs non polarisés 15 pF.
- Une alimentation de 5 Volts (Vdd).

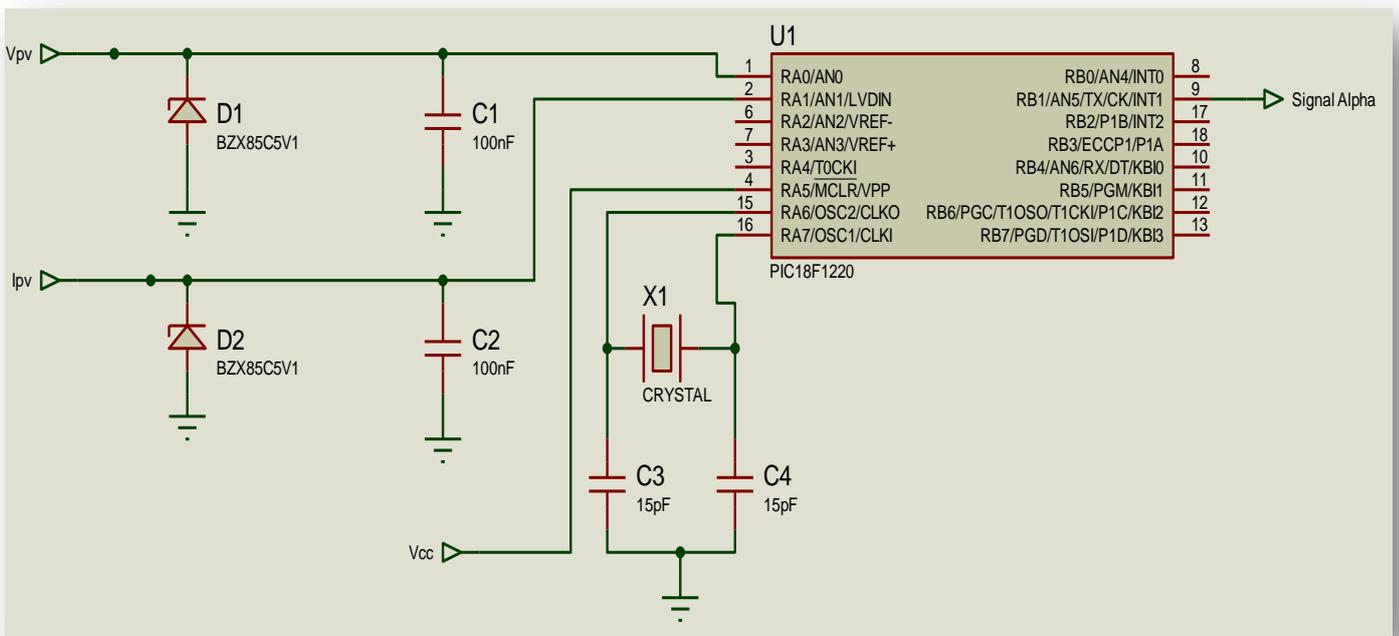


Figure IV.6 : Circuit externe du PIC 18F1220.

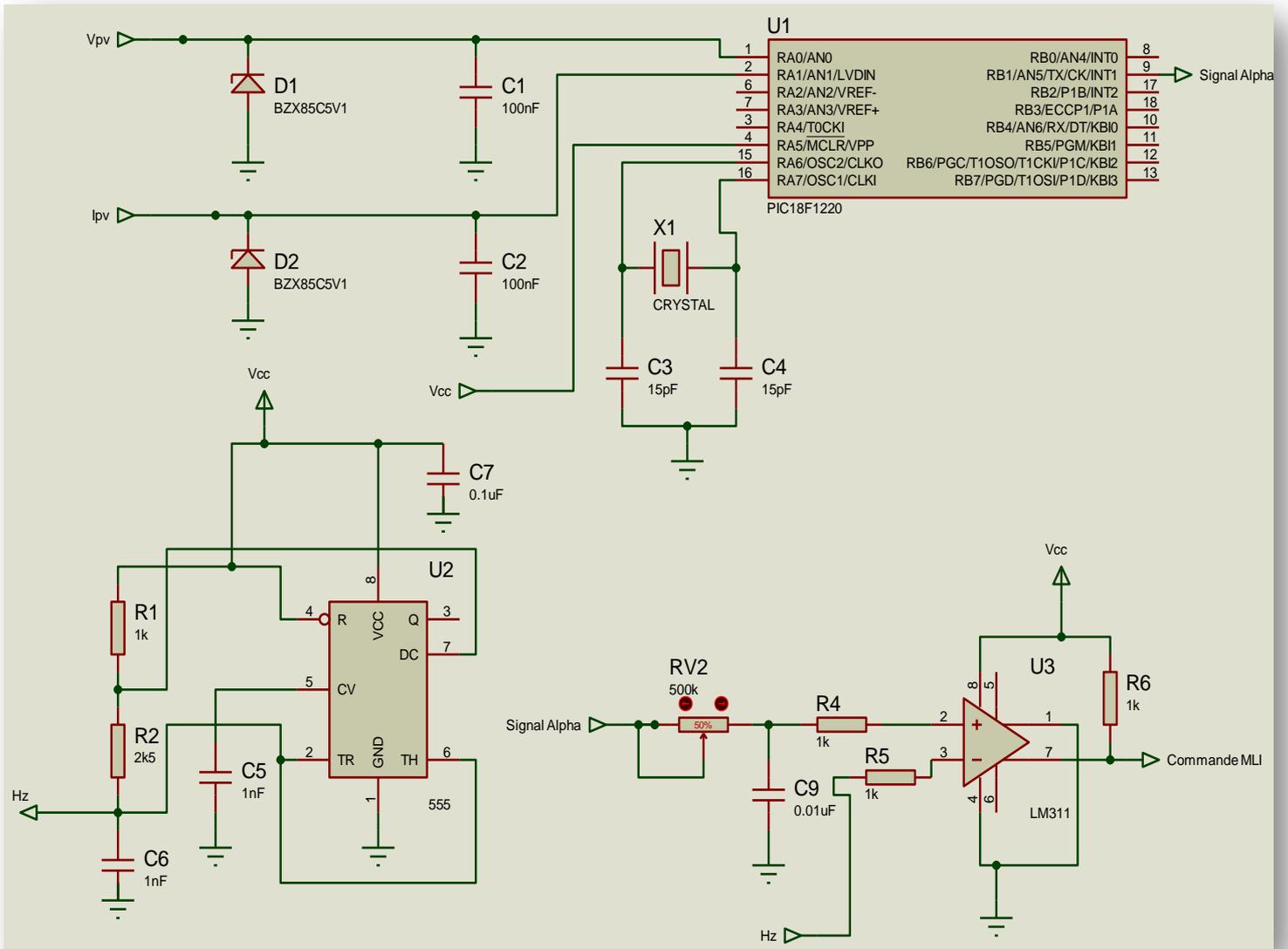


Figure IV.7 : Vue d'ensemble de la partie commande.

IV.3.2 Partie alimentation

Le fonctionnement du circuit de commande exige une tension d'alimentation de 5V (figure IV.7)

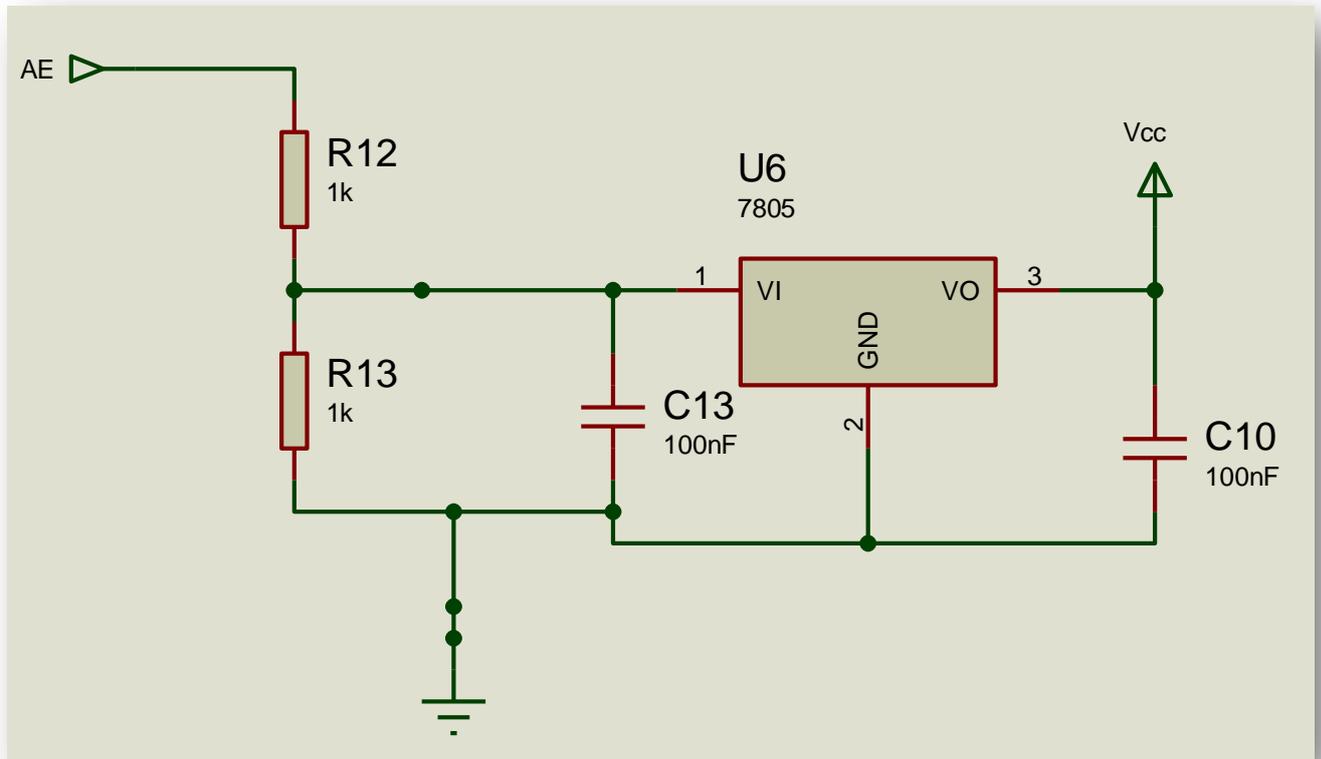


Figure IV.8 : Structure du bloc d'alimentation 5V.

IV.3.3 Partie puissance

Le circuit de puissance est constitué du panneau solaire, du convertisseur SEPIC nécessaire pour la régulation de la tension et de la batterie, (une partiellement chargée et l'autre presque déchargée) pour montrer la différence de charge.

a) Convertisseur SEPIC

Le dimensionnement du SEPIC dépend des contraintes imposées par le panneau solaire et la batterie. La source d'énergie (le panneau solaire) peut fournir un courant continu allant jusqu'à 3.25 A et une tension à vide de 21.2V. Le convertisseur SEPIC est composé de :

-Un condensateur $C_{in}=C_{out}$ dont la capacité est 440uF (équation II.23), branché aux bornes du module pour filtrer la tension d'entrée du hacheur et diminuer les ondulations d'entrée.

-Un condensateur de couplage dont la capacité est de luF (équation II.25).

L'application de (l'équation II.21) développée dans le deuxième chapitre permet de choisir la valeur de l'inductance : $L1=L2=47\mu H$

-Une MOSFET IRL2505 (voir annexe 2). Son organe de commande est la Gâte (G) Celle-ci n'a besoin que d'une tension entre la grille et la source pour contrôler le courant entre la source et le drain .

b) MAX4173

Le MAX4173 (voir annexe 2).est un capteur de courant qui fonctionne avec une résistance de détection externe qui fixe la gamme de courant .La sortie du MAX4173 (qui représente I_{pv}) est relié directement à la pin AN 1 du PIC 18F1220. (Figure IV.9)

$$\text{Avec : } I_{out} = \frac{V_{SENSE}}{100\Omega} \quad (\text{IV.3})$$

Et $R=0.05\Omega$

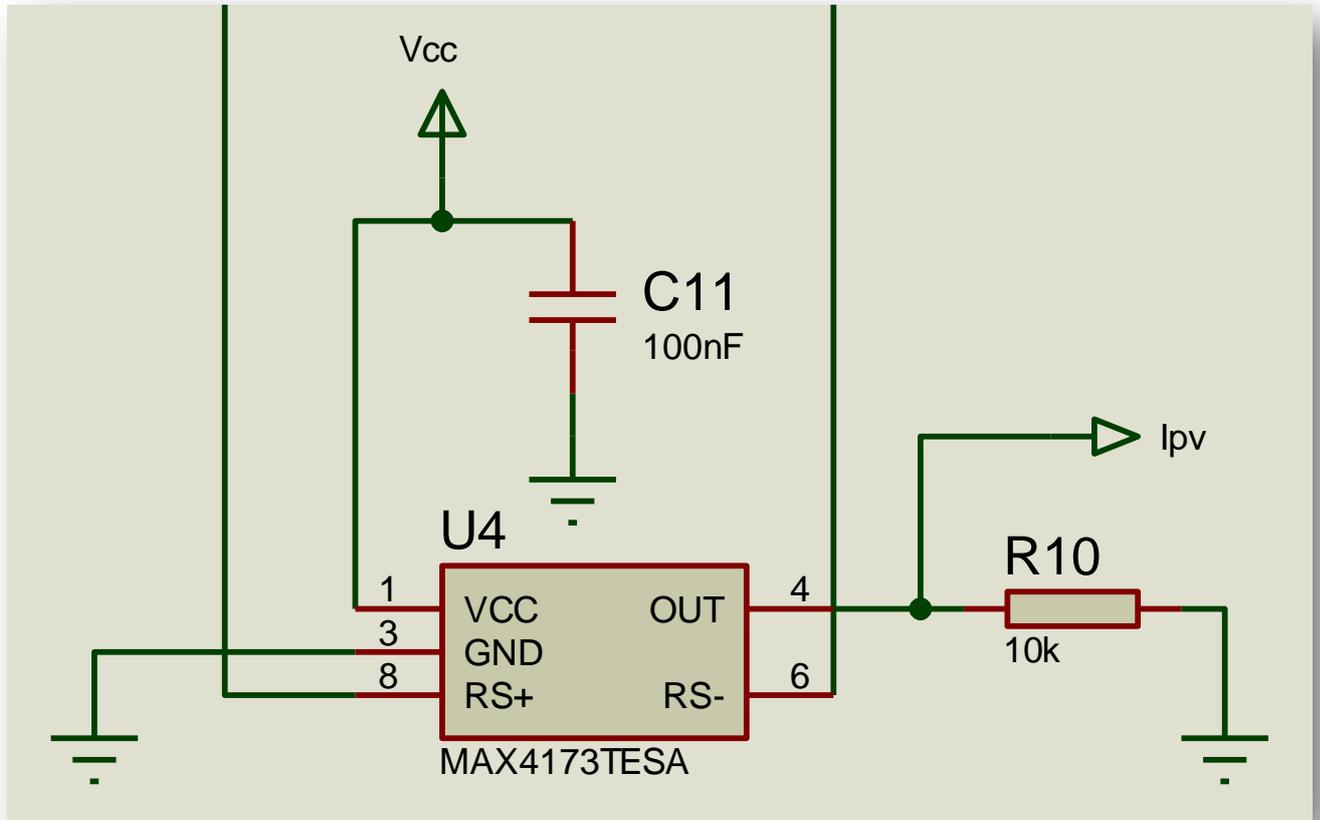


Figure IV.9 Vue d'ensemble du capteur de courant MAX4173.

c) TC4420

Le TC4420 (HIGHSPEED DRIVERS) (voir annexe 2) est capable de débiter le courant nécessaire pour piloter le MOSFET (Figure IV.10), Il est commandé à l'entrée 2 par le LM311.

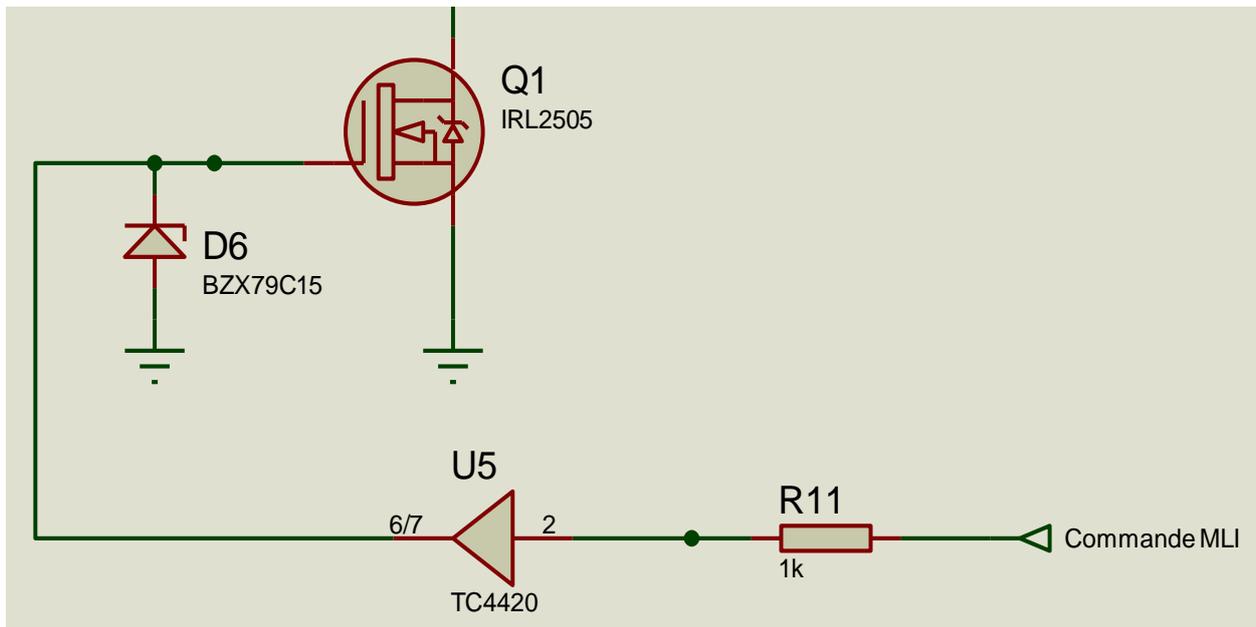


Figure IV.10 : Vue d'ensemble du driver TC4420

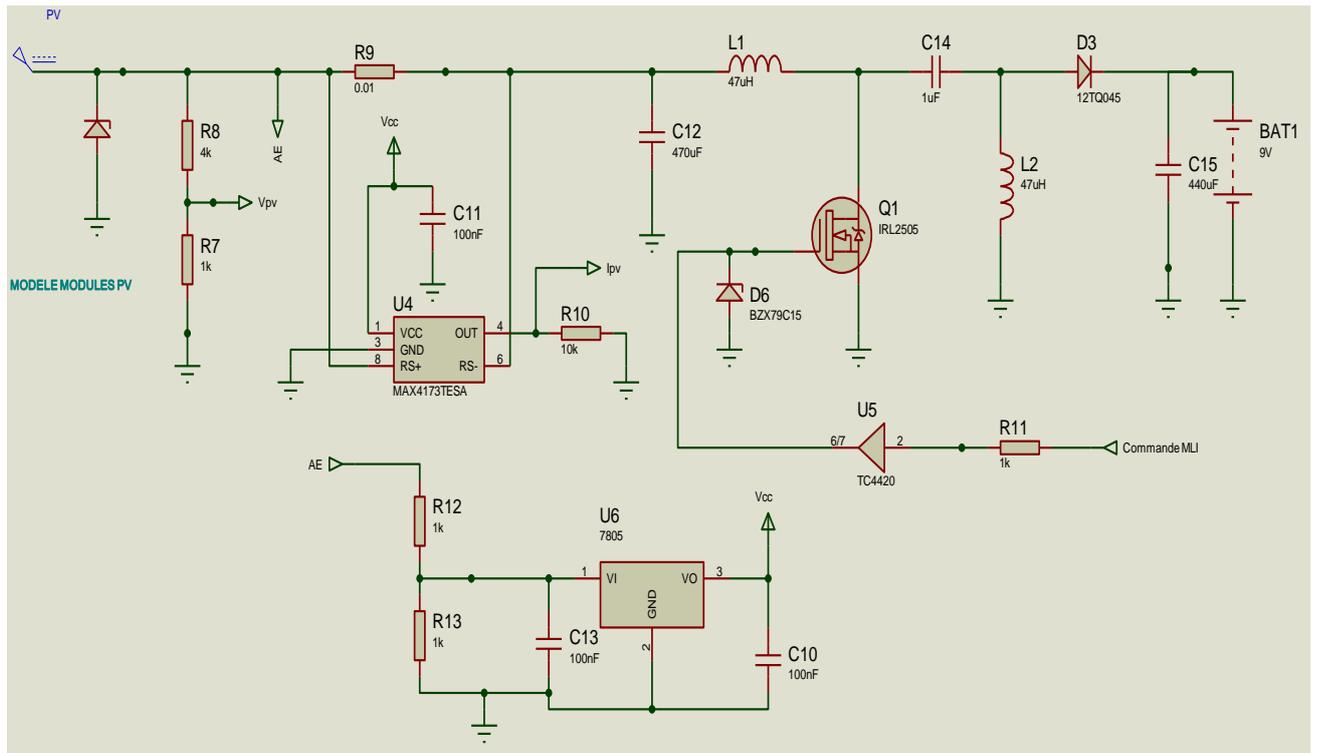


Figure IV.11 : Vue d'ensemble de la partie puissance.

IV.4 Résultat de Simulation

Nous avons simulé le fonctionnement du PIC et celui du système photovoltaïque dans le logiciel de simulation de circuits électroniques et les dispositifs programmables 'Proteus ISIS'

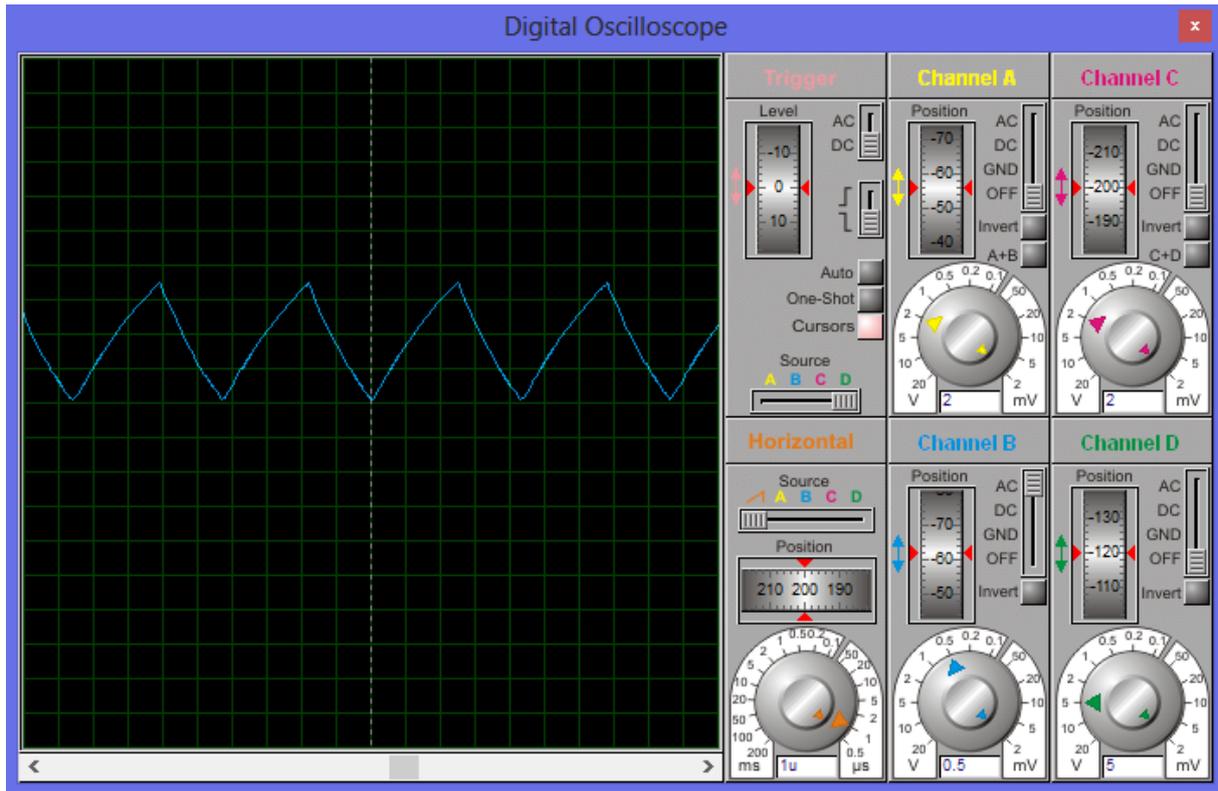


Figure IV.12 Capture de l'oscilloscope pour la sortie du TS555 (pin 2-6)

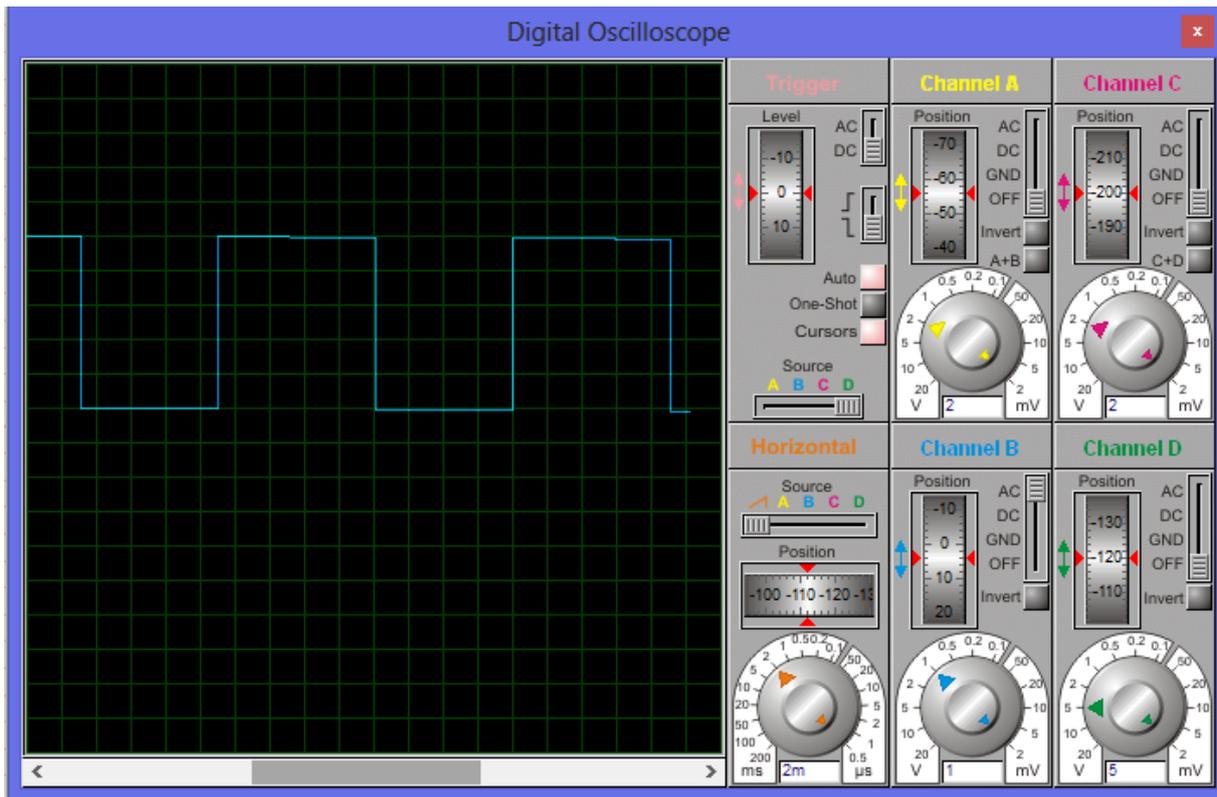


Figure IV.13 Signal généré Alpha

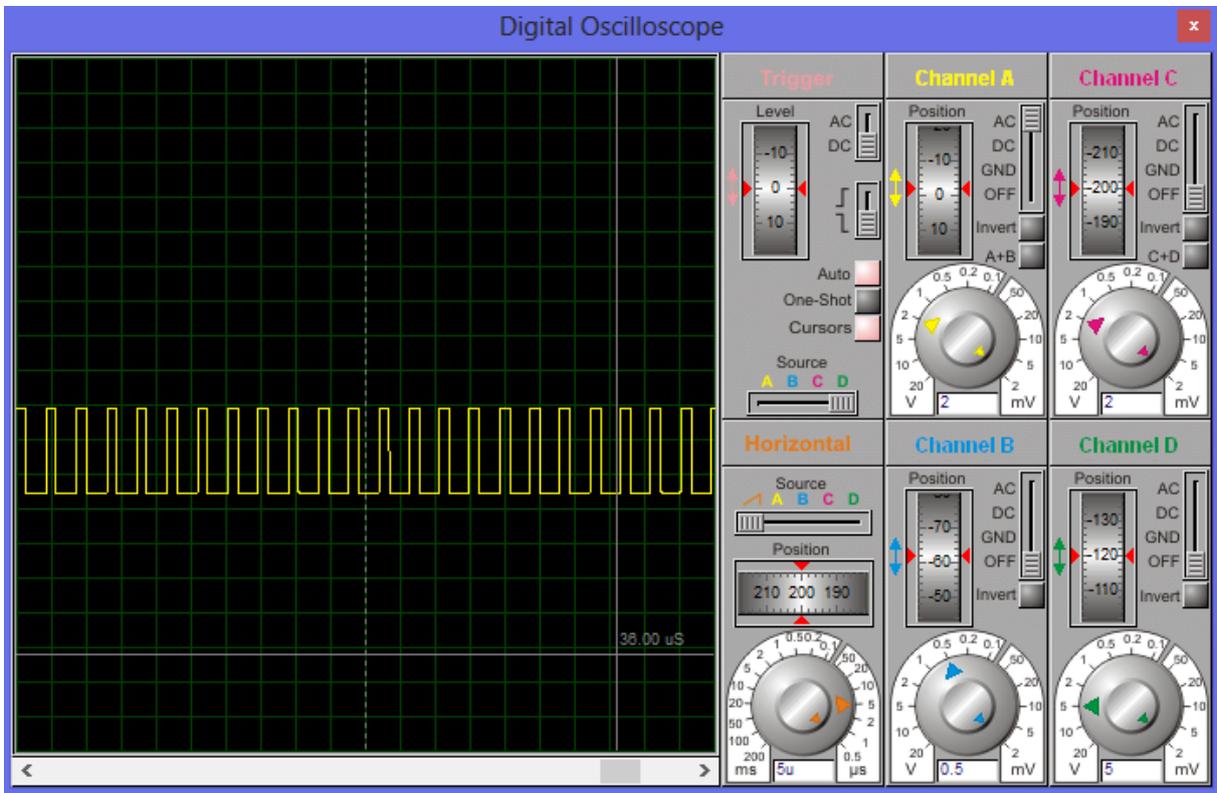


Figure IV.14 Signal MLI généré dans le cas où la dérivée est positive

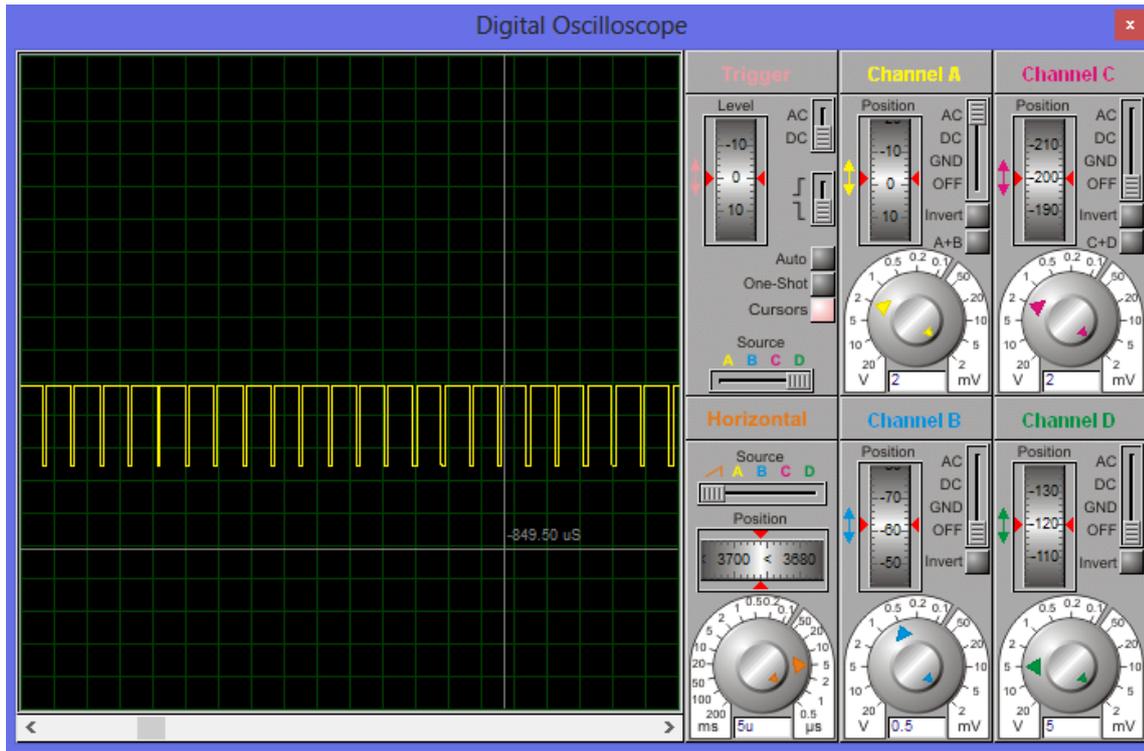


Figure IV.15 Signal MLI généré dans le cas où la dérivée est négative

La figure IV.14 montre le signal MLI avec un rapport cyclique de 20%.

La figure IV.15 montre le signal MLI avec un rapport cyclique de 90%

Notre signal MLI est d'amplitude 5V, d'une fréquence fixe de 250Khz et d'un rapport cyclique variable $D = 90\%$, $D = 60\%$, $D = 20\%$ ce signal attaque l'entrée du driver de Mosfet.

Un test a été effectué pour tester le bon fonctionnement du système complet et vérifier la fiabilité du dispositif MPPT.

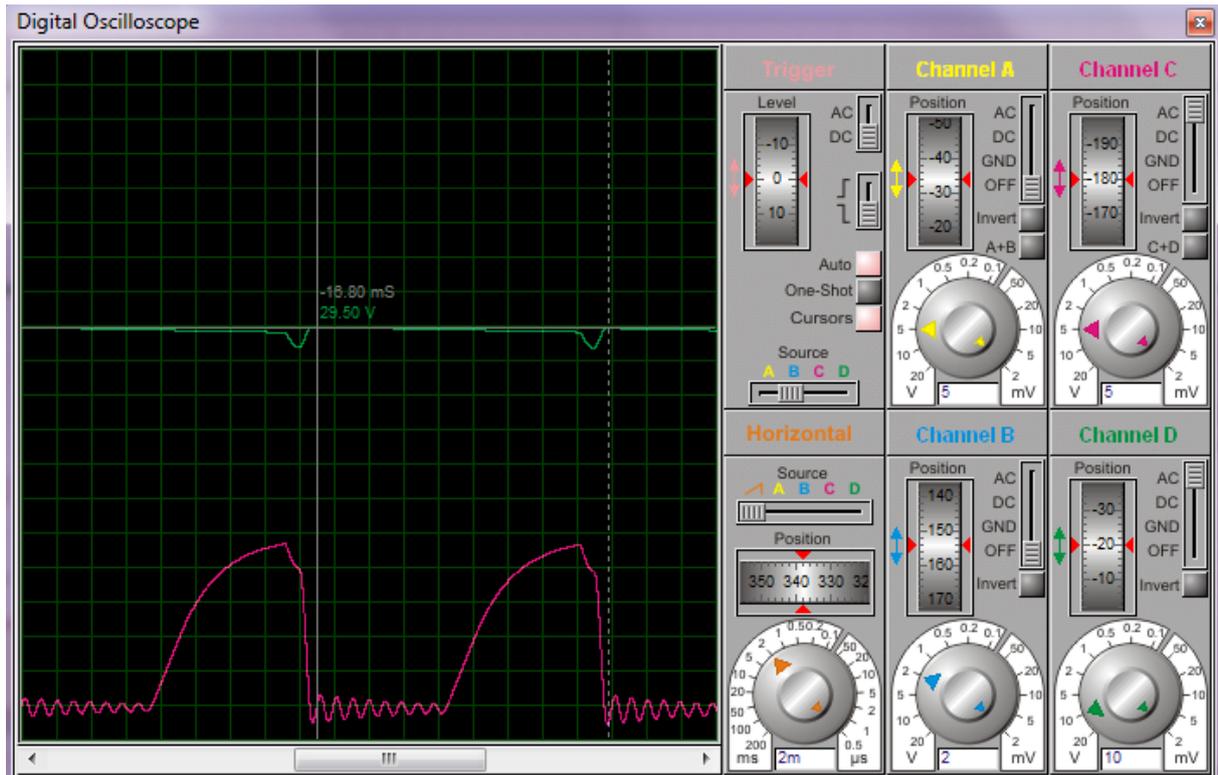


Figure IV.15 Relevés des tensions

Le graphe en bas montre la tension obtenue du panneau solaire qui est variable.

Le graphe en haut montre la tension de sortie du hacheur qui toujours stable d'une amplitude de 29V qui correspond très bien à la conduction du composant de puissance Mosfet du système complet avec MPPT.

IV.5 Conclusion

Avec une commande MPPT, le générateur PV peut fonctionner sur sa courbe de tension optimale sur toute la plage de variation d'éclairement et de température.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire traite de la modélisation et de l'optimisation d'un générateur photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur SEPIC pour la recharge d'une batterie. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible.

En début et en fin de journée, lorsque la tension du panneau solaire est inférieure à la tension de la batterie, le convertisseur SEPIC, permet de récupérer un peu d'énergie supplémentaire pour assurer la recharge de la batterie.

L'étude bibliographique sur les générateurs photovoltaïques nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules photovoltaïques dans la production de l'électricité.

La simulation du système a été effectuée en détails et en plusieurs étapes pour bien illustrer le fonctionnement du générateur photovoltaïque et son comportement face à la batterie avec ou sans convertisseur de puissance.

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisi pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

Un montage expérimental du système générateur PV a été réalisé pour valider les résultats obtenus par simulation. Le microcontrôleur PIC 18F1220 est utilisé pour assurer la commande de l'ensemble et pour implanter l'algorithme MPPT.

Les résultats expérimentaux obtenus démontrent l'efficacité du convertisseur SEPIC et de l'algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale dans la simulation de la performance du système PV étudié.

Par rapport à un chargeur PV classique, le système MPPT peut apporter un gain de puissance de 20 à 45 % en hiver et jusqu'à 15 % en été.

Une des perspectives intéressantes à cette étude serait le couplage du panneau PV avec l'éolienne et la pile à combustible dans le but de réaliser une micro-centrale multi-sources.

Bibliographie :

[1]:A. Zerga: «Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p », Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.

[2] :www.aes-tunisie.com/fr/photovoltaïque-hors-re...

[3]: Belhadj Mohammed : «Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome »,Mémoire .de.Magister2007/2008,Universitaire.De.Bechar.

[4]:A.kassewa , Tchapo.Singo : « Système d'alimentation photovoltaïque avec, stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri-Poincaré, Nancy-I-2006.

[5]:<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/> .

[6]: Centrales photovoltaïques - Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs Programme d'action PACER - Energies renouvelables Office fédéral des questions conjoncturelles Berne, juin 1996

[7]: Bellala Djamel : « Contribution a l'Optimisation des Systèmes de conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse Doctorat en sciences,Université;deBatna.

[8]: www.voltasoler.com/medias/

[9]:Yann.Riffonneau : « gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », thèse de doctorat, L'université josph.fourier,octobre ;2009.

[10]:R.Maouedj : «Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », Mémoire De Magistère Décembre ;2005.

[11]:Bendjellouli.Zakaria :«Contribution.a.la.modélisation.d'une.cellule.solaire.», mémoire.de. magister,Université ;de.Bechar. 2008/2009,

[12]:<http://glloq69.free.fr/images/tpe/dopage.jpg> .

[13]: «Les piles solaires, le composant et ces applications » Edition. Masson (1985).

[14]:A.buyers :«les système photovoltaïques» article pdf guide, Canada 2002 .

[15]: Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07 .

[16]: M^{me}. Zaamta soud: « Réalisation d'un régulateur solaire à base de Microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des Accumulateurs » mémoire de magister Centre Universités.Larbi-BenM'hidi-OumEl-Bouaghi ;20/02./2008

[17]:M Angel .C.Pastor: « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » Thèse de doctorat de l Institut National des sciences Appliquées de.Toulouse, septembre.2006.

[18]: Y. Pankow : « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension ». Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers Décembre 2004.

[19]:<http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>..

[20]: bouden abdelmaliek : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister 2008, Université Mentouri de Constantine.

[21]:Anne Laburet, Michel Viloz : énergie solaire photovoltaïque 3^e édition dunod- paris ; 2006.

[22]: www.ohmeo.com/composition-panneau-PV.

[23]: solarelectripower.org

[24]: F.Benyarou:«Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université, de Tlemcen, Juillet-2004.

[25]:Frank Jackson : Planning and Installing Photovoltaic Systems Green Dragon Energy, A guide for installers, architects and engineers second edition Berlin October.2007.

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

[27]: www.cmhc-schl.gc.ca/.

[28]:D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003

[29]: D.Turcotte,M.Ross and F.Sheriff. « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools»;article pdf. PV Horizon, Canada, 2001.

[30] :Belhadj.Mohammed :« Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome»,mémoire de magister Centre Universitaire De Bechar Année Universitaire 2007-2008.

[31] : www.abcelectronique.com.

[32] : www.21404.gel.ulaval.ca.

[33] : A. Bentaillah : « étude expérimental et de simulation des performance d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique,Tlemcen, 1994.

[34]: R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC 1999.

[35]: Ionel Vechiu : « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», these doctorat -Universite de Havere ,decembre 2005.

[36]: Maouedj Rachid : application de l'énergie Photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de bouzareah»,. mémoire De magister Université Abou Bekr Belkaïd . Tlemcen;.décembre.2005.

[37]:F.Benyarou:«Conception Assistée Par Ordinateur des Système PV Modélisation dimensionnement et simulation », thèse de doctoral en physique énergétique, Tlemcen,2004.

[38] : G. Séguier et F. Labrique : « Les Convertisseur de L'électronique de Puissance, et Comportement Dynamique», Tome5, Technique et documentation -Lavoisier, 1998.

[39] Sepic Design ,Texas Instrument SLVA-442, octobre 2010, www.ti.com

[40]: Designing a SEPIC converter, National Semiconductor, Application Note 1484, Wei Gu. Dongbing Zhang, April 30, 2008.

[41] Cédric CABAL. Thèse "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque". préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS . UNIVERSITE TOULOUSE III , 2008.

[42] T. Eram, P. L. Chapman. "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Transactions On. Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439- 449, Jun. 2007.

[43] N. Femia, G. Pétrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.

[44] R. Leyva, I. Queinnec, C. Alonso, A . Cid-Pastor, D. Lagrange and L. Martinez-Salamero, "MPPT of photovoltaïque système using extremum-seeking control" IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 249-258, Jan 2006

ANNEXES

ANNEXE 1

Programme en C de la commande MPPT pour le PIC 18F1220

//librairies nécessaires pour le bon fonctionnement du programme

```
#include <p18f1220.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#pragma config WDT = OFF
```

//Variables globale

```
int i,H ;
```

```
unsigned int high_voltage,voltage_converted,high_voltage_total;
```

```
unsigned char derived_pot,low_voltage,low_intensity;
```

```
unsigned int high_intensity,intensity_converted;
```

```
unsigned int high_total_intensity,voltage_panel;
```

```
unsigned long power,old_power,total_power;
```

```
unsigned int m ;
```

*//Fonction de conversion d'intensité: Nous changeons l'intensité de celui
panneau à la valeur de référence du PIC (5V).*

```
unsigned int intensity (void)
```

```
{
```

```
high_intensity=0;
```

```
high_total_intensity=0;
```

```
low_intensity=0;
```

```
for (i=0;i<1;i++)
```

```
{
```

```
}
```

```
ADCON0=0x05;
```

```
for (i=0;i<10;i++)
```

```
{
```

ANNEXES

```
}  
ADCON0=0x07 ;  
while (ADCON0!=0x05)  
{  
}  
high_intensity=ADRESH;  
high_total_intensity=high_intensity<<8;  
low_intensity=ADRESL;  
intensity_converted=high_total_intensity+low_intensity;  
return(intensity_converted);  
}
```

// Fonction d'interruption du Timer0: Le timer0 génère une interruption au s'emporter. La variable H se met à 1. Nous arrêtons le timer0 pour que recommencez à commencer avec la valeur désirée introduite par logiciel, en notre cas sera de 6,5ms.

```
void traiteIT(void);  
#pragma code it=0x08  
void saut_sur_spIT(void)  
{  
_asm  
goto traiteIT  
_endasm  
}  
#pragma code  
#pragma interrupt traiteIT  
void traiteIT(void)  
{  
if (INTCONbits.TMR0IF)  
{  
INTCONbits.TMR0IF=0;  
H=1;
```

ANNEXES

```
T0CONbits.TMR0ON=0;
```

```
}
```

```
}
```

//Fonction d'initiation: Nous configurons tous les registres du PIC pour le bon fonctionnement du système

```
void set_records (void)
```

```
{
```

```
i=0;
```

```
m=0;
```

```
H=1;
```

```
power=0;
```

```
old_power=0;
```

```
ADRESH=0x00;
```

```
ADRESL=0x00;
```

```
INTCONbits.TMR0IE=1;
```

```
INTCONbits.GIEH=1;
```

```
INTCONbits.TMR0IF=0;
```

```
INTCON2=0x00;
```

```
INTCON3=0x00;
```

```
PIR1=0x00;
```

```
PIE1=0x00;
```

```
IPR1=0x00;
```

```
PIR2=0x00;
```

```
PIE2=0x00;
```

```
IPR2=0x00;
```

```
RCON=0x00;
```

```
T0CON=0x46;
```

//Conversion analogique-numérique

```
ADCON1=0x7C;
```

```
ADCON2=0x92;
```

ANNEXES

```
PORTA=0x00;
```

```
TRISA=0x03;
```

```
PORTB=0x00;
```

```
TRISB=0x00;
```

```
}
```

*//Fonction de conversion de tension: Nous convertissons la tension du panneau à celui
valeur de tension de référence du PIC18F1220, 5V, pour pouvoir travailler.*

```
unsigned int voltage (void)
```

```
{
```

```
high_voltage=0;
```

```
high_voltage_total=0;
```

```
low_voltage=0;
```

```
for (i=0;i<1;i++)
```

```
{
```

```
}
```

```
ADCON0=0x01;
```

```
for (i=0;i<10;i++)
```

```
{
```

```
}
```

```
ADCON0=0x03;
```

```
while (ADCON0!=0x01)
```

```
{
```

```
}
```

```
high_voltage=ADRESH;
```

```
high_voltage_total=high_voltage<<8;
```

```
low_voltage=ADRESL;
```

```
voltage_converted=high_voltage_total+low_voltage;
```

```
return (voltage_converted);
```

```
}
```

ANNEXES

//Fonction de calcul de la valeur de la puissance

```
unsigned long power_calculation (void)
{
unsigned int x,y;
x=voltage();
y=intensity();
total_power= x * y;
return (total_power);
}
```

//Fonction de calcul de la puissance moyenne: Nous calculons la puissance moyenne du Signal pour postérieurement faire un meilleur calcul de la dérivée, pour isoler les bruits des signaux analogiques et obtenir une meilleure résolution de la graphique de puissance.

```
unsigned long average_power (void)
{
unsigned long total_average_power,sampling_P,c_power;
total_average_power=0;
sampling_P=0;
c_power=0;
for (m=0;m<8;m++)
{
c_power=power_calculation();
sampling_P=sampling_P+c_power;
}
total_average_power=sampling_P>>3;
return (total_average_power);
}
```

//Fonction de calcul de la dérivée: Nous calculons la dérivée de puissance pour détecter les variations de la puissance. Si nous nous approchons ou nous nous éloignons du point maximal de puissance.

```
unsigned char derived_power (void)
{
```

ANNEXES

```
unsigned char derived;
power = average_power();
if (power>old_power)
{
derived=1;
PORTBbits.RB0=1;
}
else
{
derived=0;
PORTBbits.RB0=0;
}
old_power = power;
return (derived);
}
```

//Programme principal MPPT

```
void main()
{
set_records();
voltage_panel= voltage();
if (voltage_panel<0x2B9)
{
PORTBbits.RB1=1;
}
else
{
PORTBbits.RB1=0;
}
while(1)
```

//alpha

ANNEXES

```
{
derived_pot = derived_power();
if ((derived_pot==1)&&(PORTBbits.RB1 ==1))
{
PORTBbits.RB1=1;
}
else if ((derived_pot==0)&&(PORTBbits.RB1==1))
{
if (H==0)
{
PORTBbits.RB1=1;
}
else
{
PORTBbits.RB1=0;
H=0;
T0CONbits.TMR0ON=1;
}
}
else if ((derived_pot==1)&&(PORTBbits.RB1==0))
{
PORTBbits.RB1=0;
}
else if ((derived_pot==0)&&(PORTBbits.RB1==0))
{
if (H==0)
{
PORTBbits.RB1=0;
}
}
```

ANNEXES

else

{

PORTBbits.RB1=1;

H=0;

T0CONbits.TMR0ON=1;

}

}

else

{

}

}

}

ANNEXES

ANNEXE 2

Détails du PIC 18F1220

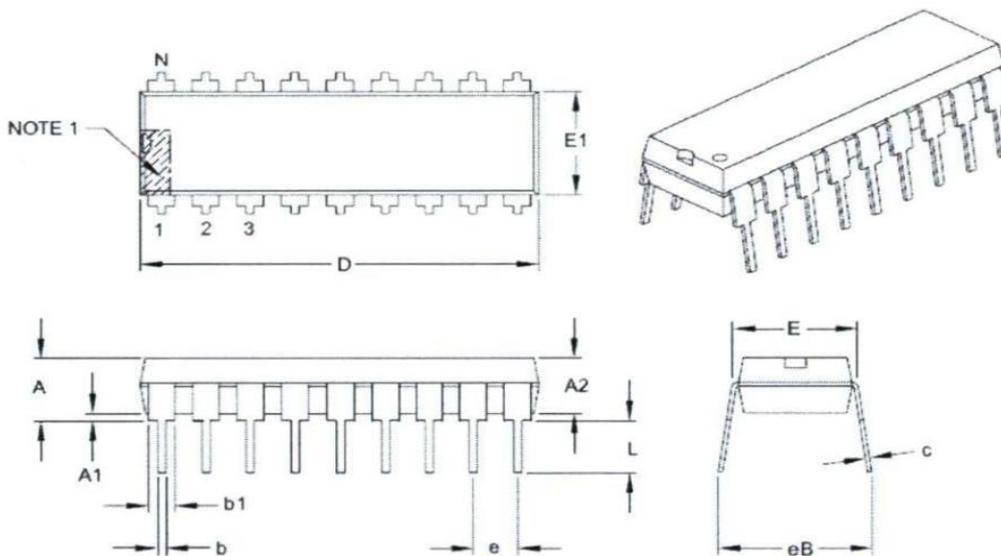
PIC18F1220/1320

24.2 Package Details

The following sections give the technical details of the packages.

18-Lead Plastic Dual In-Line (P) – 300 mil Body [PDIP]

Note: For the most current package drawings, please see the Microchip Packaging Specification located at <http://www.microchip.com/packaging>



Dimension Limits	Units	INCHES		
		MIN	NOM	MAX
Number of Pins	N	18		
Pitch	e	100 BSC		
Top to Seating Plane	A	–	–	.210
Molded Package Thickness	A2	.115	.130	.195
Base to Seating Plane	A1	.015	–	–
Shoulder to Shoulder Width	E	.300	.310	.325
Molded Package Width	E1	.240	.250	.280
Overall Length	D	.880	.900	.920
Tip to Seating Plane	L	.115	.130	.150
Lead Thickness	c	.008	.010	.014
Upper Lead Width	b1	.045	.060	.070
Lower Lead Width	b	.014	.018	.022
Overall Row Spacing §	eB	–	–	.430

Notes:

1. Pin 1 visual index feature may vary, but must be located within the hatched area.
2. § Significant Characteristic
3. Dimensions D and E1 do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed .010" per side.
4. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
BSC: Basic Dimension. Theoretically exact value shown without tolerances.

Microchip Technology Drawing C04-007B

PIC18F1220/1320

1.3 Details on Individual Family Members

Devices in the PIC18F1220/1320 family are available in 18-pin, 20-pin and 28-pin packages. A block diagram for this device family is shown in Figure 1-1.

The devices are differentiated from each other only in the amount of on-chip Flash program memory (4 Kbytes for the PIC18F1220 device, 8 Kbytes for the PIC18F1320 device). These and other features are summarized in Table 1-1.

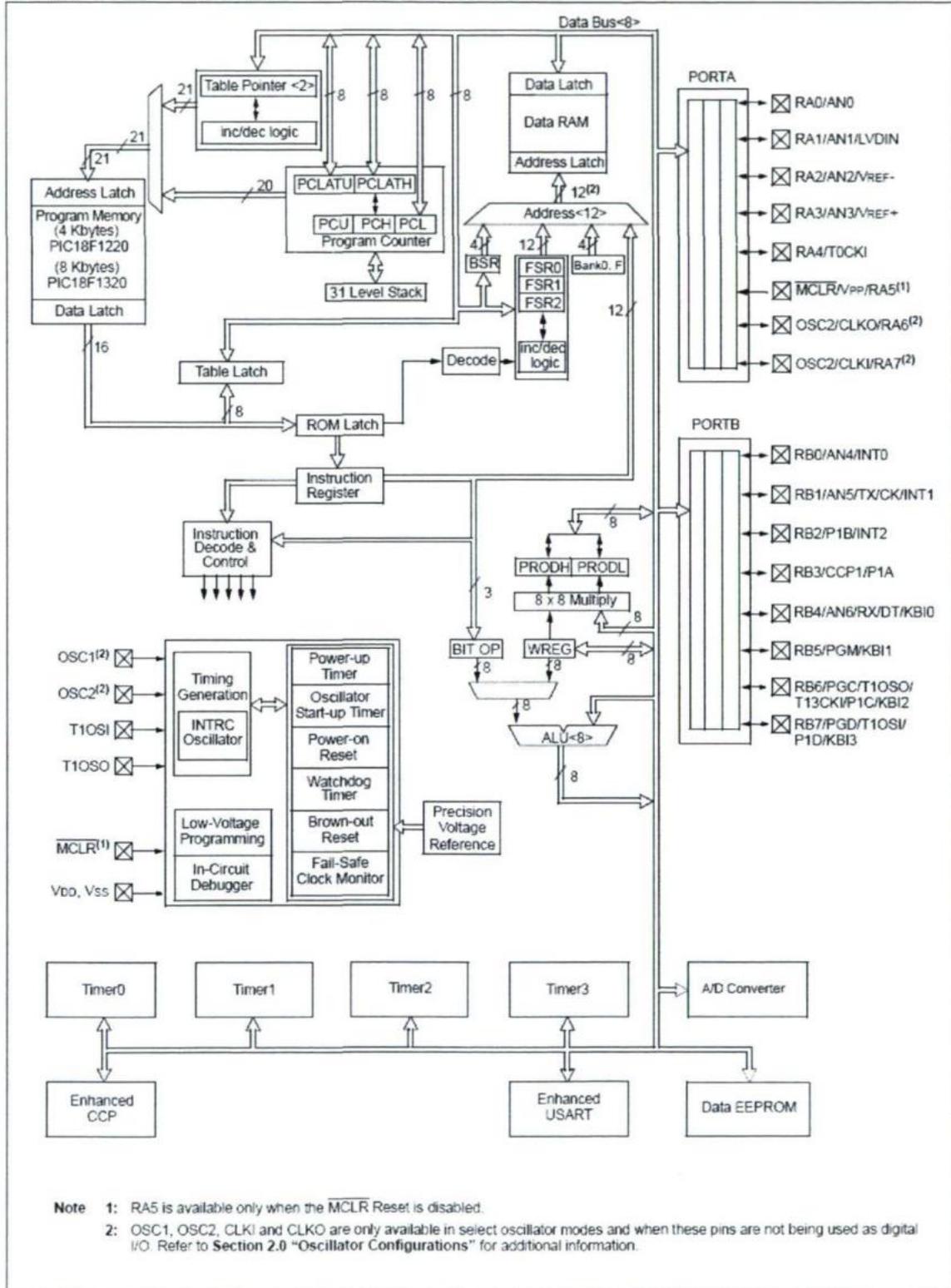
A block diagram of the PIC18F1220/1320 device architecture is provided in Figure 1-1. The pinouts for this device family are listed in Table 1-2.

TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F1220	PIC18F1320
Operating Frequency	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz
Program Memory (Bytes)	4096	8192
Program Memory (Instructions)	2048	4096
Data Memory (Bytes)	256	256
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256
Interrupt Sources	15	15
I/O Ports	Ports A, B	Ports A, B
Timers	4	4
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	1	1
Serial Communications	Enhanced USART	Enhanced USART
10-bit Analog-to-Digital Module	7 input channels	7 input channels
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions	75 Instructions
Packages	18-pin SDIP 18-pin SOIC 20-pin SSOP 28-pin QFN	18-pin SDIP 18-pin SOIC 20-pin SSOP 28-pin QFN

PIC18F1220/1320

FIGURE 1-1: PIC18F1220/1320 BLOCK DIAGRAM



Détails du LM311



January 2001

**LM111/LM211/LM311
Voltage Comparator**

1.0 General Description

The LM111, LM211 and LM311 are voltage comparators that have input currents nearly a thousand times lower than devices like the LM106 or LM710. They are also designed to operate over a wider range of supply voltages: from standard $\pm 15V$ op amp supplies down to the single 5V supply used for IC logic. Their output is compatible with RTL, DTL and TTL as well as MOS circuits. Further, they can drive lamps or relays, switching voltages up to 50V at currents as high as 50 mA.

Both the inputs and the outputs of the LM111, LM211 or the LM311 can be isolated from system ground, and the output can drive loads referred to ground, the positive supply or the negative supply. Offset balancing and strobe capability are provided and outputs can be wire OR'ed. Although slower than the LM106 and LM710 (200 ns response time vs 40 ns)

the devices are also much less prone to spurious oscillations. The LM111 has the same pin configuration as the LM106 and LM710.

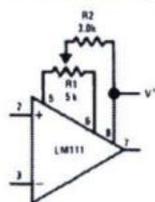
The LM211 is identical to the LM111, except that its performance is specified over a $-25^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ temperature range instead of $-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$. The LM311 has a temperature range of $0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$.

2.0 Features

- Operates from single 5V supply
- Input current: 150 nA max. over temperature
- Offset current: 20 nA max. over temperature
- Differential input voltage range: $\pm 30V$
- Power consumption: 135 mW at $\pm 15V$

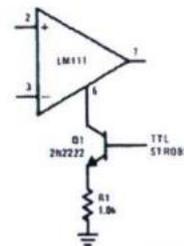
3.0 Typical Applications (Note 3)

Offset Balancing



00570436

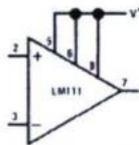
Strobing



00570487

Note: Do Not Ground Strobe Pin. Output is turned off when current is pulled from Strobe Pin.

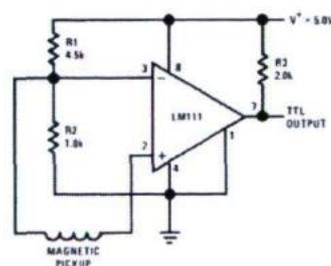
Increasing Input Stage Current (Note 1)



00570436

Note 1: Increases typical common mode slew from $7.0V/\mu s$ to $18V/\mu s$.

Detector for Magnetic Transducer



00670439

Détails du MAX 4173

**MAX4173****Low-Cost, SOT23, Voltage-Output, High-Side Current-Sense Amplifier****General Description**

The MAX4173 low-cost, precision, high-side current-sense amplifier is available in a tiny SOT23-6 package. It features a voltage output that eliminates the need for gain-setting resistors and it is ideal for today's notebook computers, cell phones, and other systems where current monitoring is critical. High-side current monitoring is especially useful in battery-powered systems, since it does not interfere with the ground path of the battery charger. The input common-mode range of 0 to +28V is independent of the supply voltage and ensures that the current-sense feedback remains viable even when connected to a battery in deep discharge. The MAX4173's wide 1.7MHz bandwidth makes it suitable for use inside battery charger control loops.

The combination of three gain versions and a user-selectable external sense resistor sets the full-scale current reading. This feature offers a high level of integration, resulting in a simple and compact current-sense solution.

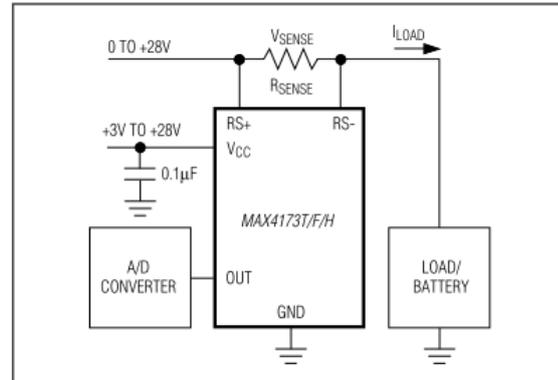
The MAX4173 operates from a single +3V to +28V supply, typically draws only 420 μ A of supply current over the extended operating temperature range (-40°C to +85°C), and is offered in the space-saving SOT23 package.

Applications

Notebook Computers
 Portable/Battery-Powered Systems
 Smart Battery Packs/Chargers
 Cell Phones
 Power-Management Systems
 General System/Board-Level Current Monitoring
 PA Bias Control
 Precision Current Sources

Features

- ◆ Low-Cost, Compact Current-Sense Solution
- ◆ High Accuracy +2V to +28V Common-Mode Range, Functional Down to 0V, Independent of Supply Voltage
- ◆ Three Gain Versions Available
 - +20V/V (MAX4173T)
 - +50V/V (MAX4173F)
 - +100V/V (MAX4173H)
- ◆ $\pm 0.5\%$ Full-Scale Accuracy
- ◆ $\pm 3\text{mV}$ Input Offset Voltage (MAX4173T)
- ◆ Wide 1.7MHz Bandwidth (MAX4173T)
- ◆ 420 μ A Supply Current
- ◆ Available in Space-Saving SOT23 Package

Typical Operating Circuit**Ordering Information**

PART	GAIN (V/V)	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	SOT TOP MARK
MAX4173TEUT+T	20	-40°C to +85°C	6 SOT23	AABN
MAX4173TESA+	20	-40°C to +85°C	8 SO	—
MAX4173FEUT+T	50	-40°C to +85°C	6 SOT23	AABO
MAX4173FESA+	50	-40°C to +85°C	8 SO	—
MAX4173HEUT+T	100	-40°C to +85°C	6 SOT23	AABP
MAX4173HESA+	100	-40°C to +85°C	8 SO	—

+Denotes a lead(Pb)-free/RoHS-compliant package.

T = Tape and reel.

Pin Configurations appear at end of data sheet.

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim Direct at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maximintegrated.com.

Détails TC 4420



TC4420
TC4429

6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS

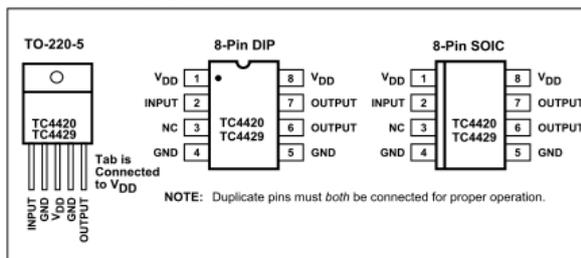
FEATURES

- Latch-Up Protected Will Withstand >1.5A Reverse Output Current
- Logic Input Will Withstand Negative Swing Up to 5V
- ESD Protected 4kV
- Matched Rise and Fall Times 25nsec
- High Peak Output Current 6A Peak
- Wide Operating Range 4.5V to 18V
- High Capacitive Load Drive 10,000pF
- Short Delay Time 55nsec Typ.
- Logic High Input, Any Voltage 2.4V to V_{DD}
- Low Supply Current With Logic "1" Input ... 450 μ A
- Low Output Impedance 2.5 Ω
- Output Voltage Swing to Within 25mV of Ground or V_{DD}

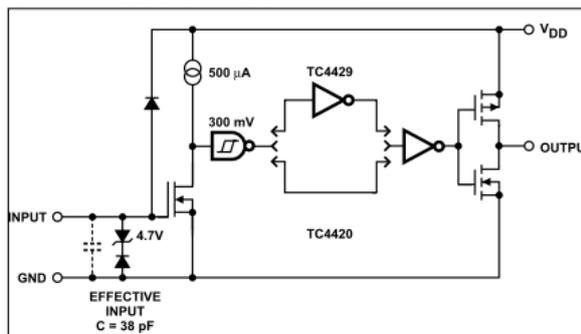
APPLICATIONS

- Switch-Mode Power Supplies
- Motor Controls
- Pulse Transformer Driver
- Class D Switching Amplifiers

PIN CONFIGURATIONS



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



GENERAL DESCRIPTION

The TC4420/4429 are 6A (peak), single output MOSFET drivers. The TC4429 is an inverting driver (pin-compatible with the TC429), while the TC4420 is a non-inverting driver. These drivers are fabricated in CMOS for lower power, more efficient operation versus bipolar drivers.

Both devices have TTL-compatible inputs, which can be driven as high as $V_{DD} + 0.3V$ or as low as $-5V$ without upset or damage to the device. This eliminates the need for external level shifting circuitry and its associated cost and size. The output swing is rail-to-rail ensuring better drive voltage margin, especially during power up/power down sequencing. Propagational delay time is only 55nsec (typ.) and the output rise and fall times are only 25nsec (typ.) into 2500pF across the usable power supply range.

Unlike other drivers, the TC4420/4429 are virtually latch-up proof. They replace three or more discrete components saving PCB area, parts and improving overall system reliability.

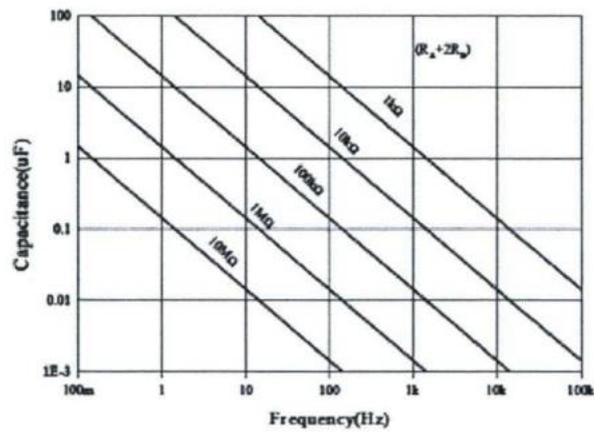
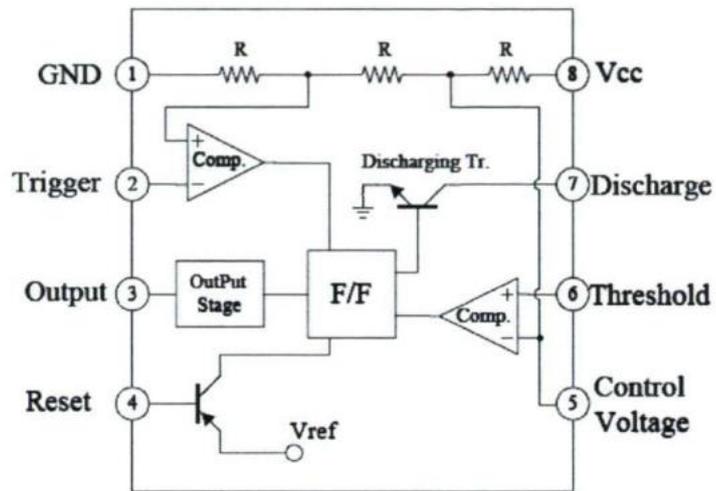
ORDERING INFORMATION

Part No.	Logic	Package	Temperature Range
TC4420CAT	Noninverting	5-Pin TO-220	0°C to +70°C
TC4420COA	Noninverting	8-Pin SOIC	0°C to +70°C
TC4420CPA	Noninverting	8-Pin PDIP	0°C to +70°C
TC4420EOA	Noninverting	8-Pin SOIC	-40°C to +85°C
TC4420EPA	Noninverting	8-Pin PDIP	-40°C to +85°C
TC4420IJA	Noninverting	8-Pin CerDIP	-25°C to +85°C
TC4420MJA	Noninverting	8-Pin CerDIP	-55°C to +125°C
TC4429CAT	Inverting	5-Pin TO-220	0°C to +70°C
TC4429COA	Inverting	8-Pin SOIC	0°C to +70°C
TC4429CPA	Inverting	8-Pin PDIP	0°C to +70°C
TC4429EOA	Inverting	8-Pin SOIC	-40°C to +85°C
TC4429EPA	Inverting	8-Pin PDIP	-40°C to +85°C
TC4429IJA	Inverting	8-Pin CerDIP	-25°C to +85°C
TC4429MJA	Inverting	8-Pin CerDIP	-55°C to +125°C

ANNEXES

Détail du TS555

Internal Block Diagram



ANNEXES

Détails du IRL2505

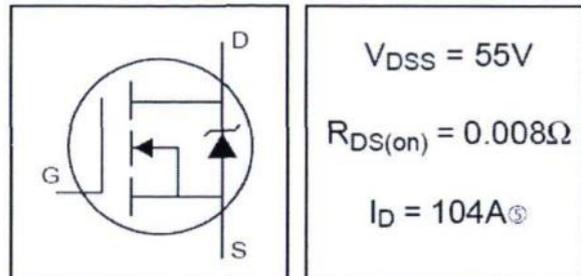
International
IR Rectifier

PD - 91325C

IRL2505

HEXFET® Power MOSFET

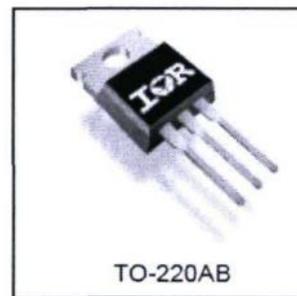
- Logic-Level Gate Drive
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 is universally preferred for all commercial-Industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	104 ^③	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	74	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ^①	360	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 16	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ^②	500	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ^①	54	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ^①	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ^③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	