

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



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Energie Renouvelable

Réf: .....

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

**MASTER**

*Thème*

*Réalisation d'un prototype d'un  
système de poursuite solaire*

Présenté par :  
Benzahia Ayoub  
Soutenu le : 03 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Dr. Terki Amel

Pr. Moussi Amar

Dr. Rabhi Boualaga

M.C.B

M.C.A

M .C.A

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

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



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière :électrotechnique  
Option : Energie Renouvelable

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

**MASTER**

*Thème*

*Réalisation d'un prototype d'un système de poursuite solaire*

**Présenté par :**

*Benzahia Ayoub*

**Avis favorable de l'encadreur :**

Pr. Moussi Amar

**Avis favorable du Président du Jury**

Dr .Terki Amel

**Cachet et signature**

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



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Energie Renouvelable

## *Thème :*

*Réalisation d'un prototype d'un système de poursuite solaire*

Proposé et dirigé par : Pr.Moussi Amar

## ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرا هاما من مصادر الطاقات المتجددة ،حيث نستعمل الألواح الكهروضوئية لتحويل الاشعاع الشمسي الى طاقة كهربائية. وبما أن السعر الابتدائي لهذه التجهيزات ما يزال مرتفعا نسبيا، فمن أجل الاستغلال المثالي لكمية الطاقة المنتجة من هذا المصدر قمنا بإنجاز هذا العمل المتمثل في تصنيع نموذج لمتعقب للشمس بالإضافة الى دارة الكترونية من أجل تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية للوح الشمسي، و هذا كله عن طريق استعمال دارات الكترونية مبنية على اساس « Microcontrôleur 16F877A »

## Résumé

L'énergie solaire est une source importante des énergies renouvelables où on utilise des panneaux solaire pour la conversion photovoltaïque. Comme le prix initiale est encore élevé ; et afin d'exploitation de la maximum quantité d'énergie nous avons réalisé un prototype d'un système de poursuite solaire et programmée un algorithme "perturbe & observe" pour le poursuit de point de puissance maximale MPPT, et tout cela par l'utilisation de  $\mu C$  pic 16F877A .

Mots clé : panneau PV, suiveur solaire , MPPT,  $\mu C$  , PIC 16F877A .

## *Dédicaces*

*Ce travail, je le dédie particulièrement à :*

*Mon cher père Mohamed qui a été mon soutien pour  
atteindre ce niveau.*

*Ma mère Fatima qui a été pour moi une lumière qui me  
guide vers mon chemin.*

*Mon oncle Naamane*

*Mes frères et mes sœurs qui n'ont pas hésité à m'aider et  
m'encourager*

*Mes amis*

*Tous les enseignants et les étudiants de master O2 énergie  
renouvelable .*

*Et à toute la famille Benzahia et Laccfar .*

*QYQUB...*

## *Remerciements*

*Avant toute chose, nous remercions ALLAH, le tout Puissant, pour nous avoir donné la force et la patience.*

*Nous exprimons d'abord nos profonds remerciements et notre vive reconnaissance à Pr. Moussi Amar, enseignant au département génie électrique en Energie Renouvelable à l'université Mohamed Khider Biskra pour avoir encadrer et diriger ce travail avec une grande rigueur scientifique, sa disponibilité, ses conseils et la confiance qu'elle nous a accordé nous ont permis de réaliser ce travail.*

*Il m'est particulièrement agréable de remercier Dr. Terki Amel, Professeur à l'université Mohamed Khider Biskra .*

*Il m'est aussi très agréable de remercier Monsieur Merabti Youcef, l'e responsable de laboratoire d'énergie renouvelable à l'université de Biskra.*

*Enfin, nos plus sincères remerciements à nos familles et à tous nos amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés.*

*AYOUB*



## *Nomenclatures*

$\lambda$ :	Longitude
$\Phi$ :	Latitude
$\delta$ :	La déclinaison solaire
$W$ :	Angle horaire
$\Delta$ :	Hauteur angulaire du soleil
$q$ :	charge de l'électron $e=1.6*10^{-19}$ coulomb.
$T$ :	température de la cellule (Kelvin).
$K$ :	constante de Boltzmann ( $K=1.3854 * 10^{-23}$ J/K).
$A$ :	facteur de qualité de la diode.
$I_{ph}$ :	courant photonique de la diode
$I_0$ :	courant de saturation de la diode (A)
$E$ :	ensoleillement dans le plan de la cellule (W/m <sup>2</sup> ).
$T$ :	température de la cellule (°C).
$I$ :	intensité de courant fournie par la cellule (A).
$V$ :	tension aux bornes de la cellule (V).
$V_{oc}$ :	Tension à circuit ouvert
$I_{mp}, V_{mp}$ :	le point de fonctionnement optimal.
$P_c$ :	La puissance de crête
$R_{sh}$ :	résistance shunt
$C_j$ :	capacité de jonction
$I_{CE0}$ :	le courant de fuite
$B$ :	l'amplification du transistor
$f$ :	fréquence de commutation
$V_{load}$ :	La tension aux bornes de la charge
$D$ :	rapport cyclique
$\Delta i_L$ :	Augmentation du courant $i_L$
$H_t$ :	l'irradiation journalière
$I_{sc}$ :	courant de court-circuit.
$\Delta i_L$ :	courant dans l'inductance
$I_{PV}$ :	courant d'entrée
$I_{C1}$ :	courant dans le condensateur
$\Delta V_{PV}$ :	L'ondulation de la tension d'entrée
$k_V$ :	facteur de tension

$k_I$  : facteur de courant

$h_{femin}$  : gain minimum de transistor

## Liste des Abréviations

<b>PV :</b>	photovoltaïque
<b>DC :</b>	courant électrique de nature continu
<b>FEM :</b>	force électromotrice
<b>GPV :</b>	Générateur photovoltaïque
<b>MPPT :</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>LDR :</b>	Light Dependent Resistor
<b>MPP :</b>	Maximum Power Point
<b>CS :</b>	convertisseur statique
<b>PIC :</b>	Peripheral interface controller
<b>CAN :</b>	Convertisseur analogique numérique
<b>PWM :</b>	pulse with modulation):
<b>ccp :</b>	capture compare pwm
<b>EEPROM :</b>	Electrical Erasable Programable read only memory
<b>RAM :</b>	Random Access Memory
<b>SFR :</b>	Special Function Registers
<b>GPR :</b>	General Propose Registers
<b>ALU :</b>	Unité Arithmétique et logique
<b>µC :</b>	Microcontrôleur

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I-1: Cordonnées terrestre.....	4
Figure I-2: Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	4
Figure I-3: Variation saisonnière du rayonnement solaire.....	5
Figure I-4: La déclinaison du soleil en fonction des jours.....	6
Figure I-5: les coordonnées horaires.....	6
Figure I-6: Eclairement journalier absorbé par le capteur pour différentes inclinaisons....	7
figureI-7:Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN).....	8
figure I-8: schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.....	8
figure I-9: schéma équivalent d'une cellule solaire.....	9
figure I-10 : caractéristique I (V) et P (V) à T=25°C et E=1000W/m <sup>2</sup> .....	10
figure I-11 : Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque.....	11
figure I-12: Groupement des cellules PV en série.....	11
figure I-13: Groupement des cellules en série- parallèle.....	12
figure I-14 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.....	12
figureI-15:Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à E=1000W/m <sup>2</sup> (1): 0 °C ; (2): 15 °C ; (3) : 30 °C ; (4) : 45 °C ; (5) : 60°C.....	13
figureI-16 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C(1) :1000W/m <sup>2</sup> ; (2) :800W/m <sup>2</sup> ;(3) :600W/m <sup>2</sup> ;(4) :400W/m <sup>2</sup> ; (5):200W/m <sup>2</sup> .....	13
figure I-17:Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique I(V) (1) :1000W/m <sup>2</sup> , 55°C ; (2) :800W/m <sup>2</sup> , 44°C; (3) :600W/m <sup>2</sup> ,40°C ; (4) :400W/m <sup>2</sup> , 32°C ; (5) :200W/m <sup>2</sup> , 25°C.....	14

### Chapitre II

Figure II-1:diagramme de comparaison entre la production et la production avec système fixe.....	17
figure II-2 :définition de la position de soleil.....	19
Figure II-3 : Orientation 1 axe.....	19
Figure II-4 : Orientation 2 axe.....	20
Figure II-5: La photodiode.....	21
Figure II-6 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	22
figureII-7 : Recherche et recouvrement du point de puissance maximale.....	22
Figure II-8 : Caractéristique I/V d'un GPV et d'une charge résistive.....	23
figureII-9: Convertisseur DC/DC.....	24
figureII-10: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.....	24
figureII-11: Convertisseur dévolteur durant l'état on.....	24
Figure II-12 : Convertisseur Buck durant l'état off.....	25
figureII-13 : Formes d'onde des tensions V <sub>PV</sub> et V <sub>load</sub> dans le cas du convertisseur Buck..	25
figure II-14 : Formes d'ondes des tensions et courants dans un convertisseur dévolteur en Mode de conductance continu .....	26
figure II-15 : Ondulation de la tension d'entrée.....	28
Figure II-16 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur survolteur.....	29
Figure II-17: Convertisseur survolteur durant l'état on.....	30
Figure II-18: Convertisseur survolteur durant l'état off.....	30
Figure II-19 :Formes d'ondes des tensions V <sub>PV</sub> et V <sub>load</sub> dans le cas du convertisseur	

survolteur.....	31
Figure II-20: Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire.....	31
Figure II-21: Algorithme type de la méthode P&O.....	32
Figure II-22: Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	32
figure II-23 : Algorithme type de la commande Hill Climbing.....	33

### Chapitre III

Figure III-1: Système représentant un GPV muni d'un suiveur solaire et un convertisseur MPPT.....	38
Figure III-2 : Schéma synoptique du prototype à réaliser.....	38
Figure III-3: Schéma Synoptique du suiveur du soleil.....	39
Figure III-4: Schématisation d'un capteur a deux cellules LDR.....	40
Figure III-5: Fonctionnement des capteurs embarqués.....	40
Figure III-6: le circuit de traitement des signaux.....	41
Figure III-7: le circuit de Bloc de puissance.....	41
Figure III-8 : Algorithme du suiveur du soleil.....	42
Figure III-9 : Schéma du prototype à réaliser.....	43
Figure III-10 : Schéma du convertisseur Buck alimenté par un GPV.....	44
Figure III-11 : figure de driver de MOSFET IR2117.....	46
Figure III-12 : le circuit de SN7406.....	46
Figure III-13:Shéma de déverseur de tension.....	47
Figure III-14: montage de capteur de courant.....	48
Figure III-15: Broches du PIC 16F877A.....	50
Figure III-16: Les éléments constitutifs du PIC 16F877A.....	51
Figure III-17: oscillateur à quartz.....	51
Figure III-18 : Schéma du prototype à réaliser.....	55

## Liste des tableaux

Tableau III-1: les état de sortie de AOP selon la position de capteur.....	41
Tableau III-2: caractéristique de GPV.....	44
Tableau III-3: détail des registres SFR et leurs états au démarrage.....	53
Tableau III-4:les registres des interruption dans le pic 16F877A.....	53

## Sommaire

Introduction général	1
<b>Chapitre I : Gisement solaire et Le générateur photovoltaïque</b>	
Introduction .....	3
I- Cordonnées terrestre.....	3
I-1- Les coordonnées géographiques .....	3
I-1-1-Longitude.....	3
I-1-2- Latitude.....	3
I-2- Le rayonnement solaire .....	4
I-2-1- Types de rayonnements.....	5
I-2-1-1- Rayonnement direct.....	5
I-2-1-2- Rayonnement diffus.....	5
I-2-1-3- Rayonnement global.....	5
I-3- Mouvement du Globe terrestre.....	5
I-4- Les coordonnées horaires.....	5
I-4-1- La déclinaison solaire.....	5
I-4-2- Angle horaire (w).....	6
I-4-3- Les coordonnées horizontales.....	6
I-4-3-1- Hauteur angulaire du soleil ( $\Delta$ ).....	6
I-4-3-2- Azimut.....	7
I-4-3-3- Angle horaire de coucher du soleil.....	7
I-5- l'effet de l'orientation d'une surface sur l'énergie incidente.....	7
I - 6 –Le générateur photovoltaïque.....	7
I - 6 –1- Principe de la conversion PV.....	7
I - 6 –2- Modèle d'une cellule solaire idéal .....	8
I - 6 –3- Modèle d'une cellule solaire réelle .....	9
I - 6 -3-1- Modèle à une diode (à une seule exponentielle).....	9
I - 6 -4- Caractéristique d'un GPV élémentaire .....	10
I - 6 –5- Constitution d'un module photovoltaïque .....	11
I - 6-6- Influence de l'éclairement et la température.....	13
I - 7 – Avantage et Inconvénients des système PV.....	14
I -7-1- Avantage.....	14
I - 7 -2- Inconvénients.....	15
Conclusion.....	15

## Chapitre II : Techniques de L'optimisation d'énergie

Introduction.....	17
II-1- Importance de la poursuite solaire.....	17
II-2- Orientations des panneaux solaire.....	18
II-2-1- Choix de l'orientation des module.....	18
II-2-2- Choix de l'inclinaison des module.....	18
II-2-3-Trajectoire apparent de soleille.....	18
II-3- type d'orientation.....	19
➤ Orientation 1 axe.....	19
➤ Orientation 2 axe.....	20
II-4- type de capteur.....	20
II-4-1- La photorésistance (LDR).....	20
II-4-2- La photodiode.....	20
II-4-3- Le phototransistor.....	21
II-5- la recherche du point de puissance maximale(MPPT).....	21
II-5-1- Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT).....	21
II-5-2- Couplage direct d'un Générateur PV et une charge résistive.....	23
II-5-3- Etude du Fonctionnement du Convertisseur Statique (DC-DC).....	23
II-5-3-1- Convertisseur dévolteur.....	24
➤ Mode de Conduction Continue.....	26
➤ Mode de Conduction Discontinue.....	26
II-5-3-1-1- Mode de Conduction Continue.....	26
➤ Ondulation du courant $i_L$ et choix de $L$ .....	27
➤ Ondulation de la tension de sortie $V_{load}$ , choix de $C_2$ .....	27
➤ Ondulation de la tension d'entrée $V_{PV}$ et choix de $C_1$ .....	28
II-5-3-2- Convertisseur survolteur (Boost converter).....	29
II-5-4-Les techniques MPPT.....	31
II-5-4-1- La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	31
II-5-4-2- La méthode de "Hill Climbing".....	32
II-5-4-3- Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.....	33
➤ Mesure de $V_{OC}$ (Fraction de $V_{OC}$ ).....	33
➤ Mesure de $I_{CC}$ (Fraction de $I_{CC}$ ).....	34
II-5-4-4- Autres méthodes.....	35
Conclusion.....	35

### **Chapitre III : Conception et réalisation d'un suiveur solaire et convertisseur MPPT**

Introduction.....	37
III-1- Méthodologie.....	38
III-2-Méthodologie de poursuite.....	39
III-2-1-Bloc d'alimentation.....	39
III-2-2-Bloc de traitement des signaux.....	39
➤ Le capteur optique (LDR).....	40
➤ la carte de conditionnement.....	40
III-2-3-Bloc de puissance.....	41
III-2-4- programme de commande.....	42
III-2-5- Algorithme du suiveur du soleil.....	42
III-3-Méthodologie de MPPT numérique.....	44
III-3-1-Bloc de puissance.....	44
➤ Cahier des charges.....	45
➤ Détermination des valeurs de L, C <sub>1</sub> et C <sub>2</sub> .....	45
➤ Choix du Driver de MOSFET.....	46
III-3-2-Bloc de commande.....	47
III-3-2-1- circuit de mesure.....	47
➤ Meure de tension.....	47
➤ Mesure du courant.....	47
III-3-2-2-Le microcontrôleur.....	48
III-3-2-2-1-Choix de PIC.....	49
III-3-2-2-2- Caractéristiques pic16f877.....	49
III-3-2-2-3- Description générale de PIC 16F877.....	51
a) L'Horloge.....	51
b) L' LU et l'accumulateur W.....	52
c) Organisation de la mémoire RAM.....	52
d) La mémoire EEPROM.....	52
e) Les ports d'E/S.....	52
f) Quelques registres de configuration et leurs bits.....	53
g) Les interruptions.....	53
➤ L'interruption INT (Entrée RB0 du port B).....	53
➤ L'interruption RBI (RB4 A RB7 du port B).....	54
h) Les module CCP1 et CCP2 (ccp : capture compare pwm ).....	54
i) Le module de conversion A/N.....	54

Conclusion.....	58
Conclusion général .....	59
Références et bibliographiques .....	60
ANNEXE .....	62

## Introduction générale

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers **2030** si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers **2100** si des efforts sont produits sur la production et la consommation .[1]

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

A ce sujet, La révolution des énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Les énergies renouvelables est avancée comme un dénouement à tous nos problèmes de production d'énergie électrique, notamment l'énergie photovoltaïque (**PV**), basée sur la conversion du rayonnement solaire en électricité à partir des cellules **PV**. [2]

Les panneaux solaires ou photovoltaïques sont l'élément de base de tout système photovoltaïque. Ils sont constitués de cellules photosensibles reliées entre elles. Chaque cellule convertit les rayons provenant du Soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique électrique spécifique qui est donnée par le fabricant sous forme de courbes. Ces courbes représentent généralement l'évolution du courant et de la puissance par rapport à la tension du panneau.

Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise des dispositifs dits systèmes de poursuite la position de panneau solaire '*sun tracking systems*'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours visé avec précision face au soleil. Les systèmes de poursuite solaire à un seul axe sont moins coûteux et leur commande est facile à mettre en œuvre, par contre leur efficacité est inférieure à celle des systèmes de poursuite solaire à deux axes [3].

En plus du système de poursuit, et dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on intègre des une techniques ou algorithmes particuliers dits « Maximum Power Point Tracking » (**MPPT**) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Le **MPPT** vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques afin de maximise leur rendement.

l'objectif du présent travail est la réalisation d'un système d'optimisation de puissance d'une source **PV** qui est construit autour d'un  $\mu C$  et Assur les deux fonction de base : la poursuit solaire et la maximisation de puissance.

# *Chapitre I*

*Gisement solaire et Le générateur  
photovoltaïque*

## Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Pour toute application de l'énergie solaire, il est indispensable de connaître de façon détaillée les caractéristiques de l'ensoleillement et du rayonnement sur le site géographique choisi. Ces caractéristiques qui constituent le gisement solaire peuvent être déduites des mesures régulières effectuées pendant plusieurs années par une station météorologique locale.

### I- Cordonnées terrestre:

#### I-1- Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre

##### I-1-1-Longitude:

La longitude d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien origine  $0^\circ$  le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention, on affecte du signe + les méridien situe à l'Est, et du signe – les méridien situé à l'Ouest. La longitude sera désigné ici par la lettre  $\lambda$ . La longitude d'un lieu peut ainsi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ . [4]

##### I-1-2- Latitude:

La latitude d'un lieu correspond à l'angle, avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu.

L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à  $0^\circ$ , le pôle nord par la latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ .

Cette convention de signe effectue le signe + à tous les lieux de l'hémisphère Nord et le signe - à tous les lieux de l'hémisphère Sud . La latitude sera désignée ici par la lettre  $\varphi$ . La latitude d'un lieu peut ainsi être comprise entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ . [4]

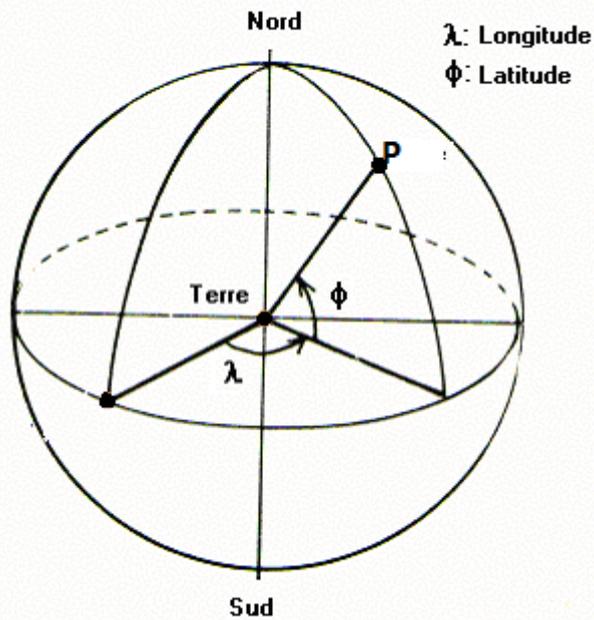


Figure I-1: Cordonnées terrestre

**I-2- Le rayonnement solaire :**

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire.

Le rayonnement ou spectre solaire se présente sensiblement comme celui d'un corps noir à **5800°K**.

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ **1370 W/m<sup>2</sup>**. Cette grandeur est appelée constante solaire.[5]

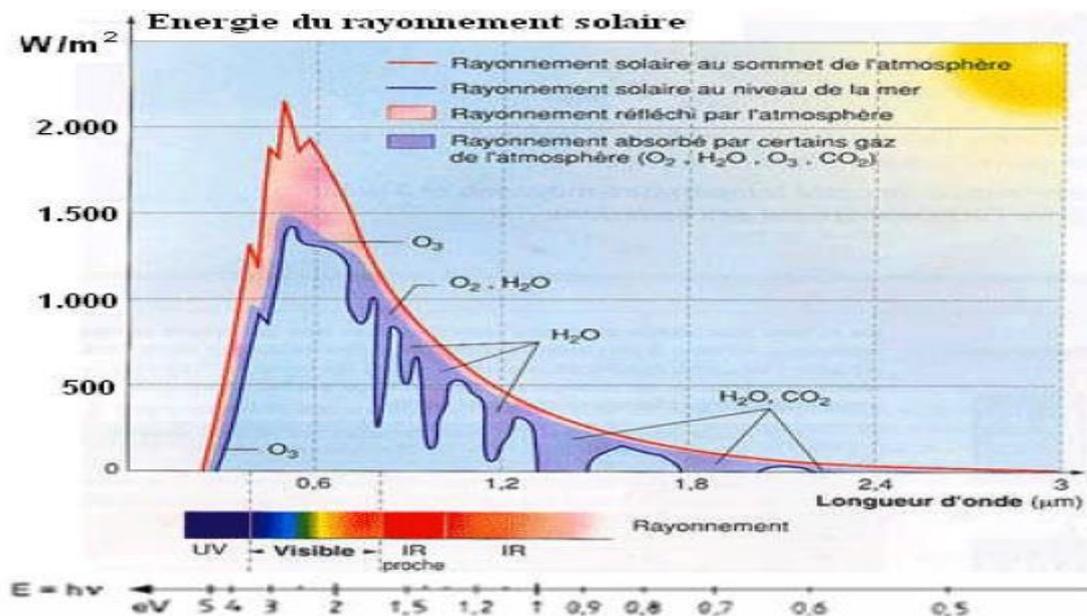


Figure I-2: Répartition spectrale du rayonnement solaire

### I-2-1- Types de rayonnements:

#### I-2-1-1- Rayonnement direct:

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

#### I-2-1-2- Rayonnement diffus:

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.

#### I-2-1-3- Rayonnement global:

C'est la somme des deux types de rayonnements direct et diffus.

### I-3- Mouvement du Globe terrestre :

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de **365,25** jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de *l'écliptique*. C'est au solstice d'hiver (**21**décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (**22**juin) qu'elle en est la plus éloignée.[6]

La terre tourne sur elle-même avec une période de **24h**. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle  $\delta = 23^{\circ}27'$  avec la normale au plan de l'écliptique.

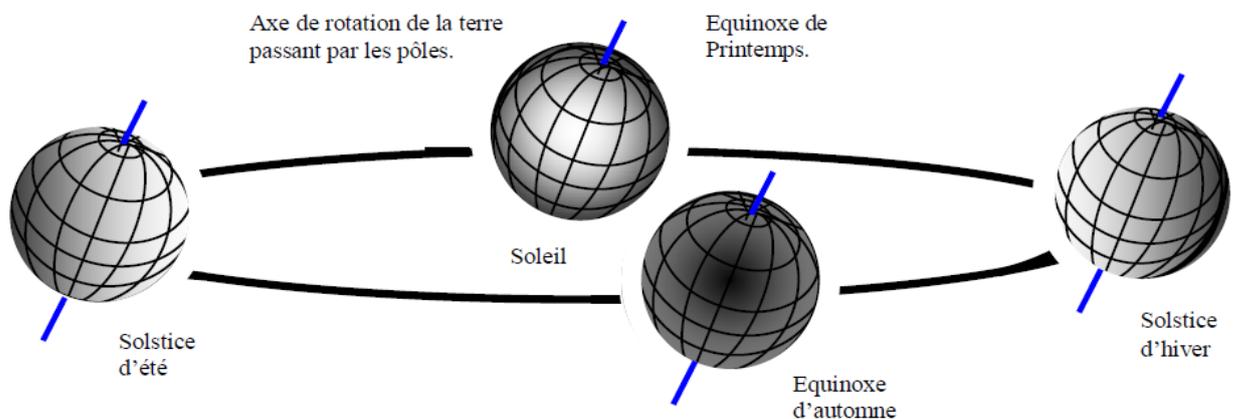


Figure I-3: Variation saisonnière du rayonnement solaire

### I-4- Les coordonnées horaires :

#### I-4-1- La déclinaison solaire :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes :  $(-23^{\circ}27'$  et  $+23^{\circ}27'$  environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule [7 ,8]:

$$\delta = 23.45 \sin(360 \times (284 + n) / 365) \quad (I.1)$$

$n$  : numéro du jour dans l'année.

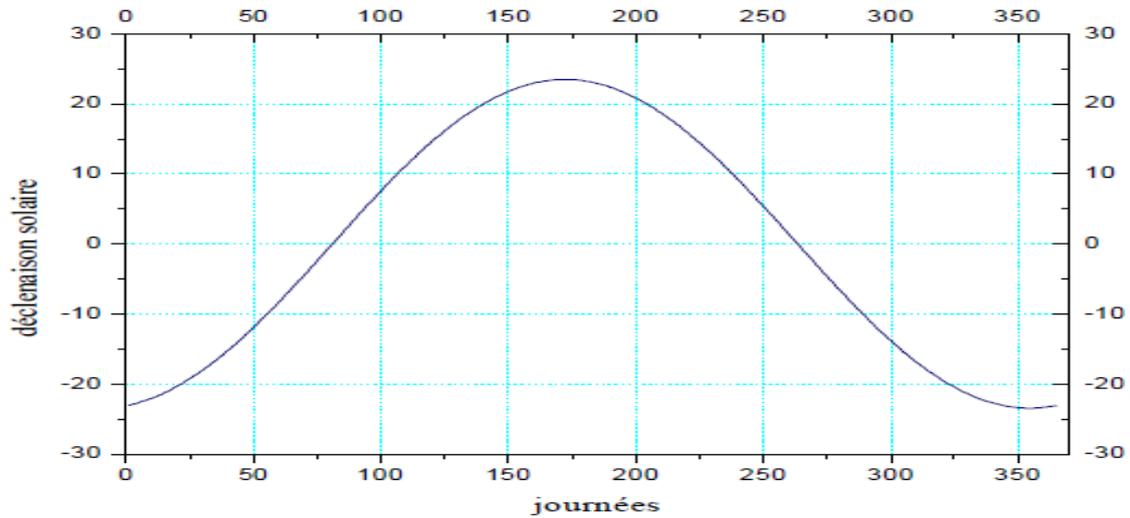


Figure I-4: La déclinaison du soleil en fonction des jours

#### I-4-2- Angle horaire ( $w$ ):

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure, [6,7]

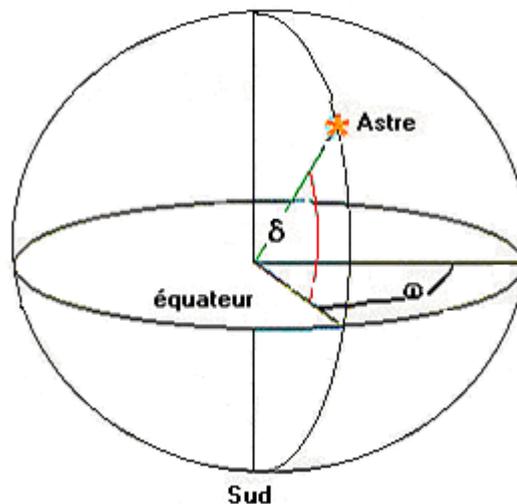


Figure I-5: les coordonnées horaires

#### I-4-3- Les coordonnées horizontales:

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

##### I-4-3-1- Hauteur angulaire du soleil ( $\Delta$ ) :

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de  $0$  (soleil à l'horizon) à  $90$  (soleil au zénith). [6,7]

### I-4-3-2- Azimut:

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale.[7]

### I-4-3-3- Angle horaire de coucher du soleil:

L'angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire. Dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local.. Il est donné par l'équation suivante:[6,7]

$$W_s = \arccos(-\tan(\Phi) \tan(\delta)) \quad (I-2)$$

$\delta$ : Déclinaison solaire

$\Phi$ : latitude

### I-5- l'effet de l'orientation d'une surface sur l'énergie incidente:

La figure (I-6) représente la variation de l'irradiation au cours de l'année de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière  $H_t$ , pour une surface orienté vers le sud ( $\gamma = 0$ ) et pour diverses valeurs de l' inclinaison ( $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ ) en un lieu situé à  $37^\circ$  de latitude ( $\Phi = 37^\circ$ ).

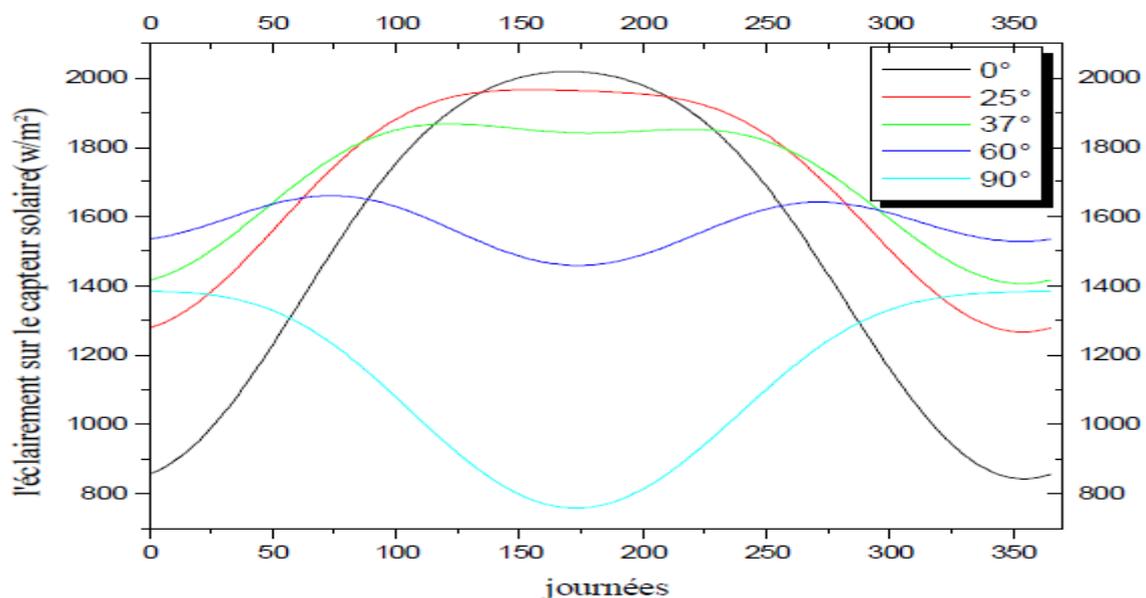


Figure I-6: Eclairement journalier absorbé par le capteur pour différentes inclinaisons

On peut vérifier que l'énergie totale reçue pendant l'année est maximale pour  $\beta = \Phi$ .

## I - 6 –Le générateur photovoltaïque :

### I - 6 –1- PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement

lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (FEM) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé *effet photovoltaïque*. La figure I-7 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

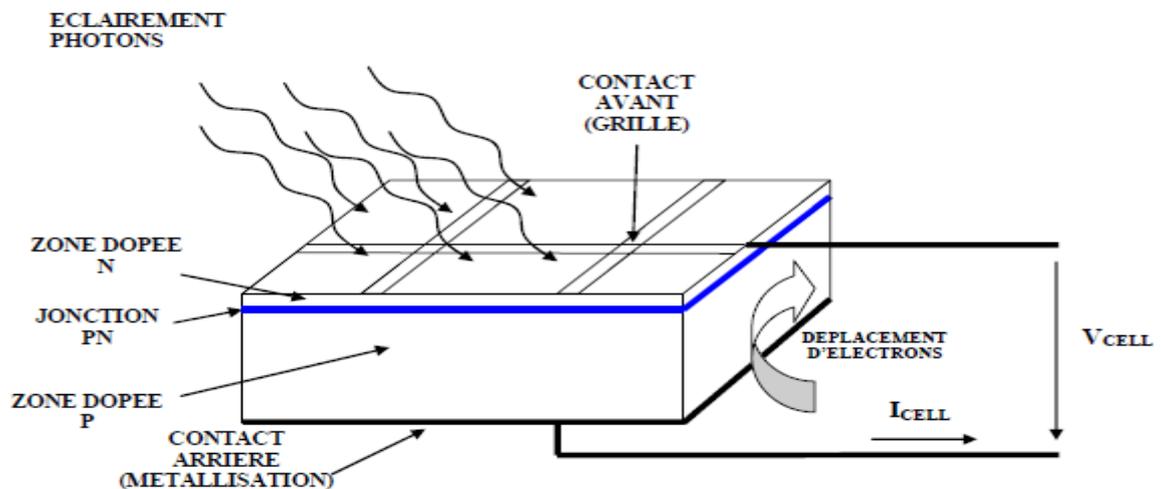


figure I-7 : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN).

**I - 6 -2- MODÈLE D'UNE CELLULE SOLAIRE IDÉALE :**

La cellule est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n).

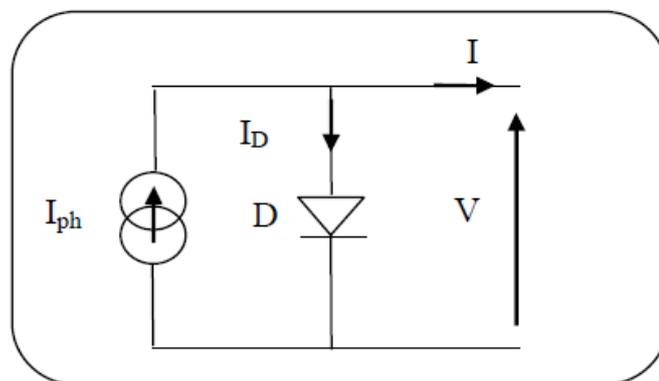


figure I-8: schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_D \tag{I-4}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q.V}{A.K.T}} - 1 \right) \quad (I-5)$$

### I - 6 -3- MODELE D'UNE CELLULE SOLAIRE REELE :

#### I- 6 -3-1- Modèle à une diode (à une seule exponentielle) :

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

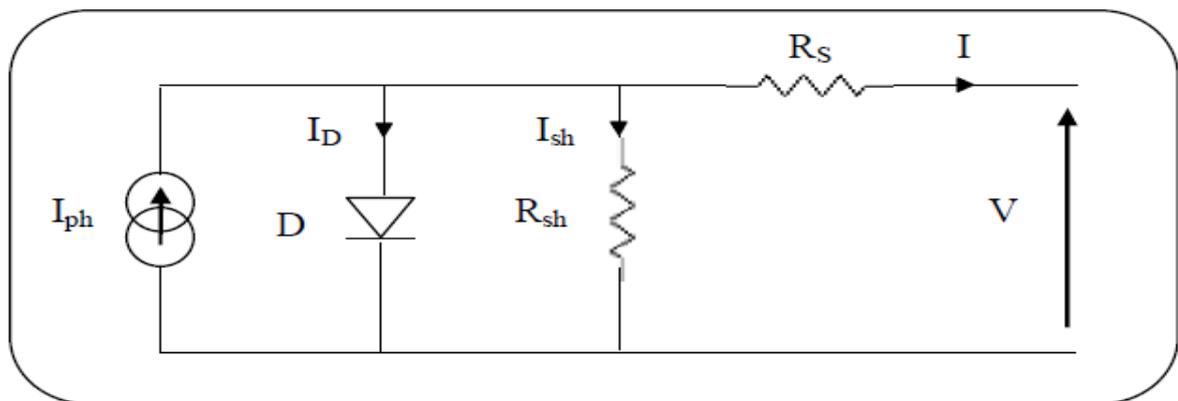


figure I-9: schéma équivalent d'une cellule solaire

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique **I-V** de la cellule:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles .
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{A K T}} - 1 \right] \quad (I-6)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{I-7})$$

$$= I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - \left( \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{I-8})$$

#### I- 6 -4- CARACTÉRISTIQUE D'UN GPV ÉLÉMENTAIRE:

La figure (I-10) représente caractéristique **I (V)** et **P (V)** tracée pour un éclairement  $E=1000 \text{ W/m}^2$  et une température ambiante  $T = 25\text{C}$  pour un module **PV**.

On constate que la caractéristique de la cellule se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension constant dans la partie verticale, on note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale.

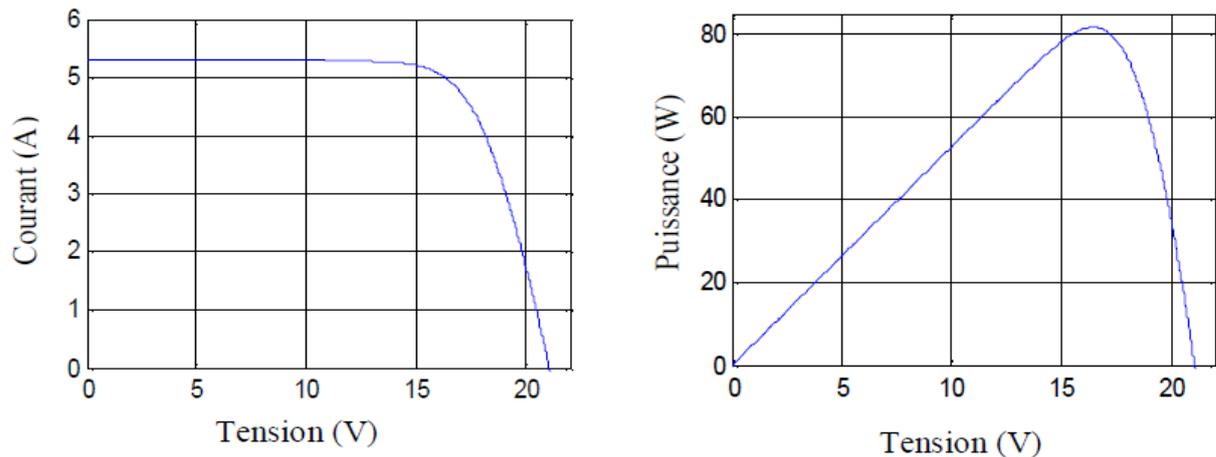


figure I-10 : caractéristique I (V) et P (V) à  $T=25^\circ\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$

On décrit un **GPV** élémentaire par les paramètres suivants:

- La puissance de crête **Pc** : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ),
- la tension à vide **V<sub>OC</sub>** : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ",
- le courant de court-circuit **I<sub>SC</sub>** : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ",
- le point de fonctionnement optimum, (**V<sub>mp</sub>**, **I<sub>mp</sub>**) : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, **P<sub>mp</sub> = V<sub>mp</sub>\*I<sub>mp</sub>**
- le rendement : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente,
- le facteur de forme : rapport entre la puissance optimale P<sub>m</sub> et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

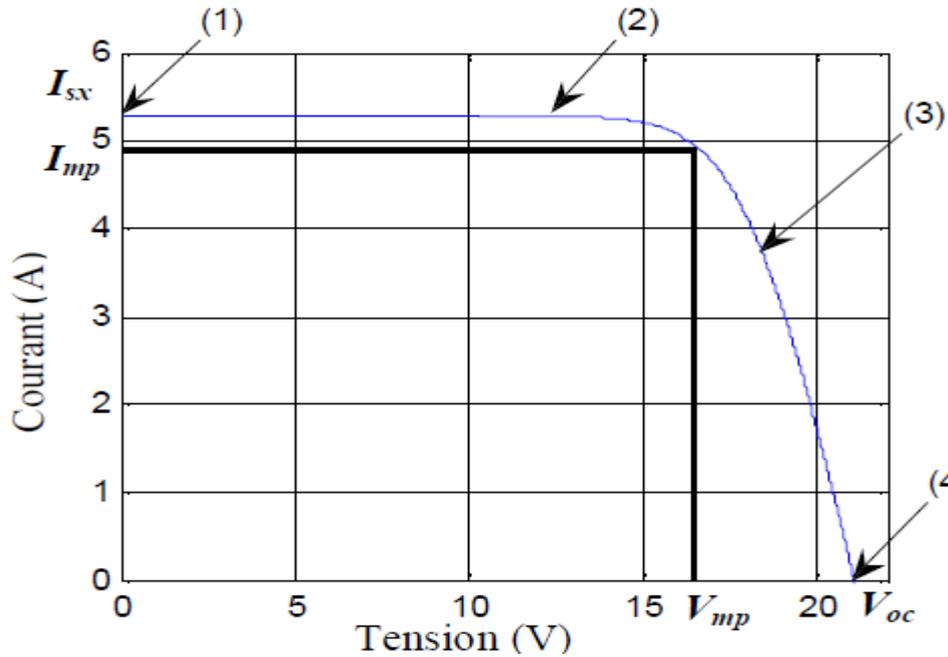


figure I-11 : Les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

Et les différentes zones de fonctionnement sont les suivantes :

- Zone 1 – 2 : fonctionnement en générateur de tension.
- Zone 2 – 3 : zone préféré pour le fonctionnement du module, le point de fonctionnement optimal défini par le courant  $I_{mp}$  et la tension  $V_{mp}$  est celui où le module délivre sa puissance maximale.
- zone 3- 4 : fonctionnement en générateur de courant constant proportionnel à l'éclairement

**I- 6 –5-CONSTITUTION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :**

Une cellule photovoltaïque seule est souvent peu utilisable ; son faible épaisseur la rend très fragile et elle produit une très faible puissance électrique de l'ordre de **1 à 3 W**, avec une tension de moins de **1V**. Ainsi pour accroître la puissance, on assemble ces cellules soit en série, soit en parallèle.

Les cellules sont assemblées pour former un **GPV** élémentaire (module photovoltaïque). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant

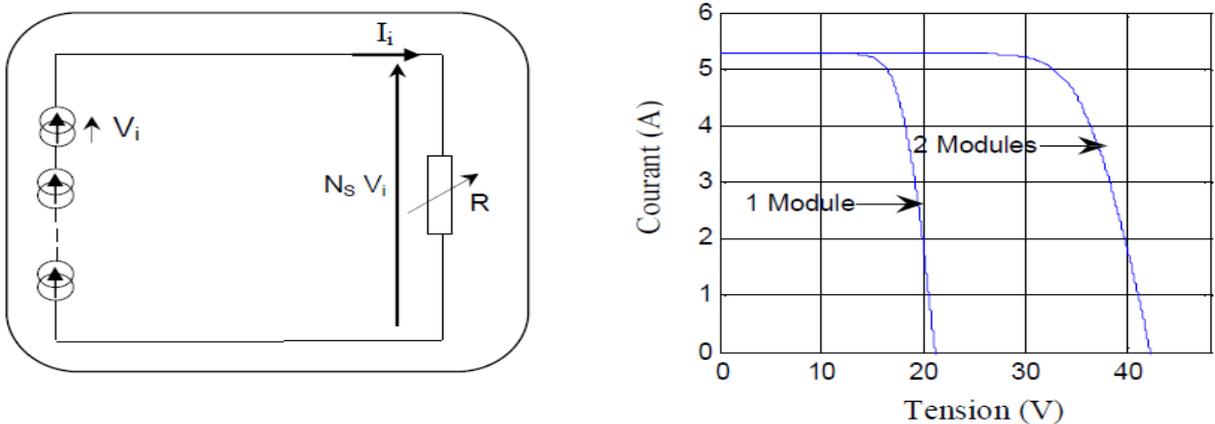


figure I-12: Groupement des cellules PV en série

Tandis que les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension

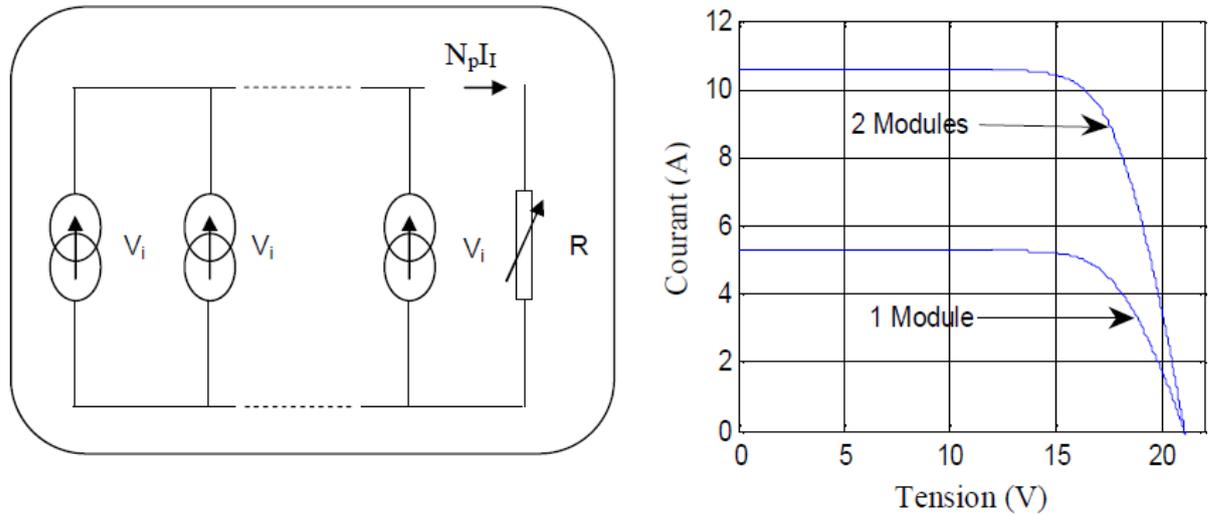


figure I-13: Groupement des cellules en série- parallèle

La plupart des panneaux **PV** commercialisés sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ses sous réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules **PV** connectées en série. Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économiques entre protection et pertes d'une partie importantes du **GPV** en cas de défaut partiel.

La figure (I-13) montre le schématique classique adopté pour un **GPV** élémentaire ; le fonctionnement traditionnel comprend la connexion d'une diode by-pass et une diode anti-retour.

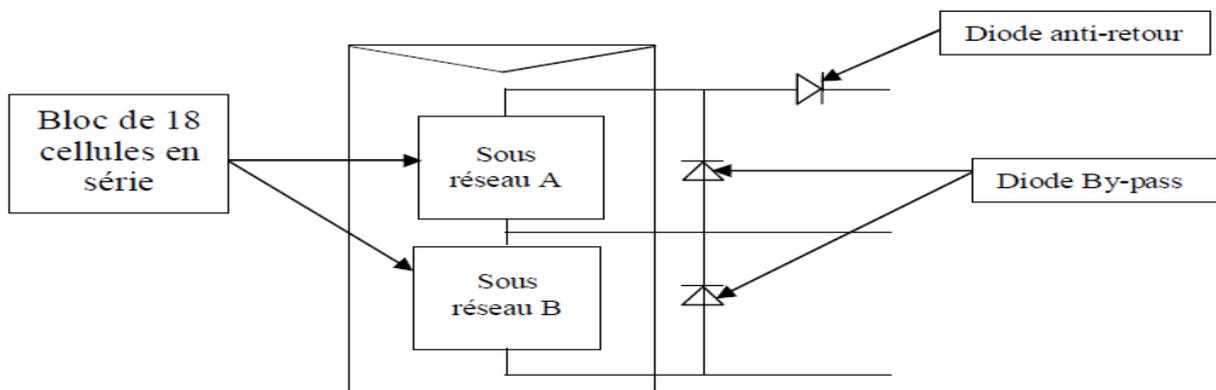


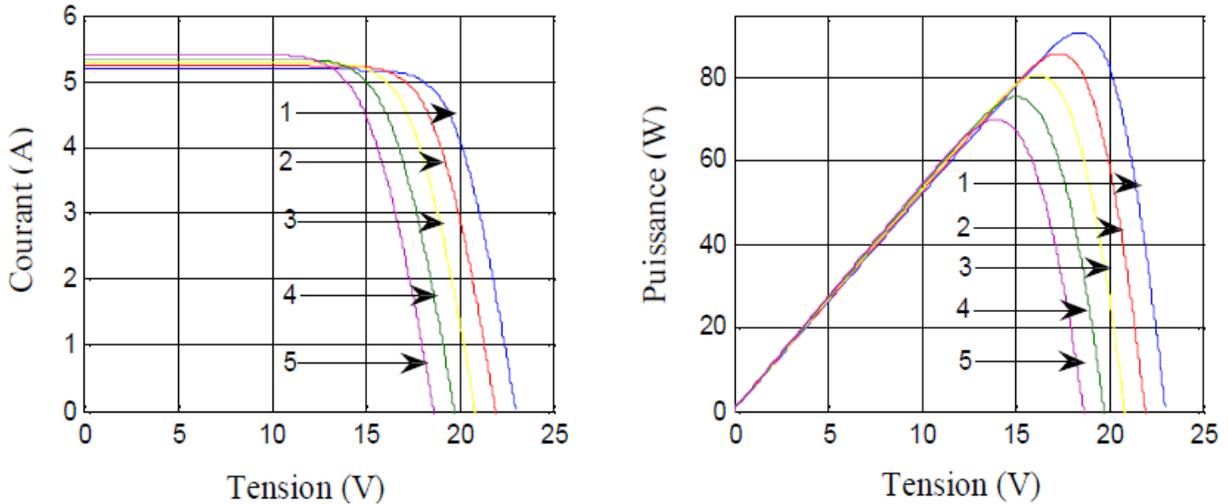
figure I-14 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour

La diode anti-retour est utilisée pour éviter les courants inverses et la diode By-pass n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cette ensemble.

L'ensemble des cellules doit être encapsulé sous verre ou sous composé plastique. L'ensemble est appelé module photovoltaïque. Un module est souvent constitué de **36** ou **72** cellules, et l'ensemble des modules photovoltaïques est appelé champ photovoltaïque.

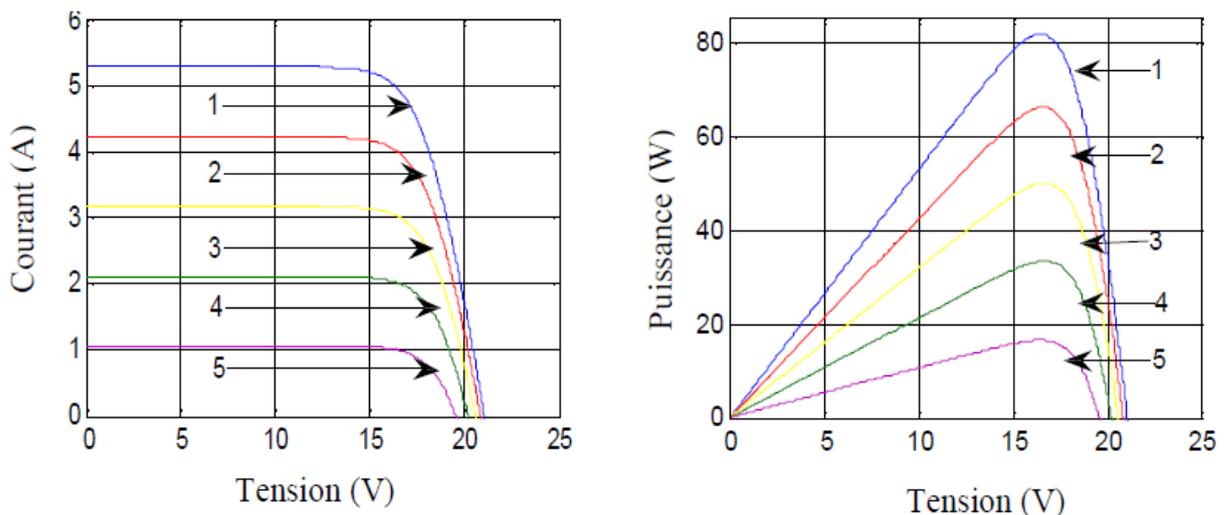
**I- 6-6-Influence de l'éclairement et la température :**

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures (**figure I-15**). La courbe caractéristique va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction.



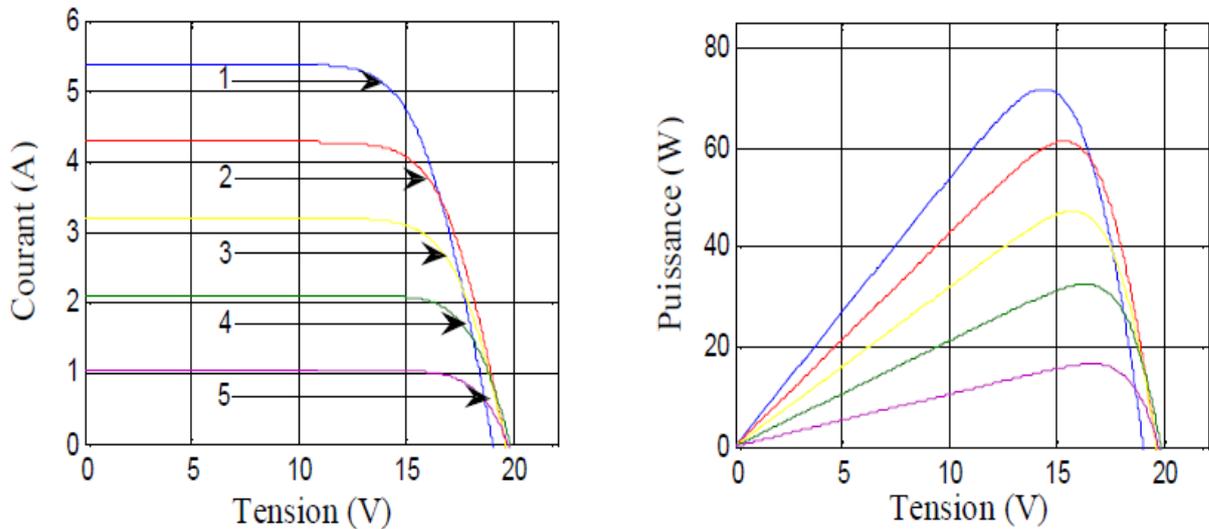
**figure I-15 :** Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à  $E=1000W/m^2$   
 (1): 0 °C ; (2): 15 °C ; (3) : 30 °C ; (4) : 45 °C ; (5) : 60 °C.

Par contre, lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairements (**figure I-16**), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) est une fonction logarithmique.



**figure I-16 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à  $T=25°C$ (1)  
 :1000W/m2 ; (2) : 800W/m2 ; (3) : 600W/m2 ; (4) :400W/m2 ; (5):200W/m2 .

La variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert  $V_{OC}$  qui n'est pas remarquable, par contre il y a une grande variation du courant  $I_{SC}$  comme le montre la figure I-17.



**figure I-17 :** Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique I(V)  
 (1) :1000W/m<sup>2</sup>, 55°C ; (2) :800W/m<sup>2</sup>, 44°C ; (3) :600W/m<sup>2</sup>,40°C ; (4) :400W/m<sup>2</sup>, 32°C ; (5)  
 :200W/m<sup>2</sup>, 25°C .

### I - 7 – Avantage et Inconvénients des système PV :

Les systèmes photovoltaïques présentent un grands nombres d'avantages et d'inconvénients qui sont :

#### I -7-1- Avantage :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

**I - 7 -2- Inconvénients :**

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque et de l'ordre de 10 à 15 %,
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par les cellules photovoltaïques.

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire.

Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu.[9]

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil.

Ainsi on propose dans notre étude de réalisation un système de poursuite solaire "solar tracker" auquel on va ajouter un circuit de maximisation de puissance MPPT (si le temps le permet) pour au max l'énergie produit par notre source **PV**.

# ***Chapitre II***

*Techniques de L'optimisation  
d'énergie*

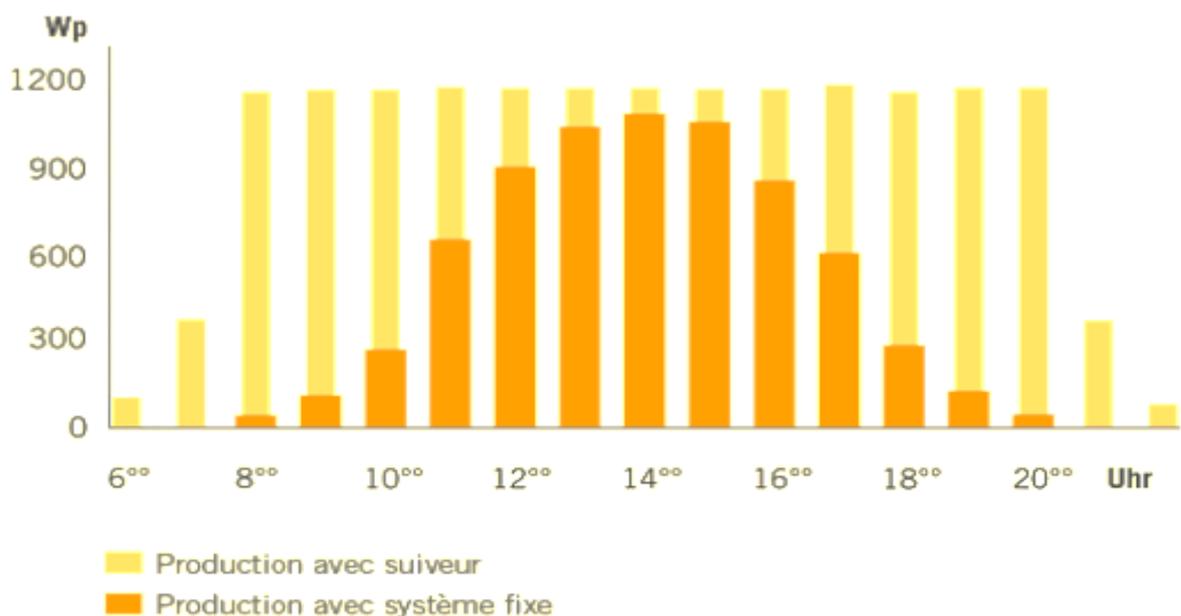
## Introduction

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant sur le comportement du système et présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. A cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom **MPPT** (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche du maximum de la courbe de puissance du panneau photovoltaïque.

Afin de collecter le maximum d'énergie, on utilise aussi des dispositifs dits systèmes de poursuite solaire '*sun tracking systems*'. Le système de poursuite solaire doit être ajusté de sorte que la source **PV** soit toujours visé avec précision face au soleil.

### II-1- Importance de la poursuite solaire:

Le soleil se déplace au cours de la journée et suivant les saisons. Le panneau solaire, en revanche, se trouve généralement en position fixe, ce qui entraîne des pertes énergétiques précieuses. Une installation fixe, orientée, dans le cas idéal, vers le sud délivre une puissance qui croît très lentement tôt le matin et diminue fortement l'après-midi.



**Figure II-1:**diagramme de comparaison entre la production et la production avec système fixe.

Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter la position du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur pour capter le maximum de rayon incident.

## **II-2- Orientations des panneaux solaire:**

### **II-2-1- Choix de l'orientation des module:**

l'orientation des modules doit être plein sud pour les sites de l'hémisphère nord et plein nord pour les sites de l'hémisphère sud l'utilisation d'une boussole est fortement recommandé pour éviter toute approximation qui risquerait d'introduire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation

### **II-2-2- Choix de l'inclinaison des module:**

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que font les modules avec l' horizontale. Comme il est difficile de modifier plusieurs fois aux coures de l'année l'inclinaison des modules, on choisit généralement une valeur moyenne pour toute l'année

### **II-2-3-Trajectoire apparent de soleille:**

Pour un observateur situe sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude (hauteur) et la longitude(azimut) du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de **0** à **90** dans l'hémisphère nord).quand a la longitude ,c'est également un angle, donne par rapport au méridien de Greenwich en se déplace vers l'Est

Le déplacement apparent du soleil et d'environ **240** en azimut et de **70** en élévation de latitudes.

le soleil se déplace au cours de la journée et suivant les saison **figure II-2** .le panneau solaire, en revanche, se trouve généralement en position fixe , ce qui entraine des pertes énergétique précieuses. une installation fixe , orientée, dans le cas idéal, vers le sud délivre une puissance qui croit très lentement tôt le matin fortement l'après-midi. Une part importante de l'énergie récupérable est ainsi perdu.

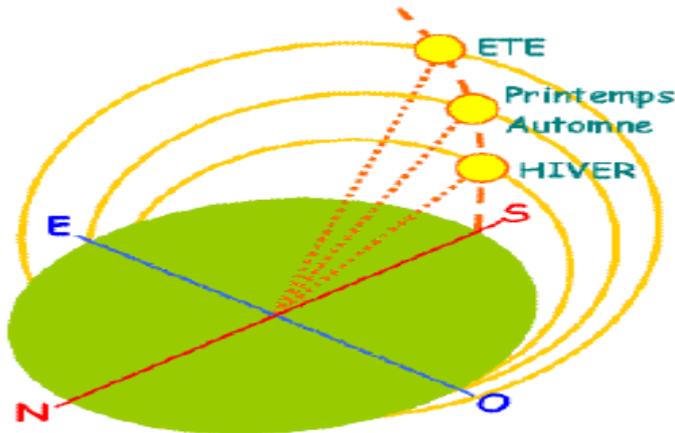


figure II-2 :définition de la position de soleil

Si l'installation s'orient constamment en direction de soleil , elle génère un maximum d'électricité. Une installation fixe de **1KW** est orientée de façon optimal, produit par jour d'ensoleillement, environ de **5KW** d'électricité solaire. La même installation de **1KW** avec suiveur fournit en revanche jusqu'à **10KW** par jour. C'est-à-dire **50%** de gain d'énergie en plus.

Ainsi, seul une rotation automatique peut permettre au panneau solaire délivrée une puissance maximale.

### II-3- type d'orientation:

le panneau solaire doit suivre le soleil, c'est à dire, il faut que les rayons qu'il reçoit lui soient perpendiculaires. Pour cela, il faut rendre le panneau mobile, il faut donc concevoir un mécanisme qui permettrait au panneau de suivre le soleil suivant sa position dans la journée (de l'est à l'ouest) et sa hauteur dans le ciel qui change avec la déclinaison solaire (angle variant à cause de l'inclinaison de la terre).

- **Orientation 1 axe :** un moteur assure la rotation d'un arbre sur lequel est fixé le panneau. Cela donc permettra au panneau d'aller de l'est à l'ouest.

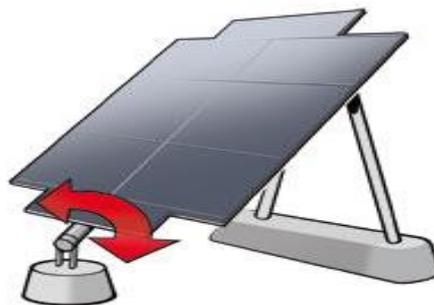


Figure II-3 : Orientation 1 axe

- **Orientation 2 axe :** pour une rotation à deux axe il faut utilisée deux moteur. Le premier assure la rotation est /ouest et le deuxième le position nord /sud



**Figure II-4 :** Orientation 2 axe

#### II-4- type de capteur:

Afin d'assurer la position du soleil , le mécanisme d'entraînement avec l'information de la position de cette dernière, d'où il faut utilise des capteur sensible à la lumière que assurant l'ajustement du mécanisme pour assurer une angle d'incidence égale à  $90^\circ$ .

##### II-4-1- La photorésistance (LDR) :

Une photorésistance est un composant dont la valeur en ohms dépend de la lumière à laquelle il est exposé. On la désigne aussi par **LDR** (Light Dependent Resistor = résistance dépendant de la lumière). La principale utilisation de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse (appareil photo, systèmes de détection, de comptage et d'alarme...). Elle est fortement concurrencée par la photodiode dont le temps de réponse est beaucoup plus court. Les matériaux utilisés sont généralement du sulfure ou du sélénure de cadmium qui se comportent comme des semi-conducteurs.

Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la **LDR** est inversement proportionnelle à la lumière reçue.

##### II-4-2- La photodiode :

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

Une photodiode peut être représentée par une source de courant **I<sub>ph</sub>** (dépendant de l'éclairement), en parallèle avec la capacité de jonction **C<sub>j</sub>** et une résistance shunt **R<sub>sh</sub>** d'une

valeur élevée (caractérisant la fuite de courant), l'ensemble étant en série avec une résistance interne  $R_s$ .

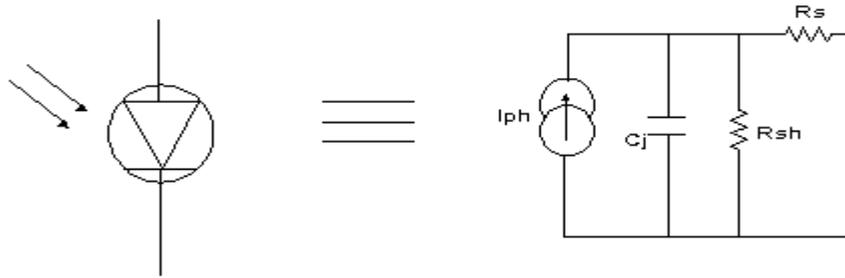


Figure II-5: La photodiode

### II-4-3- Le phototransistor :

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux ; la base est alors dite flottante puisqu'elle est dépourvue de connexion. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par le courant de fuite  $I_{CE0}$ . L'éclairement de la base conduit à un photo courant  $I_{ph}$  que l'on peut nommer courant de commande du transistor.

Le courant d'éclairement du phototransistor est donc le photo courant de la photodiode collecteur-base multiplié par l'amplification  $\beta$  du transistor. Sa réaction photosensible est donc nettement plus élevée que celle d'une photodiode (de **100** à **400** fois plus). Par contre le courant d'obscurité est plus important.

On observe une autre différence entre phototransistor et photodiode : la base du phototransistor est plus épaisse, ce qui entraîne une constante de temps plus importante et, donc une fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes. On peut éventuellement augmenter la fréquence de coupure en diminuant la photosensibilité en connectant la base à l'émetteur.

### II-5- la recherche du point de puissance maximale(MPPT) :

#### II-5-1- Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT) :

La **Figure II-6** représente le schéma de principe d'un convertisseur **MPPT**. La commande **MPPT** fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (**CS**), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le **GPV** peut fournir. L'algorithme **MPPT** peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le **MPP**. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du **CS** en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (**I** et **V** et par conséquent de la puissance du **GPV**) jusqu'à

se placer sur le **MPP**. Plusieurs algorithmes sont présents dans la littérature, nous présentons quelques-uns plus loin dans ce chapitre [10].

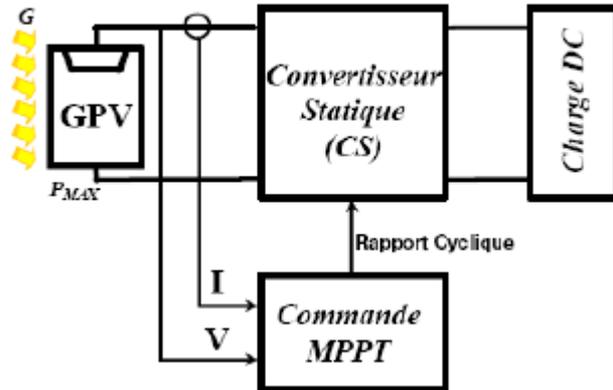
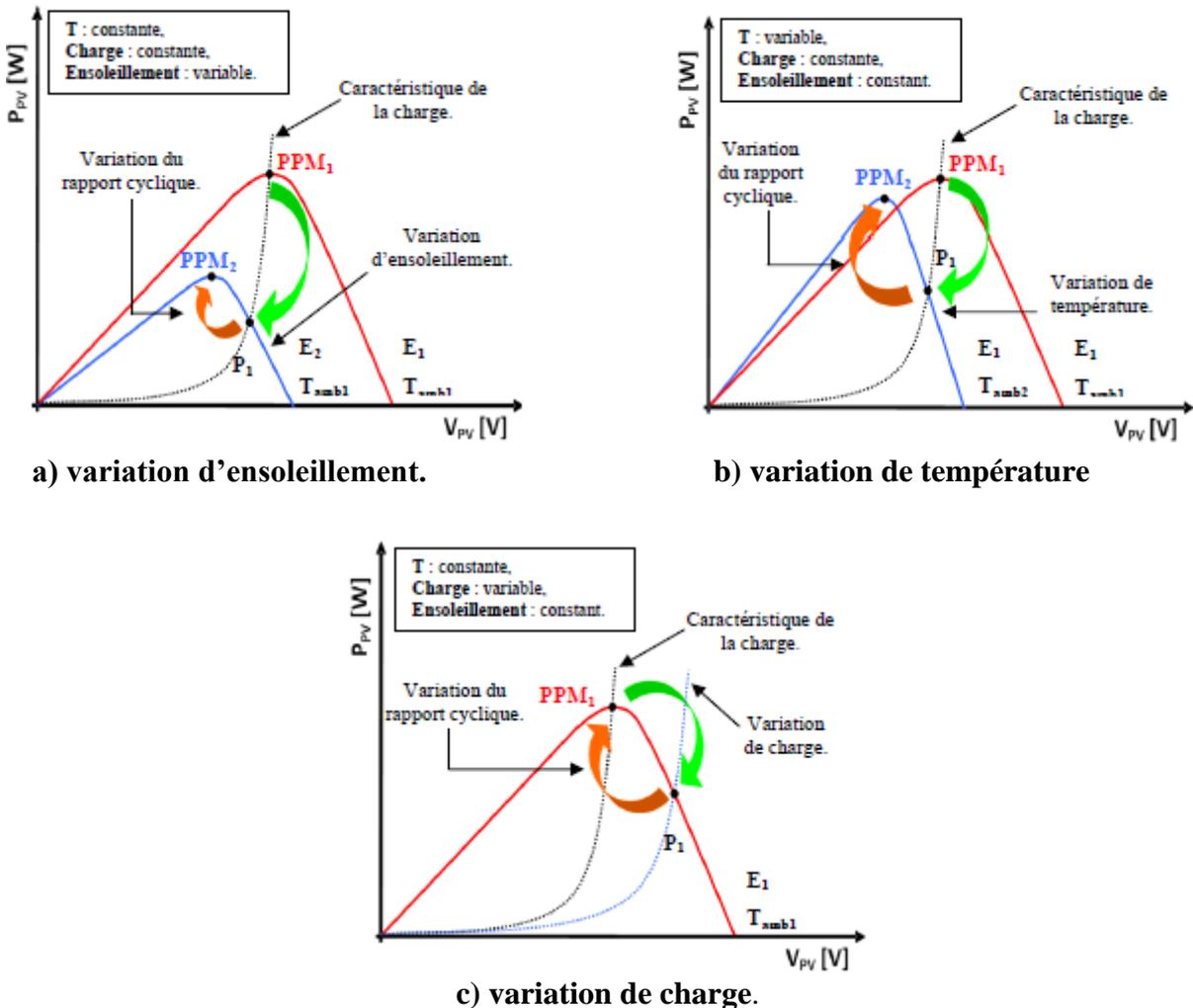


Figure II-6 : Schéma de principe du convertisseur MPPT

La (figureII-7) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximale  $PPM_1$  vers un nouveau point  $P_1$  de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

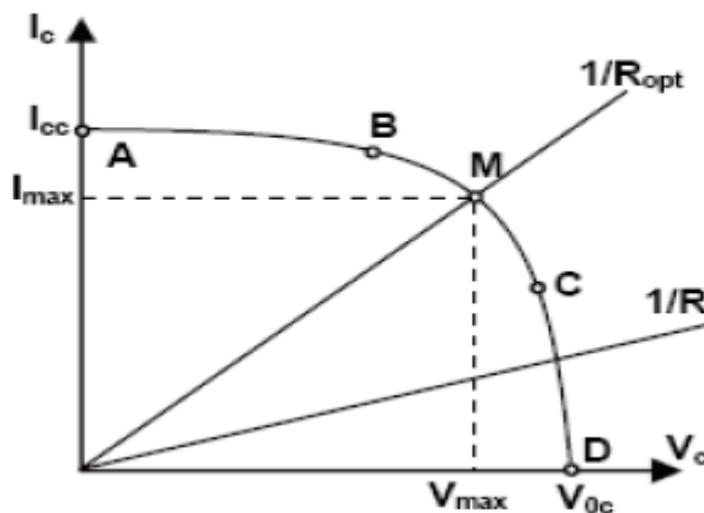


figureII-7 : Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

### II-5-2- Couplage direct d'un Générateur PV et une charge résistive :

La **Figure II-8** montre les caractéristiques **I/V** d'un **GPV** et d'une résistance. Pour une charge résistive, la caractéristique **I/V** est une droite de 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<sub>pv</sub>** varie peu en fonction de la tension et est presque égal au courant de court-circuit. Le **GPV** se comporte comme un générateur de courant. D'autres part, si la résistance **R** est grande, le **GPV** fonctionne dans la région **CD**. Dans cette zone, la tension du **GPV** varie peu en fonction du courant et est presque égale à la tension de circuit ouvert. Le **GPV** se comporte comme une source de tension. Dans la région **BC** sur la courbe, le **GPV** ne peut être caractérisé ni par une source de courant, ni par une source de tension.

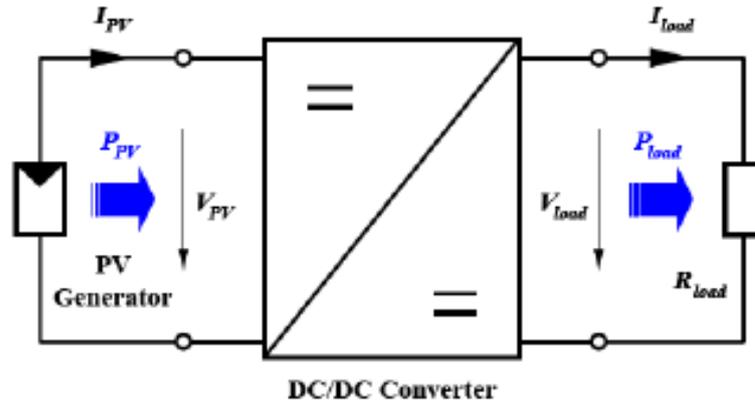
C'est dans cette zone que se trouve le **MPP** pour des conditions atmosphériques fixées. La valeur de la résistance correspondant à ce point est notée **R<sub>opt</sub>**



**Figure II-8** : Caractéristique **I/V** d'un **GPV** et d'une charge résistive.

### II-5-3- Etude du Fonctionnement du Convertisseur Statique (DC-DC) :

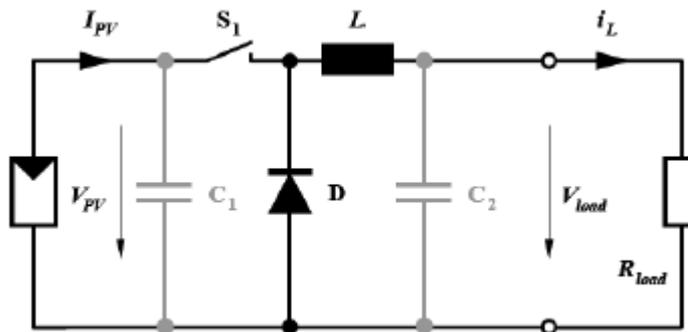
Le rôle du convertisseur **DC/DC** (dans le cadre du **PV**) est de faire l'adaptation entre la source (**GPV**) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du **MPP** pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).



figureII-9: Convertisseur DC/DC

II-5-3-1- Convertisseur dévolteur:

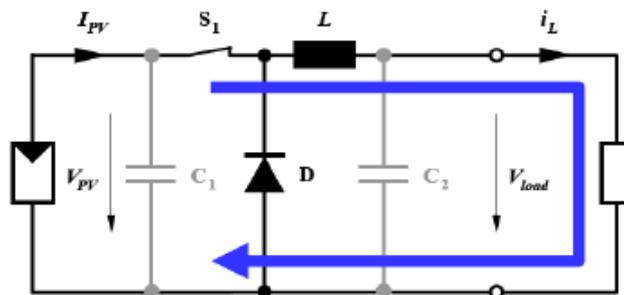
Un convertisseur dévolteur, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP.



figureII-10: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Si le commutateur  $S_1$  est activé à  $t_0$ , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode  $D$  puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant  $i_L$  n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance  $L$ . [11 ,12]

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV} - V_{load}}{L} \tag{II-1}$$



figureII-11: Convertisseur dévolteur durant l'état on

Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Si  $S_1$  est désactivé après  $t = t_1$ , la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  et circule à travers la diode  $D$  appelée "diode de roue libre". Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension. Selon l'équation II-1, le courant décroît, puisque :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{load}}{L} \tag{II-2}$$

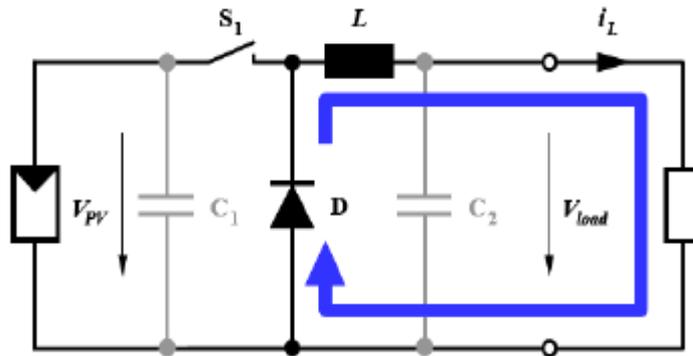
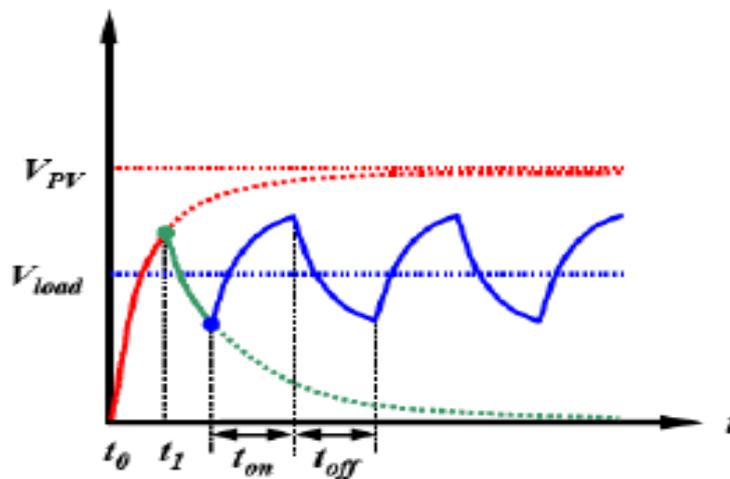


Figure II-12 : Convertisseur Buck durant l'état off

Le condensateur  $C_1$  permet de réduire les pics du courant tiré du  $GPV$ , de soutenir la tension d'alimentation  $V_{PV}$  et d'atténuer les bruits. Le commutateur  $S_1$  est activé et désactivé avec une fréquence de commutation  $f = 1/T$ . Comme l'illustre figureII-13, la tension aux bornes de la charge présente une ondulation qui peut être lissée par l'ajout d'un condensateur  $C_2$ . Quoiqu'il en soit, la valeur moyenne  $V_{load}$  est inférieure à  $V_{PV}$ . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'au  $kHz$ , l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement.



figureII-13 : Formes d'onde des tensions  $V_{PV}$  et  $V_{load}$  dans le cas du convertisseur Buck

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_{load} = \frac{t_{on}}{T} V_{PV} \tag{II-3}$$

avec :  $T = t_{on} + t_{off}$  : est la période de commutation.

$$D = t_{on}$$

$T$  : est le rapport cyclique ( $0 < D < 1$ )

Grâce à cette équation(II-3), on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique  $D$ .

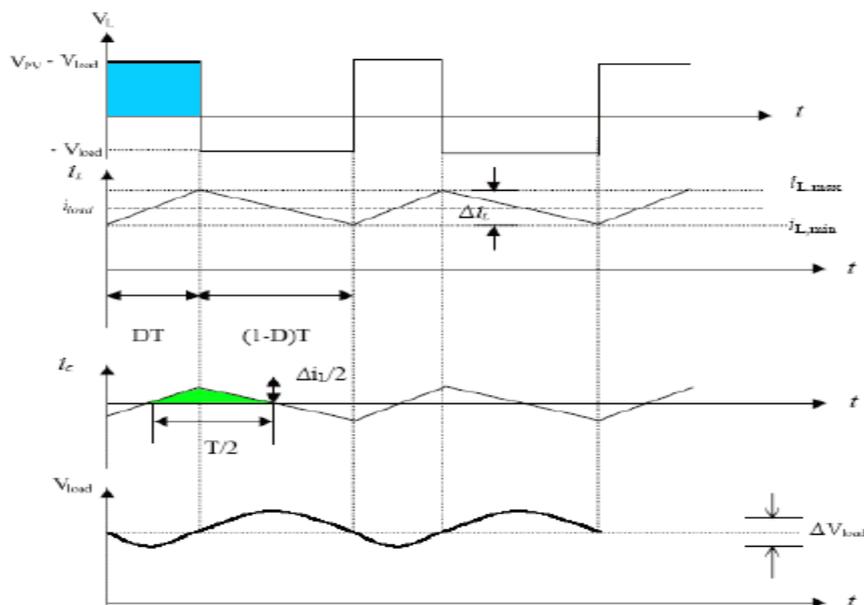
On considère ici uniquement le comportement du circuit en mode de **conduction continue** .

Il est à noter que l'interrupteur utilisé est un dispositif à semi-conducteur en commutation. Généralement, un transistor **MOSFET** est utilisé pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance.

- **Mode de Conduction Continu**: Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation et est donc continu.
- **Mode de Conduction Discontinu**: Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une période de commutation. Le courant dans l'inductance est discontinu.

**II-5-3-1-1- Mode de Conduction Continu :**

La **figure II-14** représente les formes d'ondes des principales grandeurs électriques en Mode de Conduction Continu.



**figure II-14 :** Formes d'ondes des tensions et courants dans un convertisseur dévolteur en Mode de conductance continu

L'augmentation du courant  $i_L$  durant l'état passant  $t_{on} = DT$  est donnée par (aire du rectangle bleu) :

$$\Delta i_{L,on} = \int_{i_L(0)}^{i_L^{DT}} di_L = \int_0^{DT} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_{PV} - V_{load})DT}{L} \quad (\text{II-4})$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée par :

$$\Delta i_{L,off} = \int_{i_L^{DT}}^{i_L(0)} di_L = \int_{DT}^T \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_{load}(V_{PV} - DT)}{L} \quad (\text{II-5})$$

➤ **Ondulation du courant  $i_L$  et choix de  $L$**  : Sur la **figure II-14** , on voit que le courant traversant l'inductance  $L$  présente une ondulation  $\Delta i_L$  (l'ondulation du courant est définie comme étant la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale du courant) qui est donnée par [13,14] :

$$\Delta i_L = i_{L,max} - i_{L,min} = \frac{(V_{PV} - V_{load})DT}{L} \quad (\text{II-6})$$

$$= \frac{V_{load}(1-D)}{L \cdot f} = \frac{V_{pv}}{L \cdot f} \times (1 - D)D \quad (\text{II-7})$$

avec  $f = 1/T$  , fréquence de commutation.

Sachant que l'ondulation du courant est maximale pour  $D = 0.5$ , on peut écrire pour un courant d'ondulation maximum désiré  $\Delta i_{L,max}$

$$L \geq \frac{V_{pv}}{4\Delta i_{L,max} \times f} \quad (\text{II-8})$$

➤ **Ondulation de la tension de sortie  $V_{load}$ , choix de  $C_2$**  : Dans une installation **PV**, on rajoute les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  pour que la tension de sortie  $V_{load}$  et le courant  $I_{load}$  se maintiennent à des valeurs constantes, même pendant l'ouverture de l'interrupteur. Aussi, les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et courants à l'entrée et à la sortie présentent de faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement.

$$\Delta V_{C2} = \frac{\Delta Q}{C_2} = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta i_L T}{2} = \frac{\Delta i_L}{8C_2 f} \quad (\text{II-9})$$

$$= \frac{V_{load}}{8LC_2 f^2} (1 - D) = \frac{V_{PV}}{8LC_2 f^2} (1 - D)D$$

ou en valeur relative :

$$\frac{\Delta V_{C2}}{V_{C2}} = \frac{1-D}{8LC_2 f^2} \quad (\text{II-10})$$

L'ondulation absolue maximale a lieu pour un rapport cyclique  $D = 0.5$ .

$$\Delta V_{C2,max} = \frac{V_{PV}}{32LC_2f^2} \tag{II-11}$$

par conséquent, la valeur du condensateur  $C_2$  permettant d'avoir une ondulation inférieure à  $\Delta V_{C2,max}$  doit satisfaire

$$C_2 \geq \frac{V_{PV}}{32LC_{2,max}f^2} \tag{II-12}$$

Si la valeur de l'ondulation du courant dans l'inductance  $\Delta i_L$  est déterminée, alors la valeur de  $C_2$  peut être établie à partir de l'expression (II-9):

$$C_2 \geq \frac{\Delta i_L}{8\Delta V_{c2max} \times f} \tag{II-13}$$

➤ **Ondulation de la tension d'entrée  $V_{PV}$  et choix de  $C_1$  :**

L'ondulation de la tension d'entrée peut être elle aussi estimée en admettant que le courant traversant le condensateur  $C_1$  soit égal à l'ondulation du courant dans l'inductance. Autrement dit, on fait hypothèse que l'ondulation du courant d'entrée  $I_{PV}$  est nulle.

Le courant circulant dans le condensateur  $C_1$  est donné par :

$$I_{C1} = I_{PV} - I_{DS} \tag{II-14}$$

où  $I_{DS}$  : courant traversant le commutateur à l'état on.

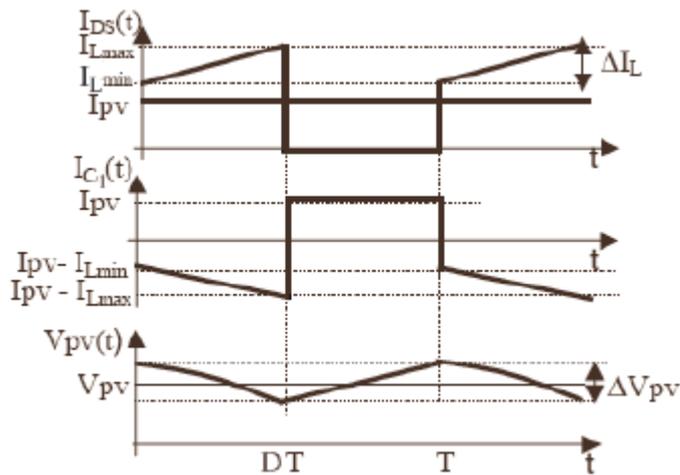


figure II-15 : Ondulation de la tension d'entrée

À partir de la forme du courant  $I_{DS}$  traversant le commutateur (**figure II-15**) et la relation (**II-14**), on peut déterminer la forme du courant  $I_{C1}$  dans le condensateur  $C_1$ .

L'ondulation  $\Delta V_{PV}$  de la tension d'entrée se déduit de l'équation différentielle régissant la tension et le courant dans le condensateur  $C_1$ . La forme de cette ondulation est représentée sur **figure II-15** et est donnée par :

$$\Delta V_{PV} = V_{PV}(T) - V_{PV}(\Delta T) = \frac{1}{C} \int_{DT}^T I_{PV} dt \quad (\text{II-15})$$

Dou

$$\Delta V_{PV} = \frac{I_{PV}}{C_1} (1 - D)T \quad (\text{II-16})$$

L'ondulation absolue maximale a lieu pour un rapport cyclique  $D = 0$ .

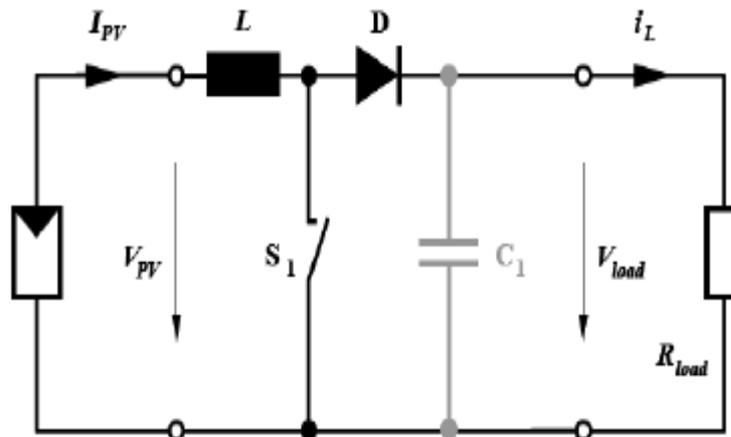
$$\Delta V_{PVmax} = \frac{I_{PV}}{C_1} T \quad (\text{II-17})$$

Par conséquent, la valeur du condensateur  $C_1$  permettant d'avoir une ondulation inférieure à  $\Delta V_{PVmax}$  doit satisfaire

$$C_1 \geq \frac{i_{pv}}{\Delta V_{pvmax} \times f} \quad (\text{II-18})$$

### II-5-3-2- Convertisseur survolteur (Boost converter) :

Un convertisseur survolteur, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du **MPP**.



**Figure II-16** : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur survolteur

Si le commutateur  $S_1$  est désactivé à  $t_0$  et si la chute de tension aux bornes de la diode est négligée, alors  $V_{load}$  est égale à  $V_{PV}$ .

Lorsque le commutateur est activé (Figure II-17), la tension de la charge chute immédiatement à zéros le condensateur  $C_1$  est omis. Le courant du circuit  $i_L$  circule à travers l'inductance  $L$  et augmente suivant l'équation [11]

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} \tag{II-19}$$

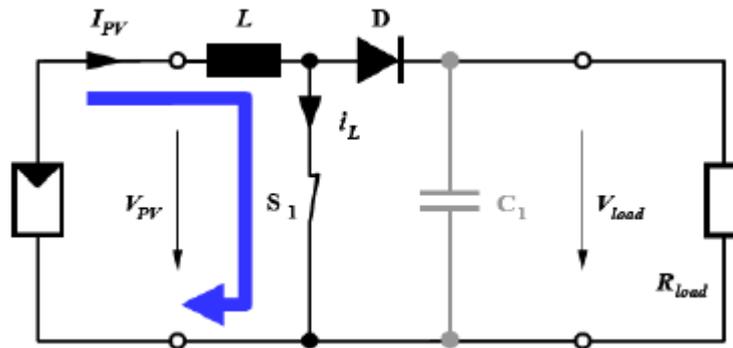


Figure II-17: Convertisseur survolteur durant l'état on

Lorsque  $S_1$  est désactivé (Figure II-16), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa F.E.M s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant  $i_L$  traversant l'inductance traverse ensuite la diode  $D$ , le condensateur  $C_1$  et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car  $V_{load} > V_{PV}$  :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV}-V_{load}}{L} \tag{II-20}$$

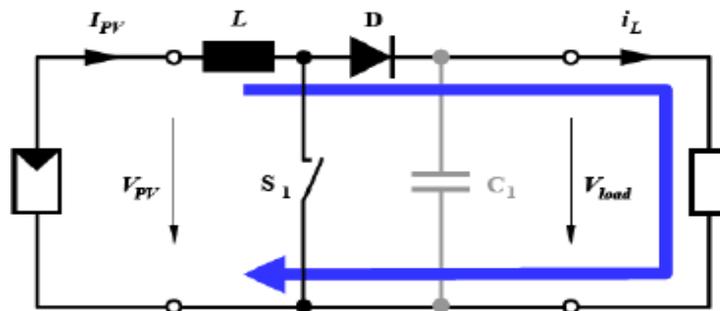


Figure II-18: Convertisseur survolteur durant l'état off

La forme d'onde de la tension de la charge est représentée sur la Figure II-19. La diode  $D$  permet d'éviter la décharge du condensateur  $C_1$ , lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge.

La tension de la charge est donnée par :

$$V_{load} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} V_{pv} \tag{II-21}$$

avec  $D = t_{on}/T$  : est le rapport cyclique ( $0 < D < 1$ )

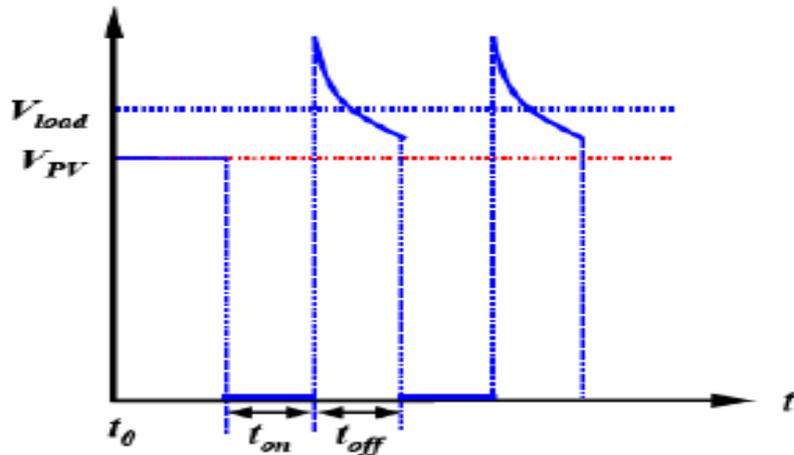


Figure II-19 :Formes d'ondes des tensions  $V_{PV}$  et  $V_{load}$  dans le cas du convertisseur survolteur

II-5-4-Les techniques MPPT :

II-5-4-1- La méthode Perturbe & Observe (P&O) :

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM)le plus utilisée , et comme son nom il est basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC / DC , puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique .

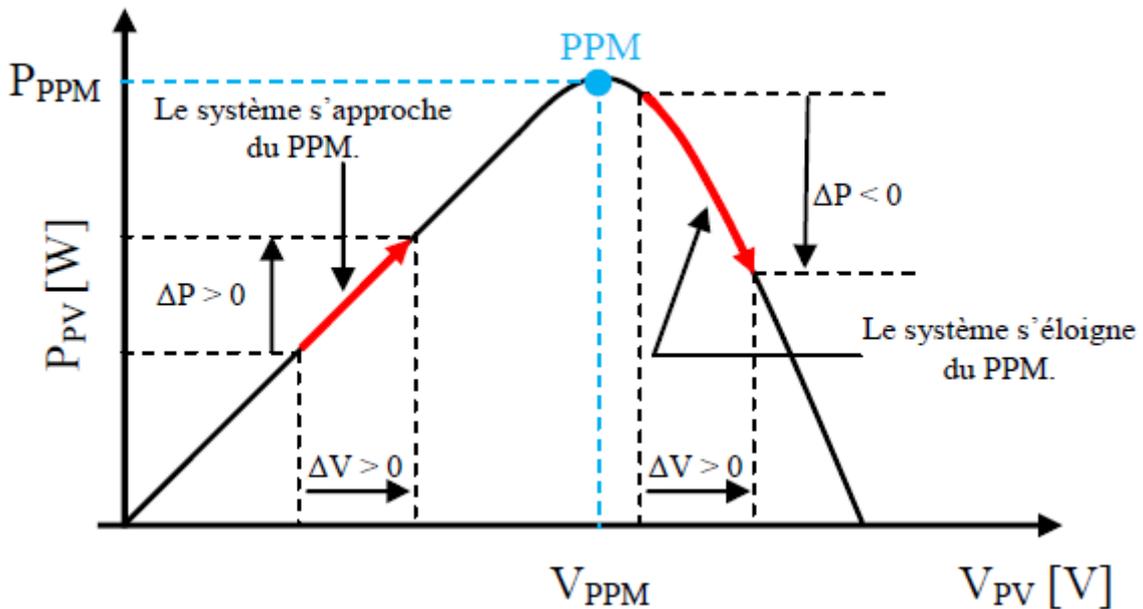


Figure II-20: Caractéristique Ppv (VPV) d'un panneau solaire.

Si la valeur de puissance  $P(k)$  du générateur est supérieur a la valeur précédent sinon on inverse la perturbation du cycle précédent  $P(k-1)$  alors en garde la même direction de

perturbation précédent sinon en inverse la perturbation du cycle précédent . la figure suivant donne l'organigramme de cette algorithme.

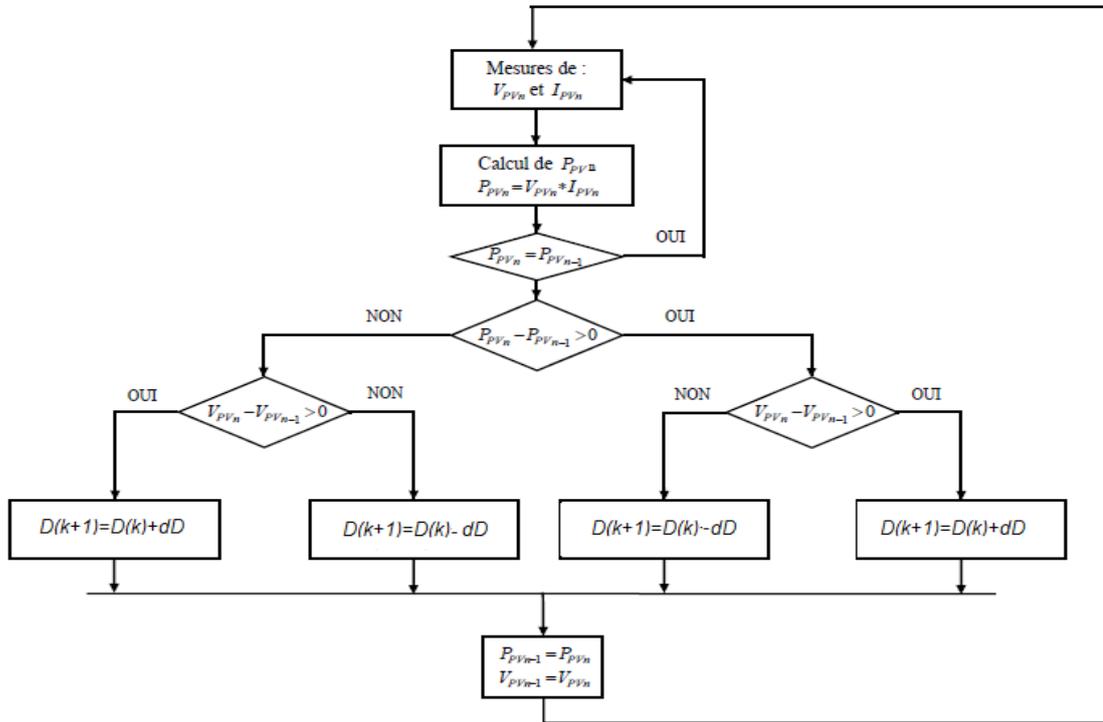


Figure II-21: Algorithme type de la méthode P&O

II-5-4-2- La méthode de “Hill Climbing”:

La technique de contrôle nommée Hill Climbing consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque  $dP_{PV}/dD$  est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure II-22.

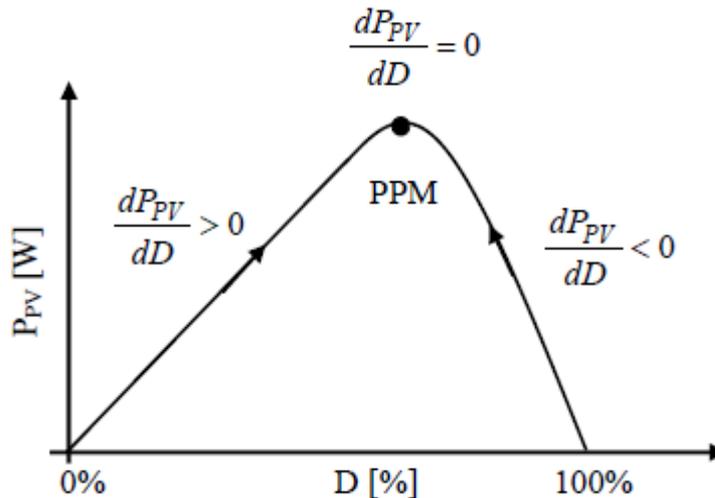


Figure II-22: Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la **figure II-23** . La variable *Slope* correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. *D* et *P<sub>PV</sub>* représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, *a* symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance *P<sub>PVn</sub>* est comparée à la valeur déterminée précédemment *P<sub>PVn-1</sub>*, en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur *Slope* change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique. Une fois le **PPM** atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations.

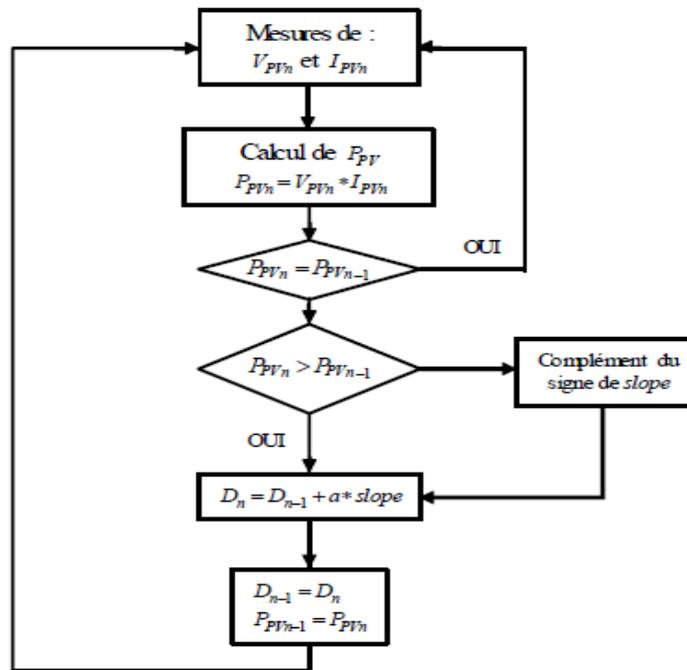


figure II-23 : Algorithme type de la commande Hill Climbing.

**II-5-4-3- Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité :**

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (*V<sub>OPT</sub>* et *I<sub>OPT</sub>*) et les paramètres caractéristiques du module PV (*V<sub>OC</sub>* et *I<sub>CC</sub>*).

Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

➤ **Mesure de VOC (Fraction de V<sub>OC</sub>) :**

Cette technique de recherche du PPM est très simple. Elle consiste à comparer la tension du panneau (*V<sub>PV</sub>*) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale (*V<sub>OPT</sub>*) .

L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du **CS**, afin de faire coïncider les deux tensions. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre  $V_{OPT}$  et  $V_{OC}$  d'un module **PV** :

$$V_{opt} = K_v \cdot V_{oc} \quad (\text{II-22})$$

avec  $k_v$  correspondant à un facteur de tension dont sa valeur dépend du **GPV** utilisé et de la température de fonctionnement. Généralement, pour des **GPV** en Si, il est compris entre **0.71 et 0.78**.

A partir de (II-22) et connaissant  $k_v$ , il faut cependant mesurer la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) afin d'en déduire la tension de référence ( $V_{OPT}$ ) à appliquer au **PV**. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de  $V_{oc}$  de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du **PV** durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure. Un autre inconvénient est l'hypothèse faite sur l'évolution de  $k_v$  dans un **GPV** suivants les différents points de fonctionnement des caractéristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothèse que ce coefficient est constant pour un générateur donné. Ceci est loin d'être vrai pour la plupart des **GPV** en Si qui affichent une variation d'au moins **10 %** de ce facteur en fonction de la température de fonctionnement. Ces commandes sont très simples et très robustes mais aujourd'hui ne présentent pas assez de précisions inhérentes à leur principe même de fonctionnement pour être retenues dans des systèmes de conversion récents.

➤ **Mesure de  $I_{CC}$  (Fraction de  $I_{CC}$ ) :**

Cette nouvelle méthode est basée sur la connaissance de la relation linéaire en première approche entre  $I_{OPT}$  et  $I_{CC}$  comme le montre l'équation (II-23) :

$$I_{opt} = K_I \cdot I_{cc} \quad (\text{II-23})$$

avec  $k_I$  correspondant à un facteur de courant qui dépend là aussi du **GPV** utilisé et est généralement compris entre **0.78 et 0.92**.

L'équation (II-23) montre que le courant  $I_{OPT}$  peut être déterminé par une mesure de  $I_{CC}$  et que le **PPM** peut être atteint en appliquant un courant de référence égal à  $I_{OPT}$  à la régulation en courant du convertisseur. La mesure de  $I_{CC}$  implique une perte de transfert de puissance du à la mise en court-circuit du **GPV**. Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop ce coefficient.

Ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont été très utilisées dans les années **80**. Elles s'avéraient alors plus faciles à mettre en œuvre et un peu moins coûteuses que les commandes extrémales citées au début de ce document. Par contre, la

précision de ces commandes est faible notamment à cause des procédés d'estimation des paramètres caractéristiques du module ( $I_{CC}$  et  $V_{CO}$ ) qui ne peuvent pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de la minute. De plus, à chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée. Comme le montre l'étude comparative ou le rendement **MPPT** de la méthode  $V_{OC}$  est de **88,1 %**, soit **8 et 10 %** inférieur à la commande **P&O** et Inc-cond respectivement.

#### II-5-4-4- Autres méthodes :

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

- les algorithmes basés sur la logique floue
- les algorithmes à base de réseau de neurones
- les algorithmes d'identification en temps réel du **MPP**
- Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement

le courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.

- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- la méthode de l'oscillation forcée

#### Conclusion

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement le système de poursuite solaire et étudie la problématique de la recherche du **PPM** en établissant une classification des commandes **MPPT** présentes dans la littérature.

# *Chapitre III*

*Conception et réalisation d'un suiveur  
solaire et convertisseur MPPT*

## Introduction

Dans ce chapitre, on présente la conception et la réalisation d'un circuit électronique à base de  $\mu c$  pour l'optimisation de la puissance d'une source **PV** du système particulier autour de deux actions :

- La poursuite du soleil à travers un mécanisme mécanique qui permet de fixer l'orientation de notre module .
- Assurer le fonctionnement de notre source **PV** au point de fonctionnement à puissance maximale (**MPPT**) par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance **DC/DC** (hacheur abaisseur).

Pour ce faire, nous avons utilisé un  $\mu c$  à base de **PIC 16F877A**, qui représente plusieurs avantages vis-à-vis des autres  $\mu c$ . De plus il présente certains avantages par rapport aux systèmes analogiques. On peut citer quelques avantages comme [15,16] :

- Nombre de composants réduit, donc un encombrement, un coût et un poids moindres.[17]
- Une puissance de consommation de la carte de commande très faible.
- Une conception et un contrôle simples.
- Robustesse vis-à-vis des perturbations.
- Souplesse d'utilisation : les paramètres de réglage et la structure de la loi de commande sont modifiés par programmation plutôt que par modification du câblage avec un régulateur analogique.
- Possibilité d'améliorer l'algorithme utilisé, par conséquent, optimiser les performances du convertisseur.
- Possibilité d'implémenter différents algorithmes, donc une maximisation dans l'utilisation du dispositif.
- Possibilité d'utiliser facilement des algorithmes complexes.
- Facilité de modification de l'algorithme si d'autres sources d'énergie renouvelables sont utilisées (systèmes hybrides).

Cependant, l'implémentation de type numérique présente aussi des inconvénients [18,19] :

- Erreur due au bruit de quantification.
- Le temps de calcul des algorithmes implantés peut avoir de l'influence sur la dynamique du système (retard).
- Les limitations du convertisseur analogique-numérique.
- La technologie numérique est plus lente que l'analogique, puisque qu'elle manipule des grandeurs discrètes et quantifiées.

Ainsi , le schéma synoptique générale à réaliser est illustré dans la figure suivante :

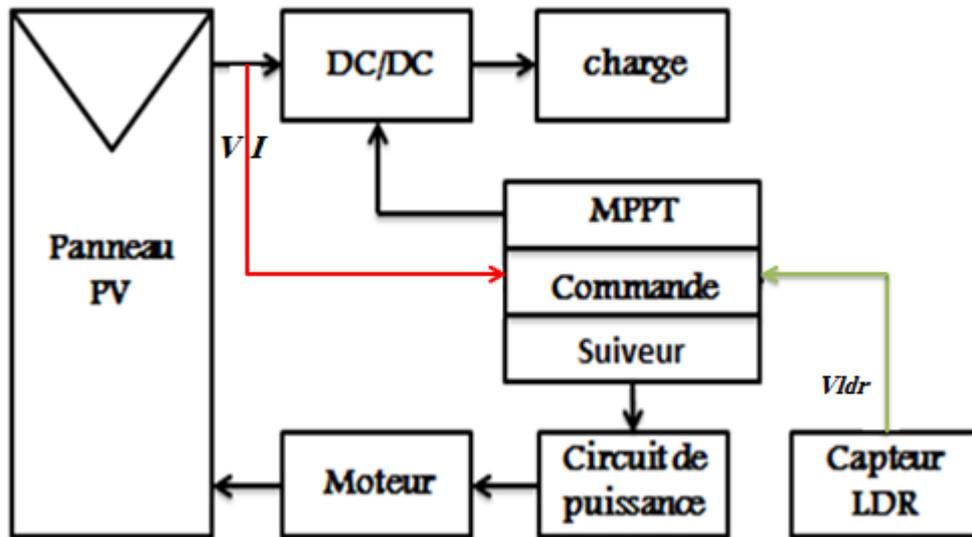


Figure III-1: Système représentant un GPV muni d'un suiveur solaire et un convertisseur MPPT

III-1- Méthodologie :

Pour la conception on à réaliser deux tâches principales :

- Celle de la poursuit solaire .
- Celle de la fonction MPPT.

Bien sûr d'autre fonction sont nécessaire pour le bon fonctionnement de notre système à sauver :

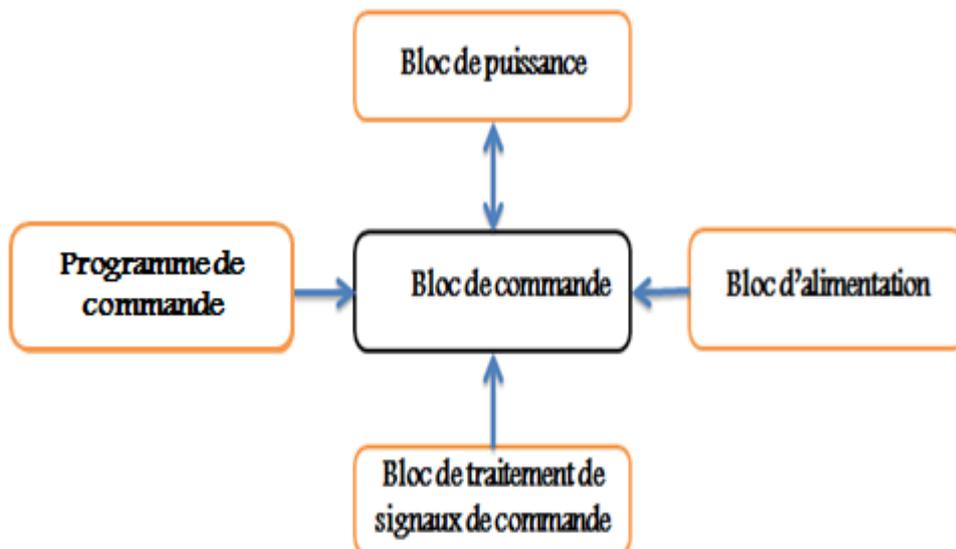


Figure III-2 : Schéma synoptique du prototype à réaliser

- Bloc d'alimentation : qui dit assura l'alimentation de cette circuit électronique ainsi que le moteur d'entraîn de suiveur .
- Un circuit de puissance : qui dit à la fois entraine le moteur du mécanisme suiveur et aussi assurer l'adaptation entre la source **PV** et la charge afin de fonctionne en **PPM** .
- Acquisition des signaux et leurs traitement car différent paramètre sont à capter et mise à niveau pour être utilisation sur notre système numérique.
- Et bien sûr Le cœur du système , qu'est le  **$\mu$ c PIC 16F877A** et ces accessoires indispensable pour son bon fonctionnement.

### III-2-Méthodologie de poursuite :

Cette fonctionnement assure la poursuite de la position de soleil pour un mouvement continue ou discret de sort que notre source **PV** face toujours le soleille pour assurer un  $\eta_{\max}$ .

La commande automatique du système de poursuite solaire comprend les parties suivantes:

- Les capteurs et étage d'adaptation .
- Carte de puissance.
- Mécanisme électro mécanique.

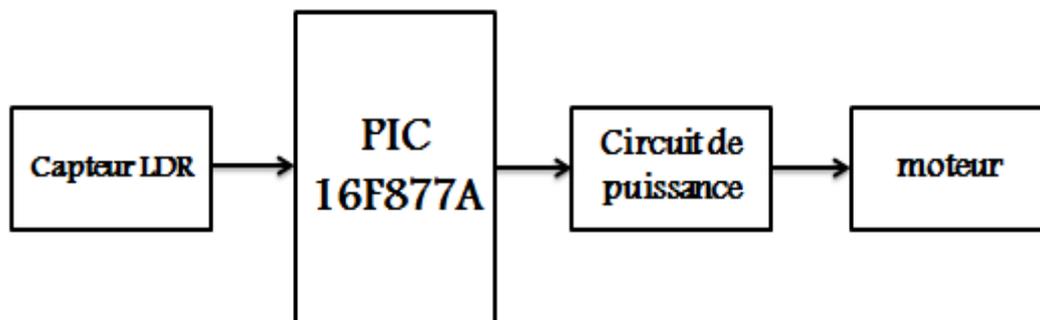


Figure III-3: Schéma Synoptique du suiveur du soleil

#### III-2-1-Bloc d'alimentation:

Le fonctionnement de notre circuit de commande exige une alimentation :

- ✓ Alimentation de **5V** pour alimenter le **PIC 16F877A** .
- ✓ Alimentation de **15V** pour l'amplificateur opérationnel .
- ✓ Alimentation de **15V** pour les relai et le moteur d'entraînement .

#### III-2-2-Bloc de traitement des signaux:

Il est composé par les élément suivant :

- les capteurs solaire .
- l'étage de traitement et conditionnement.

➤ **Le capteur optique (LDR):**

Le principe utilisé pour le capteur plan repose sur l'exploitation du déséquilibre créé entre les deux cellules séparées par une paroi opaque. La résistance LDR varie sa résistance en fonction de l'éclairement qu'elle reçoit (Figure III-4), ainsi une paroi de LDR montrée sur la figure III-5 nous permet de poursuivre le mouvement du soleil selon l'ombrage produit par la paroi qu'elle sépare.

Les LDR envoient un signal électrique à la carte de conditionnement qui fait l'interfaçage entre LDR et le PIC. Celui-ci lit le signal logique de la carte d'acquisition et fixe le fonctionnement selon le cas.

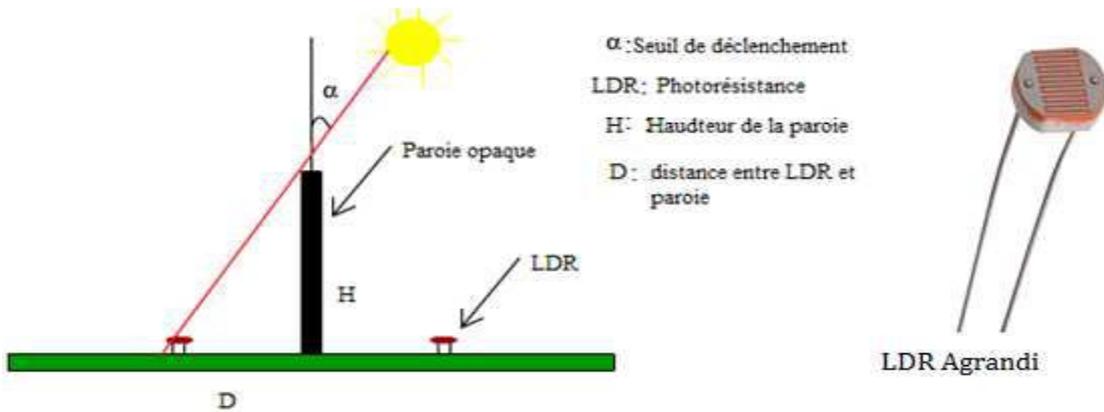


Figure III-4: Schématisation d'un capteur à deux cellules LDR

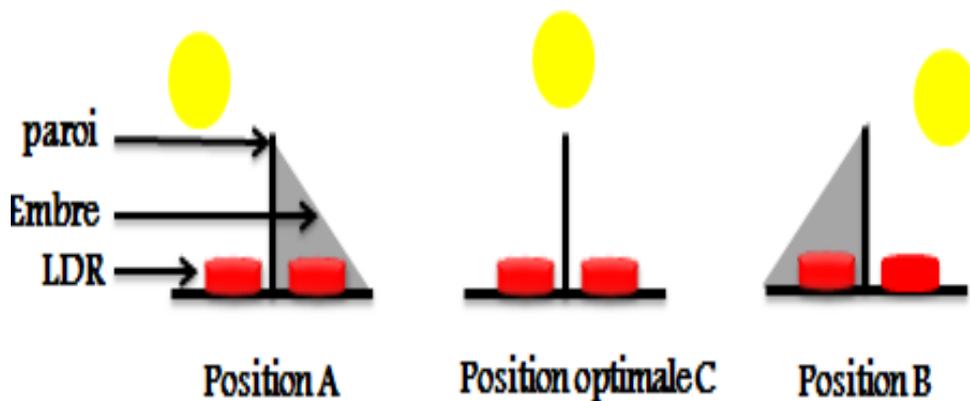


Figure III-5: Fonctionnement des capteurs embarqués

➤ **la carte de conditionnement:**

La carte de conditionnement joue le rôle d'une interface entre le capteur solaire et le microcontrôleur. L'information du capteur, après le conditionnement, est transmise au microcontrôleur qui fonctionne avec le changement du niveau de tension (0V, 5V).

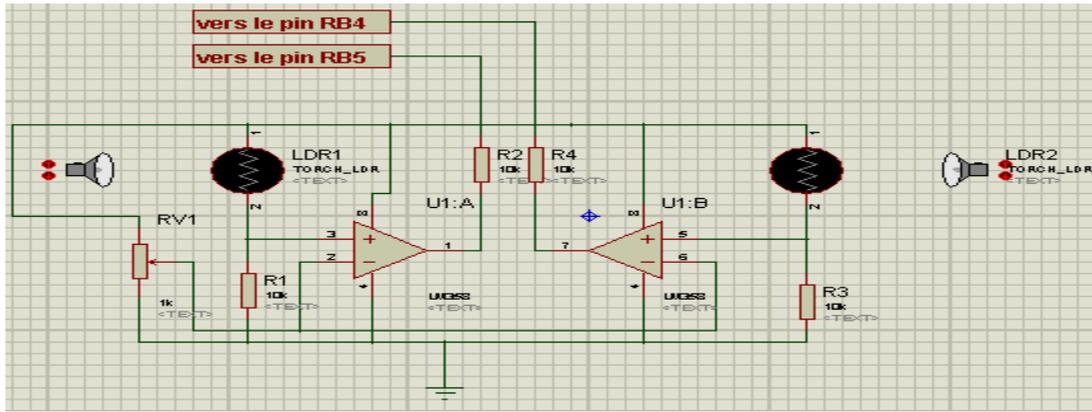


Figure III-6: le circuit de traitement des signaux

Selon la position de capteur solaire (figure III-6) les deux AOP montré en comparateur (sans boucle de retour) compare les tension à leur entrée : (voir l'Annexe a)

- entrée non inverseurs variable par l'effet de l'éclairement (variation du rapport du diviseur de tension "LDR1, R1, LDR2,R3")
- entrée inverseurs dont la tension d'entrée est fixé par la potentiomètre RV1 de sorte que le seuil de tension soit à mi-chemin entre les position A/B et celle optimale.

Le tableau III-1 suivant récapitulé des état des sortie des AOP selon la position de capteur ainsi que le sens de rotation de moteur.

Position	AOP1	AOP2	Relai 1	Relai 2	Moteur
A	1	0	1	0	Marche
B	0	1	0	1	Marche
C	0	0	0	0	Arrête

Tableau III-1: les état de sortie de AOP selon la position de capteur

III-2-3-Bloc de puissance:

La carte de puissance se compose de circuit, qui assure le pilotage de moteur. Il comprend deux transistors de puissance montés avec deux relai qui nécessite une source de tension .

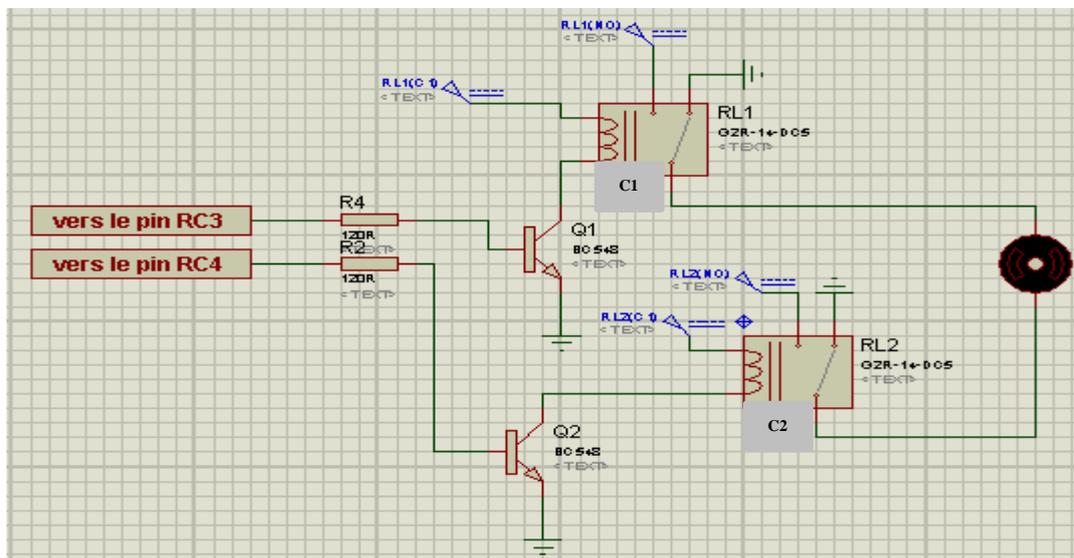


Figure III-7: le circuit de Bloc de puissance

Selon la variation de soleil, le  $\mu c$  existe sont Le **TR1** ou le **TR2** (voir annexe b) qui à suit tous action un relai qu'est alimenter le moteur d'entrainement à travers les contacts **C<sub>1</sub>** ou **C<sub>2</sub>**. Les résistances de base **R<sub>2</sub>** et **R<sub>4</sub>** sont calculé de manière à assure une fonction les Interrupteurs des transistor **TR<sub>1</sub>** et **TR<sub>2</sub>** (régime de saturation).

Avec :

un gain minimum de transistor  $h_{femin} = 110$

et avec

$$I_{sat} = \frac{V_{CC} - V_{cesat}}{R_{bob}} = \frac{15 - 0.2}{0.278} \Rightarrow I_{sat} = 0.053A \tag{III-1}$$

$$I_{bsat} = \frac{I_{csat}}{h_{femin}} = \frac{53.23}{110} = 0.48 mA \tag{III-2}$$

Pour assure la saturation des transistors ou à estimer R4 et R2 :

$$R_{4,2} \leq \frac{5 - V_{besat}}{I_{bsat}} \Rightarrow R_{4,2} \leq \frac{5 - 0.9}{0.48} = 8.45K\Omega \tag{III-3}$$

**III-2-4- programme de commande :**

Le programme de commande géant le microcontrôleur est écrit en langage C à l'aide d'un éditeur (**MikroC**), qui permet d'avoir un code hexadécimal à charger dans l'Eprom du microcontrôleur **PIC16F877A**. (voir annexe c)

**III-2-5- Algorithme du suiveur du soleil:**

L'algorithme de la poursuit (**Figure III-8**) est illustré dans la figure ci-dessous , et est traduit sous forme d'un programme qui assure le position de notre mécanisme

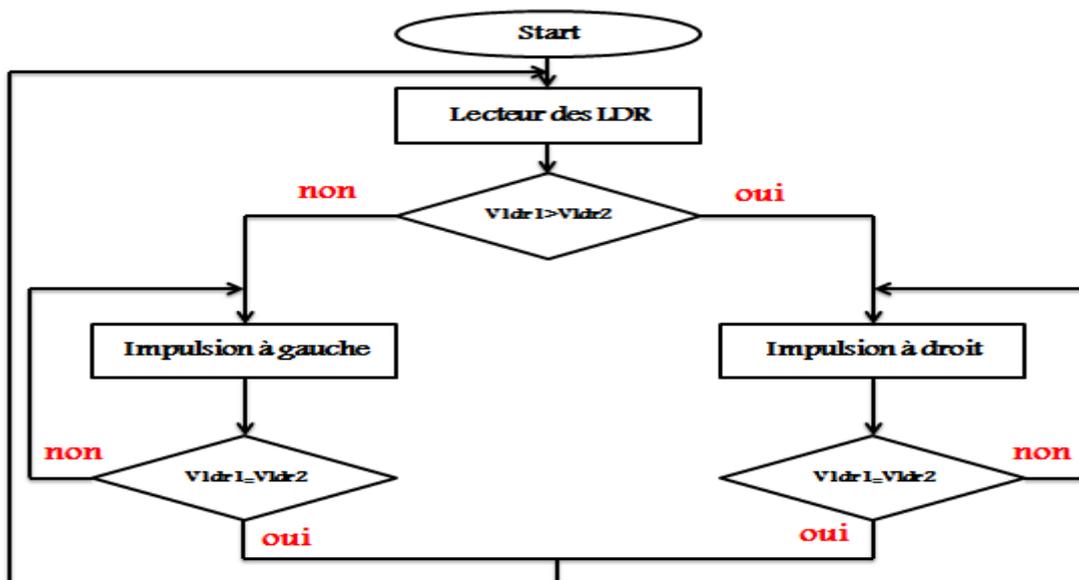


Figure III-8 : Algorithme du suiveur du soleil

➤ La schéma globale du système de poursuite est représenté dans la **Figure III-9**

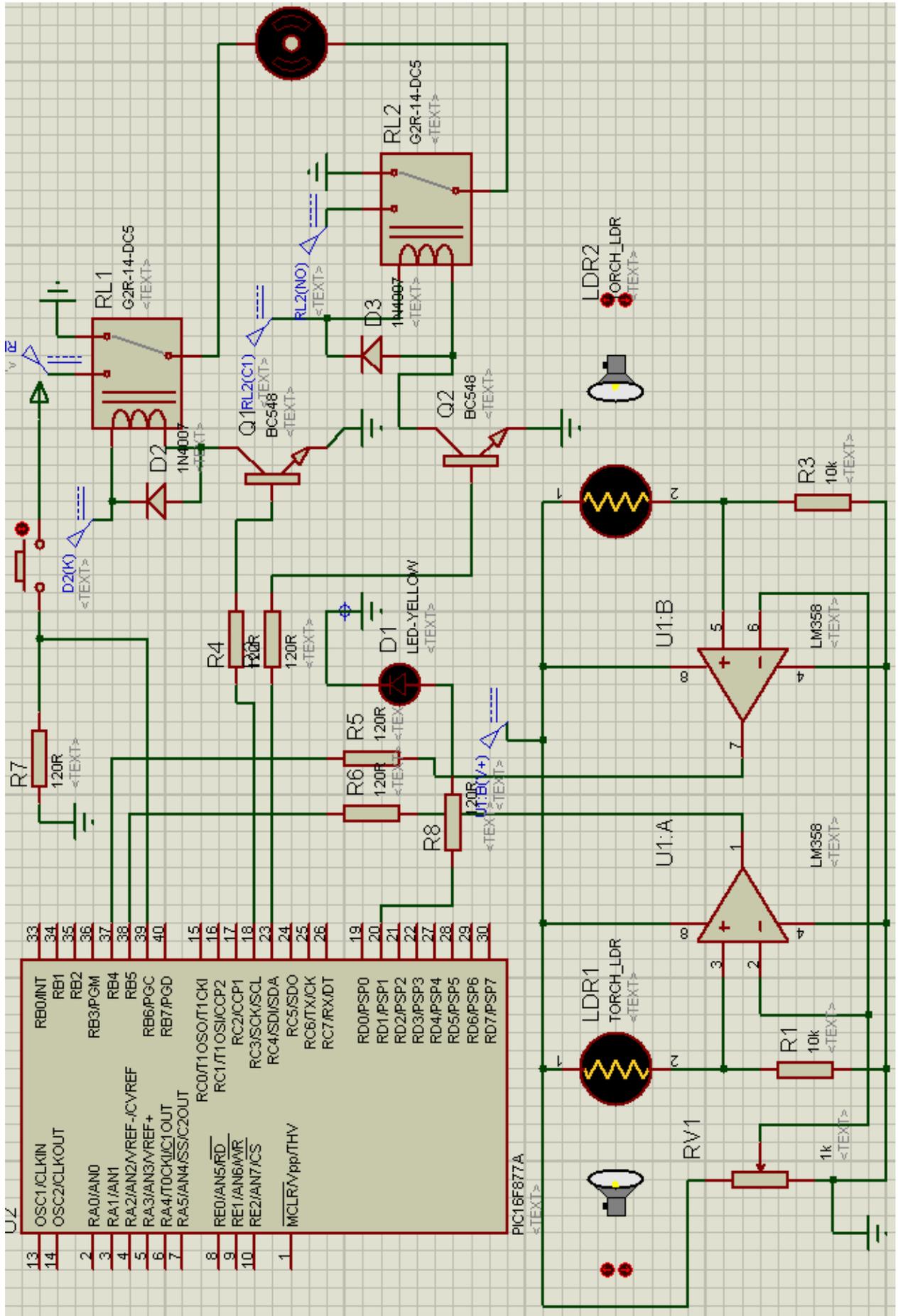


Figure III-9 : Schéma du prototype à réaliser

**Remarque :**

Si seule la fonction de poursuite est à réaliser (on aura paroi à assure cette fonction par le circuit encadré (**Figure III-6**) ) à la base d'une logique câblé et omets le  $\mu c$ .

Ce dernière est introduit pour permettre l'intégration de la **MPPT** ainsi que d'autre fonction supplémentaire.

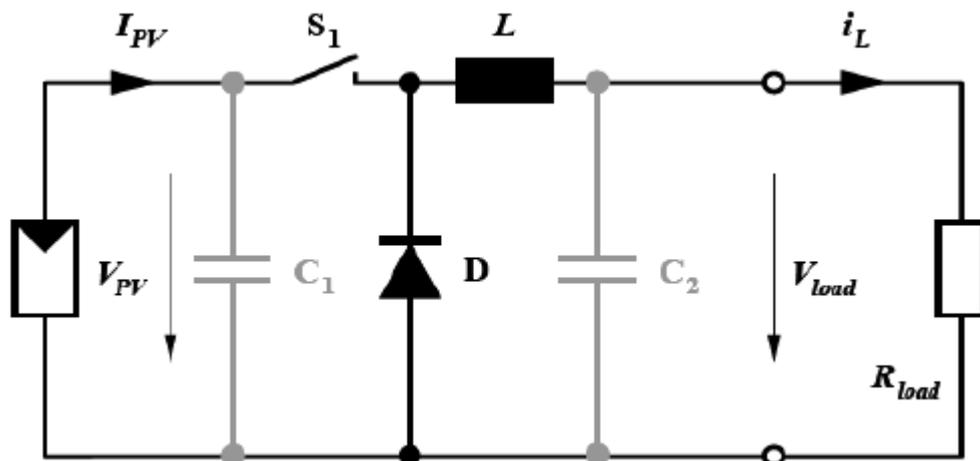
**III-3-Méthodologie de MPPT numérique :**

La méthodologie emprunte pour la réalisation de l'**MPPT** est tel que explique au **chapitre II paragraphe II-5** , l'adaptation d'impédance est assure par un hacheur abaisseur dans ce cas.

Une **MLI** est utilisé pour varie le rapport cyclique de hacheur (résistance équivalent ) afin de fonctionne au point de puissance maximale.

**III-3-1-Bloc de puissance :**

Le schéma du convertisseur abaisseur est repris ci-dessous :



**Figure III-10 :** Schéma du convertisseur Buck alimenté par un GPV

Les caractéristiques techniques du GPV utilisé sont données sur le tableau ci-dessous :

Nombre de cellules	36 en série
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	22 . 3v
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	5.43A
Tension du MPP ( $V_{mpp}$ )	17.14V
Courant du MPP ( $I_{mpp}$ )	5.01A
Puissance maximale ( $P_{mpp}$ )	85 $\mp$ 5%(W)

**Tableau III-2:** caractéristique de **GPV**

Nous avons choisi une batterie au plomb de 12V nominale comme charge. Le rôle du convertisseur est alors d'abaisser la tension  $V_{mpp}$  pour avoir une tension plus adaptée du côté de la charge. Afin de déterminer les valeurs des différents éléments du convertisseur, il est nécessaire de choisir un point de fonctionnement fixe, en l'occurrence, le **MPP**. Ceci nous

amène à établir la valeur initiale du rapport cyclique **D**. À partir de l'équation [II -3], on peut écrire :

$$D = \frac{V_{load}}{V_{pv}} = \frac{12}{17.14} = 0.7 \quad (\text{III-4})$$

➤ **Cahier des charges :**

Le cahier des charges que nous nous sommes imposé est le suivant :

- Ondulation du courant dans l'inductance **L** :  $\Delta i_L = 400\text{mA}$
- Ondulation de la tension aux bornes du condensateur **C<sub>2</sub>** :  $\Delta V_{c2} = 100\text{mV}$
- Ondulation de la tension aux bornes du condensateur **C<sub>1</sub>** :  $\Delta V_{c1} = 100\text{mV}$
- Fréquence de commutation : **f = 2kHz**

➤ **Détermination des valeurs de L, C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> :**

Le choix des éléments se fait en considérant que le convertisseur est en Mode de Conduction Continue. Dans le chapitre précédent, nous avons vu les expressions permettant de déterminer les valeurs de l'inductance **L** et de la capacité du condensateur **C<sub>2</sub>**. Afin de respecter la condition sur l'ondulation du courant de L'inductance imposée par le cahier des charges, l'inductance doit être supérieure à une certaine valeur donnée par l'expression (II-8).

$$L \geq \frac{V_{pv}}{4\Delta i_{Lmax} \times f} \Rightarrow L \geq \frac{17.14}{4 \times 0.4 \times 2 \times 10^3} = 5356.26\mu\text{H} \quad (\text{III-5})$$

La valeur que nous utiliserons est valeur **4mH**

Pour respecter la condition sur l'ondulation de la tension de sortie, la capacité du condensateur **C<sub>2</sub>** doit vérifier l'expression (II-13)

$$C_2 \geq \frac{\Delta i_L}{8\Delta V_{cmax} \times f} \Rightarrow C_2 \geq \frac{0.4}{8 \times 10^{-1} \times 2 \times 10^3} \Rightarrow C \geq 250\mu\text{F} \quad (\text{III-6})$$

La valeur que nous utiliserons (trouvons dans le laboratoire ) est **330μF**

Pour avoir l'ondulation de la tension d'entrée voulue, la capacité du condensateur **C<sub>1</sub>** doit vérifier l'expression (II-18) :

$$C_1 \geq \frac{i_{pv}}{\Delta V_{pvmax} \times f} \Rightarrow 25.05\mu\text{F} \quad (\text{III-7})$$

La valeur que nous utiliserons (trouvons dans le laboratoire ) est **33μF**

➤ **Choix du transistor MOSFET : (voir annexe d)**

Nous avons choisi le **MOSFET IRF630** comme interrupteur statique. Ces caractéristiques principales sont :

- Tension drain-source maximale : **V<sub>DS(max)</sub> = 900V** .
- Courant Drain continu maximal à **25°C : ID = 9A** .
- Tension gate-source maximale **VGS = 10 V** .

Le transistor MOSFET sera entrain à travers un MOSFET driver :

➤ **Choix du Driver de MOSFET : (voir annexe e)**

Le Driver de MOSFET que nous avons sélectionné est le **IR2117** , Ce driver a été choisi car il est dédié à la commande d'un convertisseur Buck, La tension d'alimentation du Driver **V<sub>cc</sub>** s'étend sur une plage de **10V à 20V** et **V<sub>in</sub>** de driver varie entre **0** et **V<sub>cc</sub>** .

Donc il faut ajoutée un circuit intégrée appelée **SN7406** entre le driver de **MOSFET** et le **PIC** pour augmenter l'amplitude de **PWM** à **15V**.

Comme ce dernier circuit les signaux de commande du PIC , qu'ont un niveau logique **0** à **5V**, il faut assure une adaptation des signaux pour assure une commutation adéquate .

Commande de **MOSFET** driver est alimenté par un tension **V<sub>cc</sub>=15V** donc son entré logique **IN** doit basculer entre **0** et **15V** d'où il faut ajusté la tension issue de **PIC** , on utilise dans ce cas un "buffer" dans la sortie est à collecteur ouvert. On utilisant une résistance "pull up resistor" fixé ou potentielle **15V** , avec double inversion ou obtient Une adaptation parfaite .

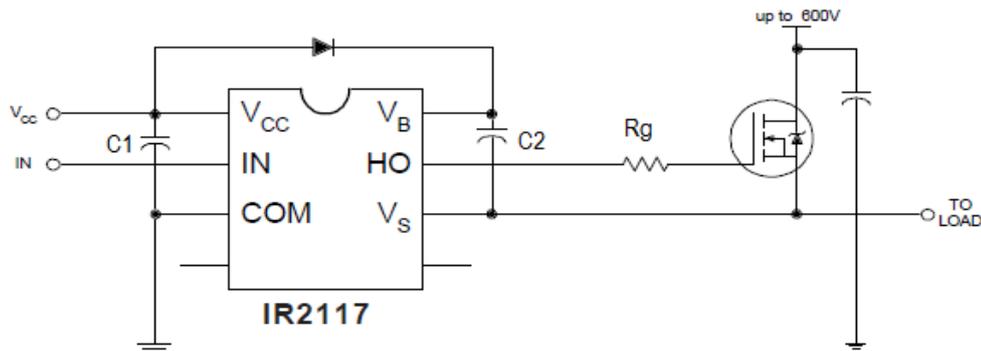


Figure III-11 : figure de driver de MOSFET IR2117

Avec :  $C1=C2= 22\mu f$  .

$R_g= 1 K\Omega$

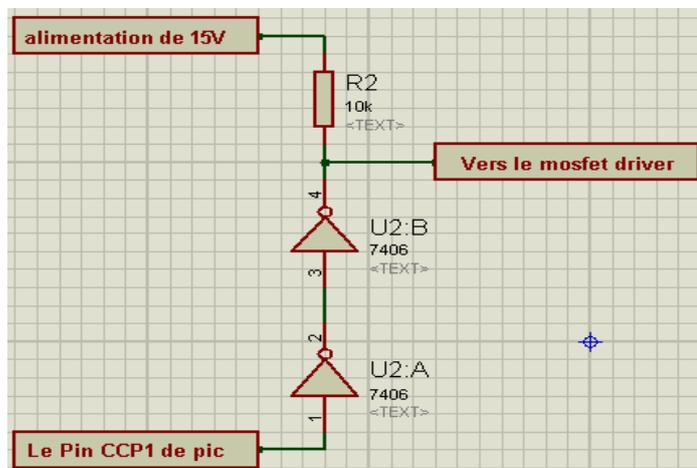


Figure III-12 : le circuit de SN7406

### III-3-2-Bloc de commande :

le bloc de commande est composé de deux parties essentielle : le circuit de mesure qui permet de lire la tension et le courant de notre panneau **PV**. Le deuxième partie, qui constitue en fait de ce bloc est formée par un **PIC 16F877A** , permettant de programmer les différents algorithmes **MPPT**.

#### III-3-2-1- circuit de mesure :

##### ➤ Meure de tension :

La mesure de la tension est nécessaire au calcul de la puissance produite par le **GPV**. Les microcontrôleurs PIC de la famille Mid-Range sont capables de mesurer une tension, car ils sont dotés d'un convertisseur analogique numérique. Cependant, la tension à mesurer pour notre application dépasse le seuil de tolérance du **PIC** qui est de **5V**. Une tension supérieure à **5V** risque de détruire le **PIC**.

Pour éviter cela, il convient d'utiliser un diviseur de tension qui abaissera la tension à mesurer vers le seuil de tolérance du **PIC**.

Nous avons vu que pour la mesure des tensions, on doit recourir à un diviseur de tension pour être dans la gamme de tolérance du **PIC**.

Pour être en sécurité, on choisit **5V** comme valeur maximale côté **PIC**. Pour obtenir la valeur des résistances nécessaires, on utilise la relation :

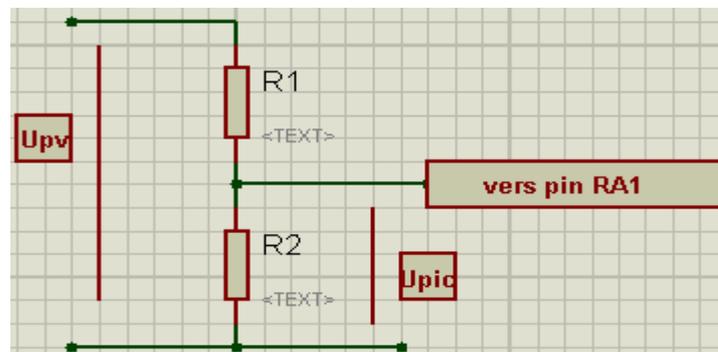


Figure III-13:Schéma de déverseur de tension

$$\frac{U_{PIC}}{U_{PV}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (III-8)$$

On pose :  **$R_2 = 1Kohm$**

$$\Rightarrow \mathbf{R_1 = 3.4Kohm}$$

##### ➤ Mesure du courant :

Les microcontrôleurs **PIC** ne sont pas capables de mesurer un courant. Une méthode indirecte doit être utilisée pour accomplir cette tâche.

Nous avons choisi d'utiliser la méthode de la résistance de mesure série pour sa simplicité et son coût faible. Cette méthode consiste à utiliser une résistance relativement petite (quelques milli ohm).

Le circuit suivant permet de convertir un constante électronique a une tension contenue proportionnelle a une courant  $I_{pv}$ .

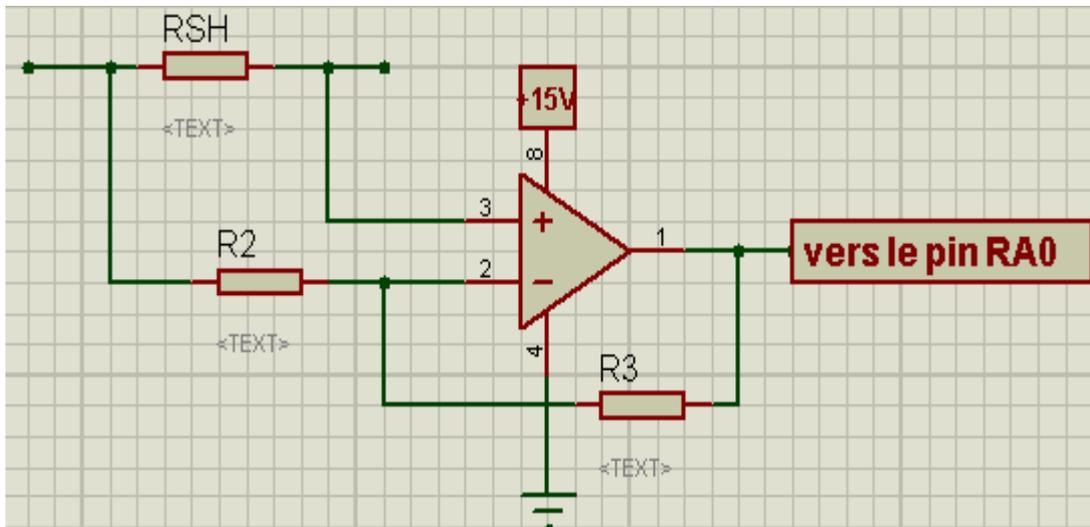


Figure III-14: montage de capteur de courant

Les formule suivantes déterminée les paramètre de ce circuit :

La tension  $V_{PIC} = 5V$

$$V_{pic} = V_{pv}(-R_3/R_2) \quad (III-9)$$

La tension  $V_{Rsh}$  est calculer par la relation :

$$V_{Rsh} = -R_{sh} \times I_{PV} \quad (III-10)$$

Si en choisi une résistance de mesure  $R_{SH} = 0.1\Omega$  et en fixant la tension maximale par le pic, dans ce cas et qui correspondant au constant max de GPV qui est le constante de  $I_{cc}$  donc :

La relation (III-9) s'écrit :

$$5V = (0.1 \times 5.43)(R_3/R_2)$$

Pour  $R_2=1k\Omega \Rightarrow R_3= 9.2 K\Omega$

### III-3-2-2-Le microcontrôleur :

Les PIC sont des microcontrôleurs à architecture RISC (Reduce Instructions Construction Set), ou encore composant à jeu d'instructions réduit. L'avantage est que plus on réduit le nombre d'instructions, plus leur décodage sera rapide ce qui augmente la vitesse de fonctionnement du microcontrôleur.

La famille des PIC est subdivisée en 3 grandes familles :

- **La famille Base-Line** : qui utilise des mots d'instructions de 12 bits.
- **la famille Mid-Range** : qui utilise des mots de 14 bits .

- **la famille High-End** : qui utilise des mots de 16 bits.

Les PIC sont des composants STATIQUES, Ils peuvent fonctionner avec des fréquences d'horloge allant du continu jusqu'à une fréquence max spécifique à chaque circuit.

### III-3-2-2-1-Choix de PIC :

Selon cahier de charge et le les fonction à intégrées on peut choisi tel au tel pic selon les contraint techno économique mise en jeux à notre disposition nous avons plusieurs circuit  $\mu C$ . tel que PIC 16F84, 16F877A , 18F225 et 18F445 doute les fonctions différents .

Pour notre circuit, les fonctions principaux nécessaires au bon fonctionnement du montage sont :

- nécessite d'entrée / sortie numérique
- nécessite de la présence d'un convertisseur A/N (pour la réduire de I et V) .
- un jeux d'interruption
- La présence d'un générateur MLI est préférable.

Selon les composant disponible, on a choisi le pic **16F877A** qui réponde à ces condition tout en restant abordable du point de vue prix .

### III-3-2-2-2- Caractéristiques pic16f877 :

- Consommation : moins de **2mA** sous **5V** à **4 MHz**.
- Architecture RISC : **35** instructions de durée **1** ou **2** cycles.
- Durée du cycle : Période de l'oscillateur quartz divisée par **4** soit **200 ns** pour un quartz de **20 MHz**.
- Deux bus distincts pour le code programme et les data.
- Code instruction : mot de **14** bits et compteur programme (PC) sur **13** bits, ce qui permet d'adresser **8 K** mots ( de **h'0000'** à **h'1FFF'**)
- Bus DATA sur **8** bits.
- **33 Ports** Entrée-Sortie bidirectionnels pouvant produire **25 mA** par sortie.
- PORTA = 6 bits** et **PORTB PORTC** et **PORTD = 8bits** **PORTE = 3 bits** pour le **16F877** et **22 I/O** seulement pour le **16F876**.
- 4 sources d'interruption :
  - Externe par la broche partagée avec le Port **B** : **PB0**
  - Par changement d'état des bits du Port **B**: **PB4 PB5 PB6** ou **PB7**
  - Par un périphérique intégré dans le chip: écriture de Data en **EEPROM** terminée, conversion analogique terminée, réception **USART** ou **I2C**.
  - Par débordement du Timer.
- **2** Compteurs **8** bits et **1** compteur **16 bits** avec pré diviseur programmable.

- Convertisseur analogique **10 bits** à **8** entrées pour le **16F877** et **4** entrées pour le **16F876**.
- **UART** pour transmission série synchrone ou asynchrone.
- Interface **I2C**.
- **2** modules pour **PWM** avec une résolution de **10 bits**.
- Interface avec un autre micro: **8 bits + 3 bits** de contrôle pour **R/W** et **CS**.
- **368 Octets de RAM**
- **256 Octets d'EEPROM Data**.
- **8K** mots de **14 bits** en **EEPROM Flash** pour le programme (**h'000' à h'1FFF'**).
- **1** registre de travail : **W** et un registre fichier : **F** permettant d'accéder à la **RAM** ou aux registres internes du **PIC**. Tous les deux sont des registres **8 bits**.

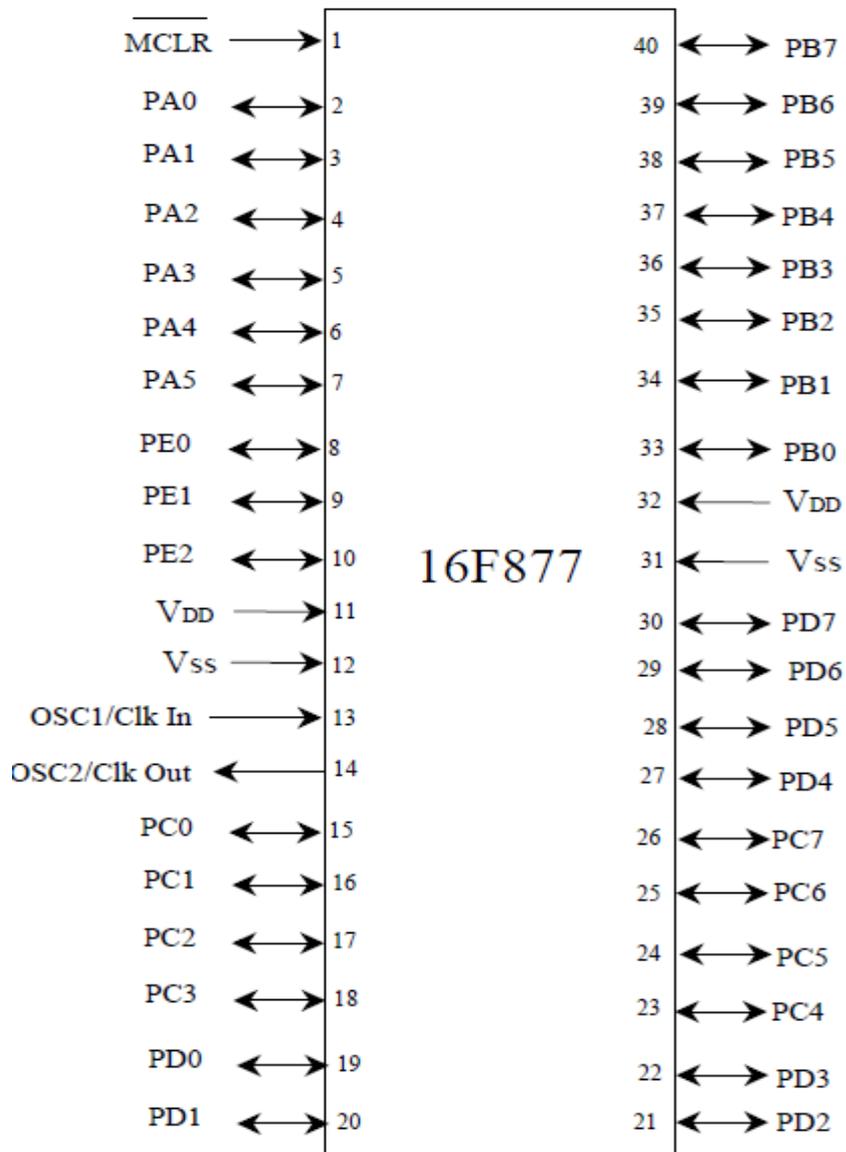


Figure III-15: Broches du PIC 16F877A

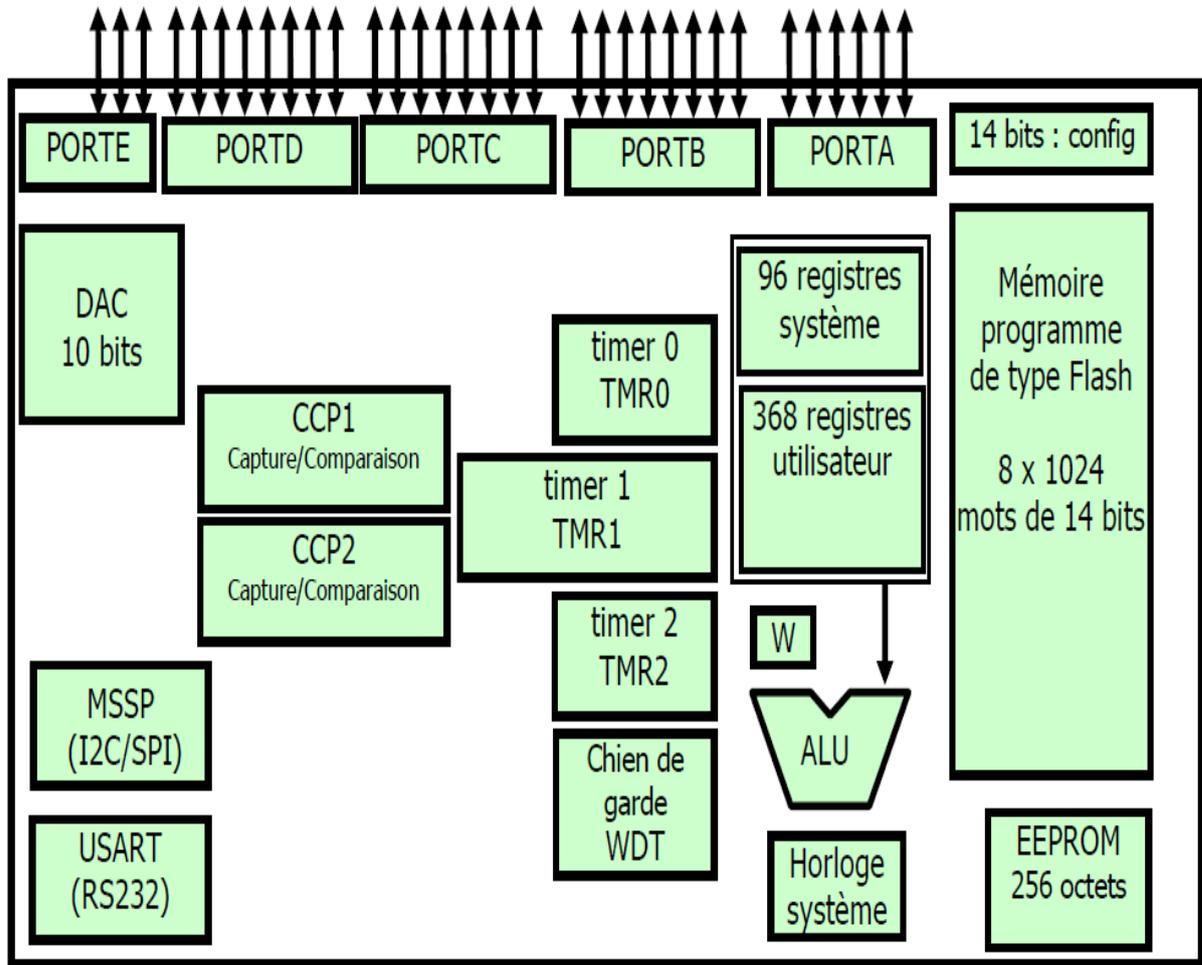


Figure III-16: Les éléments constitutifs du PIC 16F877A

III-3-2-2-3- Description générale de PIC 16F877 :

a) L'Horloge :

L'horloge peut être soit interne soit externe. L'horloge interne est constituée d'un oscillateur à quartz ou d'un oscillateur RC. Avec l'oscillateur à Quartz, on peut avoir des fréquences allant jusqu'à 20 MHz selon le type de  $\mu C$ . Le filtre passe bas ( $R_s$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ) limite les harmoniques dus à l'écrêtage et Réduit l'amplitude de l'oscillation, il n'est pas obligatoire.

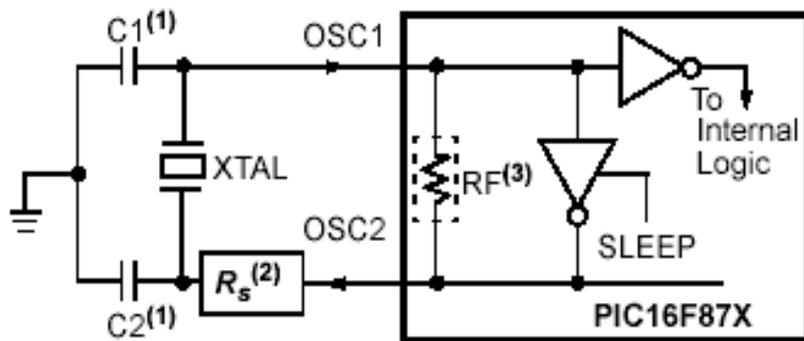


Figure III-17: oscillateur à quartz

Avec un oscillateur **RC**, la fréquence de l'oscillation est fixée par  $V_{dd}$ ,  $R_{ext}$  et  $C_{ext}$ . Elle peut varier légèrement d'un circuit à l'autre.

Dans certains cas, une horloge externe au microcontrôleur peut être utilisée pour synchroniser le PIC sur un processus particulier. Quel que soit l'oscillateur utilisé, l'horloge système dite aussi horloge instruction est obtenue en divisant la fréquence par **4**. Dans la suite de ce document on utilisera le terme **Fosc/4** pour désigner l'horloge système.

Avec un quartz de **4 MHz**, on obtient une horloge instruction de **1 MHz**, soit le temps pour exécuter une instruction de  $1\mu s$ .

#### b) L'ALU et l'accumulateur W :

L'ALU est une Unité Arithmétique et logique **8 Bits** qui réalise les opérations arithmétiques et logique de base. L'accumulateur **W** est un registre de travail **8 bits**, toutes les opérations à deux opérandes passe par lui. On peut avoir :

- Une instruction sur un seul opérande qui est en général un registre situé dans la **RAM**
- Une instruction sur **2** opérandes. Dans ce cas, l'un des deux opérandes est toujours l'accumulateur **W**, l'autre peut être soit un registre soit une constante.

Pour les instructions dont un des opérandes est un registre, le résultat peut être récupéré soit dans l'accumulateur, soit dans le registre lui-même.

#### c) Organisation de la mémoire RAM :

L'espace mémoire RAM adressable est de **512** positions de 1 octet chacune :

- **96** positions sont réservées au **SFR** (Special Function Registers) qui sont les registres de configuration du **PIC**.
- Les 416 positions restantes constituent les registres **GPR** (General Purpose Registers) ou RAM utilisateur. Sur le **16F876** et **16F877**, **3** blocs de **16** octets chacun ne sont pas implantés physiquement d'où une capacité de RAM utilisateur de **368** GPR

#### d) La mémoire EEPROM:

Le **PIC 16F876/877** dispose de 256 octets de mémoire **EEPROM** de donnée. La première position aura l'adresse **0**, la deuxième aura l'adresse **1** . . . et la dernière aura l'adresse **255**.

#### e) Les ports d'E/S :

Le **PIC 16F877** dispose de **33** broches d'entrée sortie regroupées dans **5** ports **PORTA**, **PORTB**, **PORTC**, **PORTD** et **PORTE**. Chaque broche d'un port peut être configurée soit en entrée soit en sortie à l'aide des registres de direction **TRISA**, **TRISB**, **TRISC** et **TRISD** et **TRISE**.

f) Quelques registres de configuration et leurs bits :

STATUS	IRP	RP1	RP0	TO	PD	Z	DC	C	0001 1xxx
OPTION_REG	RBPU	INTEDG	TOCS	TOSE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111
INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x
PIE1	PSPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 0000
PIR1	PSPIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 0000
PIE2	N.I.	Réservé	N.I.	EEIE	BCLIE	N.I.	N.I.	CCP2IE	-r-0 0--0
PIR2	N.I.	Réservé	N.I.	EEIF	BCLIF	N.I.	N.I.	CCP2IF	-r-0 0--0
EECON1	EEPGRD	—	—	—	WRERR	WREN	WR	RD	x--- x000
TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010
RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x
CCPxCON	—	—	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0	--00 0000
T1CON	—	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON	--00 0000
T2CON	—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	-000 0000
SSPCON	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0	0000 0000
SSPCON2	GCEN	ACKSTAT	ACKDT	ACKEN	RCEN	PEN	RSEN	SEN	0000 0000
SSPSTAT	SMP	CKE	D/A	P	S	R/W	UA	BF	0000 0000
CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000
TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010
RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x
CCP2CON	—	—	CCP2X	CCP2Y	CCP2M3	CCP2M2	CCP2M1	CCP2M0	--00 0000
ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON	0000 00-0
ADCON1	ADFM	—	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	0--- 0000
TRISx									1111 1111

Tableau III-3: détail des registres SFR et leurs états au démarrage

g) Les interruptions :

Une interruption provoque l'arrêt du programme principal pour aller exécuter une procédure d'interruption. A la fin de cette procédure, le microcontrôleur reprend le programme principal à l'endroit où il l'a laissé. A chaque interruption sont associées deux bits, un bit de validation et un drapeau. Le premier permet d'autoriser ou non l'interruption, le second permet au programmeur de savoir de quelle interruption il s'agit.

Sur le 16F876/877, les interruptions sont classées en deux catégories, les interruptions primaires et les interruptions périphériques. Elles sont gérées par les registres :

INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF
PIE1 (bk1)	PSPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
PIR1 (bk0)	PSPIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
PIE2 (bk0)	-	-	-	EEIE	BCLIE	-	-	CCP2IE
PIR2 (bk1)	-	-	-	EEIF	BCLIF	-	-	CCP2IF
OPTION_REG(bk1)		INTEDG						

Tableau III-4: les registres des interruptions dans le pic 16F877A

➤ L'interruption INT (Entrée RB0 du port B) : (voir annexe f)

Cette interruption est provoquée par un changement d'état sur l'entrée RB0 du port B quand elle est programmée en entrée. En plus de son bit de validation INTE et son drapeau INTF,

elle est gérée aussi par le bit **INTEDG (OPTION\_REG)** qui détermine le front sur lequel l'interruption se déclenche, **1**=montant, **0**=descendant .

➤ **L'interruption RBI (RB4 A RB7 du port B) : (voir annexe f)**

Cette interruption est provoquée par un changement d'état sur l'une des entrées RB4 à RB7 du port B, Le front n'a pas d'importance. Les bits associés sont RBIE (validation) et RBIF (drapeau).

**h) Les module CCP1 et CCP2 (ccp : capture compare pwm ):**

Chacun des modules **CCP1** et **CCP2** permet :

- Soit de **CAPTURER** en un seul coup le contenu du double registre **TMR1**
- Soit de **COMPARER** en permanence son contenu avec un registre **16 bits** et de déclencher un évènement au moment de l'égalité.
- Mode **PWM** (pulse with modulation): ce mode permet de générer des signaux dans le rapport cyclique est variable

**i) Le module de conversion A/N : (voir annexe g)**

Ce module est constitué d'un convertisseur Analogique Numérique **10 bits** dont l'entrée analogique peut être connectée sur l'une des **8 (5 pour 16F876)** entrées analogiques externes. On dit qu'on a un **CAN** a **8** canaux. Les entrées analogiques doivent être configurées en entrée à l'aide des registres **TRISA** et/ou **TRISE**.

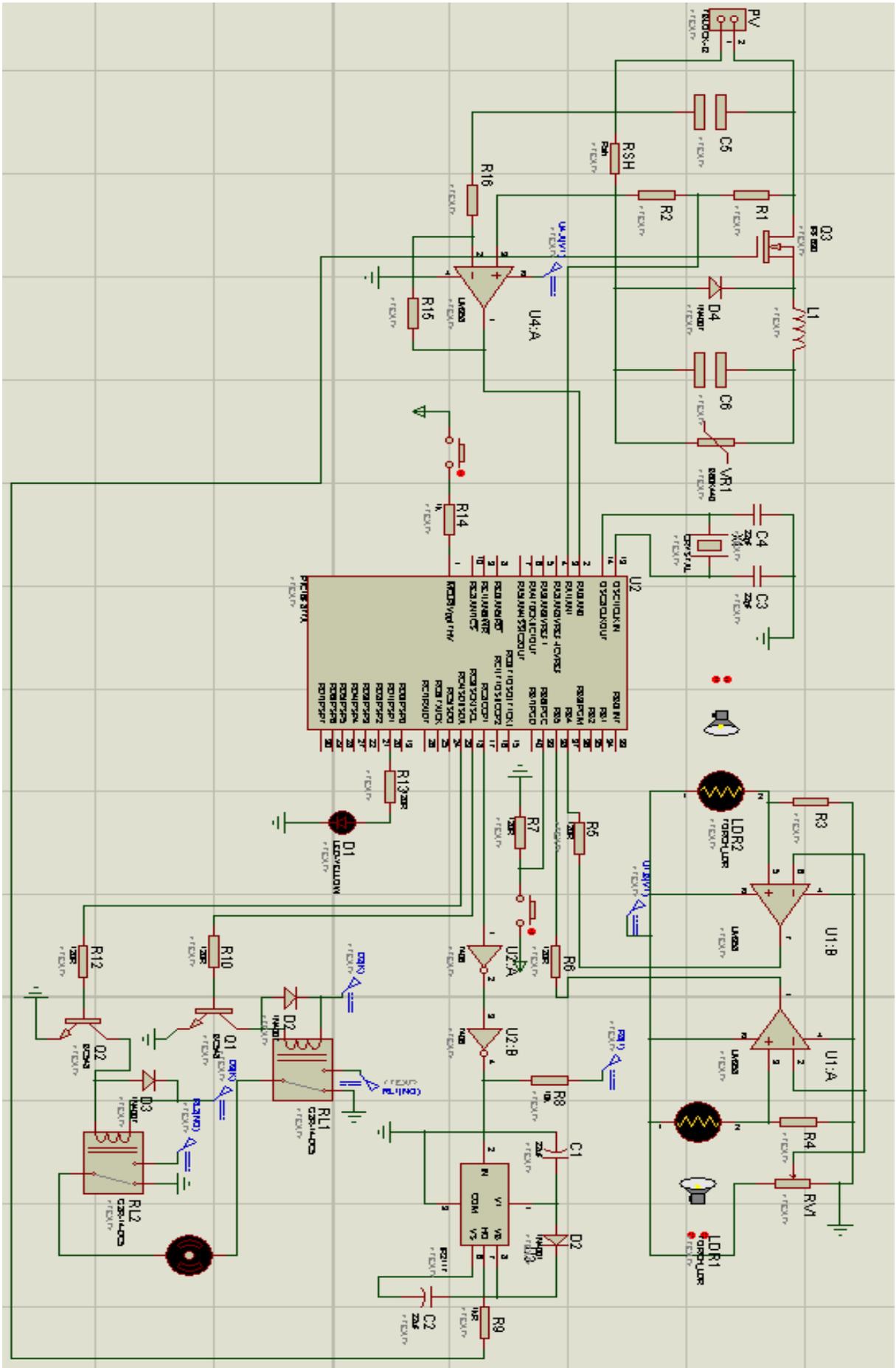


Figure III-18 : Schéma du prototype à réaliser

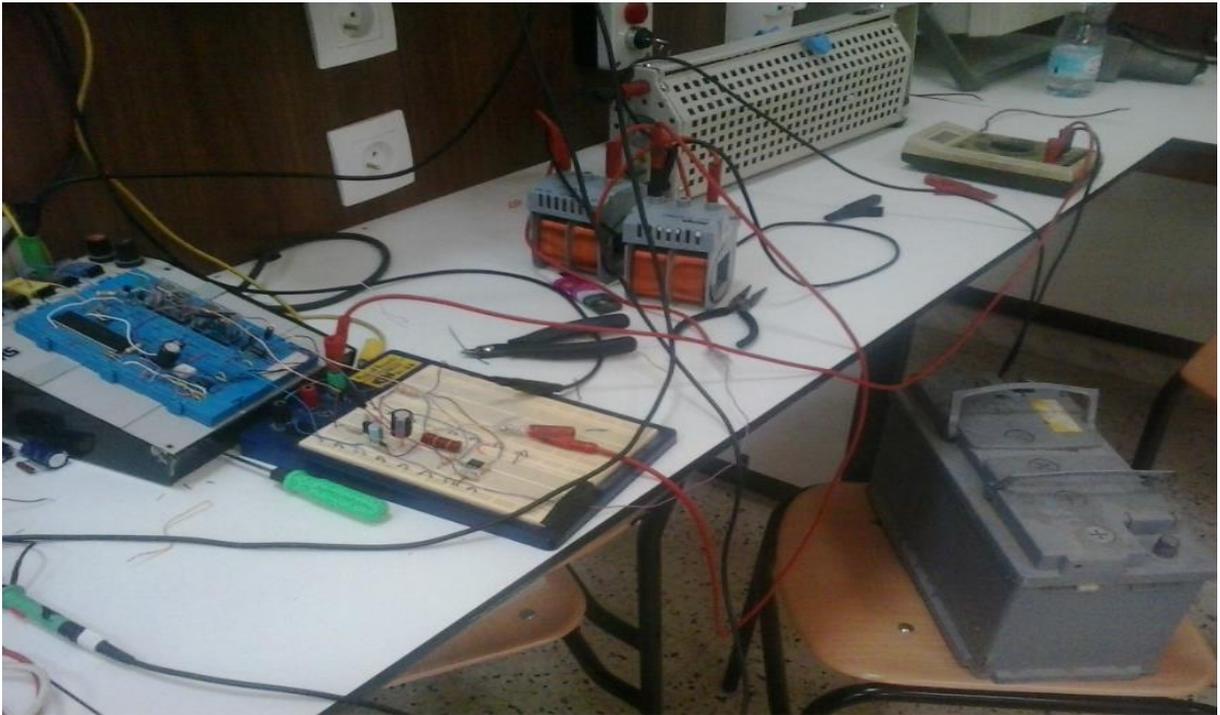


Figure III-19 : le circuit réalisée

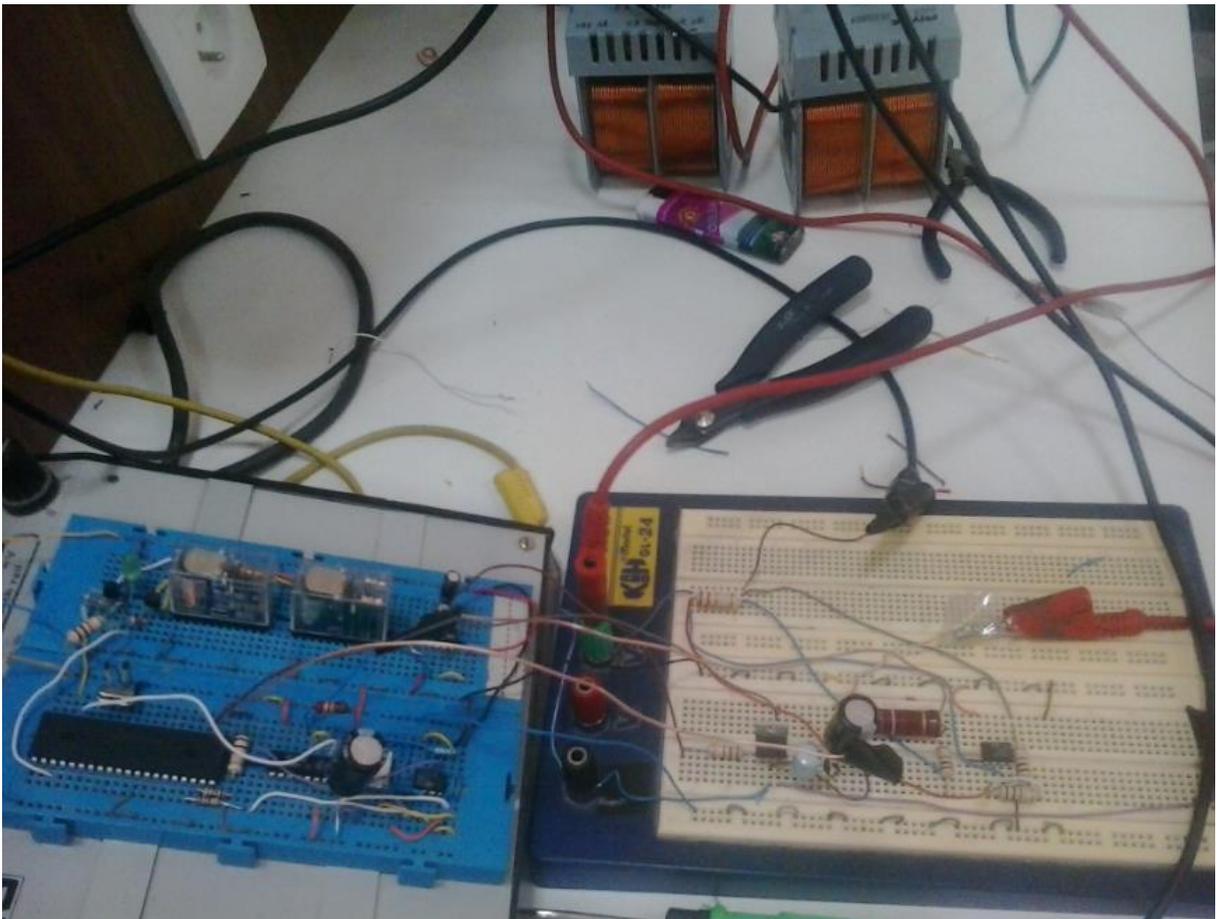


Figure III-20 : le circuit réalisée



Figure III-21 : le panneau solaire avec le suiveur

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes et la méthodologie suivie pour la conception et la réalisation du système de poursuite solaire et le convertisseur **MPPT**. Nous avons ensuite fait le choix des différents composants et nous avons représenté les caractéristique de **PIC** .

## Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire sont focalisés sur l'optimisation de la production d'énergie électrique photovoltaïque ainsi que son transfert vers une charge avec le moins de pertes possibles. Cela permet d'améliorer les performances et le rendement d'un système photovoltaïque qui a un prix d'installation initial très élevée.

Le travail présenté consiste de l'étude et la réalisation pratique d'un système à double fonction :

- La poursuite du soleil par orientation continue du module solaire.
- La maximisation de la puissance issue du module solaire par le poursuit de **PPM**.

Ces deux fonction permettent de maximiser la puissance d'une source **PV**.

La travail est réalisée autour d'un  **$\mu C$  PIC 16F877A** dont la prix est acceptable et l'implantation est facile et ne demande qu'un minimum d'accessoire. Une partie mobile est indispensable "vérin électromécanique" entraîne par un moteur **CC** est indispensable pour l'orientation du module solaire suit aux information issue d'un capteur **LDR**.

De plus, la partie de puissance propose un hacheur abaisseur qui faire le rôle d'un adaptateur d'impédance.

Pour faciliter la réalisation, le module est en première lieu simulé sous logiciel "porteuse isis", puis réaliser sur maquette électronique.

Les résultats, malgré qu'il demande plus d'intention sont prometteuse est nécessite d'être finaliser pour des puissance plus fort, a savoir le champ PV de labo de l'énergie renouvelable **.(3.6 KW)**

## Références Bibliographiques

- [1]K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivié 'Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique', université de maroc ,revue des énergies renouvelables ,pp 451 – 462, 2007.
- [2]P. Stéphane, A. Corinne, E. Bruno « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ».
- [3] S. Abdallah and S. Nijmeh, '*Design, Construction and Operation of One Axis Sun Tracking System with PLC Control*', Jordan Journal Applied Science University, pp. 45 – 53, 2002.
- [4]Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique Ch.Perrinde Brichambourt Ch.vague
- [5]R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [6]J.M.chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, bordas Paris.1984
- [7]R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [8]F.G.Acién Fernandez, F.Garcia Camacho, Modeling of Biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal Cultures, Effects of Dilution Rate ,tube diameter and solar irradiation, Biotechnology and bioengineering. Vol 58, N: 6pp605-616 (1998)
- [9]C.Zidani ,F.Benyarou, Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie. Rev.Energ.Ren, Vol.6, pp69-76,2003.
- [10]M.Angel Cid Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques", Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [11] Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering",JohnWiley& Sons Ltd, 2003
- [12]W.Xiao, "A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method For Photovoltaic Power Systems", The University of British Columbia, 2003
- [13]Adedamola Omole, "Analysis, Modeling and Simulation of Optimal Power Tracking of Multiple Modules of Paralleled Solar Systems", The Florida State University, 2006

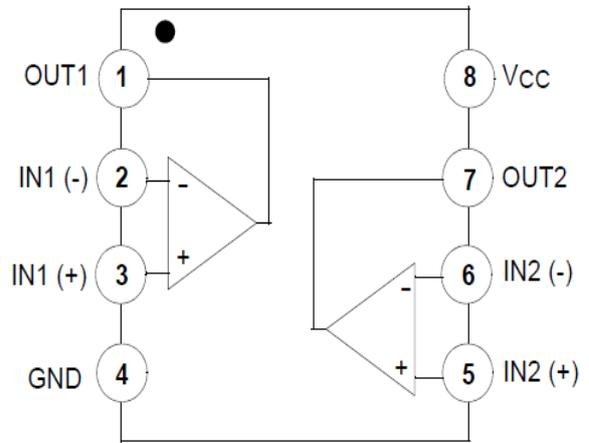
- [14] M. Girard, H. Angelis, M. Girard, "Alimentations à Découpage (2e édition)", DUNOD, 2003
- [15] Akihiro Oi, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of California Polytechnic State University, 2005
- [16] Nattorn Pongratananukul, "Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems", University of Central Florida, 2005
- [17] Cédric Cabal, "Optimisation Energétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Université Toulouse - Paul Sabatier, 2008
- [18] D. Jaume et M. Vergé, "Le calculateur numérique pour la commande des processus", Techniques de l'ingénieur.
- [19] Jean-Paul LOUIS, Claude BERGMANN, "Commande numérique des machines : Évolution des commandes", Techniques de l'ingénieur

**Annexe a : LM358**

**8-DIP**



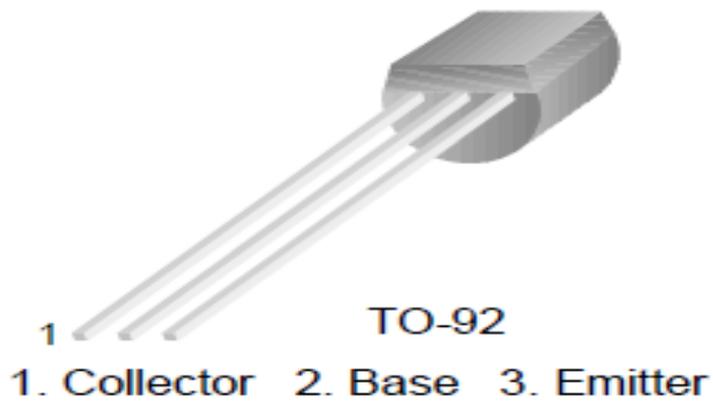
**8-SOP**



**Figure a .1 : AOP Lm358**

**Figure a .2 : branche de LM358**

**Annexe b : BC546**

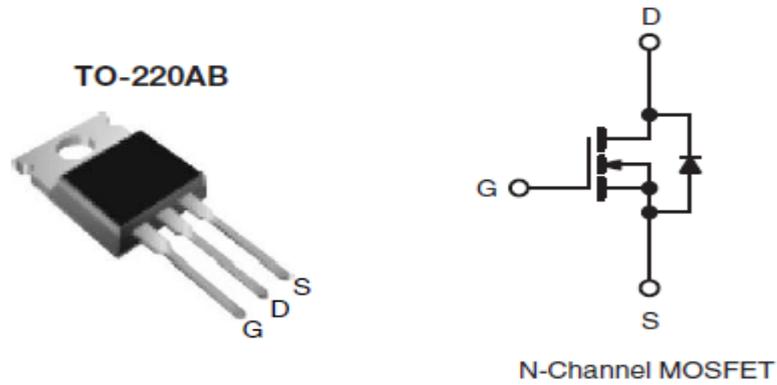


**Figure b.1 : branche de BC546**

## Annexe C : le programme de poursuite solaire

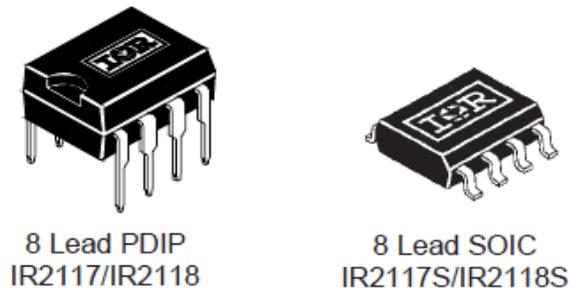
```
void interrupt()
{
if(intcon.RBIF)
{
if(PORTB.B4==1&&PORTB.B5==0){PORTC.B3=1;PORTC.B4=0;delay_ms(100);}
if(PORTB.B4==1&&PORTB.B5==1){PORTC.B3=0;PORTC.B4=0;delay_ms(100);}
if(PORTB.B4==0&&PORTB.B5==0){PORTC.B3=0;PORTC.B4=0;delay_ms(100);}
if(PORTB.B4==0&&PORTB.B5==1){PORTC.B3=0;PORTC.B4=1;delay_ms(100);}
if(PORTB.B6==1){PORTC.B3=1;PORTC.B4=0;delay_ms(20000);}
}
INTCON.RBIF=0;
}
void main()
{
TRISD=0x00;
PORTD=0X00;
TRISC=0x00;
PORTC=0X00;
OPTION_REG.B6=0;
INTCON=0B10001000;
for(;;)
{
PORTD.B1=1;delay_ms(500);PORTD.B1=0;delay_ms(500);
}
}
```

**Annexe d : MOSFET IRF630**

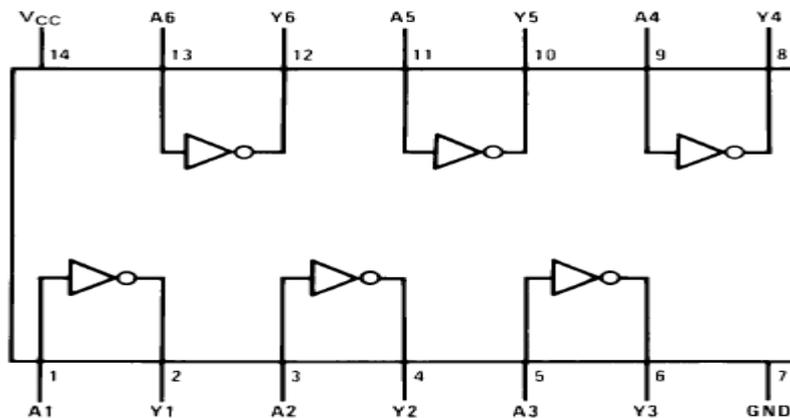


**Figure d .1 : branche de IRF 630**

**Annexe e :IR2117 et SN 4706**



**Figure e.1: IR2117**

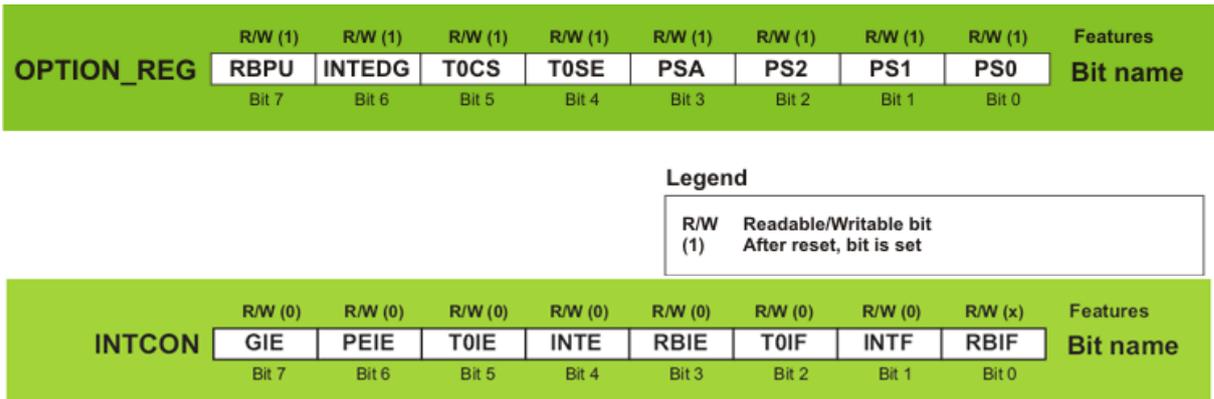


**Figure e.2 : Branche de SN 4706**

## Annexe f : les interruption

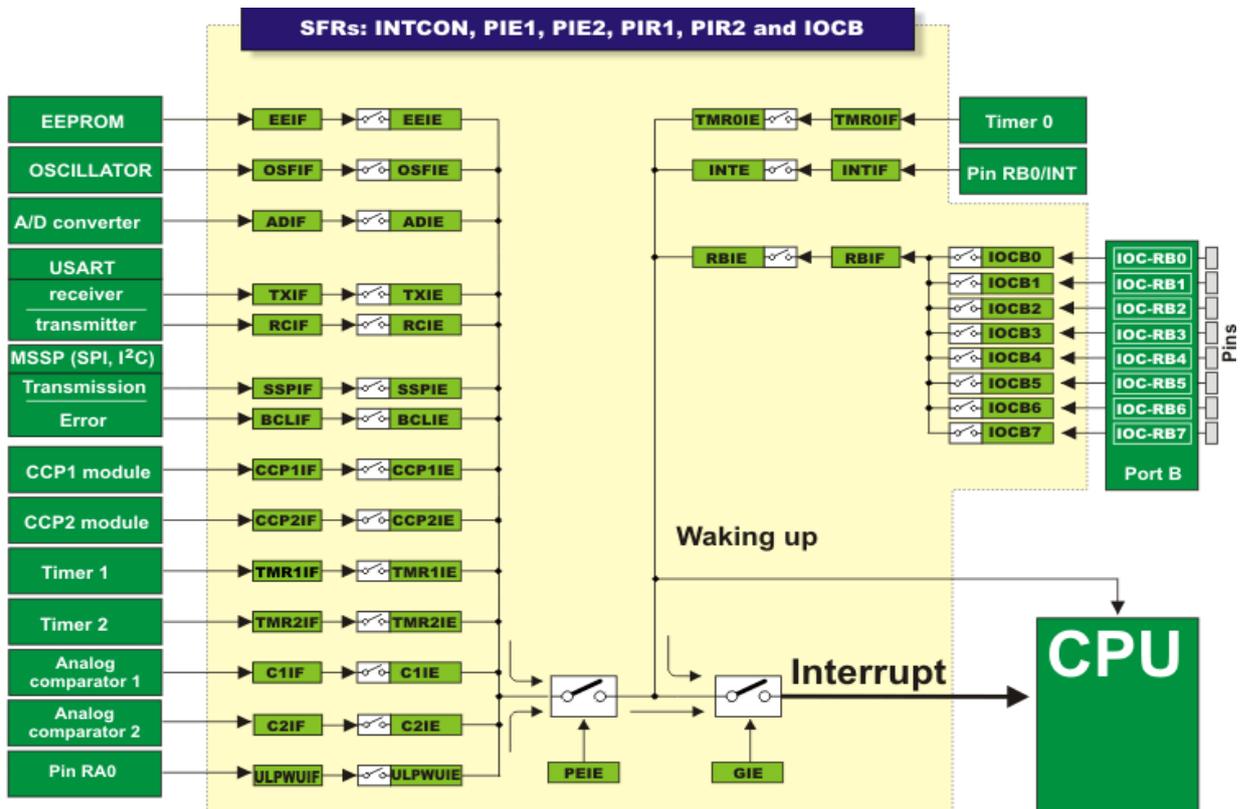
### f.1 - L'interruption INT (Entrée RB0 du port B) :

Cette interruption est provoquée par un changement d'état sur l'entrée RB0 du port B quand elle est programmée en entrée. En plus de son bit de validation INTE et son drapeau INTF, elle est gérée aussi par le bit INTEDG (OPTION\_REG) qui déterminé le front sur lequel l'interruption se déclenche, 1=montant, 0=descendant



### f.1 - L'interruption RBI (RB4 A RB7 du port B) :

Cette interruption est provoquée par un changement d'état sur l'une des entrées RB4 a RB7 du port B, Le front n'a pas d'importance. Les bits associés sont RBIE (validation) et RBIF (drapeau).



Annexe g : Le module de conversion A/N

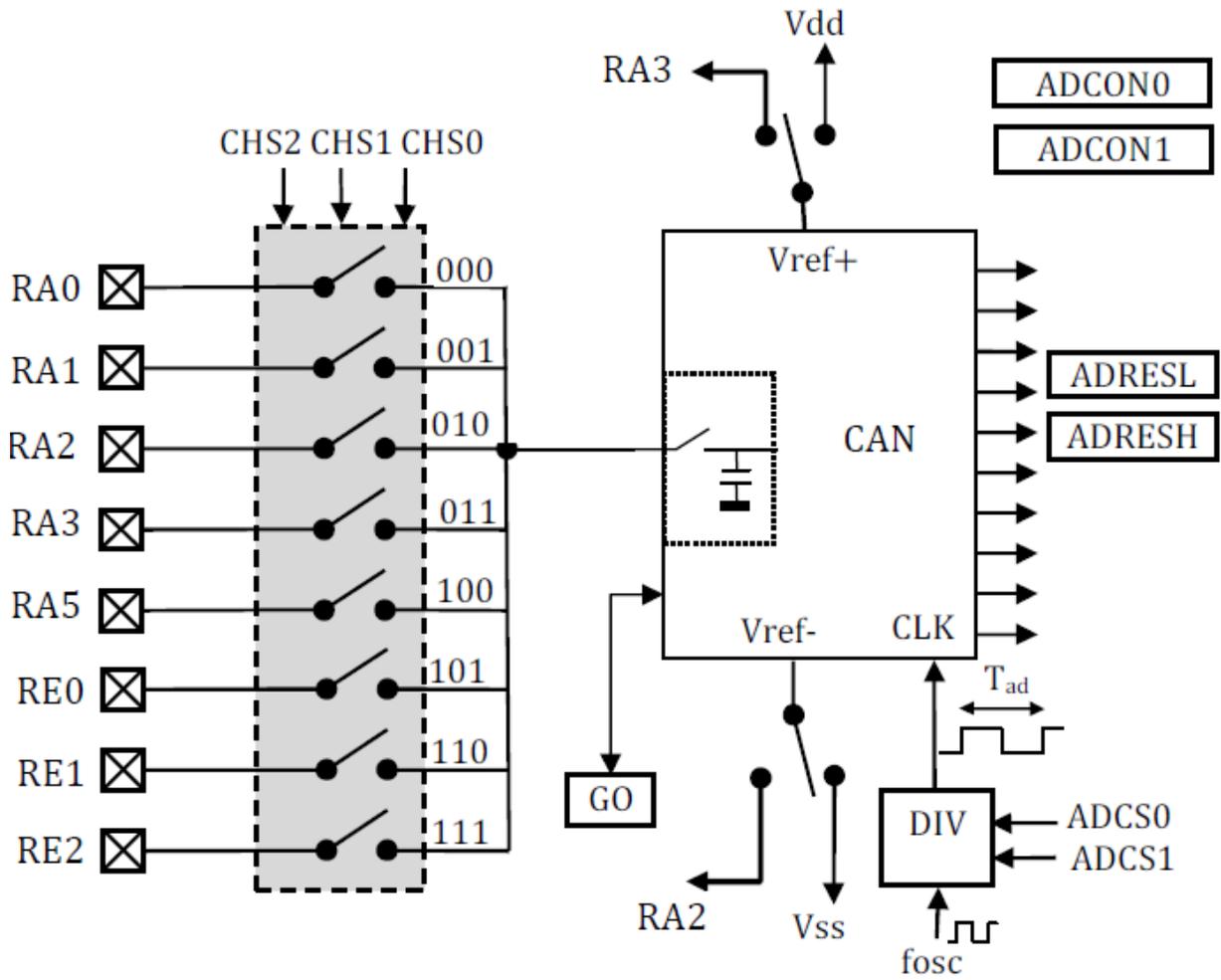


Figure g .1 : schéma bloc simplifié de CAN