

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



*Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou*  
*Faculté de Génie Electrique et d'Informatique*  
*Département d'Electrotechnique*



# Mémoire

*De Fin d'études En vue de*  
*L'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique*  
*Option : Machines électriques*

*Conception d'un circuit d'extraction de  
la puissance maximale d'un  
panneau photovoltaïque à base  
d'un microcontrôleur*

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup> N. BENYAHIA

Présenté par :

M<sup>r</sup> A. BADJI

M<sup>r</sup> H. AKHMOUM



## *Remerciements*

## ***Remerciement***

*En premier lieu, nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur M<sup>r</sup> N. BENYAHIA pour ses conseils judicieux, son suivi attentif et sa confiance qui nous a été très précieuse. De plus, nous tenons à le remercier pour nous avoir assuré l'encadrement et la documentation nécessaire pour l'élaboration de ce mémoire.*

*A l'issue de ce projet de fin d'étude, nous souhaitons remercier M<sup>r</sup> N. BENAMROUCHE responsable du laboratoire LATAGE pour nous avoir accueillis au sien du laboratoire.*

*Nous tenons également à remercier M<sup>r</sup> B. BOUKAIS, M<sup>r</sup> H. SEDIKI, M<sup>r</sup> A. BARCHEHE, et M<sup>elle</sup> R. KACHENORA pour leurs précieuses aides, et leur entière disponibilité.*

*Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Nous remercions l'ensemble des enseignants et les membres du personnel pour leurs aides et leurs disponibilités tout au long de cette période passée à l'UMMTO.*

*Sans oublier les membres de jury qui nous feront l'honneur d'examiner notre travail.*

*Merci*

## *Dédicaces*

# *Dédicaces*

**Je dédie ce modeste travail à:**

- ❖ *Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé ;*
- ❖ *Mes frères « MAHMOUD, HAMID, KRIM » ;*
- ❖ *Mes sœurs « CHAFIAA, ZAHOUA, SOUHILA » ;*
- ❖ *Mon neveu « Rayane »*
- ❖ *Mes cousins, cousines et toute la famille ;*
- ❖ *Tous mes amis sans exception ;*
- ❖ *A la mémoire de mes grands parents et ma cousine*

*A.HAKIM*

**Je dédie ce modeste travail à :**

- ❖ *Mes chers parents ;*
- ❖ *Mes frères et sœurs ;*
- ❖ *Toute la famille ;*
- ❖ *Tous mes amis (es).*

*B.ABDERRAZAK*

## *Sommaire*

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Systèmes photovoltaïques autonomes.....</b>	<b>2</b>
I.2.1 Topologie type 1 .....	2
I.2.2. Topologie type 2.....	3
I.2.3. Topologie type 3.....	3
I.2.4. Topologie type 4.....	4
<b>I.3. Commande MPPT des convertisseurs DC/DC .....</b>	<b>4</b>
I.3.1. Méthodes de contre réaction de tension .....	5
I.3.1.1. Méthode à tension de référence fixe.....	6
I.3.1.2. Méthode PPM avec $V_{co}$ du panneau .....	6
I.3.1.3. Méthode MPPT avec cellule pilote.....	7
I.3.2. Méthode de la dérivée de la puissance .....	7
I.3.2.1. Méthode de perturbation et observation ( $P \& O$ ).....	8
I.3.2.2. Méthode par incrémentation de conductance .....	8
I.3.3. Méthode avec contre réaction du courant .....	11
<b>I.4. Conclusion.....</b>	<b>12</b>

## Chapitre II: Modèle et dimensionnement

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>II.2. Modèle de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>13</b>
<b>II.3. Résultats de simulation .....</b>	<b>15</b>
II.3.1. Association de cellules photovoltaïques en série .....	18
II.3.2. Association de cellules PV en parallèle .....	18
<b>II.4. Validation du modèle mathématique.....</b>	<b>19</b>

<b>II.5. Etude et réalisation du convertisseur .....</b>	<b>20</b>
II.5.1. Hacheur survolteur (boost) .....	20
II.5.2. Dimensionnement du convertisseur .....	21
II.5.2.1. Calcul de l'inductance de lissage $L_l$ .....	21
II.5.2.2. Calcul du condensateur de filtrage de bus .....	23
<b>II.6. Conclusion.....</b>	<b>24</b>

## **Chapitre III: configuration et programmation du PIC16F877A**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>25</b>
<b>III.2. Qu'est ce qu'un microcontrôleur ou PIC .....</b>	<b>25</b>
III.2.1. Principes caractéristiques du PIC 16F877A .....	25
III.2.2: Architecture interne de PIC 16F877A .....	27
III.2.3. Brochage du PIC 16F877A .....	28
<b>III.3. Différentes étapes de la configuration de PIC.....</b>	<b>28</b>
III.3.1. La conversion analogique numérique (A/N) .....	30
III.3.2. Génération d'un signal PWM « MLI » .....	33
III.3.2.1. Les registre utilisés pour la PWM .....	35
III.3.2.2. Initialisation correspondant à ce mode PWM.....	36
<b>III.4. Choix du compilateur .....</b>	<b>37</b>
III.4.1. Présentation de <i>MPLAB IDE</i> .....	37
III.4.2. Création d'un nouveau projet .....	37
<b>III.5. Conclusion .....</b>	<b>42</b>

## **Chapitre IV: Conception et réalisation du convertisseur MPPT**

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>IV.2. Description de l'installation .....</b>	<b>43</b>
<b>IV.3. Description de la commande MPPT à réalisée.....</b>	<b>44</b>
<b>VI.4. Présentation du prototype .....</b>	<b>46</b>



IV.4.1. Bloc d'alimentation .....	46
IV.4.2. Conception de l'unité de mesure .....	48
IV.4.3. Conception de l'unité de contrôle.....	49
IV.4.4. Réalisation du convertisseur <i>BOOST</i> .....	51
<b>IV.5. Essais expérimentaux .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.6. Conclusion .....</b>	<b>55</b>
<b><i>Conclusion générale</i>.....</b>	<b>56</b>
<b><i>Annexes</i> .....</b>	<b>57</b>

## ***Nomenclature***

## *Nomenclature*

$I_{ph}$  : courant généré par les photons ou photo-généré

$I_{PV}$ ,  $V_{PV}$  : courant et tension fournis par la cellule.

$I_D$  : courant de la diode donné par :

$q$  : charge de l'électron =  $1.6 \times 10^{-19}$  C.

$K$  : constante de Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>.

$V_{pv}$  : tension de panneau ;

$D$  : diode ;

$C_s$  : condensateur de filtrage de la tension ;

$I_c$  : courant qui traverse le condensateur ;

$I_{Bus}$  : courant de la charge ;

$V_{bus}$  : la tension aux bornes de la charge,

$\alpha$  : le rapport cyclique,

$I_{Lmoy}$  : courant moyenne aux bornes de l'inductance,

$T$  : période de découpage du signal de commande de l'interrupteur [s] ;

$\alpha$  : rapport cyclique du signal de l'interrupteur ;

$I_{Lm}$  : courant minimum dans l'inductance [A] ;

$I_{LM}$  : courant maximum dans l'inductance [A] ;

$\hat{I}_L$  : ondulation de courant dans l'inductance [A] ;

$C_f$  : valeur du condensateur de filtrage [F] ;

$I_L$  : courant dans l'inductance [A] ;

$V_{cm}$  : tension minimale aux bornes du condensateur [V] ;

$V_{cM}$  : tension maximale aux bornes du condensateur [V] ;

$\hat{V}_{Bus}$  : ondulation de tension aux bornes du condensateur [V] ;

$L_l$  : valeur de l'inductance de lissage [H].

## *Introduction générale*

## *Introduction générale*

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe des rayonnements solaires en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque *PV* basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice, lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. L'association de plusieurs cellules en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque *GPV* qui a une caractéristique courant-tension ( $I-V$ ) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique  $I-V$  d'un panneau photovoltaïque dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, le point de fonctionnement de ce dernier dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible, un étage d'adaptation entre le générateur et la charge contrôlé par un régulateur est introduit.

Certains régulateurs recherchent le point de puissance maximale *PPM* qui correspond à une tension et un courant de panneau *PV* optimaux (nommés respectivement  $V_{opt}$  et  $I_{opt}$ ) pour lesquels la puissance maximale dépend d'un certain nombre des paramètres météorologiques, tel que le niveau d'irradiation solaire et la température.

Les problèmes techniques dont souffre l'énergie photovoltaïque actuellement est le manque de compétitivité par rapport aux autres solutions, le fait d'être une source intermittente d'électricité difficile à anticiper et à contrôler la rend difficile à exploiter. La question du prix élevé de l'électricité photovoltaïque est également souvent avancée comme un frein important au développement de cette ressource énergétique. L'objectif de notre travail est orienté dans le sens de développement d'un étage d'adaptation à faible coût. Par conséquent, une réalisation électronique d'une commande *MPPT* (maximum power point tracking) numérique à base du microcontrôleur *PIC* de la série *16F* s'avère une solution intéressante pour rendre cette ressource énergétique attractive.

Au début de ce présent mémoire, nous présenterons les différents types de solution des systèmes photovoltaïques autonomes ainsi que les différentes méthodes *MPPT* utilisées pour extraire le maximum de puissance des panneaux photovoltaïques. Nous passerons ensuite à la modélisation et la simulation du panneau photovoltaïque avec validation expérimentale du modèle du panneau, nous terminons cette partie par un dimensionnement du convertisseur. Dans le troisième chapitre, nous détaillerons les différentes étapes de la configuration et la programmation du *PIC*. Finalement, nous présenterons, le détail de la réalisation électronique de cette commande numérique et les résultats expérimentaux obtenus.

## ***Chapitre I***

### ***Généralités sur les systèmes photovoltaïques***

## I.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque est l'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable qui suscitait un intérêt croissant ces dernières années. Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont les suivants : propre, plus de disponibilité par rapport à d'autres sources d'énergie, capacité de puissance élevée par unité de poids, très modulaires, et peu d'entretien. [1]

En raison du coût initial élevé du panneau photovoltaïque, il est important de les utiliser efficacement et d'en extraire le maximum de puissance possible. La caractéristique  $I = f(V)$  des cellules solaires est affectée par les conditions de rayonnement et de température. L'extraction de la puissance maximale se fait par le contrôle de la tension et du courant, des techniques dit « *MPPT* » sont utilisées pour atteindre cet objectif. Beaucoup de techniques de contrôle *MPPT* ont été discutées dans la littérature. [4] La technique de la conductance incrémentielle est la *MPPT* la plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques. [1]

## I.2. Systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont équipés en plus du système d'extraction de la puissance maximale, d'un dispositif de stockage. Ce dernier est muni à son tour d'un gestionnaire de la puissance, quand la puissance disponible au panneau *PV* est inférieure à celle requise par la charge, ce dispositif doit fournir cette différence de puissance. Quand la puissance disponible au panneau *PV* est supérieure à la puissance exigée par la charge, l'excès devrait être employé pour charger le dispositif de stockage. Il existe plusieurs topologies, nous citons quelques unes :

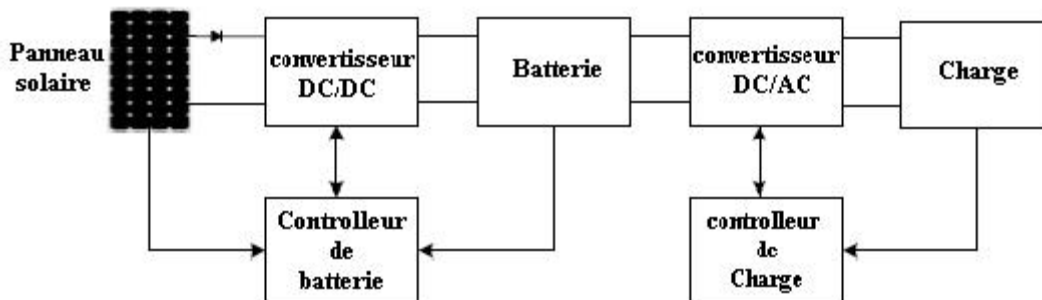


Figure I.1 : Connexion PV-batterie (type 1)

### I.2.1 Topologie type 1

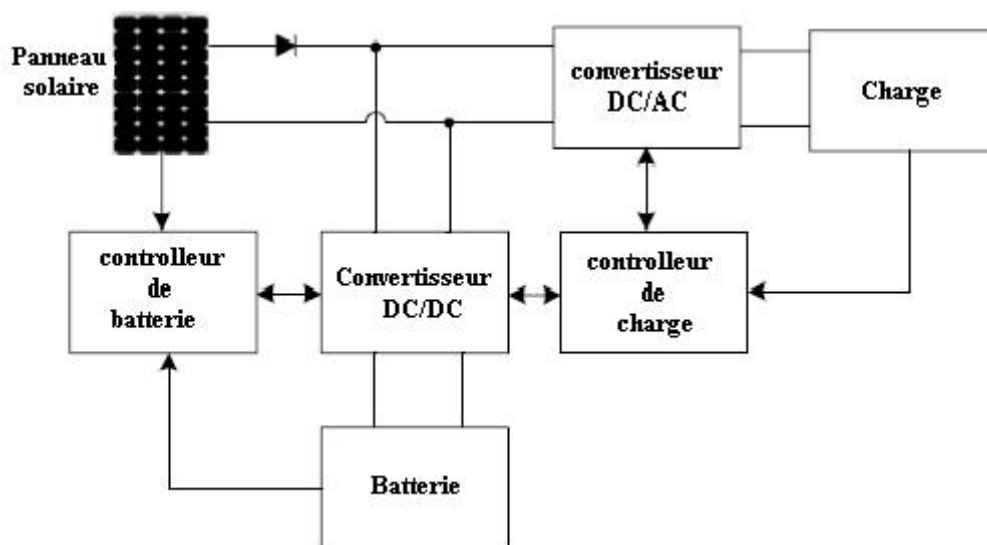
Une topologie du raccordement du (*PV-batterie*) est montrée sur le schéma de la **figure I.1**, dans cette dernière, le convertisseur *DC/DC* est employé pour capturer toute la puissance disponible au *PV*. La batterie agit en tant qu'amortisseur d'énergie, cette énergie est transférée vers la charge par le biais d'un convertisseur *DC/AC*. Le contrôleur de la batterie détermine l'état de cette batterie selon le *PPM* des panneaux solaires. Quand il n'y a aucun rayonnement solaire, le débranchement du convertisseur *DC/DC* est nécessaire, dans ce cas l'énergie emmagasinée dans la batterie va être transférée automatiquement vers la charge. La taille de

la batterie devrait être choisie de sorte qu'elle puisse satisfaire toutes les demandes de puissance pendant une période sans aucune rupture. [5]

### I.2.2. Topologie type 2

Dans la topologie du raccordement représentée sur la **figure I.2**, la batterie est reliée en parallèle au panneau solaire au lieu d'un raccordement en cascade, dans cette topologie, les deux convertisseurs  $DC/DC$  et  $DC/AC$  jouent le rôle de contrôleurs de la demande de puissance de la charge et la capture de puissance disponible à la sortie du panneau solaire. Cette topologie exige une stratégie plus compliquée du point de vue commande en comparaison à la topologie de type I, puisque elle exige l'opération synchronisée des convertisseurs.

Dans le cas où la puissance débitée par le panneau solaire est supérieure à celle consommée par la charge, le convertisseur  $DC/DC$  devrait charger la batterie. Le panneau solaire devrait assurer le transfert d'énergie vers la charge par l'intermédiaire du convertisseur  $DC/AC$ , dans le cas où la puissance est insuffisante, l'énergie stockée dans la batterie ne devrait être transférée à la charge qu'à travers le convertisseur  $DC/AC$ . Cette topologie exige un  $DC/DC$  bidirectionnel pour la charge et la décharge de la batterie. [5]



*Figure I.2 : Connexion PV-batterie (type 2)*

### I.2.3. Topologie type 3

Dans cette représentation, la batterie est reliée au bus continu par un convertisseur bidirectionnel  $AC/DC$ . Dans ce type de topologie, le convertisseur  $DC/AC$  devrait contrôler la puissance du panneau et son transfert vers la charge. [5]



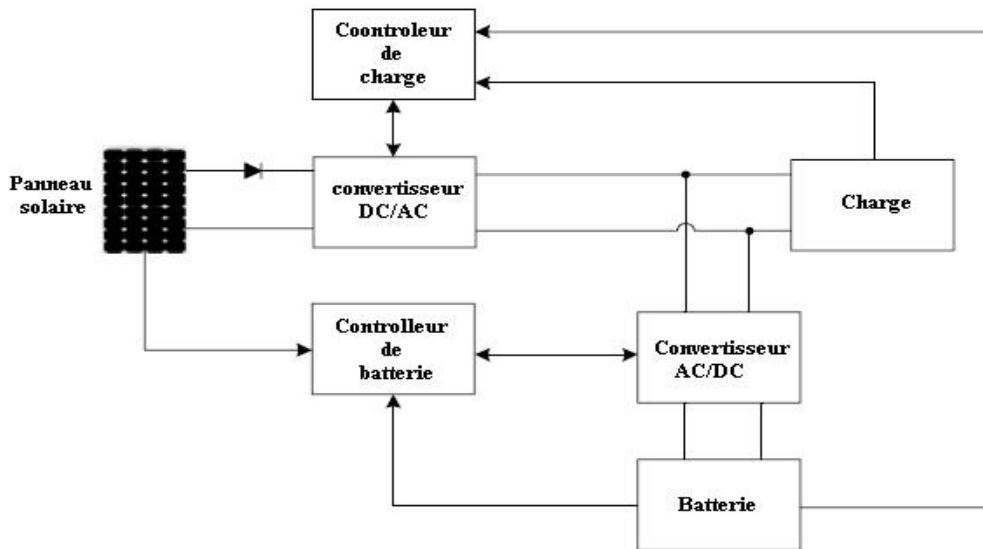


Figure I.3 : Connexion PV-batterie (type 3)

#### I.2.4. Topologie type 4

Dans cette topologie, le panneau photovoltaïque et la batterie sont équipés de leurs propres convertisseurs  $DC/DC$ . Un convertisseur  $DC/AC$  est utilisé pour assurer le transfert de l'énergie à la charge. Le convertisseur du panneau photovoltaïque doit être unidirectionnel, par contre celui de la batterie devrait être un convertisseur bidirectionnel, pour permettre la charge et la décharge de la batterie. [5]

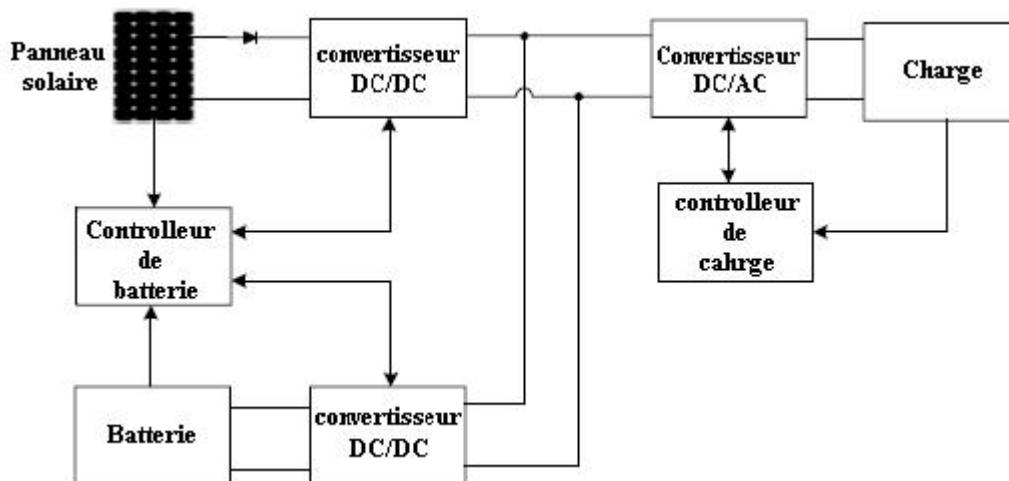
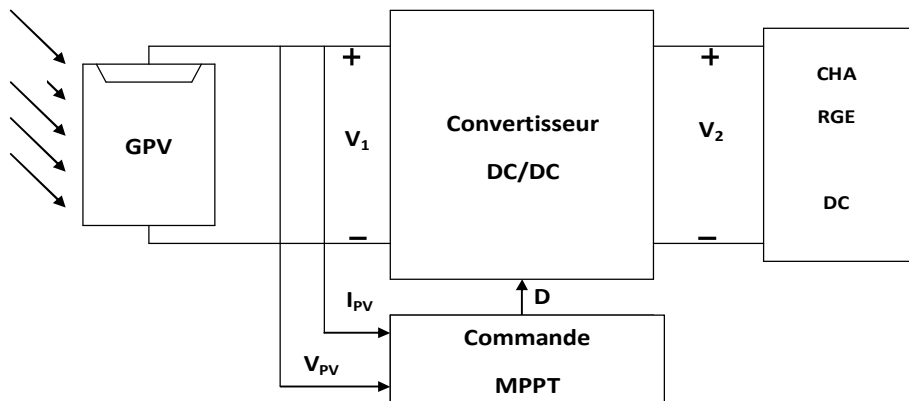


Figure I.4 : Connexion PV-batterie (type 4)

### I.3. Commande MPPT des convertisseurs DC/DC

Par définition, une commande **MPPT**, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur **PV** de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance voir **figure I.5**. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température, irradiation), et quel que soit la tension de la batterie, la commande du

convertisseur place le système au point de fonctionnement maximums ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ). Pour cela, plusieurs systèmes ont été publiés dans la littérature. []



**Figure I.5 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC**

Le point de puissance maximale *PPM* est habituellement contrôlé par deux variables de commandes : La tension et la puissance qu'on mesure à chaque instant. Ces dernières sont employées à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module est au point de puissance maximale. L'algorithme de recherche *MPPT* peut être plus au moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant, tous les algorithmes performants doivent agir sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé. De nombreuses recherches sur les commandes *MPPT* ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du *PPM* selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Ces techniques servent à obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs *PV*.

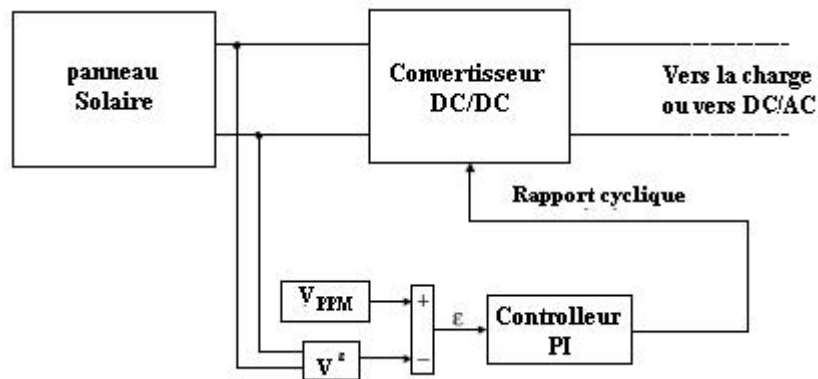
Dans ce qui suit, nous allons rappeler les différentes approches (techniques) pour faire fonctionner un panneau solaire au voisinage de son point de puissance maximale. Les méthodes les plus courantes sont : méthodes basées sur la contre réaction de la tension, méthodes basées sur la contre réaction de la puissance et les méthodes basées sur la contre réaction du courant.

Le classement a été fait en fonction de leur principe et de leur performance. Malgré la quantité d'études menées dans ce domaine, beaucoup présentaient des imperfections lorsqu'elles étaient en situation réelle. [3]

### **I.3.1. Méthodes de contre réaction de tension [1]**

Quand le système emploie comme paramètre la tension, il règle le module solaire à une tension spécifique qui devrait donner le point maximum de la puissance et parmi les méthodes proposées pour rechercher ce point, la méthode dite méthode de rétroaction de tension ou contre réaction de tension. Dans ce cas le *PPM* est habituellement changeable en se basant sur un rapport fixe de la tension du circuit ouvert. Ceci enlève dans la plupart du temps la dépendance de ce point à la température et à l'éclairement. Mais la précision de l'ajustement de

la tension de fonctionnement dépend du choix de ce rapport. Autrement dit ce mécanisme repose sur le contrôle de la tension des panneaux par comparaison avec une référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la *MLI* de commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la **figure I.6**. Selon la nature de cette référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :



**Figure I.6 : Méthode avec contre réaction de tension et modulation**

#### ***1.3.1.1. Méthode à tension de référence fixe***

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur *DC/DC*. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales, relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année.

#### ***1.3.1.2. Méthode PPM avec $V_{co}$ du panneau***

La tension à vide du panneau  $V_{co}$  est mesurée en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, stockant la valeur mesurée, en suite ajustant la tension de référence  $V_{ref}$  sur une certaine fraction de la tension du circuit ouvert, cette valeur a été déterminée expérimentalement au voisinage de 76% de  $V_{co}$ . Cette tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau  $V_{pv}$  et le signal d'erreur résultant  $V_{comp}$  est employé comme entré dans la commande *MLI* du convertisseur *DC/DC* (**figure I.6**).

Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la prise en compte des facteurs importants comme l'ensoleillement et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface des cellules sont aussi pris en compte.

### ***I.3.1.3. Méthode MPPT avec cellule pilote***

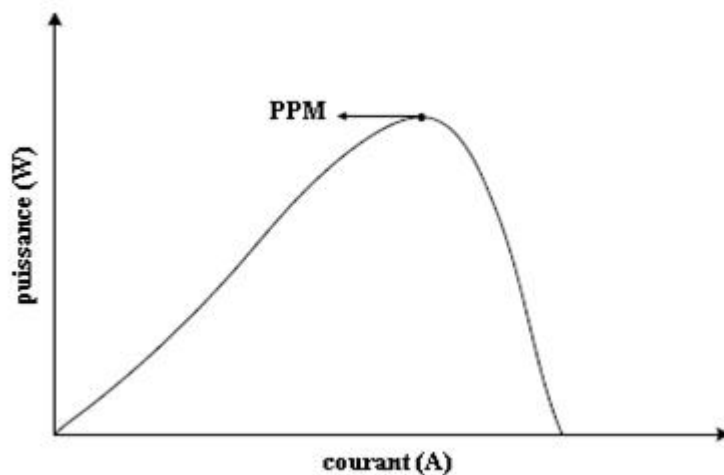
Pour éviter les inconvénients liés à l'interruption fréquente de l'exploitation du système, l'utilisation d'une cellule pilote a été proposée [1]. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée photovoltaïque. Sa tension  $V_{co}$  est constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions de fonctionnement courantes du panneau. La tension  $V_{co}$  de cette dernière est multipliée par un certain facteur constant pour être comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction. Puisque cette méthode emploie toujours un facteur fixe pour estimer la tension optimale  $V_{op}$  d'une valeur mesurée de  $V_{co}$ , le point de puissance maximal n'est toujours pas vraiment obtenu. Cette technique est fondée sur la connaissance des caractéristiques de la rangée photovoltaïque pour estimer le lieu du Point de Puissance Maximale.

Ces trois méthodes ne donnent pas des résultats exacts, et ils peuvent donner des points loin du point maximal [1]. Pour cette raison deux autres méthodes sont les plus utilisées dans les applications photovoltaïques elles seront détaillées dans les paragraphes suivants.

### ***I.3.2. Méthode de la dérivée de la puissance [5]***

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance  $P_{pv} = f(V_{pv})$  obtenu directement de la caractéristique du GPV. Le point de puissance maximale PPM est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (I.1)$$



***Figure I.7 : Caractéristique de puissance MPPT***

### ***1.3.2.1. Méthode de perturbation et observation (P & O)***

La méthode de perturbation et observation (*P&O*) est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température. Comme son nom l'indique, la méthode (*P & O*) fonctionne avec la perturbation de la tension  $V_{pv}$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau PV.

La **figure I.8** représente l'algorithme de la méthode (*P & O*). À chaque cycle,  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurés pour calculer  $P_{pv}(k)$ . Cette valeur de  $P_{pv}(k)$  est comparée à la valeur  $P_{pv}(k-1)$  calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté,  $V_{pv}$  est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué,  $V_{pv}$  est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent.  $V_{pv}$  est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint,  $V_{pv}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{op}$ , ceci cause une puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement.

### ***1.3.2.2. Méthode par incrément de conductance***

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue : il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ( $G = I_{pv} / V_{pv}$ ). La conductance incrémentielle est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité par celle de la tension ( $G = dI_{pv} / dV_{pv}$ ). La comparaison de la conductance  $G$  à la conductance incrémentielle ( $G$ ), pour trouver le maximum de la courbe **figure I.9**, il faut chercher le point d'annulation de la dérivée de la puissance.

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \quad (I.2)$$

D'où :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (I.3)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (I.4)$$

Donc :

$$\frac{\partial}{\partial a} \left( \frac{P_{pv}(k)}{V_{pv}(k)} \right) \cdot \frac{\partial V_{pv}(k)}{\partial a} = \frac{\partial P_{pv}(k)}{\partial a} + \frac{P_{pv}(k)}{V_{pv}(k)} \cdot \frac{\partial V_{pv}(k)}{\partial a} \quad (I.5)$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial a} \left( \frac{P_{pv}(k)}{V_{pv}(k)} \right) \cdot \frac{\partial V_{pv}(k)}{\partial a} = G + \Delta G \quad (I.6)$$

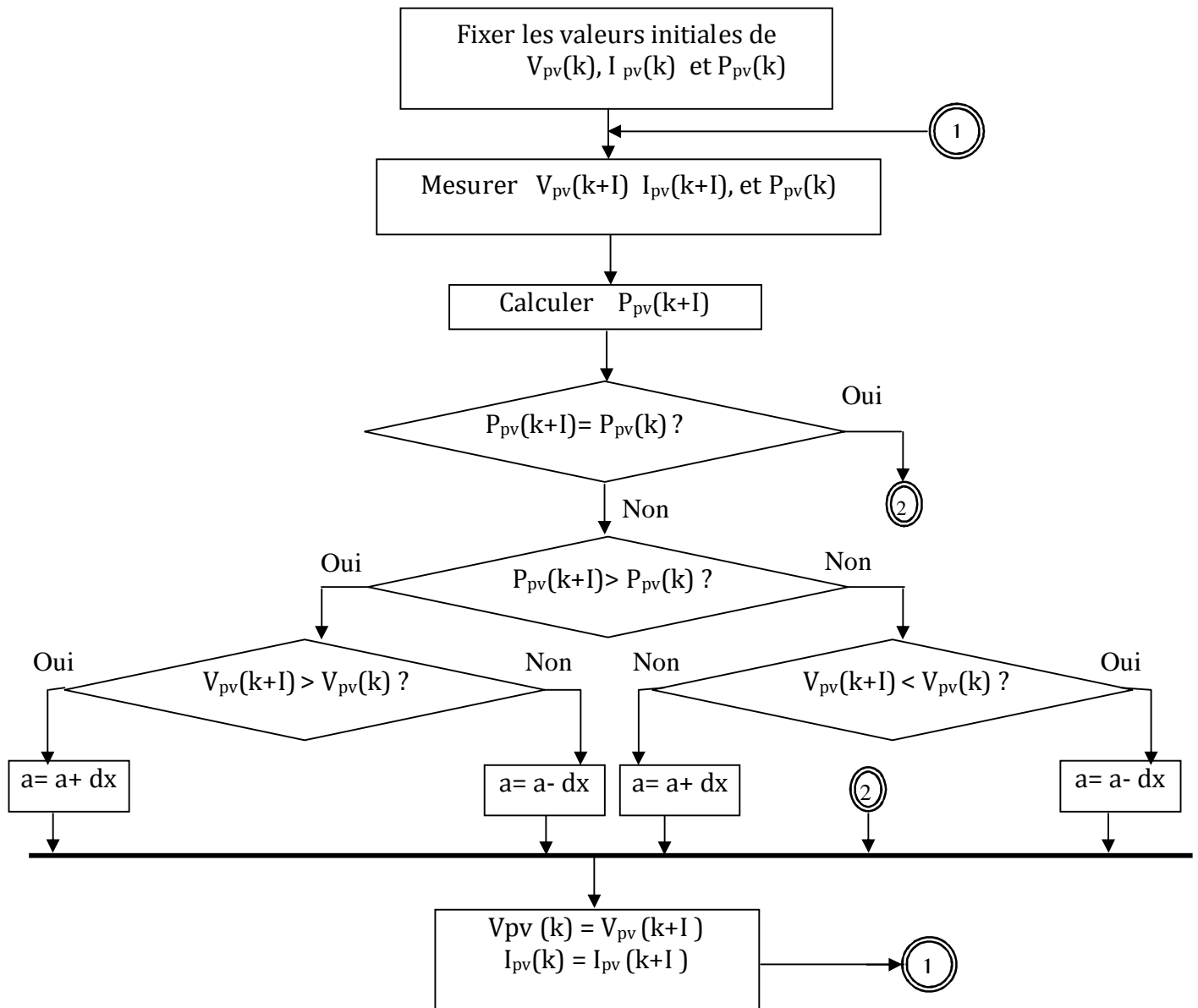


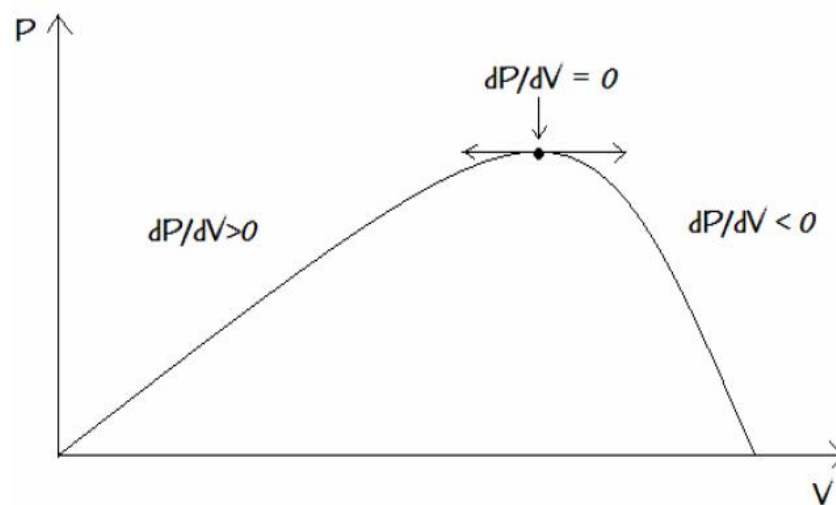
Figure I.8 : Organigramme de la méthode P & O

En général, la tension issue de la source est positive, d'où les résultats clés de la méthode de la conductance incrémentielle.

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \quad \Delta V > -\Delta V$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad \Delta G = -\Delta G$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \quad \Delta V < -\Delta V$$



**Figure I.9 : Evolution de la puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un Panneau**

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \quad V_{pv} \text{ augmente}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad V_{pv} \text{ ne change pas}$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \quad V_{pv} \text{ diminue}$$

### **Bilan :**

$$\Delta V > -\Delta V \quad V_{pv} \text{ augmente, } \Delta G > -\Delta G$$

$$\Delta V = -\Delta V \quad V_{pv} \text{ ne change pas, } \Delta G = -\Delta G$$

$$\Delta V < -\Delta V \quad V_{pv} \text{ diminue, } \Delta G < -\Delta G$$

Il existe un cas dans lequel les conductances ne peuvent pas être comparées: lorsque le système était effectivement au PPM à l'itération précédente. En effet, dans ce cas, le rapport cyclique n'a pas été modifié et donc  $V_{pv}$  est restée constante ( $dV_{pv} = 0$ ). La conductance

incrémentielle  $G$  n'est alors pas définie (il faudrait diviser par 0 pour la calculer). Il suffit dans ce cas d'observer les variations de  $I_{pv}$ , pour déduire les variations de  $V_{pv}$  :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{1}{\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}}} = \frac{1}{\frac{dV_{pv}}{dP_{pv}} \cdot \frac{dP_{pv}}{dI_{pv}}}$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Leftrightarrow \frac{dV_{pv}}{dP_{pv}} > 0, \frac{dP_{pv}}{dI_{pv}} > 0$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Leftrightarrow \frac{dV_{pv}}{dP_{pv}} < 0, \frac{dP_{pv}}{dI_{pv}} < 0$$

Ceci explique pourquoi le 1<sup>er</sup> test de l'algorithme est  $dV_{pv} = 0$ , chose constatée dans le schéma fonctionnel de l'algorithme donné juste après :

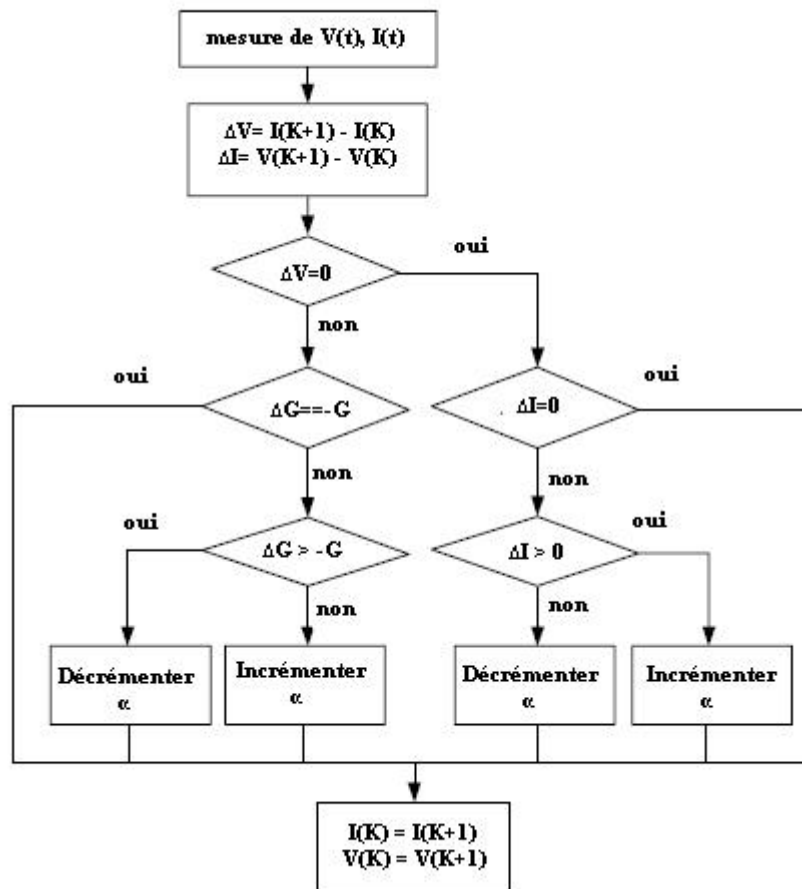


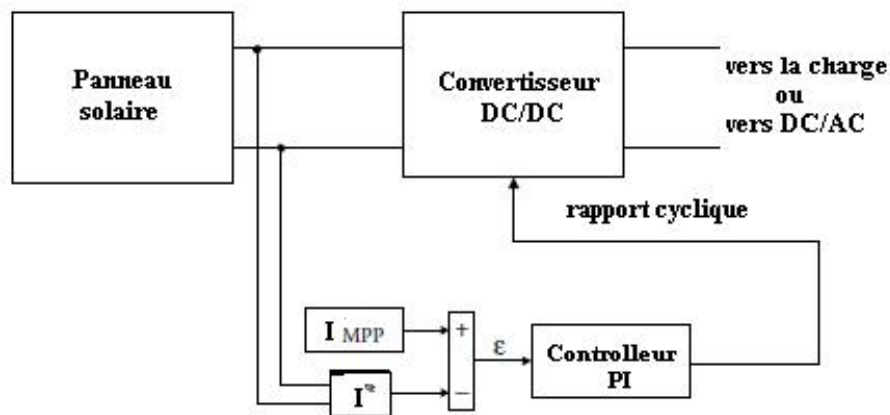
Figure I.10 : Diagramme fonctionnel algorithme Conductance incrémentielle

### I.3.3. Méthode avec contre réaction du courant [5]

Dans toutes les méthodes *MPPT* présentées jusqu'ici, une mesure de  $I$  et  $V$  a été employée pour obtenir des informations sur la puissance actuelle de sortie du panneau. Basé sur cette information, le mécanisme *MPPT* ajuste la tension  $V$  de sortie du panneau pour déplacer le point de fonctionnement des piles solaires plus près de leurs *PPM*.



Cette nouvelle méthode *MPPT* utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel actuel du système. La **figure I.11** illustre le schéma de principe de cette méthode



**Figure I.11 : Méthode de la contre réaction du courant**

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes motionnée, précédemment. Les divers essais extraits de la littérature montre que ce type de commande peut être performant dans certaines conditions mais ne permettent pas de dire que tel mode de recherche est plus performant qu'une autre car les conditions de test et les valeurs de la variable d'incrémentations ne sont pas similaires.

#### **I.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, les topologies des systèmes autonomes photovoltaïques ont été présentées. Les différentes structures basées sur les techniques MPPT des systèmes photovoltaïques sont aussi énumérées dans cette partie.

## *Chapitre II*

### *Modèle et dimensionnement*

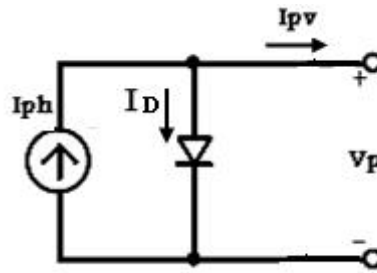
## II.1. Introduction

Après avoir cité les différents blocs ou composants constituant une chaîne de conversion photovoltaïque ainsi que le rôle et l'influence de chacun de ces composants sur le système, nous procédons dans ce chapitre à la modélisation du système décrit précédemment avec une validation expérimentale du modèle du panneau photovoltaïque.

## II.2. Modèle de la cellule photovoltaïque [1]

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. Cette cellule est constituée d'un matériau semi-conducteur de *type P-N*, la taille de chaque cellule va de quelque centimètres carrés jusqu'à  $100\text{ cm}^2$  ou plus. Sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Une cellule élémentaire peut être représentée par le schéma électrique équivalent suivant :



*Figure II.1. Schéma équivalent électrique d'une cellule PV idéale*

La cellule photovoltaïque est équivalente à un générateur de courant  $I_{ph}$  induit par le flux lumineux, shunté par une diode représentant la jonction P-N du semi-conducteur.

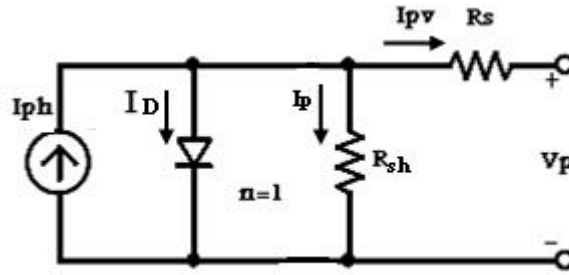
L'équation caractéristique d'une cellule idéale est de la forme :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_{000} e^{\frac{q}{kT} V_P} - 1 \quad (II.1)$$

$$I_D = I_{000} e^{\frac{q}{kT} V_P} - 1 \quad (II.2)$$

Un modèle PV peut être exprimé par le circuit équivalent représenté par la **figure II.2**, ce modèle est également connu comme modèle d'une simple diode. Dans ce modèle le courant du court-circuit et la tension du circuit ouvert sont les paramètres principaux. Le courant du court-circuit dépend de l'éclairement, alors que la tension du circuit ouvert est affectée par la qualité du matériau utilisé et dépend aussi de la température.

Lorsque les résistances de contact et les pertes ohmiques ne peuvent être considérées comme négligeables par rapport à la résistance de charge, on doit associer au schéma équivalent une résistance série  $R_s$  et une résistance shunt  $R_{sh}$ .



**Figure II.2. Schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle**

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds, le courant débité par la cellule peut être représenté par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (II.3)$$

$I_{ph}$  : courant généré par les photons ou photo-généré.

$I_{Rsh}$  : courant traversant la résistance shunt, si cette résistance est très grande, le courant devient très faible et est indépendant de la tension.

$$I_{Rsh} = \frac{V}{R_{sh}} = \frac{q A n_i^2 D_p}{q A n_i^2 L_p} \quad (II.4)$$

$$V = R_{sh} \cdot I_{Rsh} = V + R_s \cdot I_{pv} \quad (II.5)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D0} \exp \left[ \frac{q V}{n k T} \right] - \frac{V}{R_{sh}} - \frac{q A n_i^2 D_p}{q A n_i^2 L_p} N_A \quad (II.6)$$

Tel que  $n$  est le facteur d'idéalité, pour les cellules actuellement commercialisées au silicium, on prend  $n=1$ .

Si on suppose  $R_{sh}$  infini ( $R_{sh}=\infty$ ) l'équation précédente devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D0} \exp \left[ \frac{q V}{k T} \right] - \frac{q A n_i^2 D_p}{q A n_i^2 L_p} N_A \quad (II.7)$$

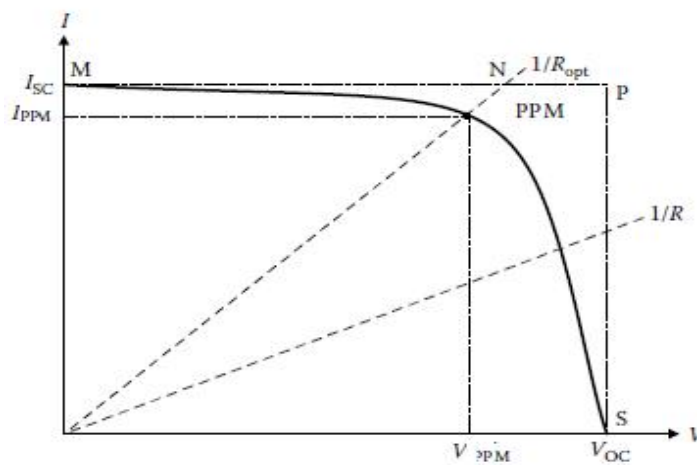
Le courant de court-circuit est obtenu pour une tension de sortie nulle, le courant de court-circuit est donné par l'équation suivante :

$$I_{\text{out}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{sat}} \left[ \exp \frac{q V_{\text{out}}}{k T} - 1 \right] - \frac{q V_{\text{out}}}{R_{\text{sh}}} \quad (\text{II.8})$$

La tension à circuit ouvert est obtenue pour un courant de sortie nul, la tension de circuit ouvert est donnée par l'équation suivante :

$$0 = I_{\text{ph}} - I_{\text{sat}} \left[ \exp \frac{q V_{\text{oc}}}{k T} - 1 \right] - \frac{q V_{\text{oc}}}{R_{\text{sh}}} \quad (\text{II.9})$$

La **figure II.3** montre la caractéristique  $I = f(V)$  du générateur photovoltaïque, pour un éclairement donné est une température constante. Les paramètres fondamentaux suivants : le courant du court-circuit, la tension du circuit ouvert et la puissance maximale peuvent être déterminés à partir de la caractéristique.

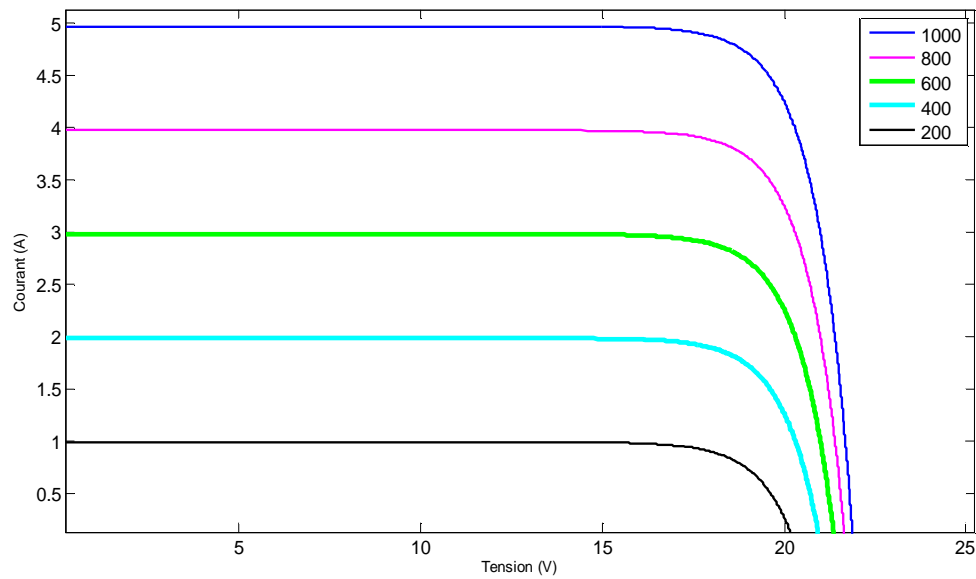


**Figure II.3. Caractéristique  $I = f(V)$  du générateur photovoltaïque**

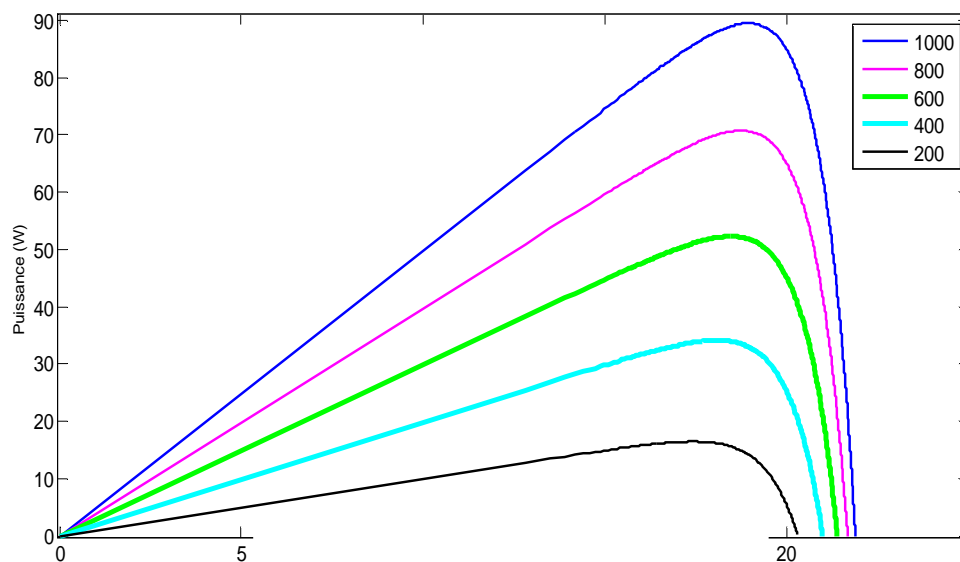
Si une charge résistive variable  $R$  est alimentée par le panneau, le point de fonctionnement se détermine par l'intersection de la caractéristique  $I = f(V)$  et la caractéristique de charge. La caractéristique de charge est une ligne droite avec une pente de  $(I / V = I / R)$ . La puissance fournie à la charge dépend de la valeur de la résistance de charge. Cependant, si la résistance de charge est faible, la cellule se comporte comme une source de courant constant donc il est au voisinage du courant du court-circuit. D'autre part si la résistance de charge est plus importante, la cellule se comporte comme une source de tension constante, elle est au voisinage de la tension du circuit ouvert. [3]

### II.3. Résultats de simulation

Les **figures (II.4, II.5)** présentent une simulation du modèle du panneau photovoltaïque pour différents niveaux de rayonnement à une température constante.



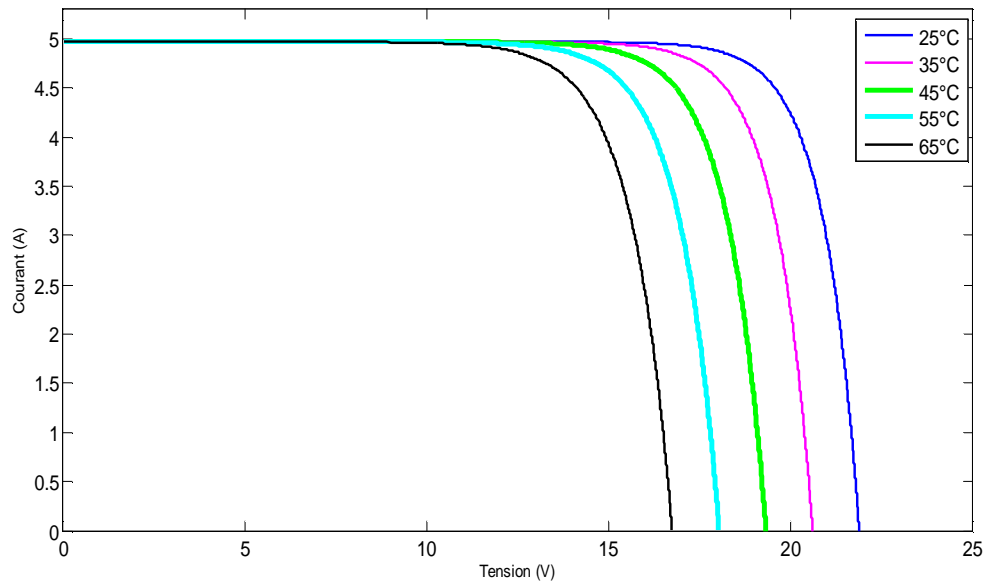
**Figure II.4 : Caractéristiques  $I = f(V)$**



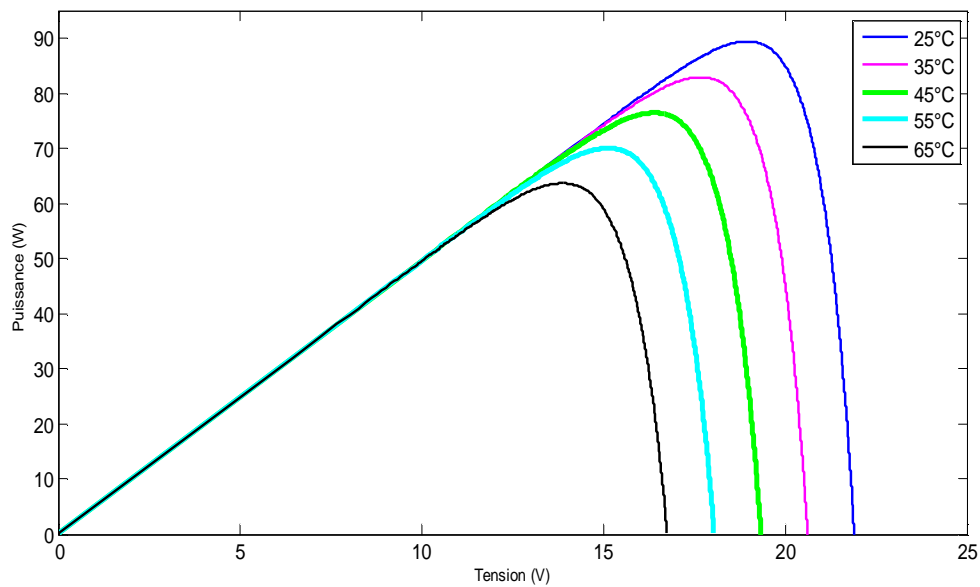
**Figure II.5 : Caractéristiques  $P = f(V)$**

Nous remarquons que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. On s'aperçoit de l'existence d'un point où la puissance est maximale. Il est intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et exploiter au mieux la puissance crête installée.

Les **figures (II.6, II.7)** présentent une simulation du modèle du panneau photovoltaïque pour différentes températures de fonctionnement des cellules photovoltaïques à un éclairement constant :



**Figure II.6 : Caractéristiques  $I=f(V)$**



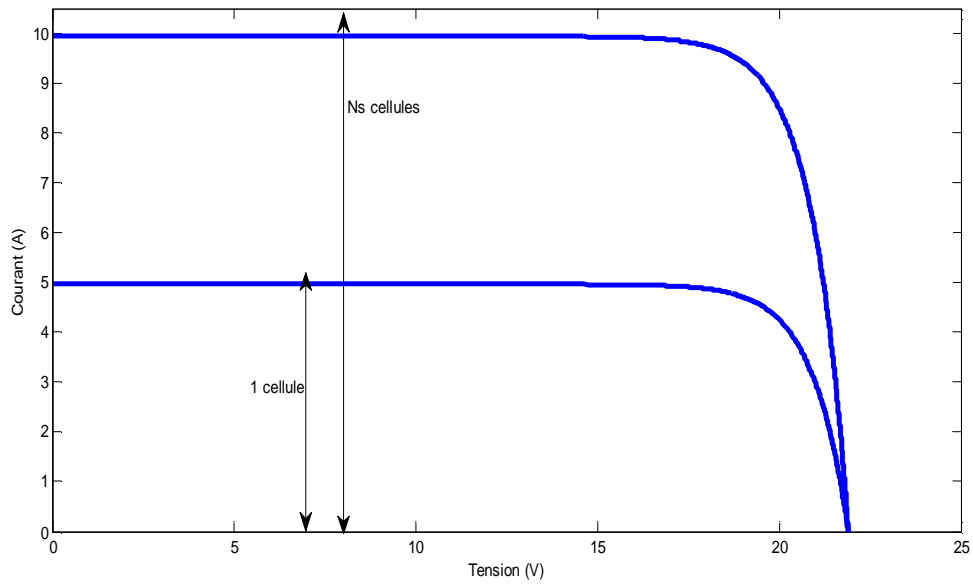
**Figure II.7 : Caractéristiques  $P=f(V)$**

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera à prendre impérativement en compte. Il est important de savoir que la puissance diminue environ de **0.5%** par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de **25°C**.

### II.3.1. Association de cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La **figure II.8** montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sc}$ ) obtenue en associant en série (indice  $s$ )  $n_s$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_c$ ). []

$$V_{scc} = n_s \cdot V_{cc} \quad \text{et} \quad I_{scc} = I_{cc} \quad (\text{II.10})$$



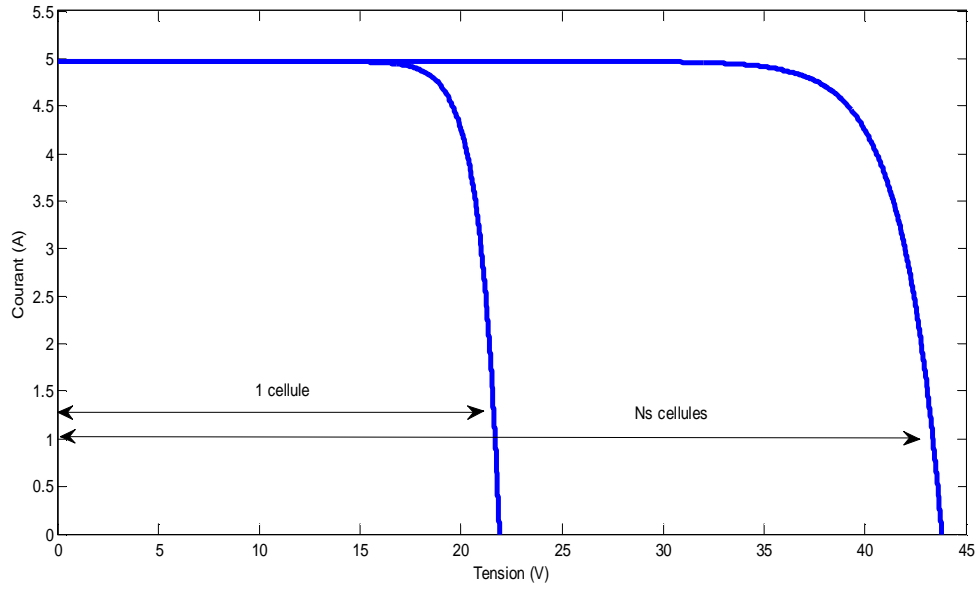
**Figure II.8 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques**

### II.3.2. Association de cellules PV en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La **figure II.9** montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) obtenue en associant en parallèle (indice  $p$ )  $n_p$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ). [3]

$$I_{pcc} = n_p \cdot I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{pcc} = V_{cc} \quad (\text{II.11})$$

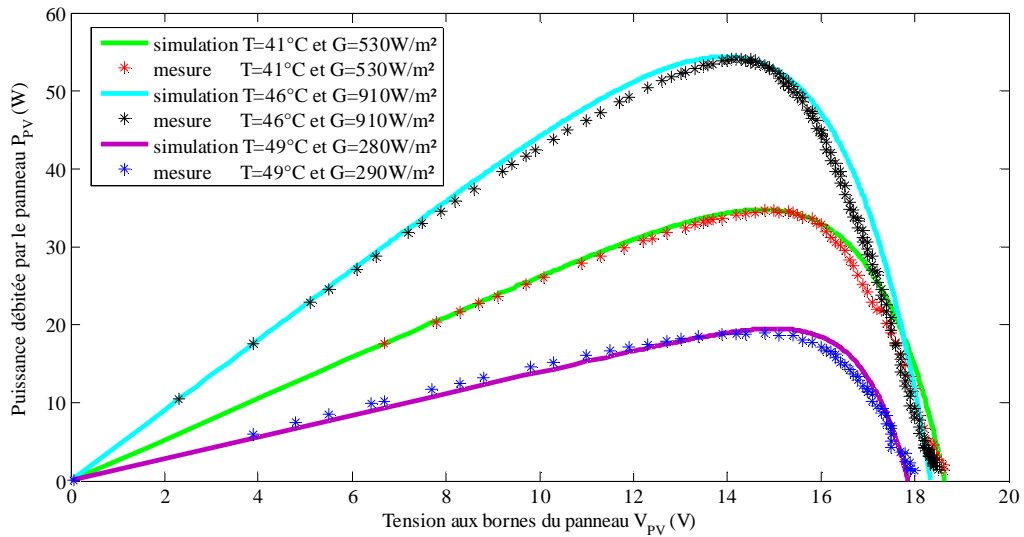




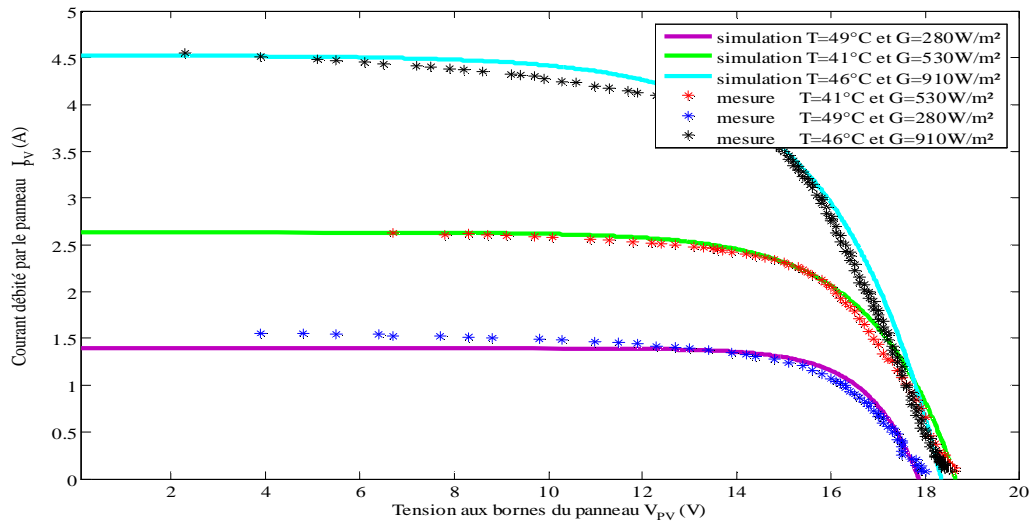
**Figure II.9 : caractéristique résultante d'un groupement constitué de  $n_p$  cellule identique en parallèle**

#### II.4. Validation du modèle mathématique

Dans l'objectif de vérifier la validité du modèle développé, nous avons réalisé trois essais identiques: le premier à 10:00h, le second à 13:00h, et le troisième à 17:00h. Les figures (II.10 et II.11) montrent les caractéristiques obtenues.



**Figure II.10: les courbes de  $P_{pv} = f(V_{pv})$  obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour différentes températures ( $T$ ) et différents éclaircements ( $G$ )**



**Figure II.11 : les courbes de  $P_{pv} = f(V_{pv})$  obtenues expérimentalement et par simulation du module PV pour différentes températures ( $T$ ) et différents éclaircements ( $G$ )**

Pour déterminer les différentes valeurs du courant et de la tension du panneau photovoltaïque, une résistance variable a été branchée aux bornes du panneau. Pour chaque valeur de la résistance on mesure la tension et le courant du *panneau*, les valeurs mesurées sont illustrées dans le **tableau II.1**, donné en annexe A.

#### **Interprétation des courbes :**

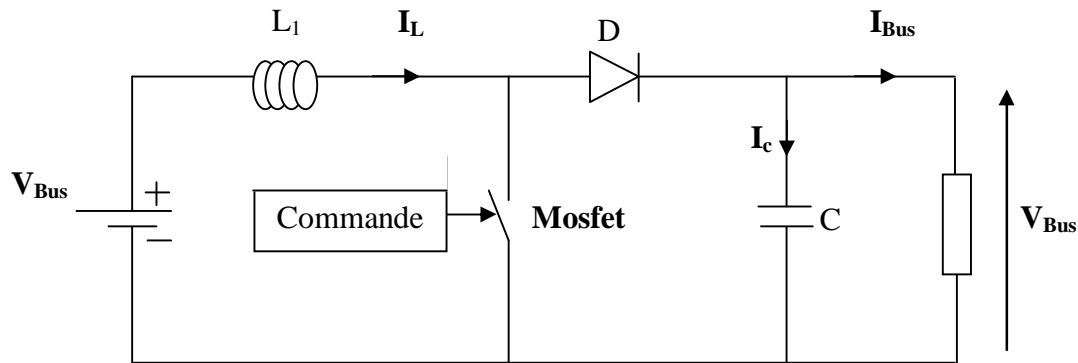
Nous avons confronté nos résultats de simulation aux valeurs mesurées. Nous constatons un bon accord pour les différentes caractéristiques. En revanche des écarts plus ou moins prononcés sont constatés et ça est dû aux paramètres que nous avons négligés lors de la modélisation de panneau et aux erreurs de lecture sur les appareils de mesure.

## **II.5. Etude et réalisation du convertisseur**

L'objectif principal de notre présent travail est le développement d'un étage d'adaptation à base d'un hacheur survolteur (Boost) muni d'une commande MPPT à faible cout, par conséquent, le système de stockage ne sera pas abordé. Le convertisseur à réaliser est d'une puissance maximale de 160 W (deux panneaux en parallèle). La fréquence de fonctionnement choisie est de 5 kHz.

### **II.5.1. Hacheur survolteur (boost)**

La structure du hacheur *survolteur* développée est décrite en **figure II.12**, la condition de fonctionnement de cette structure élévatrice est que la tension de sortie soit plus élevée que la tension d'entrée ( $V_{out} > V_{pv}$ ).



**Figure II.12 : Convertisseur DC-DC élévateur**

Le dimensionnement de chaque élément a été dicté par le choix de faire fonctionner le convertisseur élévateur en mode de conduction continue, sur la plage de fonctionnement la plus grande possible. Dans ce mode de fonctionnement, l'énergie emmagasinée dans l'inductance «  $L$  » est transférée partiellement et le courant dans celle-ci ne s'annule jamais.

Les relations utilisées pour le dimensionnement sont les relations classiques entre la tension de sortie et celle d'entrée et le rapport cyclique :

$$V_{\text{sortie}} = \frac{1}{1-D} \cdot V_{\text{entrée}} \quad (\text{II.12})$$

Une relation analogue lie la valeur moyenne du courant dans l'inductance au courant de sortie :

$$I_{L \text{ moyenne}} = I_{\text{sortie}} = \frac{V_{\text{sortie}}}{R_{\text{charge}}} \quad (\text{II.13})$$

## II.5.2. Dimensionnement du convertisseur [2]

L'inductance de lissage  $L_I$  est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source  $V_{pv}$ . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

### II.5.2.1. Calcul de l'inductance de lissage $L_I$

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c.-à-d en négligeant l'ondulation de la tension vis-à-vis de sa valeur moyenne.

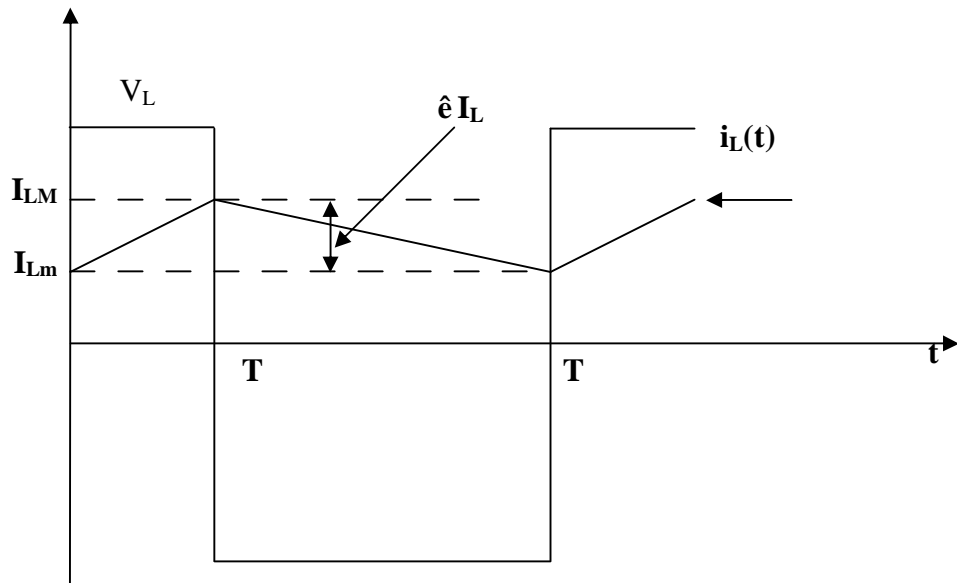


Figure II.13 : Ondulation de courant

Pour  $0 < t < T$  :

$$i_L(t) = \frac{V_L}{L} t + I_{Lm} \quad (\text{II.14})$$

A  $t = T$ :

$$i_L(T) = \frac{V_L}{L} \cdot T + I_{Lm} \quad (\text{II.15})$$

D'où:

$$\Delta I_L = I_{LM} - I_{Lm} = \frac{V_L \cdot T}{L} \quad (\text{II.16})$$

Or:

$$V_L = \frac{L}{T} \Delta I_L \quad (\text{II.17})$$

Nous pouvons donc écrire:

$$\Delta I_L = \frac{L \cdot \Delta i_L}{T} \quad (\text{II.18})$$

Tel que :

$$T = \frac{L}{\Delta i_L} \quad (\text{II.19})$$

L'inductance de lissage est calculée en fonction de l'ondulation du courant souhaitée. L'ondulation maximale est obtenue pour un rapport cyclique de 0.5. L'ondulation maximale est donc :

$$\Delta I_{L_{\text{bus}}} = \frac{V_{\text{bus}}}{2 \cdot f_p \cdot L_{\text{bus}}} \quad (\text{II.20})$$

Par conséquent, l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation suivante :

$$L_{\text{bus}} = \frac{V_{\text{bus}}}{2 \cdot f_p \cdot \Delta I_{L_{\text{bus}}}} \quad (\text{II.21})$$

Application numérique :

$\Delta I_{L_{\text{bus}}} = 3\%$  de courant max de PV (0.1488 A). Pour  $f_p = 5 \text{ KHz}$  et  $V_{\text{Bus}} = 24 \text{ V}$ .

Donc :

$$L_{\text{bus}} = 8 \text{ mH}.$$

### II.5.2.2. Calcul du condensateur de filtrage de bus

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance. L'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur

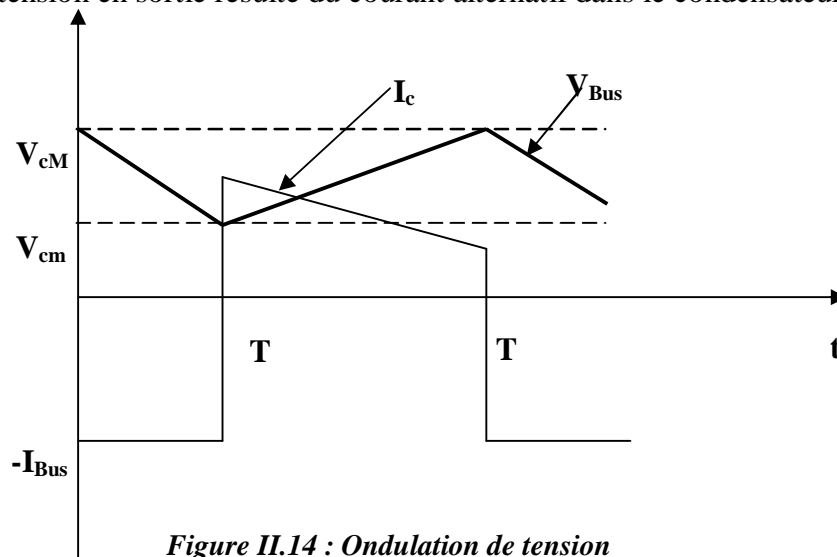


Figure II.14 : Ondulation de tension

Calculons l'ondulation de tension :

Pour:  $0 < t < T$

$$V_{\text{ref}}(t) = V_{\text{ref}} - \frac{V_{\text{ref}}}{T_s}(t) \quad (\text{II.22})$$

En  $t = T$ :

$$V_{\text{ref}}(T) = V_{\text{ref}} - \frac{V_{\text{ref}}}{T_s} \alpha T = V_{\text{ref}} \quad (\text{II.23})$$

D'où:

$$\Delta V_{\text{ref}} = V_{\text{ref}} - V_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{ref}}}{T_s} \cdot \alpha \quad (\text{II.24})$$

Or:

$$I_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}}} \quad (\text{II.25})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta V_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{ref}} \cdot \alpha}{T_s \cdot R_{\text{ref}}} \quad (\text{II.26})$$

L'ondulation de tension maximale est obtenue pour un courant maximal et un rapport cyclique de 0.5 :

$$\Delta V_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{ref}}}{T_s \cdot R_{\text{ref}}} \quad (\text{II.27})$$

La valeur minimale du condensateur est donc donnée par la relation :

$$C_{\text{ref}} = \frac{V_{\text{ref}}}{T_s \cdot \Delta V_{\text{ref}}} \quad (\text{II.28})$$

Application numérique :

$\hat{e} V_{\text{Bus}} = 2.66\%$  de la tension max de PV (0.6384 V). Pour  $f_p = 5 \text{ KHz}$  et  $I_{LM} = 4.96 \text{ A}$ .

Donc :  $C \approx 400 \mu\text{F}$

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé le panneau photovoltaïque existant au labo LATAGE, afin d'introduire ces équations dans *simulink* (Mathlab) et réaliser le circuit de simulation. Nous avons constaté que ces performances sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV.

Dans cette étude nous avons utilisé le modèle à une seule diode pour simuler le fonctionnement du module PV pour différents niveaux d'ensoleillement et de température. Par la suite, nous avons donné la structure du hacheur survolteur à réaliser et le dimensionnement de ses paramètres.

## ***Chapitre III***

### ***Configuration et programmation du PIC16F877A***

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire le fonctionnement général du PIC 16F877A ainsi que sa programmation pour qu'il soit intégré dans une chaîne de commande.

### III.2. Qu'est ce qu'un microcontrôleur ou *PIC* [6]

Le microcontrôleur est un composant électronique ayant une unité de traitement de données des mémoires, des interfaces de communication (entrée/sorties, port série ..) et de multiples ressources internes. Souvent un microcontrôleur se connecte à un bus de données de 8 ou 16 bits, on peut dire alors qu'il est moins puissant qu'un microprocesseur.

Il existe trois familles du *PIC*

- Base-Line : les instructions sont codées sur 12 bits
- Mid-Line : les instructions sont codées sur 14 bits
- High-End : les instructions sont codées sur 16 bits

Un *PIC* est identifié par un numéro de la forme suivante :

xx(L)XXyy-zz

Où :

xx : signifie la famille des composants (12, 14, 16, 17 ou 18)

L : c'est la tolérance la plus importante de la plage de tension

XX : type de mémoire de programme.

- C : EPROM ou EEPROM
- CR : PROM
- F : FLASH

yy : Identification

zz : vitesse maximale du quartz

#### III.2.1. Principes caractéristiques du PIC 16F877A

Un *PIC 16F877A* possède les caractéristiques suivantes :

- Une fréquence de fonctionnement allant jusqu'à 20 MHz
- Jeu de 35 instructions ;
- Une mémoire de programme de type FLASH sur 8K mots (1 mot = 14bits)
- Une mémoire de données de type RAM sur 368 octets
- Une mémoire de données type EEPROM sur 256 octets
- Une pile (stack) à 8 niveaux
- 14 sources d'interruptions



- Un chien de garde *WDT* (Watch Dog Timer)
- Timer0 (compteur *8bits* avec pré-diviseur)
- Timer1 (compteur *16bits* avec pré-diviseur et possibilité d'utiliser une horloge externe)
- Timer2 (compteur *8bits* avec pré-diviseur et post-diviseur)
- Une conversion *Analogique/Numérique 10bits* à 8 entrées multiplexées
- Deux modules de *capteur/comparaison/PWM*
- Portes *Entrées/Sorties* : *A, B, C, D et E*
- Une interface de communication série *MSSP, USART*
- Une interface de communication parallèle *PSP*
- Tension de fonctionnement entre *2.0 Volts* et *5.5*

### III.2.2 : Architecture interne de PIC 16F877A

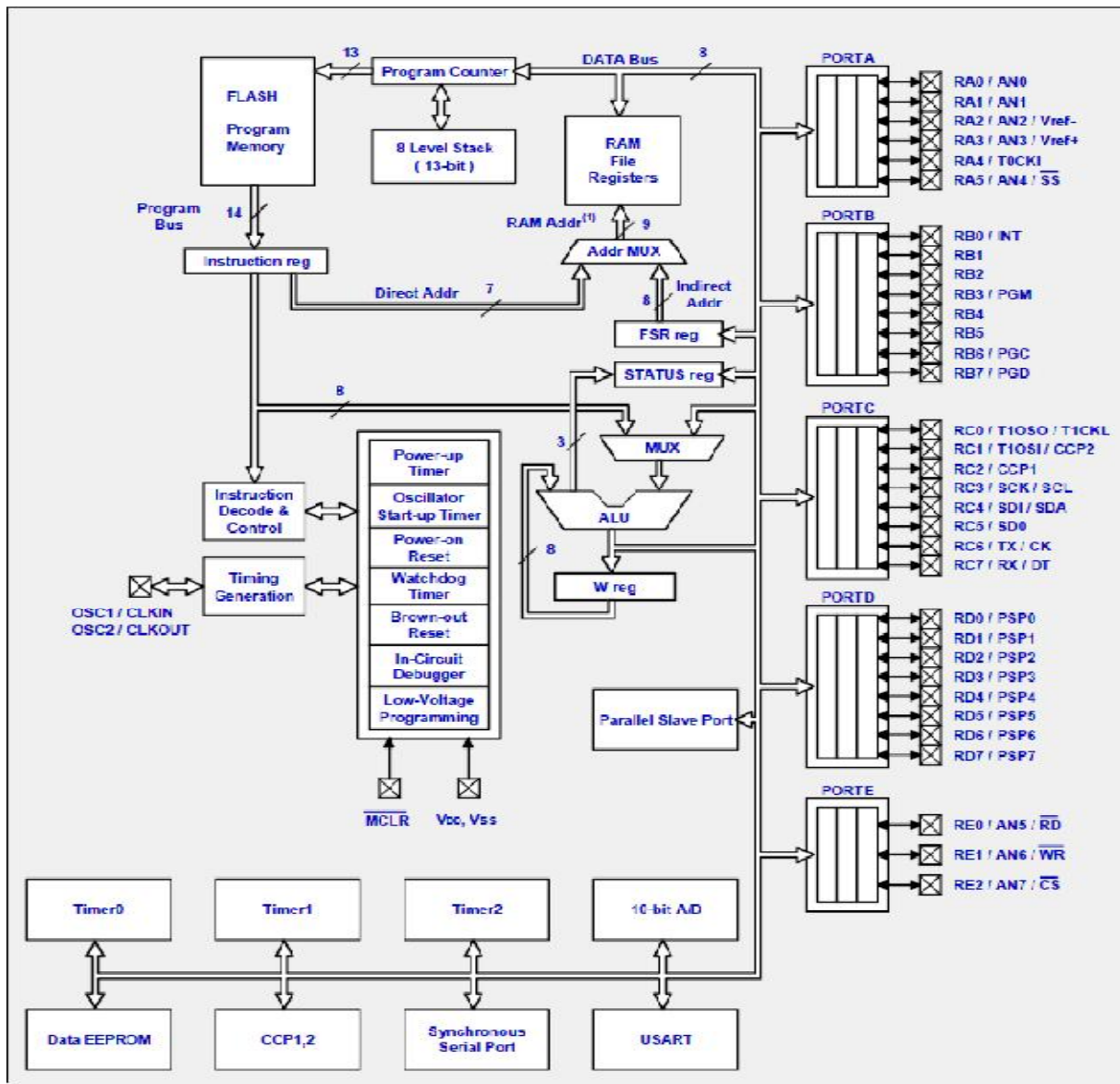


Figure III.4 : Architecture interne du PIC

#### Explication de la structure :

Une fois le programme est stocké dans la mémoire (*Program Memory*) et le microcontrôleur est initialisé, l'instruction à exécuter est désignée par le PC (*Program Counter*) et sera chargée dans le registre d'instruction (*Instruction Reg*) au moyen d'un bus de programme sur 14 bits, puis elle sera décodée dans le décodeur et le contrôleur d'instruction (*Instruction Decode & control*) et ensuite dirigée vers l'ALU (*ALU*) avec les données chargées à partir des entrées configurées comme entrées, l'ALU fera l'opération nécessaire et sauvegardera le résultat temporairement dans le registre de travail (*W reg*) sur 8 bits. Ce résultat sera aussi mit dans la RAM à l'aide d'un bus de données sur 8 bits.

### III.2.3. Brochage du PIC 16F877A

La Figure ci-dessous illustre le rôle de chaque patte du *PIC 16F877A*.

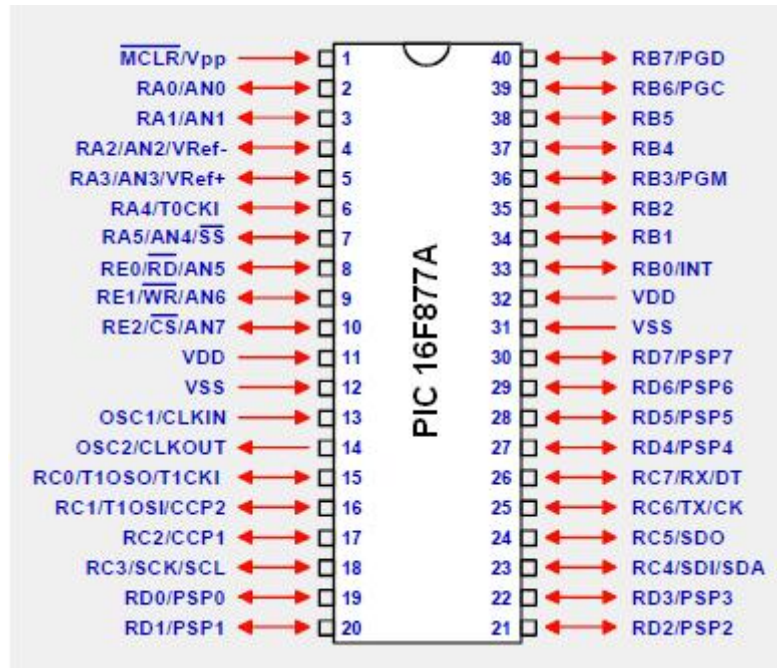


Figure III.5 : différentes pins du *PIC 16F877A*

### III.3. Différentes étapes de la configuration de PIC

Après avoir présenté le *PIC* et donné quelques explications sur son fonctionnement, maintenant nous allons décrire l'étape de l'acquisition des grandeurs analogiques, ces grandeurs sont principalement la tension du panneau et le courant débité par ce dernier. Pour cela nous avons opté pour deux capteurs.

#### Capteur de tension :

L'acquisition de la tension se fait grâce à un capteur de tension *LV 25-P (LEM)* placé aux bornes du panneau *PV*.

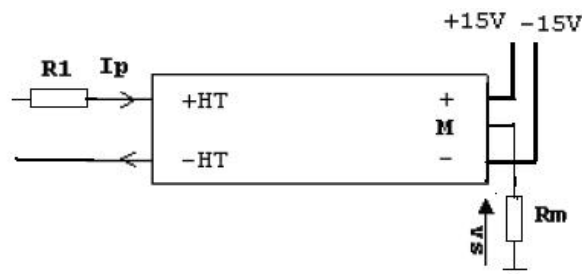


Figure III.6 : Capteur de tension *LV 25-P*

Ce capteur de tension est obligatoire afin d'ajuster la tension fournie par le panneau solaire.

Le microcontrôleur accepte une tension uniquement positive avec une valeur maximale de 5Volts. On relie pour cela la borne M du capteur à une entrée analogique du pic.

Pour effectuer l'adaptation de la tension, on utilise l'équation (III.1) pour déterminer la valeur des deux résistances utilisées afin d'obtenir au maximum 5 volts lorsque le panneau solaire fonctionne sous sa tension maximale.

$$V_M = V_P \cdot K_N \quad \text{et} \quad V_M = V_P \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Avec :

$K_N$ : rapport de transformation du capteur  $K_N = 2500/1000$ .

Si le panneau solaire fournit 21.9 Volts en sortie la tension qui sera présente aux bornes du pic est de 5 Volts de même, si la tension du panneau est plus faible alors la tension aux bornes du pic sera elle aussi faible. Cette tension ne pourra donc en aucun cas dépasser les 5 Volts.

### Capteur de Courant :

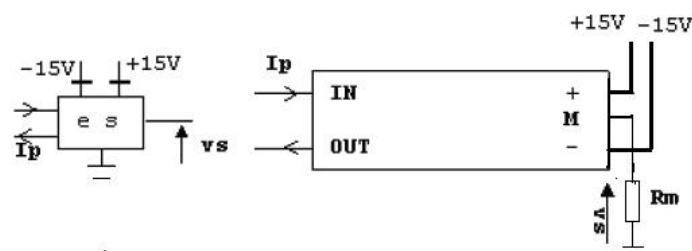
L'acquisition du courant est réalisée par un capteur à effet hall **LA 55-P (LEM)** qui délivre une tension proportionnelle au courant qui passe dans ce composant. La documentation technique définit le rapport entre la tension et le courant et par la relation suivante :

$$V_M = V_P \cdot K_N \quad \text{et} \quad V_M = V_P \cdot K_N$$

Avec :

$K_N$ : rapport de transformation du capteur du courant,  $K_N = 2/1000$ .

$I_P$ : courant primaire délivré par le panneau solaire.



**Figure III.7 : Capteur de courant LA 55-P**

Si le panneau solaire délivre un courant de 4.96 Ampères en sortie, la tension qui sera présente aux bornes du pic est de 5 Volts, de même si le courant du panneau est plus faible

alors la tension aux bornes du pic sera elle aussi faible. Cette tension ne pourra donc en aucun cas dépasser les 5 Volts.

### III.3.1. La conversion analogique numérique (A/N)

La première chose à comprendre, c'est que le *PIC* ne contient qu'un seul convertisseur, mais plusieurs pins sur lesquelles connecter nos signaux analogiques. Un circuit de commutation sélectionnera donc laquelle des pins sera reliée au condensateur de maintien interne durant un temps ( $T_{acq}$ ). Ces différentes entrées seront donc des canaux différents d'un seul et même convertisseur.

La sélection de la source de tension de référence dépend de bits du registre *ADCON1*, tandis que le canal sélectionné pour la numérisation dépend du registre *ADCON0*.

Pour pouvoir utiliser une pin en mode analogique, il faudra que cette pin soit configurée également en entrée par *TRISA* ou *TRISE*.

#### Les registres *ADRESL* et *ADRESH* :

Le convertisseur donne un résultat sur 10 bits, et donc que ce résultat devra obligatoirement être sauvegardé dans deux registres, ces registres sont tout simplement les registres *ADRESL* et *ADRESH*.

Comme deux registres contiennent 16 bits, et que nous n'en utilisons que 10, Microchip nous a laissé le choix sur la façon dont est sauvegardé le résultat. Nous pouvons soit justifier le résultat à gauche, soit à droite.

La justification à droite complète la partie gauche du résultat par des « 0 ». Le résultat sera donc de la forme :

ADRESH								ADRESL							
0	0	0	0	0	0	b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0

La justification à gauche procède bien évidemment de la méthode inverse :

ADRESH								ADRESL							
b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	0	0	0	0	0	0

Le choix de la méthode d'effectuer à l'aide du bit 7 du registre *ADCON1*.

#### Le registre *ADCON1* :

Le registre ADCON1 dispose, comme tout registre accessible de notre *PIC* de 8 bits, dont seulement 5 sont utilisés.

- b7 : ADFM : A/D result ForMat select
- b6 : Inutilisé : lu comme « 0 »
- b5 : Inutilisé : lu comme « 0 »
- b4 : Inutilisé : lu comme « 0 »
- b3 : PCFG3 : Port ConFiGuration control bit 3
- b2 : PCFG3 : Port ConFiGuration control bit 2
- b1 : PCFG3 : Port ConFiGuration control bit 1
- b0 : PCFG3 : Port ConFiGuration control bit 0

Le bit ADFM permet de déterminer si le résultat de la conversion sera justifié à droite (1) ou à gauche (0).

Nous trouvons dans ce registre les 4 bits de configuration des pins liées au convertisseur analogique/numérique. Ces bits nous permettent donc de déterminer le rôle de chaque pin. Comme nous avons 16 combinaisons possibles, nous aurons autant de possibilités de configuration.

Le **tableau III.2** correspondant à ces combinaisons pour le 16F877A.

PCFG 3 à 0	AN7 RE2	AN6 RE1	AN5 RE0	AN4 RA5	AN3 RA3	AN2 RA2	AN1 RA1	AN0 RA0	Vref- +	Vref +	A/D/R
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	Vss	Vdd	8/0/0
0001	A	A	A	A	Vref+	A	A	A	Vss	RA3	7/0/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	Vss	Vdd	5/3/0
0011	D	D	D	A	Vref+	A	A	A	Vss	RA3	4/3/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	Vss	Vdd	3/5/0
0101	D	D	D	D	Vref+	D	A	A	Vss	RA3	2/5/1
0110	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-	0/8/0
0111	D	D	D	D	D	D	D	D	-	-	0/8/0
1000	A	A	A	A	Vref+	Vref-	A	A	RA2	RA3	6/0/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	Vss	Vdd	6/2/0
1010	D	D	A	A	Vref+	A	A	A	Vss	RA3	5/2/1
1011	D	D	A	A	Vref+	Vref-	A	A	RA2	RA3	4/2/2
1100	D	D	D	A	Vref+	Vref-	A	A	RA2	RA3	3/3/2
1101	D	D	D	D	Vref+	Vref-	A	A	RA2	RA3	2/4/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	Vss	Vdd	1/7/0
1111	D	D	D	D	Vref+	Vref-	D	A	RA2	RA3	1/5/2

**Tableau III.2. Les différentes combinaisons du PIC 16F877A**

La dernière colonne « A/D/R » résume les colonnes précédentes. Le premier chiffre représente le nombre de pins configurées en tant qu'entrées analogiques, le second en tant qu'entrées/sorties numériques, et le dernier le nombre de pins servant à l'application des tensions de référence.

**Le registre ADCON0 :**

Ce registre est le dernier utilisé par le convertisseur analogique/numérique. Il contient les bits que nous allons manipuler lors de notre conversion. Sur les 8 bits de notre registre, 7 seront utilisés.

- b7 : ADCS1 : A/D conversion Clock Select bit 1
- b6 : ADCS0 : A/D conversion Clock Select bit 0
- b5 : CHS2 : analog Channel Select bit 2
- b4 : CHS1 : analog Channel Select bit 1
- b3 : CHS0 : analog Channel Select bit 0
- b2 : GO/DONE : A/D conversion status bit
- b1 : Inutilisé : lu comme « 0 »
- b0 : ADON : A/D ON bit

Nous parlons du diviseur, les bits ADCS1 et ADCS0 permettent de choisir la vitesse de conversion :

ADCS1	ADCS0	Diviseur	Fréquence max du quartz
0	0	Fosc/2	1.25 Mhz
0	1	Fosc/8	5 Mhz
1	0	Fosc/32	20 Mhz
1	1	Osc RC	1 Mhz, et en mode sleep

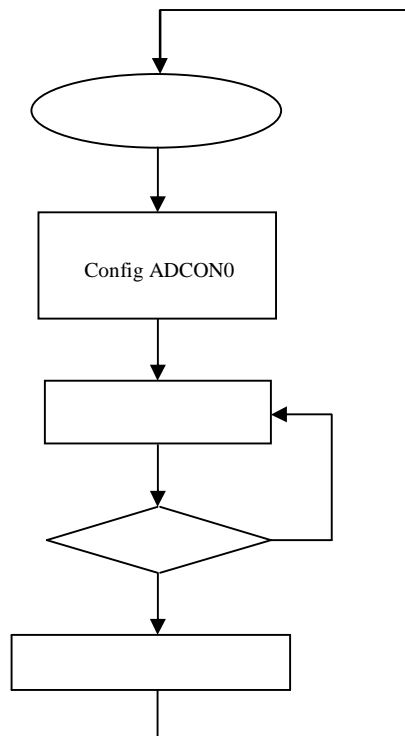
**Tableau III.3 : Les différentes combinaisons pour le choix du diviseur**

Nous avons vu que nous pouvons configurer, via ADCON1 plusieurs pins comme entrées analogiques. Nous avons vu également que nous ne pouvons effectuer la conversion que sur une pin à la fois. Nous devons donc être en mesure de sélectionner le canal voulu. Ceci s'effectue via les bits CHSx.

CHS2	CHS1	CHS0	Canal	Pin
0	0	0	0	AN0/RA0
0	0	1	1	AN1/RA1
0	1	0	2	AN2/RA2
0	1	1	3	AN3/RA3
1	0	0	4	AN4/RA5
1	0	1	5	AN5/RE0
1	1	0	6	AN6/RE1
1	1	1	7	AN7/RE0

**Tableau III.4 : les différentes combinaisons pour sélectionner une entrée analogique**

Le résumé des opérations concrètes à effectuer pour échantillonner notre signal est donné par l'organigramme suivant :



**Figure III.8 : Organigramme de conversion d'un signal analogique**

### III.3.2. Génération d'un signal PWM « MLI »

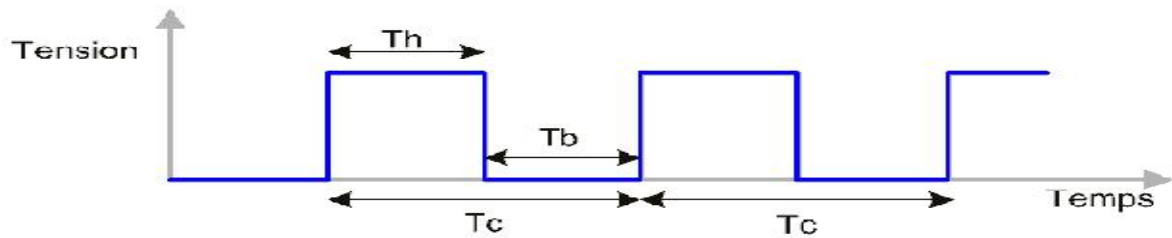
*PWM* signifie « **P**ulse **W**idth **M**odulation », ce qu'on pourrait traduire par modulation de largeur d'impulsion.

En somme, il s'agit d'un signal binaire de fréquence fixe dont le rapport cyclique peut être modulé par logiciel.

Etant donné qu'un signal binaire n'a plus de secret pour nous, nous savons donc qu'il s'agit d'un signal qui peut prendre deux états, pour notre « *PWM* » une pin de notre *PIC* est configurée en sortie.

Le rapport cyclique d'un signal binaire à fréquence fixe peut être défini comme étant le rapport entre le temps où il se trouve à l'état « 1 » par rapport au temps total d'un cycle. Un cycle n'étant constitué, par définition, que d'un état « 1 » suivi d'un état « 0 », la somme des temps des deux états étant constante. Voir **figure III.9**.





**Figure III.9 : Exemple d'un signal PWM avec un rapport cyclique de 50%**

$$T_c = T_h + T_b \quad \text{et} \quad R_c = \frac{T_h}{T_c}$$

$T_c$  : durée d'un cycle

$T_h$  : durée de l'état haut

$T_b$  : durée de l'état bas

$R_c$  : le rapport cyclique

Nous avons vu que nous avons besoins de deux choses pour créer notre signal. D'une part, le temps  $T_c$ , qui détermine la fréquence de notre signal, et d'autre part le rapport cyclique de ce dernier. Le temps  $T_c$  est défini tout simplement par le *timer 2*. Nous programmons éventuellement le pré-diviseur, et on fait charger la valeur adéquate dans  $PR2$ , et le temps mis par notre  $TMR2$  pour déborder le temps  $T_c$ .

Le post-diviseur n'est pas utilisé dans le module *PWM*. Donc il n'intervient pas dans le calcul de  $T_c$ .

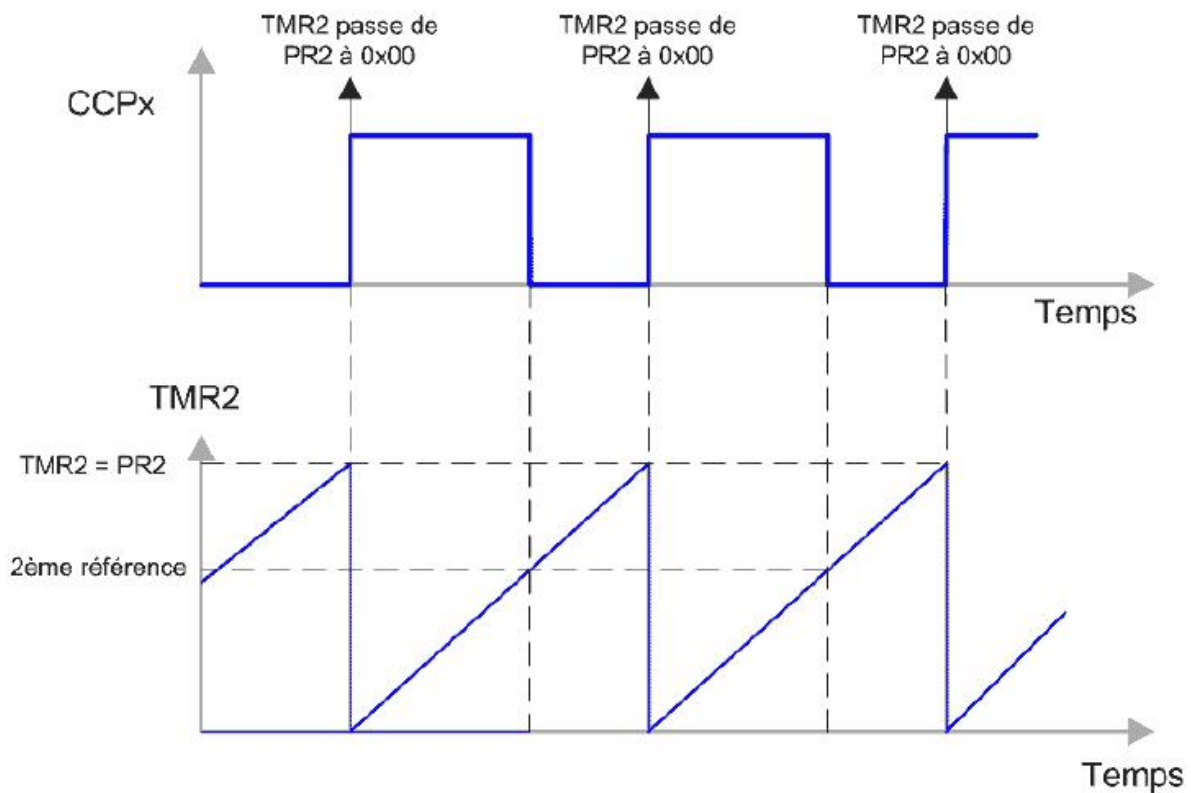
Le calcul  $T_c$  s'effectue de la façon suivante :

$$T_c = \frac{2^8}{PR2} + 1 \cdot 4 \cdot \frac{2^8}{PR2} \cdot \frac{2^8}{PR2}$$

Comme notre  $PR2$ , est donc le temps  $T_c$  continue de fonctionner, lui, sur 8 bits, notre cycle se déroule de la façon suivante :

- Le *timer 2* compte : on imagine que le signal *CCP* vaut actuellement 0
- $TMR2$  (8 bits) arrive à la valeur de  $PR2$  (8 bits)
- Au cycle suivant, le  $TMR2$  repasse à 0,  $CCPx$  passe à 1
- $TMR2+2$  atteint la seconde valeur de consigne (8 bits),  $CCPx$  passe à 0, le *timer 2* continue de compter.
- $TMR2$  (8 bits) arrive à la valeur de  $PR2$
- Au cycle suivant,  $TMR2 = 0$ ,  $CCPx$  vaut 1, et ainsi de suite.

La figure suivante représente un graphique de la chronologie des événements en fonction du contenu du registre du timer 2.



**Figure III.10 : génération du signal PWM**

### **III.3 .2.1. Les registres utilisés pour la PWM**

#### **Le registre CCPxCON :**

Ce registre *CCPxCON* permet donc, en toute logique, de déterminer le mode de fonctionnement du module. Voici son contenu, « x » remplace « 1 » ou « 2 » suivant le module utilisé dans tout le reste du chapitre.

- b7 : Inutilisé : lu comme « 0 »
- b6 : Inutilisé : lu comme « 0 »
- b5 : CCPxX : module Capteur Compare and Pwm x bit X
- b4 : CCPxY : module Capteur Compare and Pwm x bit Y
- b3 : CCPxM3 : module Capteur Compare and Pwm x Mode select bit 3
- b2 : CCPxM2 : module Capteur Compare and Pwm x Mode select bit 2
- b1 : CCPxM1 : module Capteur Compare and Pwm x Mode select bit 1
- b0 : CCPxM0 : module Capteur Compare and Pwm x Mode select bit 0

Les bits  $CCPxX$  et  $CCPxY$  sont en fait les deux bits du poids faible qui complètent de 10 bits utilisés pour le mode de fonctionnement de  $PWM$ .

Les bits  $CCPxM3$  à  $CCPxM0$  servent à déterminer quel sera le mode de fonctionnement du module concerné, le  $11xx$  est utilisé pour le module  $PWM$ .

### Le registre $T2CON$ :

L'information  $Tc$  est gérée à partir du  $timer2$ . Il faut donc configurer le pré-diviseur et  $PR2$  (le *post-diviseur* n'intervient pas).

La mise en œuvre du  $timer2$  s'effectue grâce au registre  $T2CON$  et au registre  $PR2$ .

#### **$T2CON$ :**

bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
Non utilisé	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0
0	/5 Calcul du postdiviseur				1	/16 Calcul du prédiviseur: 0 1	

Choix du pré-diviseur

bit1 : T2CKPS1	bit0 : T2CKPS0	/ Prédiviseur
0	0	1
0	1	4
1	0 ou 1	16

### ***III.3.2.2. Initialisation correspondant à ce mode $PWM$***

1. Configuration des broches du port  $C$  correspondant à  $CCP1$  et  $CCP2$  en sortie par une écriture dans le registre  $TRISB$
2. Initialisation de  $CCPxCON = 0$  (Tout les modes sont sur arrêt: capture, comparaison et  $PWM$ ). Et  $TMR2 = 0$  (Pour démarrage final du  $Timer 2$ ).
3. Ecriture dans le registre  $PR2$  afin d'établir la période (en choisissant déjà le rapport de prédivision d'horloge du  $Timer 2$ ).
4. Ecriture dans le registre  $CCPRxL$  afin d'établir le rapport cyclique initial (sur les 8 bits de poids forts).
5. Ecriture dans le  $CCPxCON$  afin de configurer le mode  $PWM$  et d'établir le rapport cyclique initial (sur 10 bits) à l'aide des bits  $CCPxY$  et  $CCPxX$  (2 bits de poids faibles).
6. Définition du rapport de pré-division d'horloge du  $Timer2$  et démarrage du  $Timer 2$  par une écriture dans le registre  $T2CON$ .

Une fois qu'on a bien compris toutes ces étapes il ne reste qu'à écrire le programme.

### III.4. Choix du compilateur

Pour écrire le programme, au départ nous avons utilisé le compilateur *CCS* en *langage C*, et comme il est difficile à maîtriser nous ne sommes pas arrivés aux résultats recherchés avec la précision voulue. Pour cela notre choix est porté sur un autre type de compilateur appelé *CC5X* qui s'adapte sur *MPLAB IDE*.

Ce dernier est beaucoup plus facile à manipuler, surtout il permet de comprendre chaque étape du programme. En plus il permet d'intervenir sur n'importe quel registre du *PIC* pour changer son état par une simple instruction.

#### III.4.1. Présentation de MPLAB IDE

Le *MPLAB IDE* est un outil de développement pour programmer les microcontrôleurs.

Ce logiciel permettra de créer un programme, de l'assembler et le simuler avant de le transférer vers la mémoire flash de *PIC*.

*MPLAB IDE* permet :

- D'assembler, compiler et lier les fichiers sources qui peuvent provenir de langages différents
- D'effectuer des mesures temporelles avec le simulateur ou l'émulateur
- De voir les variables grâce à des fenêtres d'observation (*watch windows*).

#### III.4.2. Création d'un nouveau projet

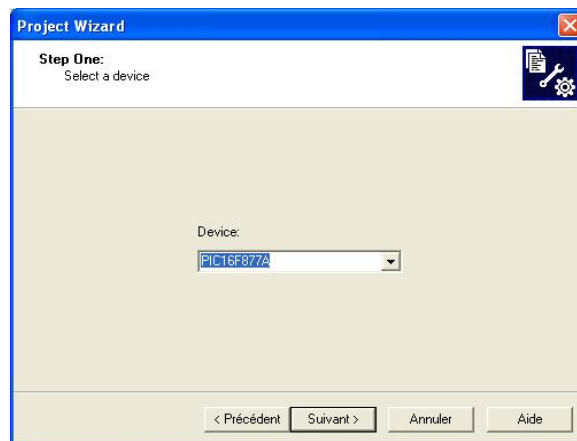
Les différents fichiers nécessaires à *MPLAB* lors d'un développement pour microcontrôleur sont représentés comme suite :

La première action à effectuer est donc la création d'un nouveau projet.

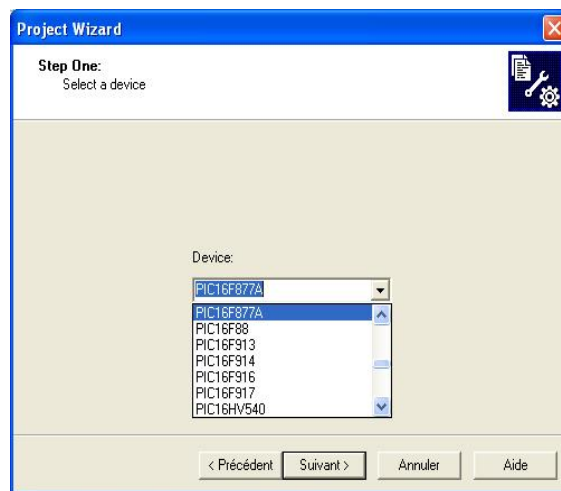
- ✓ Après avoir lancé *MPLAB*, Choisir dans le menu « *Projet* » l'action « *projet wizard* »



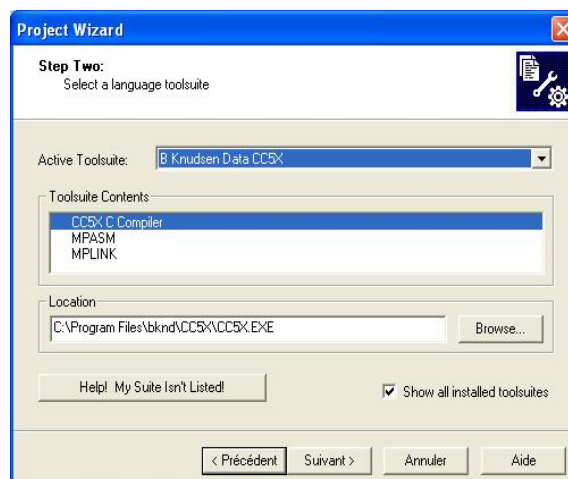
- ✓ L'assistance de création de projet s'affiche.



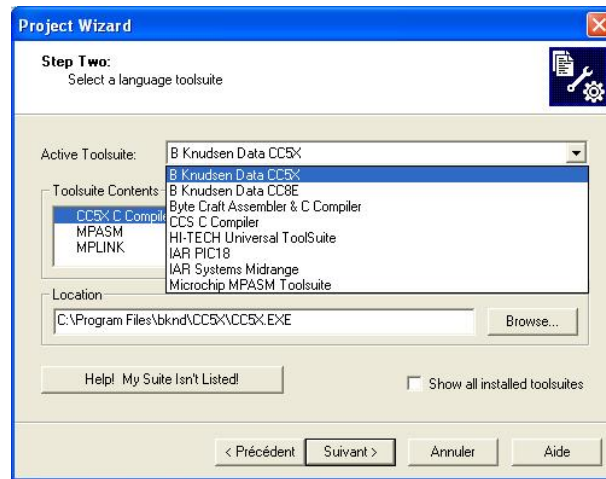
- ✓ Cliquez sur « *suivant* ».
- ✓ La première étape consiste à indiquer la référence du microcontrôleur qui sera utilisé.



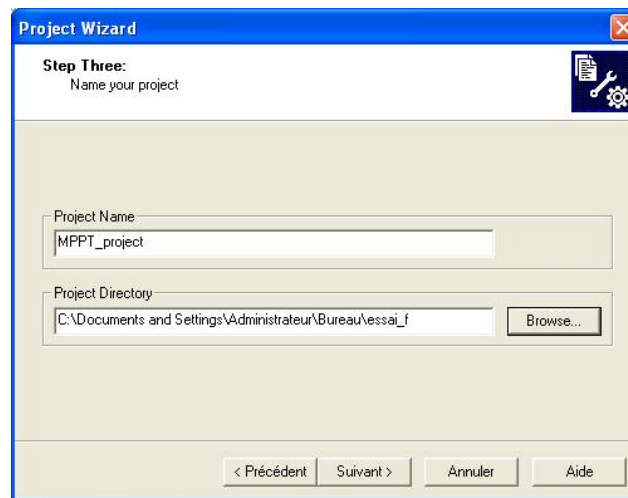
- ✓ Cliquer ensuite sur « *suivant* ».
- ✓ La seconde étape consiste à indiquer le langage qui sera utilisé pour la programmation. Dans certains cas, la liste des différents langages n'est pas complète, cocher alors la case « *show all installed tool suites* »




- ✓ pour une programmation en *assembleur* choisir pour la rubrique « *Active Toolsuite* » le langage « *Microchip MPASM toolsuite* ».
- ✓ pour une programmation en *langage C*, choisir pour la rubrique « *Active Toolsuite* » le langage « *Bknudsen Data.CC5X* ».



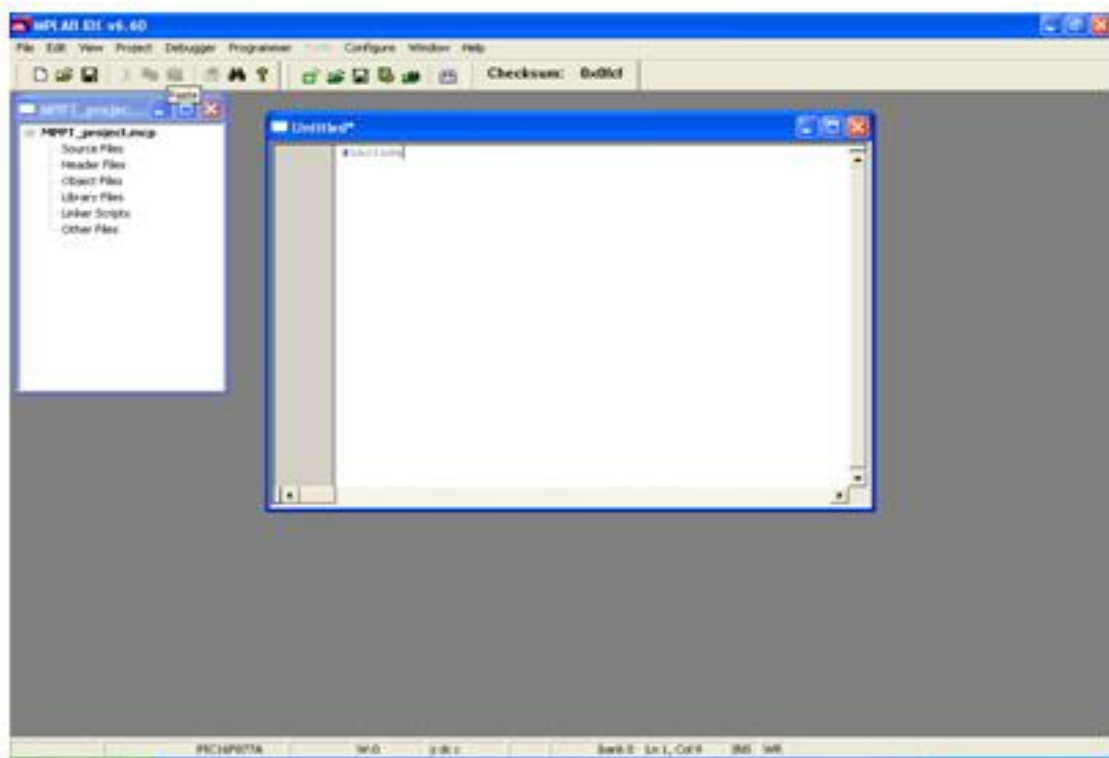
- ✓ cliquer en suite sur « *suivant* ».
- ✓ la troisième étape consiste à indiquer le nom du projet ainsi que son emplacement.
- ✓ indiquer dans la case « *create new project file* » le nom souhaité pour le projet, en utilisant le bouton « *browse* » pour parcourir l'arborescence des répertoires, et éventuellement créer un nouveau répertoire.



- ✓ cliquer sur « *suivant* ».
- ✓ la dernière étape permet éventuellement d'ajouter au projet un fichier source existant (en assembleur-extension.ASM ou en langage C-extension.C). Dans le cas où aucun fichier source existant n'est à incorporer au projet, cliquer directement sur « *suivant* ».
- ✓ pour ajouter un fichier source existant, parcourir l'arborescence dans la fenêtre de gauche, sélectionner le fichier désiré puis cliquer sur le bouton « *Add* » cocher ensuite la case située à gauche du nom du fichier pour qu'il soit copié à partir de son emplacement d'origine dans le répertoire du projet.
- ✓ Cliquer en suite sur « *suivant* ».

- ✓ L'assistant de création de projet affiche un résumé de celui-ci : contrôler les différentes informations présentées :
  - Référence du microcontrôleur ;
  - Outil utilisé en fonction du langage ;
  - Répertoire du projet.
- ✓ Cliquer sur « terminer » pour valider la création du projet.
- ✓ MPLAB affiche dans une fenêtre le nom du projet (d'extension .mcp « *Microchip Projet* »). Celui-ci mentionne éventuellement le nom du fichier source spécifié à l'étape 4 précédente, un double clic sur celui-ci permet de l'ouvrir en vue de l'éditer.
- ✓ Si aucun fichier existant n'a été incorporé au projet à l'étape 4, choisir dans le menu « file » l'option « New » ou cliquer sur l'icône 
- ✓ Une fenêtre d'éditition apparaît. Taper le texte du programme source (*en assembleur ou en C*). Puis enregistrer le fichier dans le même répertoire que celui de projet.
- ✓ Incorporer ce nouveau fichier source au projet en choisissant l'option « Add files » dans le menu contextuel (obtenu par un clic du bouton droit de la souris) de la rubrique « source files ».
- ✓ Rechercher puis sélectionner le fichier sauvegardé précédemment.

Une fois que nous avons fait toutes ces étapes il ne restera qu'à commencer l'écriture de programme.

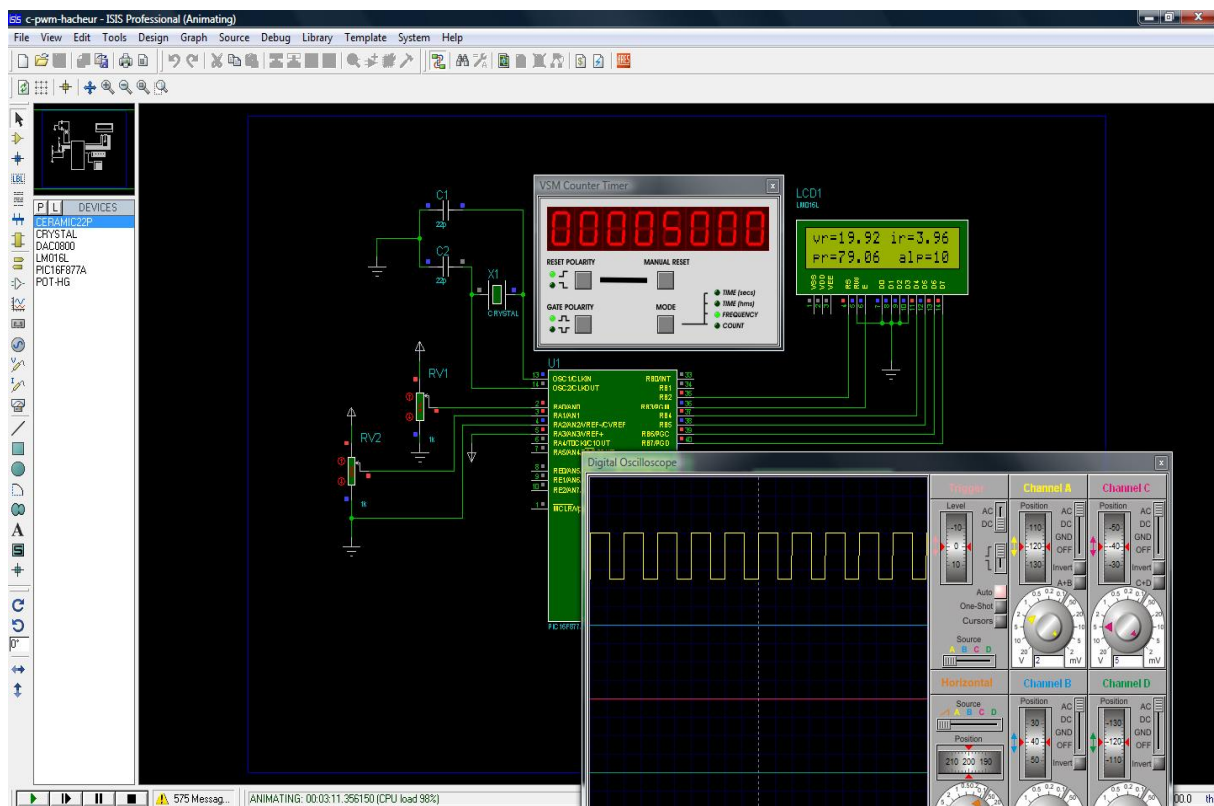


Après avoir écrit le programme nous l'avons simulé à l'aide de **PROTEUS**. Ce dernier nous a permis de réaliser le circuit du **PIC 16F887A** auquel nous avons ajouté un afficheur **LCD** pour afficher les valeurs de la tension ( $V_{pv}$ ), du courant ( $I_{pv}$ ), de la puissance ( $P_{pv}$ ), et le rapport cyclique ( ) à chaque variation de la température ou d'éclairement.

Une fois que le programme est injecté dans le **PIC** on commence la simulation. Pour chaque variation de la puissance ( $P_{pv}$ ) c.à.d. ( $I_{pv}$  et  $V_{pv}$ ) nous visualisons le signal de rapport cyclique ( ) à l'aide d'oscilloscope.

C'est avec ce signal qu'on commande le hacheur élévateur (**Boost**) que nous avons dimensionné dans le chapitre précédent.

La figure suivante illustre le circuit de simulation et le signal de commande de la **MPPT**.



**Figure III.11 : schéma de simulation réalisé par PROTEUS**



### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre une description des modules les plus importants du *PIC* ont été présentés à savoir : la conversion analogique/numérique et le module de la modulation de la largeur d'impulsion.

Nous avons terminé par une simulation du programme au niveau du logiciel *PROTEUS*.

## ***Chapitre IV***

### ***Conception et réalisation du convertisseur MPPT***

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous détaillerons la réalisation électronique de la commande MPPT numérique développée dans le cadre de ce projet. Pour atteindre ce but, nous allons réaliser plusieurs cartes électroniques à savoir le bloc alimentation, la carte du PIC avec affichage et enfin la carte du hacheur. La gestion du PIC est assurée par un algorithme MPPT que nous avons préalablement chargé dans la mémoire interne de ce dernier pour que l'adaptation se fasse automatiquement à tout instant. L'objectif principal de cet algorithme est d'effectuer une recherche automatisée du *PPM* du panneau photovoltaïque.

## IV.2. Description de l'installation

La **figure IV.1** représente les panneaux *PV* utilisés dans le cadre de nos travaux. Dans notre présent travail, nous avons considéré un seul panneau.

Les caractéristiques constructeurs de ces panneaux sous conditions standards ( $1000W/m^2$ ,  $25^{\circ}C$ ) sont illustrées dans le **tableau IV.1**



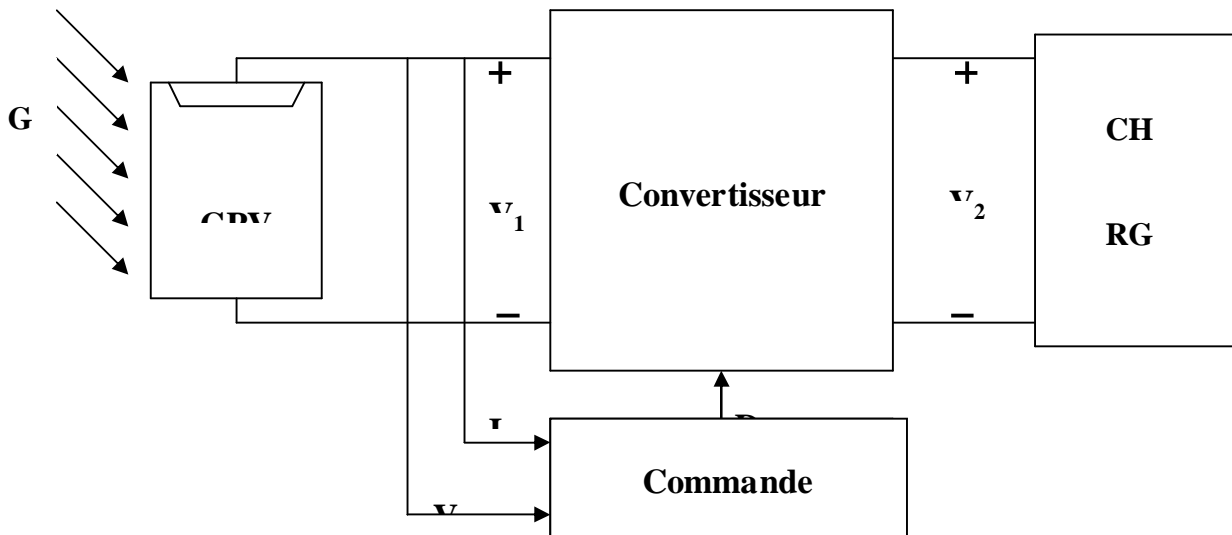
*Figure IV.1 : Site photovoltaïque du LATAGE-UMMTO*

**Tableau VI.1 : Caractéristiques du panneau solaire du LATAG-UMMTO**

<b>Module</b>	<b>80M-12</b>
<b>Puissance</b>	<b>85 W (25°C)</b>
<b>Tension optimale</b>	<b>17.10 V</b>
<b>Courant optimal</b>	<b>4.70 A</b>
<b>Tension à circuit ouvert</b>	<b>21.9 V</b>
<b>Courant de court-circuit</b>	<b>4.96 A</b>

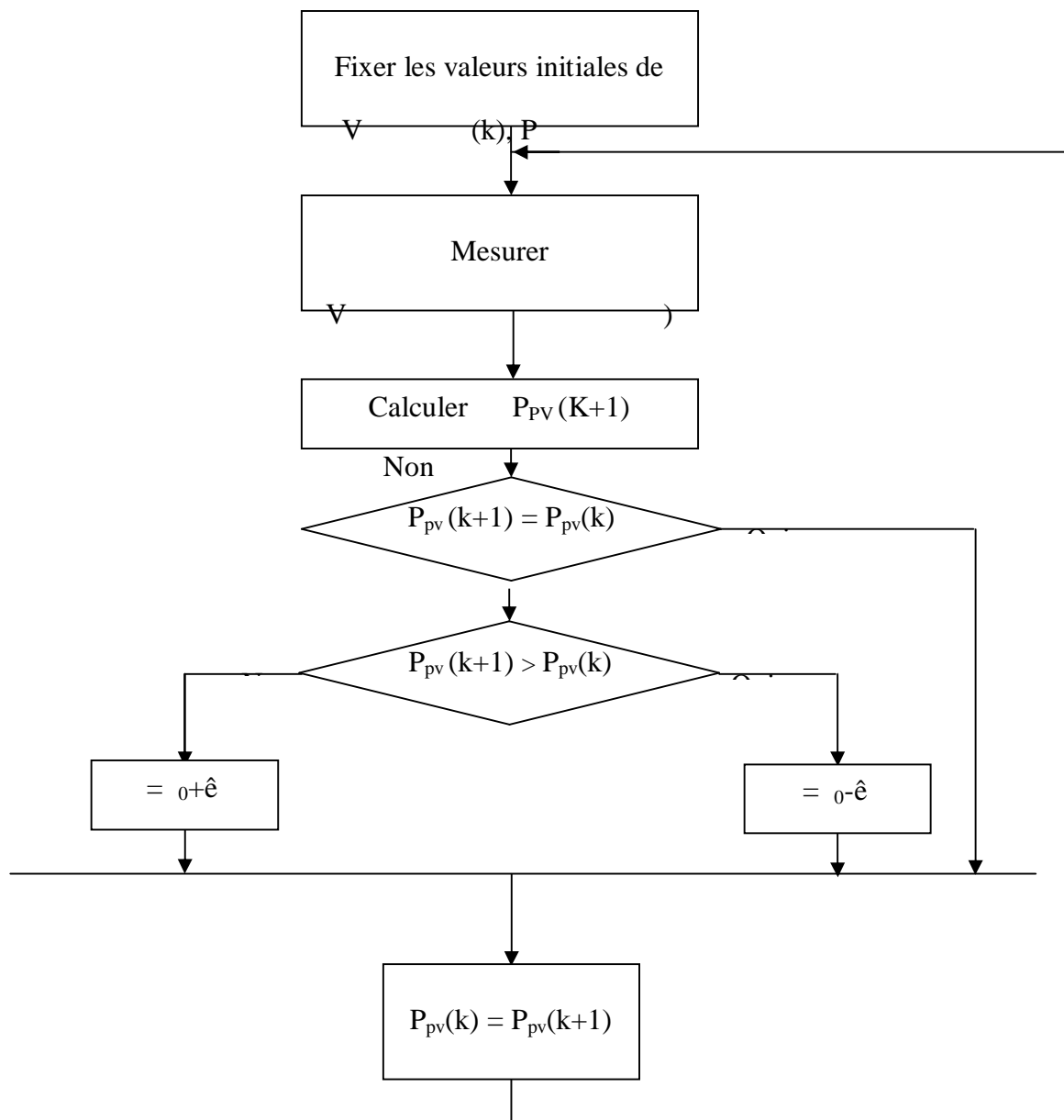
### IV.3. Description de la commande MPPT à réaliser

Comme nous l'avons cité dans le premier chapitre, notre réalisation *MPPT* se base sur la méthode de « **Perturbation et Observation *P&O*** » pour sa simplicité. La **figure IV.2** présente le schéma de principe de la commande *MPPT*.



**Figure IV.2 : Schéma de principe de la MPPT**

Cette méthode de recherche du point de puissance maximale est considérée comme la première technique développée pour atteindre cet objectif, elle se base sur l'algorithme suivant :



**Figure IV.3 Organigramme de la MPPT à réaliser**

Le système démarre d'un rapport cyclique initial «  $\alpha_0$  » et d'une puissance initiale  $P_0$ . Après avoir effectué la mesure du courant «  $I_{pv}$  » et la tension «  $V_{pv}$  » aux bornes du PV, le produit ( $V_{pv} * I_{pv}$ ) est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée  $P_{pv}(k+1)$  délivrée par le générateur PV à l'instant où la mesure est effectuée.

Cette image est alors comparée à la puissance précédente  $P_{pv}(k)$  et est **incrémentée**. Une fois modifiée,  $P_{pv}(k)$  prend la valeur de la puissance précédente  $P_{pv}(k+1)$  et  $\alpha_0$  prend la valeur de  $\alpha$ , **enfin**, une nouvelle mesure de  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  est effectuée pour calculer la nouvelle puissance  $P_{pv}(k+1)$ .

L'objectif de notre étude est la réalisation d'une commande *MPPT* numérique basée sur la commande déjà existante en version analogique. Les objectifs concrets que nous voulons atteindre par cette réalisation numérique sont les suivantes :

- Obtention des rendements *MPPT* équivalents à ceux obtenus avec la commande *MPPT* analogique
- Réduction du coût de fabrication par rapport à la commande *MPPT* analogique
- Réduction du nombre de composants utilisés pour la mise en œuvre
- Diminution du volume total de l'étage d'adaptation PV
- Diminution de la consommation de la commande

## VI.4. Présentation du prototype

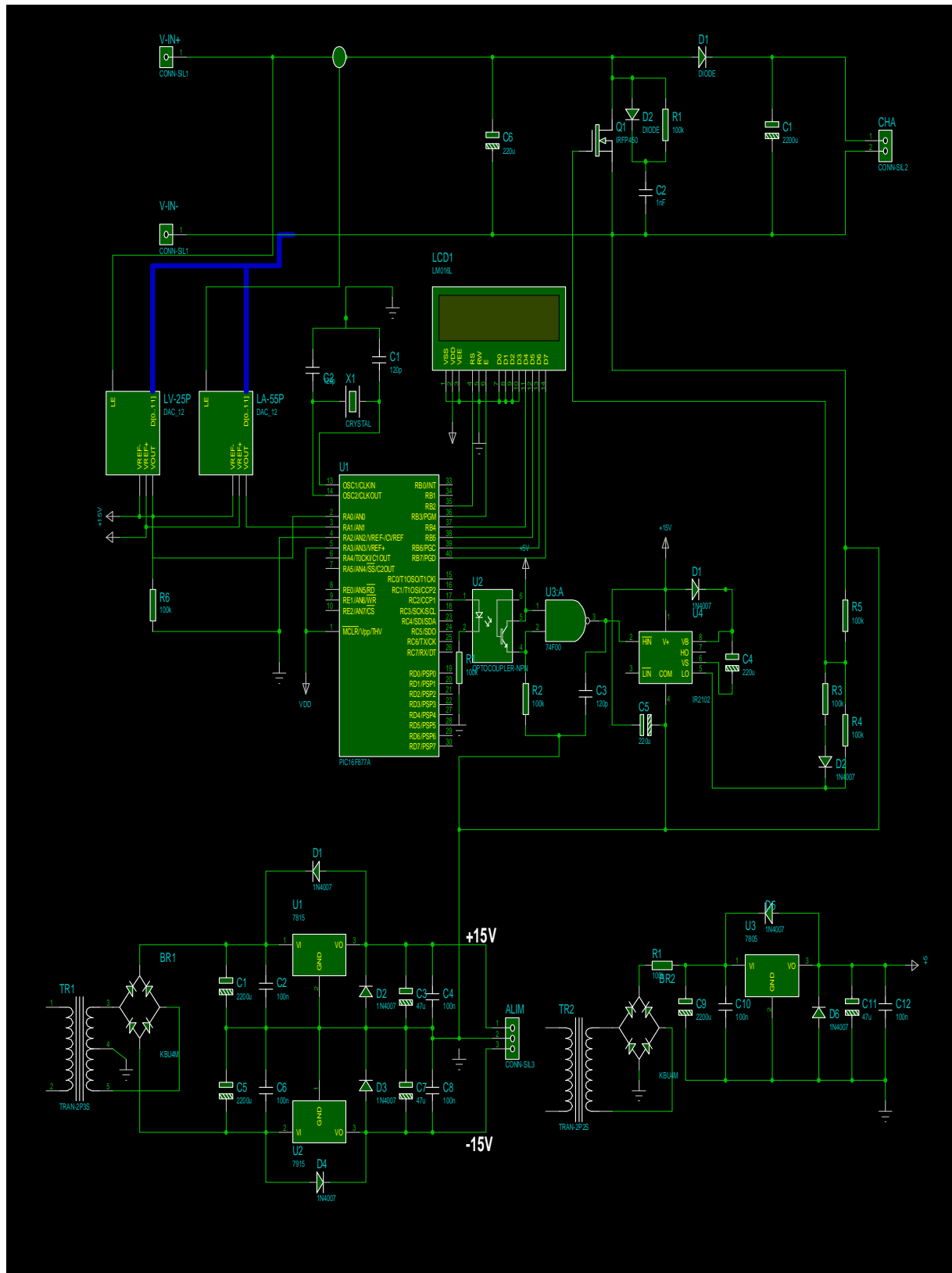
Le schéma de la **figure IV.4**, représentant le prototype à réaliser, il a été fait sous le logiciel électronique *PROTEUS (ISIS)*, qui permet de dessiner des schémas électroniques, de les simuler et de réaliser le circuit imprimé correspondant. Dans cette partie nous allons aborder la présentation du projet que nous voulons réaliser.

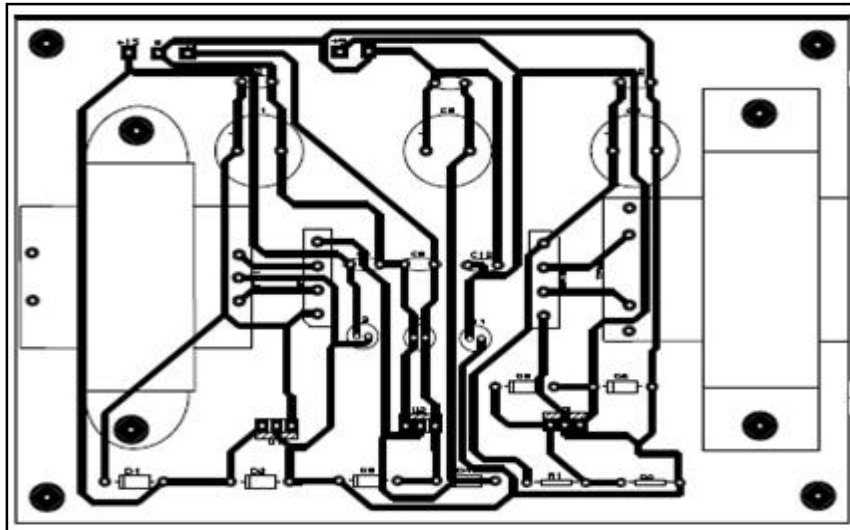
### IV.4.1. Bloc d'alimentation

Afin de fournir la tension de fonctions du Driver du *MOSFET*, l'inverseur, l'afficheur, les capteurs et du *PIC*, une carte d'alimentation (+5V, +15V et -15V) est réalisée ou nous avons utilisés :

- Un transformateur abaisseur 220V/(2.17) V
- Un transformateur abaisseur 220V/12V
- Deux ponts de gretz,
- Un régulateur *L7805CV* pour stabiliser la tension à 5V,
- Un régulateur *L7815CV* pour stabiliser la tension à +15V,
- Un régulateur *L7915CT* pour stabiliser la tension à -15V,
- Et leurs composants (condensateurs, diodes, résistances etc.).

La **figure IV.5** représente le circuit imprimé de la carte sous *Proteus*.





*Figure IV.5 : Circuit imprimé de la carte d'alimentation*

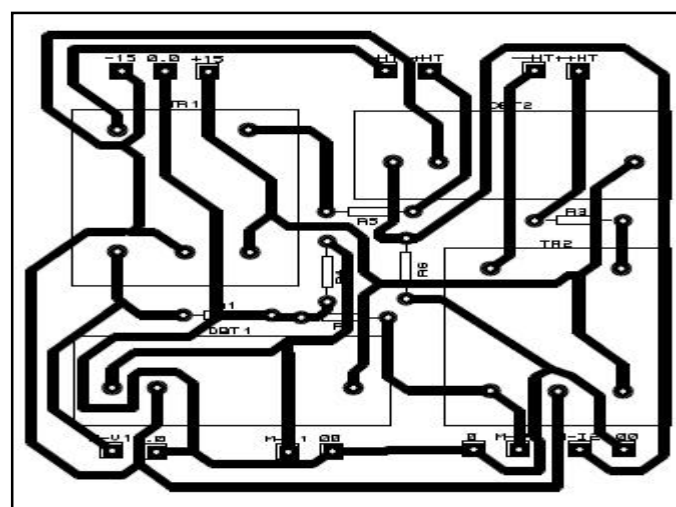
#### **IV.4.2. Conception de l'unité de mesure**

La mesure de la tension et du courant sont nécessaires au calcul de la puissance produite par le *GPV*.

Les microcontrôleurs 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 capteur de tension qui abaissera la tension à mesurer vers le seuil de tolérance du *PIC*.

Un capteur du courant qui transforme le courant à mesurer à une tension de sortie qui lui est proportionnelle. Les schémas des circuits imprimés sont donnés par la **figure IV.6**

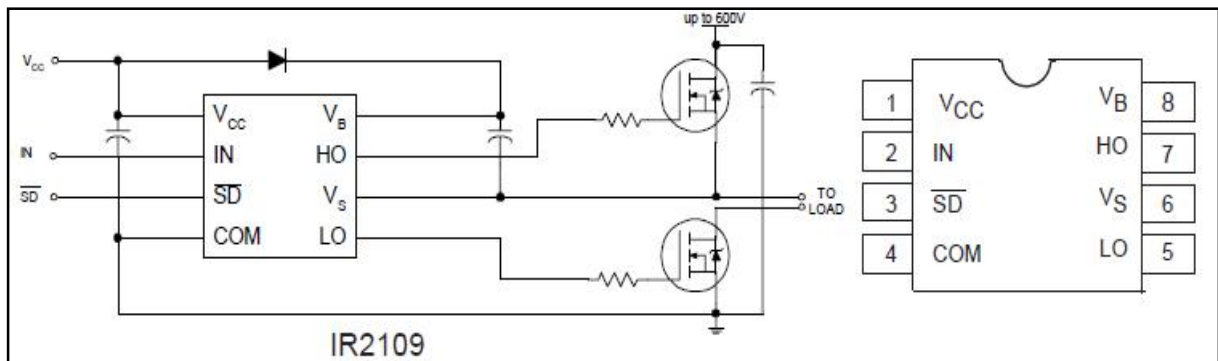


*Figure IV.6 : Circuit de la carte de l'unité de mesure*



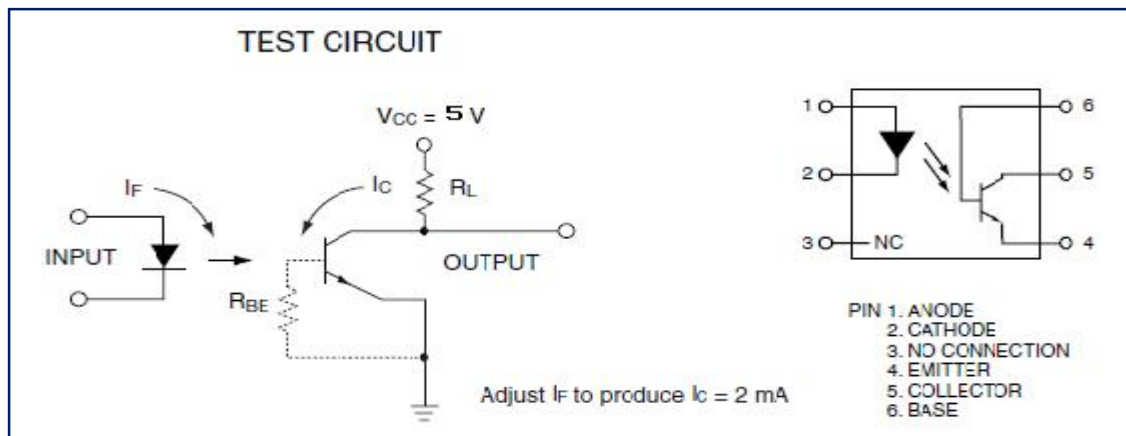
#### IV.4.3. Conception de l'unité de contrôle

L'unité de contrôle conçue dans ce travail consiste à effectuer la mesure des différentes grandeurs requises par l'algorithme utilisé (tension et courant débités par le panneau photovoltaïque) pour générer ensuite le signal de commande requis. Cet objectif est atteint en utilisant un microcontrôleur *16F877A*. Ce dernier est capable de générer un signal *MLI*. Néanmoins, ce signal ne peut être utilisé pour commander d'une manière directe les composants de puissance à savoir les *MOSFET* ou les *IGBT* qui consistent à être commandés par une tension de +15V. Comme la tension générée par le microcontrôleur est de l'ordre de 0-5V, un dispositif (Driver) est utilisé pour effectuer cette tâche. Le Driver que nous avons choisi est le (*IR2109*). Ce dernier a été choisi pour sa haute fréquence de fonctionnement et sa basse consommation. La **figure IV.7** montre la disposition des broches du driver et leurs connexions aux composants de puissance.



**IV.7 : schéma d'une application typique du IR2109**

Enfin, un circuit d'isolation galvanique (opto-coupleur) est prévu pour assurer la protection de l'unité de contrôle. Le fait d'employer un opto-coupleur contribue à la sécurité du montage et permet ainsi d'amplifier le signal et d'assurer un haut niveau d'isolation électrique entre la partie commande et la partie puissance. La carte de commande sera ainsi protégée contre tout court-circuit éventuel dans la partie puissance. Dans notre cas, on a utilisé un opto-coupleur « *4N35* », la **figure IV.8** montre le circuit utilisé.



**Figure IV.8 : Schéma de l'optocoupleur utilisé**

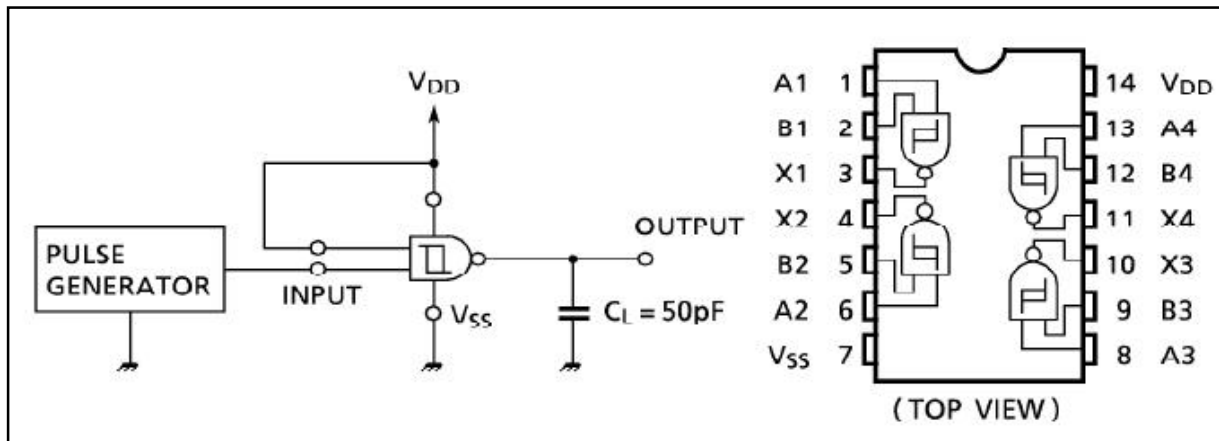


Figure IV.9 : Schéma de l'inverseur utilisé

### Affichage des données :

Pour l'affichage des différentes grandeurs mesurées et d'autres informations utiles, nous avons utilisé un afficheur à cristaux liquides (LCD) à deux (02) lignes. Un circuit intégré spécialisé est chargé de la gestion du module. Il remplit une double fonction d'une part, il commande l'affichage, et se charge de la communication avec l'extérieur.

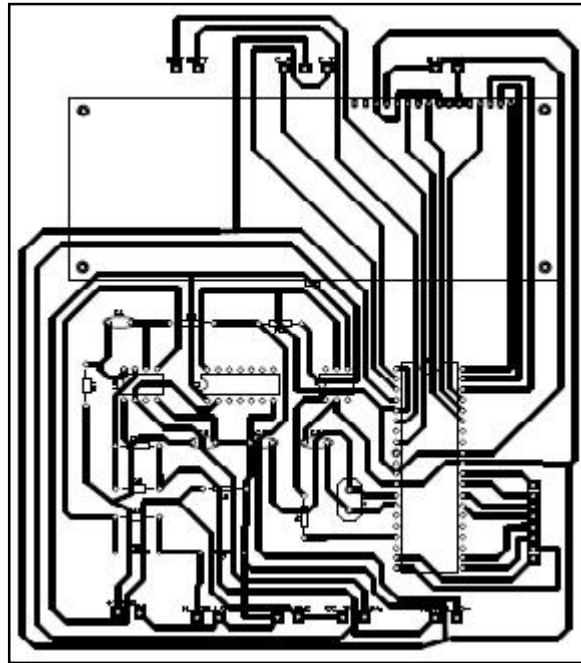
Le tableau ci-dessous présente les différentes broches de l'afficheur.

Broche	Nom	Fonction
1	Vss	Masse
2	Vdd	Alimentation positive +5V
3	Vee	Réglage du contraste de l'afficheur
4	RS	Sélection du registre (Register Select)
5	R/W	Lecture ou écriture (Read/Write)
6	E	Entrée de validation (Enable) active sur front descendant
7..14	D0..D7	Bus de données bidirectionnel 8 états
15	A	Anode rétroéclairage (+5V)
16	K	Cathode rétroéclairage (masse)

Tableau VI.1 : Les différentes broches de l'afficheur

Ces composants sont utilisés dans le circuit de commande, donc l'implémentation des ces composants se fait dans une même carte.

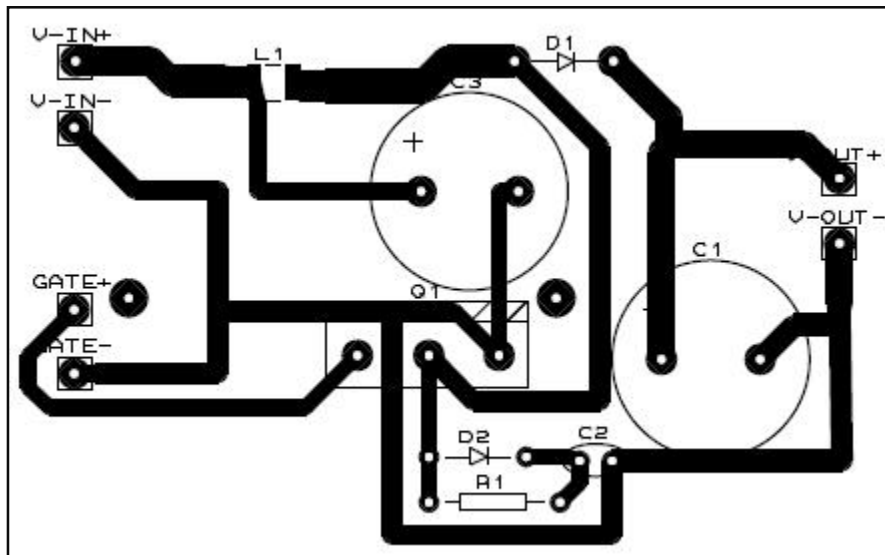
La figure IV.10 montre le schéma du circuit de commande.



*Figure IV.10 : Carte du circuit de commande*

#### IV.4.4. Réalisation du convertisseur *BOOST*

C'est un circuit de puissance qui est essentiellement constitué d'un hacheur parallèle pour élever la tension des panneaux photovoltaïques, il est défini par la figure suivante :

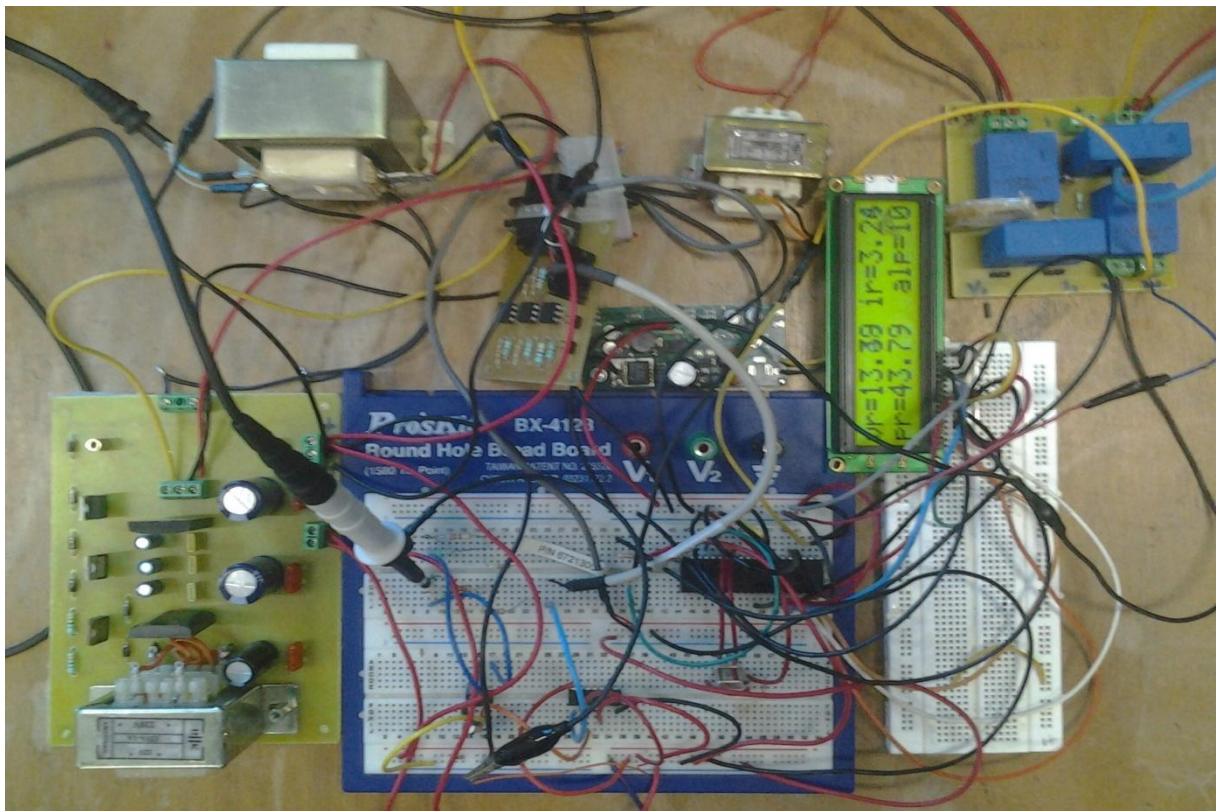


*Figure IV.11 : circuit imprimé du convertisseur statique*

## IV.5. Essais expérimentaux

Pour tester les performances du banc d'essais réalisé, nous avons effectué quelques essais sur une charge purement résistive.

Au départ, nous avons connecté la charge directement au panneau sans utilisation du convertisseur DC/DC, cela pour la vérification du programme développé pour la poursuite de puissance maximale générée par les panneaux photovoltaïques. Le schéma de montage est donné par la **figure IV.12**.

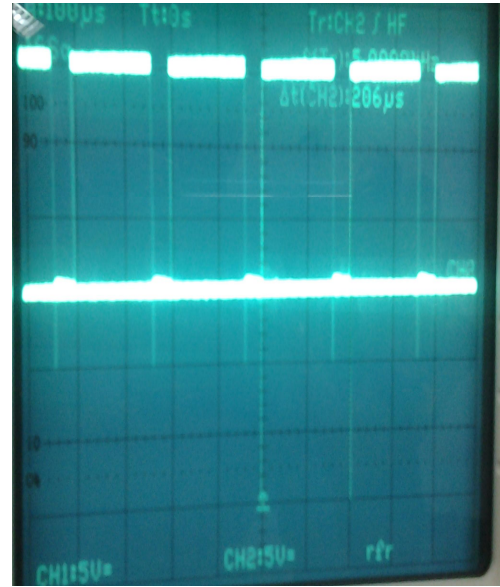
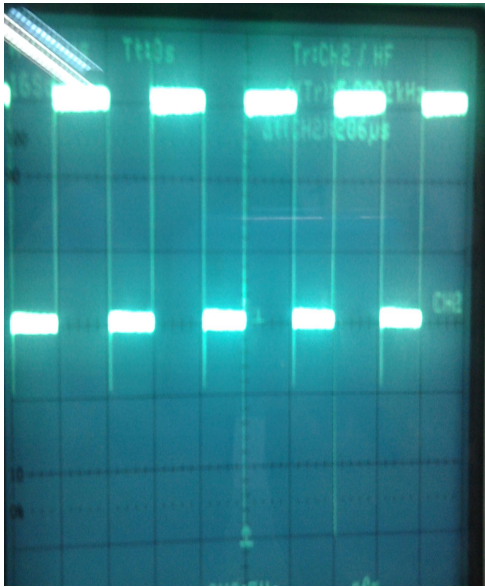


*Figure IV.12 : Schéma de montage*

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un oscilloscope numérique à double voie, qui nous permet de visualiser les signaux.

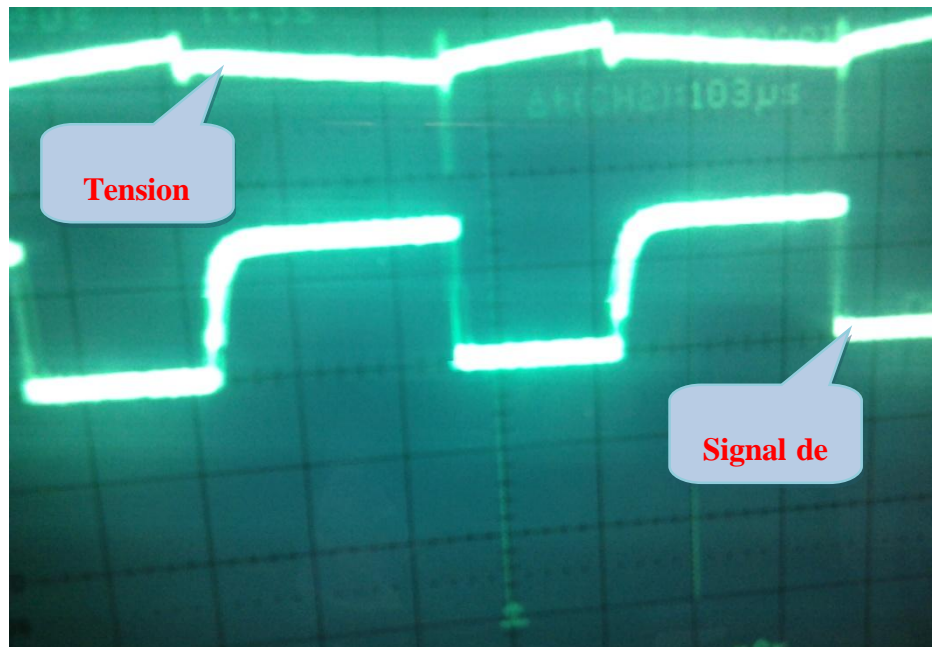
On donne sur la **figure IV.13** les allures du rapport cyclique à la sortie du driver en fonction de la puissance disponible aux bornes du panneau photovoltaïque.



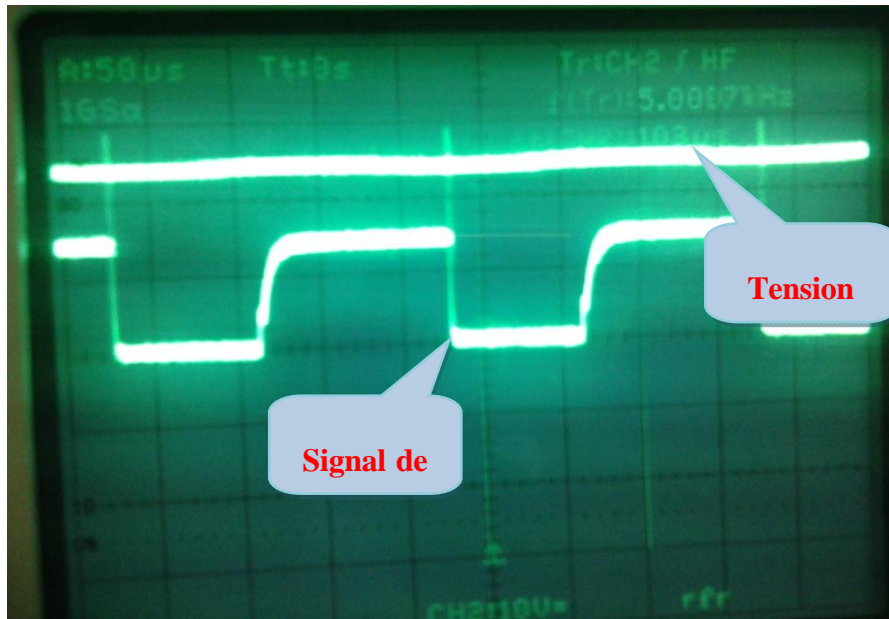


*Figure IV.13 : Signaux de commande*

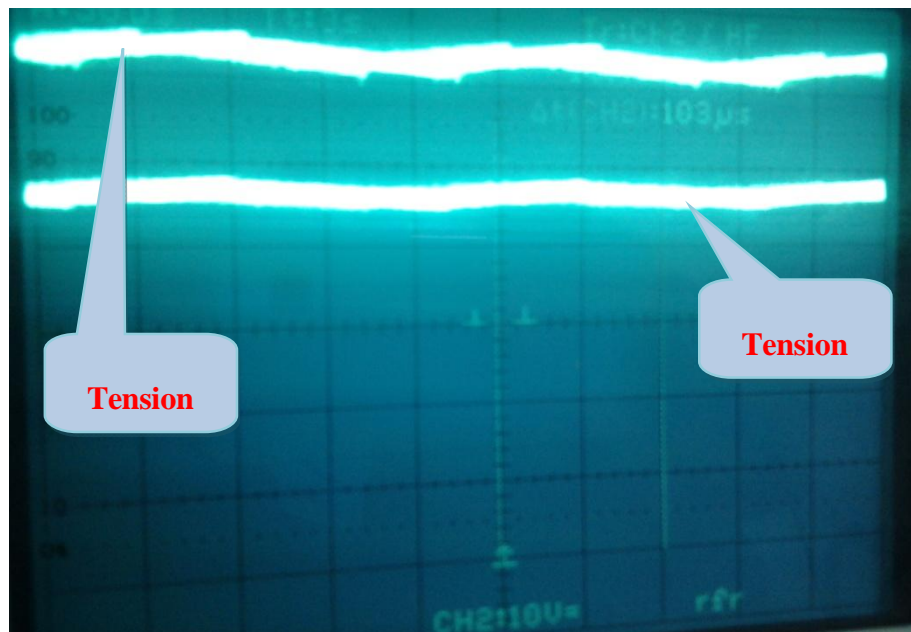
Après avoir vérifié le bon fonctionnement du signal de commande (MLI), nous avons connecté cette charge au panneau photovoltaïque via le convertisseur DC/DC réalisé. Les différents signaux sont représentés par les figures suivantes :



*Figure IV.14 : signal de commande et la tension de sortie du convertisseur*

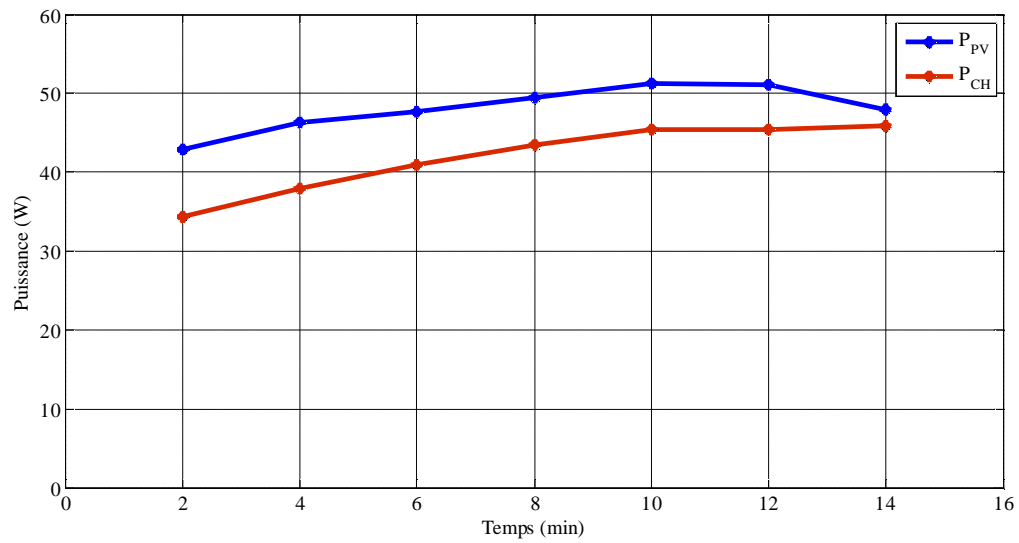


*Figure IV.15 : signae de commande et la tension d'entrée du convertisseur*



*Figure IV.16 : allures de la tension de sortie et la tension d'entrée du convertisseur*

D'après ces courbes, on remarque que la tension est approximativement le double de la tension d'entrée est cela est dû à la valeur du rapport cyclique qui avoisine les (é50%) imposée par la commande du convertisseur, ce dernier est variable selon la puissance du panneau photovoltaïque.



**Figure IV.16 : allures de la tension de sortie et la tension d'entrée du convertisseur**

La **figure IV.16** illustre les puissances mesurées d'entrées et de sorties, nous constatons que la technique *MPPT* adopté dans ce présent travail donne des résultats satisfaisantes au terme de la poursuite du point de puissance maximale. Les valeurs des grandeurs d'entrée et de sortie sont données par le **tableau VI.1**.

## ***Conclusion générale***



## *Conclusion générale*

Le générateur photovoltaïque est un convertisseur d'énergie caractérisé par un point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point se déplace en fonction des conditions atmosphériques. Un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque puisse fonctionner avec efficacité. Grâce à la présence d'un processus de poursuite de point de puissance maximale, connu sous le nom de contrôleur MPPT, une adaptation source/charge est réalisée, permettant un transfert maximal de puissance.

Dans un premier temps, nous avons montré l'effet de l'irradiation solaire et de la température sur les caractéristiques de base du modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque, par conséquent, une validation expérimentale de ce dernier a été effectuée par des essais expérimentaux. Nous terminons cette partie par le dimensionnement du convertisseur à réaliser.

Dans la deuxième partie, la configuration et la programmation du microcontrôleur a été réalisée pour qu'il puisse répondre aux exigences de la commande MPPT, nous passerons ensuite à la réalisation des différentes cartes électroniques (Alimentations, Capteurs, carte de commande et carte du convertisseur). Enfin, des essais ont été effectués sur le système réalisé. Les performances de la commande MPPT ont été vérifiées par le relevé de la puissance de sortie et celle d'entrée.

La commande MPPT numérique ainsi réalisée est très avantageuse notamment par rapport au coût et la rapidité de poursuite, néanmoins, elle présente quelques inconvénients à savoir, le manque de précision. Cet obstacle peut être corrigé en ajoutant un circuit analogique à la sortie du PIC pour assurer la régulation.

## ***Annexe***

**Annexe A :**

V (V)	I (A)
18.60	00.08
18.50	00.12
18.50	00.13
18.40	00.16
18.40	00.17
18.30	00.28
18.20	00.37
18.10	00.46
18.00	00.66
17.80	00.84
17.70	00.92
17.60	01.01
17.50	01.08
17.40	01.16
17.30	01.26
17.10	01.34
17.00	01.43
16.80	01.57
16.70	01.65
16.60	01.71
16.50	01.79
16.40	01.84
16.30	01.88
16.10	01.99
16.00	02.05
15.80	02.13
15.60	02.17
15.40	02.23
15.10	02.28
14.80	02.34
14.60	02.36
14.40	02.28
14.20	02.40
13.90	02.42
13.70	02.44
13.60	02.45
13.50	02.46
13.30	02.47
13.10	02.48
12.70	02.56
12.40	02.51
11.80	02.53
11.30	02.55
10.10	02.58
09.10	02.60
08.70	02.61
08.30	02.62

(a): 7h:00

V <sub>1</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)
18.50	00.07
18.50	00.08
18.50	00.10
18.40	00.11
18.40	00.12
18.40	00.13
18.30	00.17
18.30	00.18
18.30	00.19
18.30	00.26
18.20	00.29
18.20	00.37
18.10	00.40
18.10	00.45
18.00	00.48
18.00	00.51
18.00	00.56
17.90	00.60
17.90	00.65
17.80	00.69
17.80	00.72
17.80	00.77
17.70	00.80
17.70	00.85
17.60	00.90
17.60	00.97
17.50	01.02
17.50	01.05
17.50	01.08
17.40	01.15
17.40	01.18
17.30	01.28
17.30	01.36
17.20	01.48
17.10	01.58
17.00	01.69
16.90	01.78
16.80	01.94
16.60	02.12
16.40	02.29
16.20	02.45
15.90	02.70
15.50	02.98
15.50	03.00
13.70	03.60
12.10	03.80
10.20	03.94

(b): 13h:00

V <sub>2</sub> (V)	I <sub>2</sub> (A)
18.00	00.07
17.90	00.08
17.90	00.13
17.80	00.20
17.50	00.25
17.50	00.34
17.50	00.38
17.40	00.42
17.40	00.48
17.30	00.50
17.30	00.54
17.20	00.56
17.10	00.60
17.00	00.67
17.00	00.70
16.80	00.77
16.80	00.80
16.70	00.82
16.60	00.86
16.50	00.90
16.40	00.93
16.30	00.97
16.30	01.00
16.20	01.02
16.10	01.04
16.00	01.07
15.80	01.12
15.60	01.16
15.40	01.21
15.10	01.24
14.80	01.28
14.20	01.33
13.90	01.35
13.40	01.38
13.00	01.40
12.70	01.41
12.30	01.42
11.90	01.44
11.50	01.45
11.00	01.46
10.30	01.48
09.80	01.49
08.80	01.50
08.30	01.51
07.70	01.52
06.70	01.52
06.40	01.54

(c): 17h:00

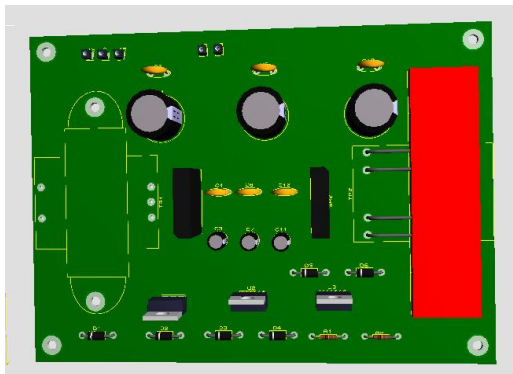
***Tableau II.1 : les différentes valeurs de la tension et du courant du générateur photovoltaïque***

$V_{PV}$ (V)	11.00	12.00	12.50	13.00	13.50	13.50	13.60
$I_{PV}$ (A)	03.90	03.86	03.81	03.80	03.80	03.78	03.53
$V_{sort}$ (V)	24.00	25.60	26.40	27.20	28.00	28.00	28.60
$I_{sort}$ (A)	01.43	01.48	01.55	01.60	01.62	01.62	01.59
T (min)	02.00	04.00	06.00	08.00	10.00	12.00	14.00

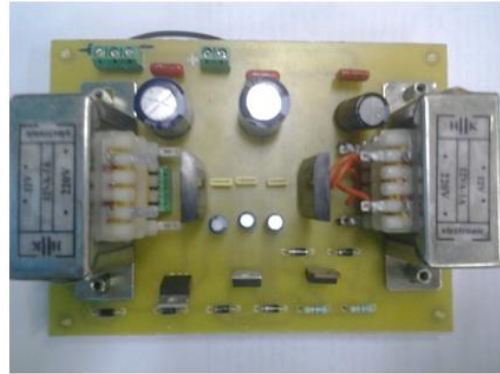
***Tableau IV.1 : les différentes valeurs des grandeurs d'entrée/sortie du convertisseur***

## Annexe B :

### *Les différentes cartes réalisées*

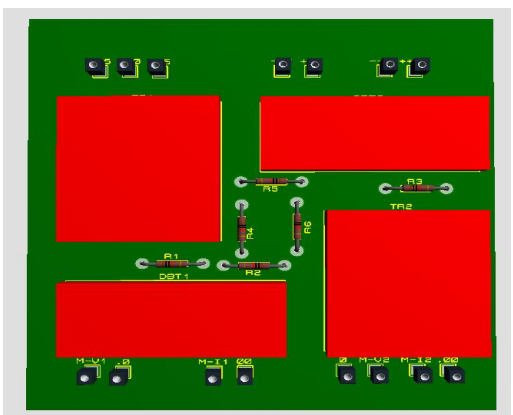


*(a) :vue en 3D par simulation*

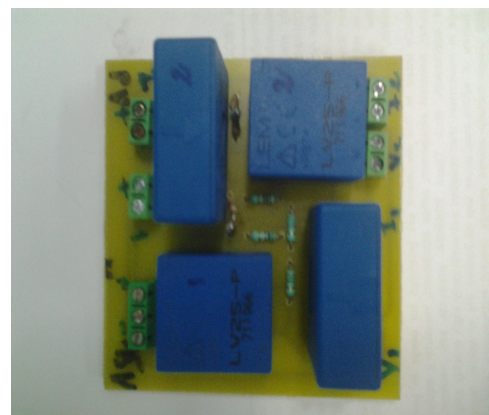


*(b) : carte réelle*

*Figure (1) : Vues de la carte d'alimentation réalisée*

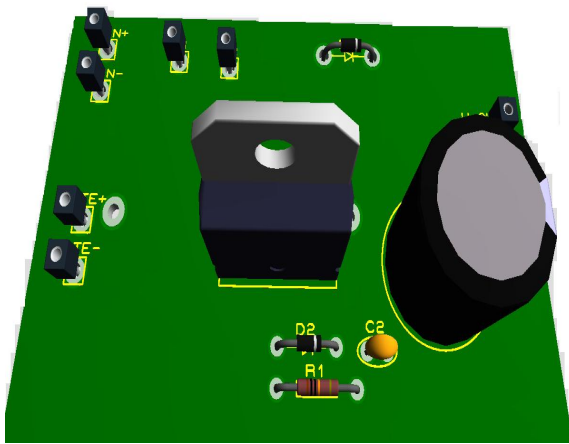


*(a) :vue en 3D par simulation*



*(b) : carte réelle*

*Figure (2) : Vues de la carte de mesure réalisée*

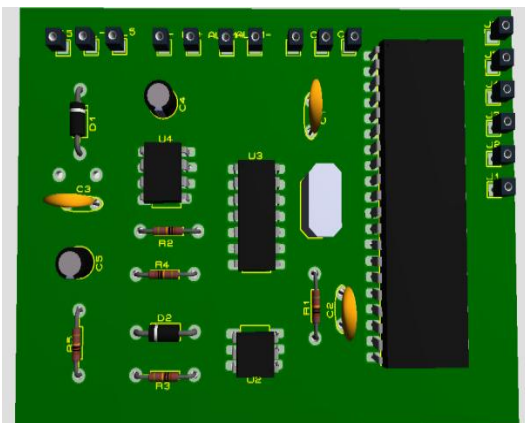


(a) :vue en 3D par simulation

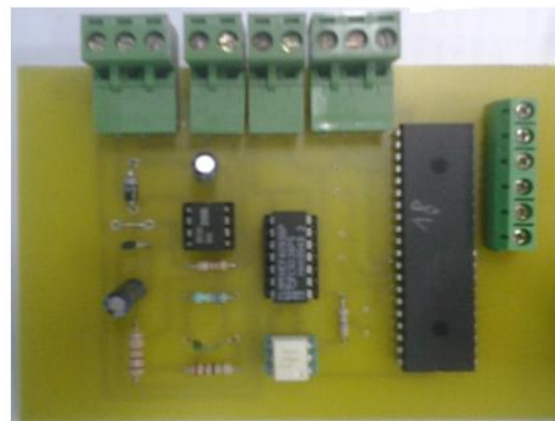


(b) : carte réelle

Figure (3) : Vues de la carte du convertisseur réalisée



(a) : vue en 3D par simulation



(b) : carte réelle

Figure (3) : Vues de la carte de commande réalisée

## ***Bibliographie***

## ***Bibliographie***

- [1] M. ADOUANE, « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », Mémoire de Magister, Ecole National Polytechnique d'Alger, Alger, 2008.
- [2] J. LACHAISE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à l'attraction », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [3] L. ABBASSEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Alger, 2011.
- [4] S. ALGDDAR, « Design of an intelligent solar power management system for a two bedroom house », Master Thesis, University of Derby, UK, 2009.
- [5] Aliroza Khaligh, Omer C.Onar, « Energy harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems », Taylor and Francis Group, 2010.
- [6] BIGONOFF, « La programmation des PIC Par Bigonoff, Seconde Partie- Révision 21, la gamme MID-Range par l'étude des PIC 16F87X. <http://www.abcelectronique.com/bigonoff> ou [www.bigonoff.org](http://www.bigonoff.org). »