

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Automatisation et contrôle des Systèmes industriels**

## **THÈME**

# **Etude et conception d'un système de contrôle pour suiveur de soleil**

***Préparé par :***

**AZIL AHMED AZEDDINE**

**AIDOUNI YASSINE**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mr S.BELFEDAL	MAA	Président
Mr B.BELABBAS	MAA	Examineur
Mr L.BESSOLTANE	MAA	Encadreur

**PROMOTION 2015 /2016**

# Remerciements

*Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères envers Monsieur Bessoltane laïd notre cher enseignant, pour l'encadrement, sa disponibilité, leur patience, leur compréhension, leur subvention financière et leur aide précieuse pour réussir notre projet.*

*Nos remerciements aussi à Messieurs Aybout Kada, Chehat Tahar, Sasi, Henni Omar, Bouhawse Mustapha, Nasri Djilali et Madame OGAB pour leurs disponibilité, leurs soutiens morale, leurs encouragements et leurs aides dans l'élaboration du projet.*

*Nous remercions le président et membres du jury pour bien vouloir évaluer notre travail.*

*Nos derniers remerciements ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce modeste travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents : ABDELHMID et DJEMAA que dieu les garde et Les protège pour leurs soutiens morale et financiers, Je les remercie de m'avoir encouragé Et aidés à devenir ce que Je suis et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mon frère et mes sœurs et à toute ma grande famille.*

*Aux chers amis : BRAHIM, ANOIR, HAMZA, AZOU, HOSSAM, ZAKI, MOHAMED.*

*A tous mes collegues d'études surtout UIT DE CHALALA ET PROMOTION DE AUTOMATISATION ET CONTROL DE Système INDUSTRIELLE 2016.*

*AHMED AZEDDINE*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents : ABDELHAFID et DJAMILA que dieu les garde et Les protège pour leurs soutiens morale et financiers, Je les remercie de m'avoir encouragé Et aidés à devenir ce que Je suis et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mon frère et mes sœurs et à toute ma grande famille.*

*Aux chers amis : Amine, Taher ,Oussama, Kamel, Meddah, Khaled, Hichem, Redouane, Mustapha, Abdelhak, Zinou, Zaki, Hocine, Youcef, Mehdi.*

*A tous mes collègues d'études surtout ceux d'automatisation et contrôle des Systèmes industriels promotion 2016.*

*Yassine*

# Sommaire

## Sommaire

## Remerciement

## Dédicaces

## Liste de figures

## Introduction générale

<b>CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES.....</b>	<b>2</b>
I.1. introduction.....	2
I.2. Rayonnement solaire.....	2
I.3. Energie photovoltaïque.....	3
I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	4
I.5. Technologies des cellules photovoltaïques.....	6
I.5.1. La première technologie.....	6
I.5.2. La deuxième technologie.....	7
I.5.3. La troisième technologie (non silicium).....	7
I.6. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.6.1. Courant de court-circuit.....	8
I.6.2. Tension de circuit-ouvert.....	9
I.6.3. Rendement énergétique.....	9
I.6.4. Facteur de forme.....	9
I.7. Performances de générateur photovoltaïque.....	9
I.7.1. Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension.....	9
I.7.2. Influence de la température sur la caractéristique courant-tension.....	10
I.8. Architecture classique d'un générateur photovoltaïque.....	12
I.8.1. Module et groupement de cellules en série.....	12
I.8.2. Groupement de cellules ou modules en parallèle.....	13
I.9. Avantages et Inconvénients du solaire photovoltaïque.....	14
I.10. Conclusion.....	15
<b>CHAPITRE II: SYSTEME POURSUITE SOLAIRE.....</b>	<b>16</b>
II.1. introduction.....	16
II.2. Intérêt des suiveurs.....	16
II.3. Position du soleil par rapport à un observateur.....	17
II.4. Orientation de la surface.....	19

II.5. Différents types de montures.....	21
II.5.1 Monture al azimutale.....	21
II.5.2 Monture équatoriale.....	21
II.6. Système suiveur solaire utilisant des capteurs LDRs.....	22
II.7. Conclusion.....	23
<b>CHAPITRE III: CALCULATEUR ET ACTIONNAIRE DANS UN SUIVEUR DE SOLEIL</b>	<b>24</b>
III.1. Introduction.....	24
III.2. Le microcontrôleur 16F877A.....	24
III.2.1. Les différentes familles des PICs.....	25
III.2.2. Les caractéristiques du PIC 16F877A.....	25
III.2.3. L'architecture externe et interne du PIC 16F877A.....	25
III.2.4. Organisation de la mémoire du PIC16F877A.....	27
III.2.5. Registres du PIC 16F877A.....	28
III.2.6. Les interruptions.....	29
III.2.7. Les Timers.....	29
III.3. Capteurs de lumière.....	30
III.3.1. Principales caractéristiques des capteurs.....	31
III.3.2. Principe de fonctionnement d'une photorésistance.....	31
III.4. Moteur à courant continu.....	32
III.4.1. Organes mécaniques d'un MCC.....	32
III.4.2. Stator.....	33
III.4.3. Rotor.....	33
III.4.4. Collecteur et balai.....	34
III.4.5. Moteur à courant continu à aimant permanent.....	35
III.5. Caractéristiques électriques d'un MCC.....	35
III.5.1. Equations électriques.....	35
III.5.2. Bilan des puissances.....	36
III.6. Caractéristiques mécaniques d'un MCC.....	37
III.6.1. Couple moteur (couple utile) et couple de pertes.....	37
III.6.2. Couple résistant.....	37
III.6.3. Rendement.....	38
III.7. Circuit de pilotage d'un MCC.....	39
III.8. Conclusion.....	40

<b>CHAPITRE IV: SIMULATIONS, REALISATIONS ET RESULTATS OBTENUS.....</b>	<b>41</b>
IV.1. Introduction.....	41
IV.2. Simulations et résultats obtenus.....	41
IV.3. Réalisations et résultats expérimentaux.....	48
IV.4. Conclusion.....	52
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>53</b>
<b>RESUME</b>	
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	

## LISTE DE FIGURES

<b>Figure (I-1) Réponse spectrale d'une cellule PV</b>	<b>2</b>
<b>Figure (I-2) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>4</b>
<b>Figure (I-3) Cellule photovoltaïque</b>	<b>4</b>
<b>Figure (I-4): Caractéristique courant tension d'une cellule PV au silicium</b>	<b>5</b>
<b>Figure (I-5) Modèle équivalent d'une cellule PV au silicium</b>	<b>5</b>
<b>Figure (I-6) Panneaux PV (cellule monocristalline)</b>	<b>6</b>
<b>Figure (I-7) Panneaux PV avec cellule poly cristallines</b>	<b>7</b>
<b>Figure (I-8) Module photovoltaïque amorphe</b>	<b>7</b>
<b>Figure (I-9) Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension</b>	<b>10</b>
<b>Figure (I-10) Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension</b>	<b>10</b>
<b>Figure (I-11) Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la température</b>	<b>11</b>
<b>Figure (I-12) Influence de la température sur la caractéristique <math>P=f(v)</math></b>	<b>11</b>
<b>Figure (I-13) Groupement des cellules PV en série</b>	<b>12</b>
<b>Figure (I-14) Groupement des cellules PV en parallèle</b>	<b>13</b>
<b>Figure (II.1) Système poursuite de soleil</b>	<b>16</b>
<b>Figure (II.2) Intérêt des suiveurs</b>	<b>16</b>
<b>Figure (II.3) Le diagramme comparatif de production électrique</b>	<b>17</b>
<b>Figure (II.4) Position du soleil par rapport à une surface inclinée</b>	<b>19</b>
<b>Figure (II.5) Orientation d'une surface (axe vertical)</b>	<b>19</b>
<b>Figure (II.6) Orientation d'une surface (axe horizontal)</b>	<b>20</b>
<b>Figure (II.7) Monture al azimutale</b>	<b>21</b>
<b>Figure (II.8) Monture équatoriale</b>	<b>21</b>

<b>Figure (II.9) Schéma de principe du système suiveur solaire</b>	<b>22</b>
<b>Figure (II.10) Capteurs du lumière du soleil (LDR)</b>	<b>23</b>
<b>Figure(III.1) Boitier du PIC16F877A</b>	<b>26</b>
<b>Figure(III.2) Architecture interne du PIC16F877A</b>	<b>27</b>
<b>Figure(III.3) Principe d'un capteur</b>	<b>31</b>
<b>Figure(III.4) Photo d'une photorésistance de type LDR</b>	<b>31</b>
<b>Figure(III.5) Evolution de la résistance d'n LDR en fonction de luminosité photorésistance</b>	<b>32</b>
<b>Figure(III.6) Schéma descriptive d'une machine à courant continu</b>	<b>33</b>
<b>Figure(III.7) Schéma de principe d'un stator</b>	<b>33</b>
<b>Figure(III.8) Schéma de principe d'un rotor</b>	<b>34</b>
<b>Figure (III.9) Photo des MCCs a aiment permanent</b>	<b>34</b>
<b>Figure(III.10) Vue de coupe du MCC à aiment permanent.</b>	<b>35</b>
<b>Figure (III.11) Représentation de bilan des couples moteur</b>	<b>37</b>
<b>Figure (III.12) Chronogrammes de vitesse, de couple électromagnétique et couple résistant</b>	<b>38</b>
<b>Figure (III.13) Schéma de principe de pilotage du MCC</b>	<b>39</b>
<b>Figure (III.14) Circuit L293D</b>	<b>39</b>
<b>Figure (III.15) Brochage du L293D</b>	<b>40</b>
<b>Figure (IV.2) Cheminement de programmation et simulation</b>	<b>42</b>
<b>Figure (IV.2) Schéma de simulation du système de contrôle pour suiveur de soleil</b>	<b>43</b>
<b>Figure (IV.3) Organigramme de programme principal</b>	<b>44</b>
<b>Figure (IV.4) Organigramme des interruptions des fins de cours</b>	<b>45</b>
<b>Figure (IV.5) Etat du moteur M1 suivant la tension de R1 et R2</b>	<b>46</b>

## **LISTE DE FIGURES**

<b>Figure (IV.6)</b>	<b>Etat du moteur M2 suivant la tension de R3 et R4</b>	<b>46</b>
<b>Figure (IV.7)</b>	<b>Etat du moteur M1 et M2 suivant l'état des fins de cours 1 et 2</b>	<b>47</b>
<b>Figure (IV.8)</b>	<b>Etat du moteur M1 et M2 suivant l'état de la fin de cours 3</b>	<b>47</b>
<b>Figure (IV.9)</b>	<b>Représentation de la carte des capteurs LDRs</b>	<b>48</b>
<b>Figure (IV.10)</b>	<b>Représentation de la carte de commande</b>	<b>48</b>
<b>Figure (IV.11)</b>	<b>Etat du moteur M1 suivant la tension de R1 et R2</b>	<b>49</b>
<b>Figure (IV.12)</b>	<b>Etat du moteur M2 suivant la tension de R3 et R4</b>	<b>49</b>
<b>Figure (IV.13)</b>	<b>Evolutions d'état du moteur M1 suivant la tension de R1 et R2</b>	<b>50</b>
<b>Figure (IV.14)</b>	<b>Evolutions d'état du moteur M2 suivant la tension de R3 et R4</b>	<b>51</b>
<b>Figure (IV.15)</b>	<b>Etat du moteur M1 et M2 suivant l'état des fins de cours 1 et 2</b>	<b>51</b>

# **Introduction générale**

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvèlent assez rapidement pour être considérées comme inépuisable. Face aux prévisions d'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites " renouvelables " et notamment vers la plus ancienne, le soleil, qui déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole).

L'énergie solaire est inépuisable, non polluante, et gratuite représente également un fort potentiel, elle permet de diminuer les factures d'énergie. Il nous faut la capter et la transformer directement en électricité par effet photovoltaïque (PV), provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou ceux qui sont recouvert d'une mince couche métallique.

Dans le cadre de ce travail, notre objectif est l'étude et conception d'un système de contrôle pour suiveur de soleil et cela pour maximiser la quantité d'éclairement absorbé et par conséquence augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée. Ce mémoire est divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous abordons tout d'abord des généralités sur les générateurs photovoltaïques et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire et les différentes technologies des cellules PV. Nous décrivons ensuite les paramètres d'une cellule PV et ses performances vis-à-vis l'intensité de l'éclairement et la température. Nous terminons ce chapitre par la présentation des techniques de groupement des cellules PV.

Dans le second chapitre, nous présentons le principe de constitution d'un suiveur de soleil, ses intérêts et ses effets sur le rendement de transformation de l'énergie solaire. En effet, nous décrivons le positionnement du soleil par rapport à un observateur, et les types de montures d'un panneau solaire.

Le troisième chapitre est consacré à la représentation des trois parties essentielles constituant notre manipe. Nous évoquons au départ des rappels sur le microcontrôleur et ses caractéristiques. Ensuite nous faisons un rappel sur la machine à courant continu, en particulier la machine à aimant permanent. Dans la troisième partie, nous présentons le principe de fonctionnement d'un capteur de lumière de type LDR (Light Dépendant Resistance) et le circuit de pilotage des moteurs L293D.

Nous entamons le quatrième chapitre par la présentation des démarches d'utilisation des logiciels de simulation que nous avons utilisé, à savoir: le compilateur MICRO C, logiciel transfert WIN PIC USB et le PROTEUS. En suite nous donnons les principaux résultats de la simulation et ceux issus de la réalisation pratique avec leurs interprétations.

**Chapitre I :**  
**Généralité sur les générateurs**  
**photovoltaïques**

## I.1 Introduction

Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque (PV).

Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et les différentes associations pour avoir un panneau solaire.

## I.2. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150 \cdot 10^6 \text{ Km}$ , la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180 \cdot 10^6 \text{ GW}$ , c'est pour cela que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie non-renouvelables.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 220 à 10 000  $\text{nm}$ , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit [3]:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $<$  à 400  $\text{nm}$ ).
- 47 % dans la bande visible (400 à 800  $\text{nm}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $>$  à 800  $\text{nm}$ ).

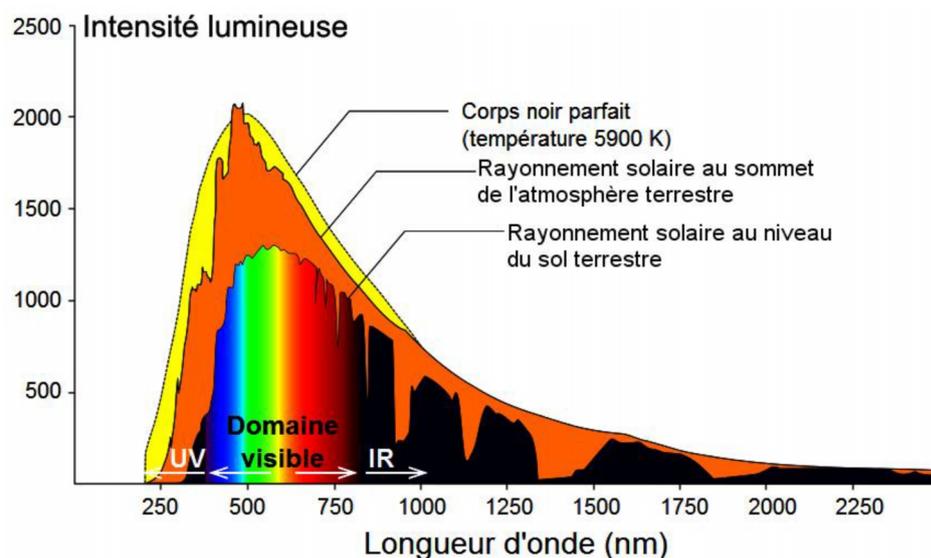


Fig. I.1: Réponse spectrale d'une cellule PV

Au cours de ces dix dernières années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (**ISO 9845-1** :1992) et la société américaine de test et de matériaux (**ASTM E 892-87** :1992) ont fixées le flux de standardisation Es à  $1000 W/m^2$  [2].

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur  $10\,000 W/m^2$  crête dans les zones tempérées et jusqu'à  $14\,000 W/m^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

### I.3. Energie photovoltaïque

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 est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Le mot "*photovoltaïque*" vient de la grecque, "*Photo*" qui signifie lumière et de "*Voltaïque*" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la "lumière électricité" [2].

Un système photovoltaïque est destiné à satisfaire un besoin d'énergie électrique selon des conditions spécifiques d'exploitation. Il est généralement constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage, de source auxiliaire d'appoint (groupe diesel, aérogénérateur, réseau, etc.....), des systèmes d'interface (convertisseurs, réseau, etc..) d'un système de control et de commande (système de surveillance, armoires électriques, cartes électroniques..) et d'une utilisation courant un usage déterminé. Cet usage (éclairage, réfrigération, pompage, communication,...) est exploité dans divers secteurs (santé, éducation, agriculture, énergie...).

La topologie d'un système PV est déterminée selon d'une part la nature de l'utilisation (nombre de récepteurs, contrainte d'exploitation, sécurité énergétique,..) et d'autre part des considérations technico-économiques prenant en compte aussi bien le rendement énergétique que la taille de l'investissement.

La partie principale dans ces installations est le générateur photovoltaïque. Il est composé de divers modules formés par une association série-parallèles de cellules élémentaires convertissant l'énergie solaire (sous formes de rayonnement) en une énergie électrique. Une cellule peut produire  $1.5W$  pour un ensoleillement de  $100 W/m^2$  avec une tension de  $0.6V$ . Un module de 36 cellules produit une puissance moyenne de  $40$  à  $50W$  et occupe une surface de  $0.5m^2$  environ. Le rendement énergétique moyen est de l'ordre de  $12$  à  $15\%$  est atteint pour une phase de recherche  $30\%$ .

La durée de vie d'un tel générateur est estimée à plus de 20 ans [1].

#### I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [2].

L'absorption d'un photon par un semi-conducteur donne naissance à une paire d'électron trou lorsque son énergie est supérieure à celle de la largeur de la bande interdite du matériau. Le champ électrique interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région P et l'électron vers la région N. Par tapage du semi conducteur de région de type P et de type N ; la cellule solaire est donc une jonction P-N avec des diverses parties représentées sur le schéma de la figure suivante [3]:

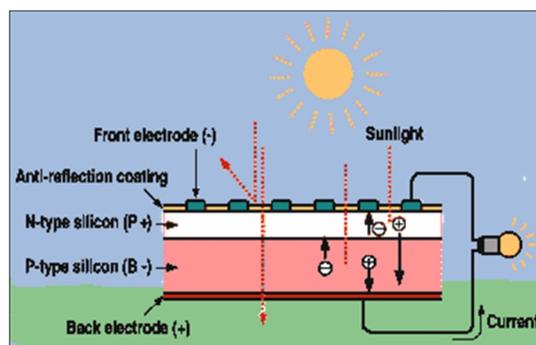


Fig. I.2: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'un photon vient frapper la zone de transition, il arrache un électron à l'atome de silicium qui va se déplacer du côté N, tandis que le « trou » ainsi créé par cet arrachement va se déplacer du côté P. Il apparaît ainsi aux bornes du dispositif, une différence de potentiel. Si on ferme la cellule sur un circuit extérieur, un courant va circuler. La cellule qui se comporte comme une pile sensible aux photons (c.à.d. à la lumière) s'appelle des photopiles.

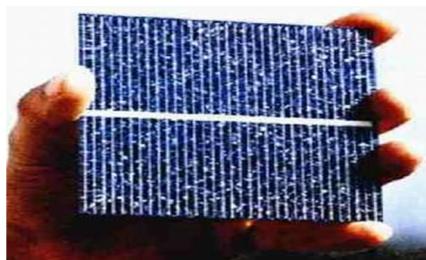


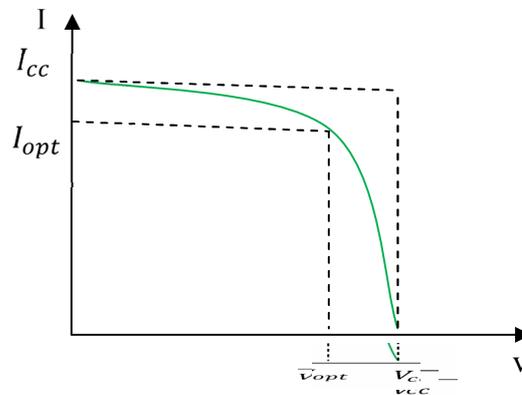
Fig. I.3: Cellule photovoltaïque

L'inconvénient principal des photopiles reste la limitation de leur rendement. Il est de l'ordre de 12% pour une cellule de silicium monocristallin. Plusieurs phénomènes entrent en ligne de compte dans cette limitation du rendement, mais les deux principaux sont les suivantes :

- Non absorption des photons peu énergétiques (infrarouge).
- Utilisation partielle de l'énergie de photons très énergétiques (ultraviolet).

La part de cette énergie qui n'est pas employée est dissipée dans le matériau sous forme de chaleur.

Une cellule photovoltaïque représentée par sa caractéristique  $I_p = f(V)$  donnée sous la courbe illustrée dans figure suivante [8].



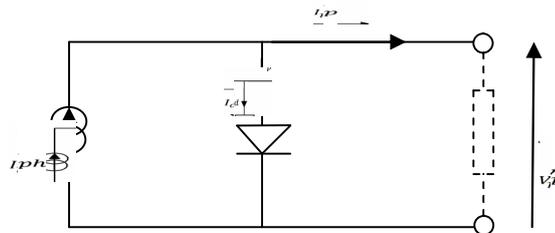
**Fig. I.4: Caractéristique courant tension D'une cellule PV au silicium**

La caractéristique électrique d'une diode est régie par :

$$I_D = I_s (e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1) \tag{I.1}$$

Le courant dans une cellule PV est donnée par :

$$I_p = I_{ph} - I_D = I_{PH} - I_s (e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1)$$



**Fig. I.5: Modèle équivalent d'une Cellule PV au silicium**

$I_p$  : Courant fournie par une cellule (A).

$I_{ph}$  : Photo courant (A).

$I_d$ : Courant de la diode (A).

$I_s$ : Courant inverse de la jonction PN.

$V_p$  : Tension aux bornes de la cellule (V).

$V_t = K.T/q$  : Potentielle thermique.

$q$  : Charge électrique élémentaire (C).

$K$  : Constante de Boltzmann,  $k= 1.38 \cdot 10^{-23} \text{J}/^\circ\text{K}$ .

$T$  : Température en  $^\circ\text{K}$ .

## I.5. Technologies des cellules photovoltaïques [3] [2]

### I.5.1. La première technologie

Photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin (d'efficacité est de 12 à 18 %, de durée de vie de 25 à 30 ans) ou Poly-cristallin (d'efficacité qui varie généralement de 13 à 18 %).

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont des photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Une tranche de silicium (wafer) est alors découpée dans le barreau de silicium.

Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction p-n dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule ronde ou presque carrée et vues de près, elles ont une couleur uniforme (figure I.6).



**Fig. I.6: Panneaux PV (cellule monocristalline)**

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 18%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline (figure I.7).



Fig. I.7: Panneaux PV avec cellule poly cristallines

### I.5.2. La deuxième technologie

Fait appel aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moins bonne que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, et permettent d'utiliser des couches de silicium très minces qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface abas coût en utilisant peu de matière première (figure I.8).



Fig. I.8: Module photovoltaïque amorphe

### I.5.3. La troisième technologie (non silicium)

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (notée  $C_dT_e$ ) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (noté CIGS).

La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules.

Dans le cas de la technologie à base de Tellurure de Cadmium - ( $C_dT_e$ ), la simplicité chimique du matériau et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. D'un point de vue rendement énergétique, la filière C T, présente des rendements de cellules dépendent fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat), qui record de 16.5% en laboratoire et des modules commerciaux à près de 10.7%.

Comparé aux autres technologies couche mince, le C T est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en C T sont minimes. En effet, les modules en C T ne présenteraient pas de risques sanitaires et environnementaux.

## I.6. Paramètres d'une cellule photovoltaïque [2] [4]

Ces paramètres sont déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes:

### I.6.1. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_{ser}$  nulle et  $R_{shu}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.1), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.1)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{e(I_{PV} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (I.2)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement  $I_{cc} = I_{ph}$ ).

### I.6.2. Tension de circuit-ouvert

La tension de circuit-ouvert c'est la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{eV_{PV}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV}}{R_{shu}} \quad (I.3)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = V_T \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.4)$$

### I.6.3. Rendement énergétique

Rendement énergétique c'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance solaire incidente. Il est donné par:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.5)$$

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

### I.6.4. Facteur de forme

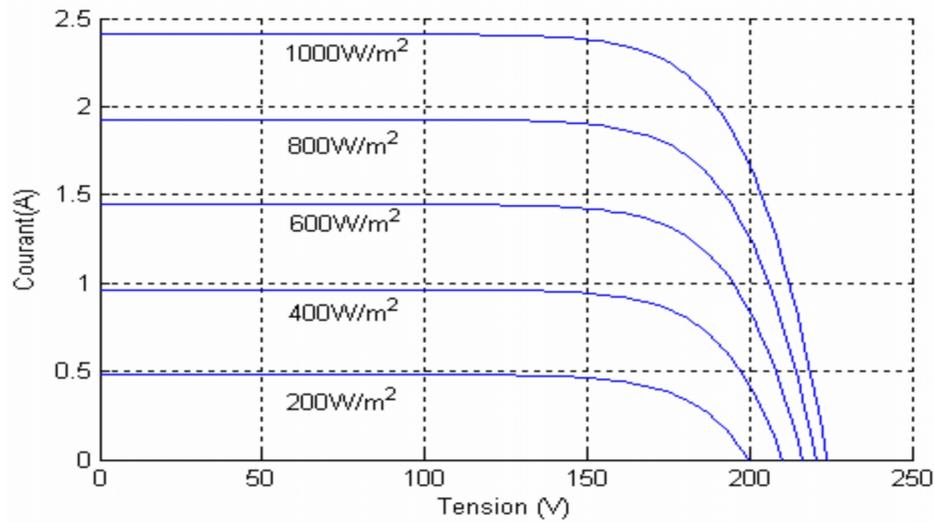
On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante. Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_{ser}$  et  $R_{shu}$ . Il est défini par:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.6)$$

## I.7. Performances de générateur photovoltaïque

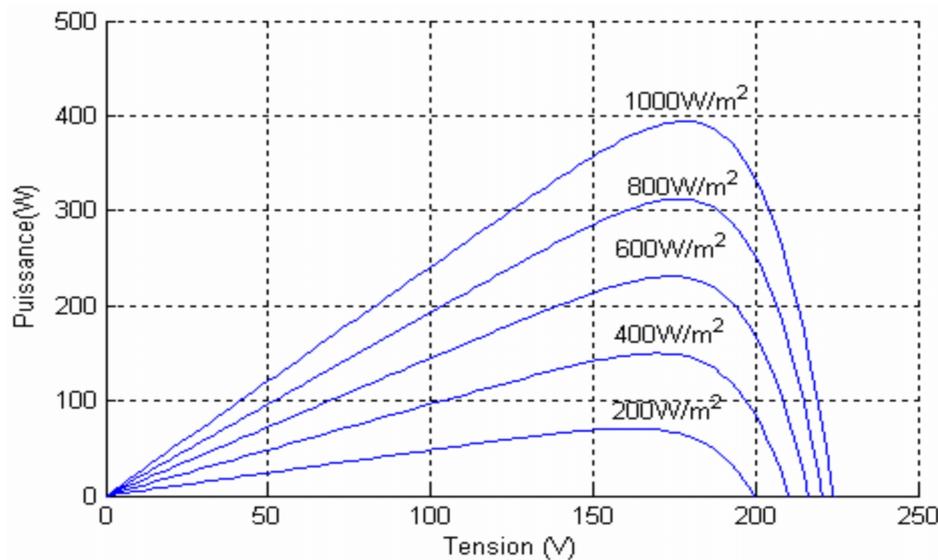
### I.7.1. Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension

D'après les résultats illustrés à la figure (9) qui montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I = f(v)$  à une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [5] [6].



**Fig. I.9: Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension**

Dans le cas de la variation de la puissance délivrée par le générateur PV en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement représenté sur la figure (10), on peut remarquer qu'il y a une influence très importante de l'éclairement sur la caractéristique  $P(v)$ .



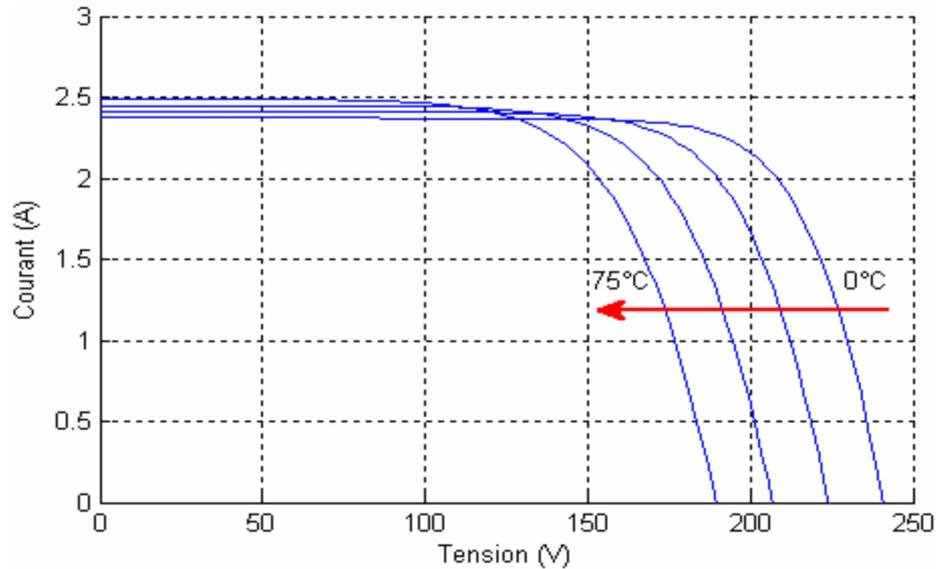
**Fig.10: Influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension**

### I.7.2. Influence de la température sur la caractéristique courant-tension

L'équation de Boltzmann donne:  $I_s = I_o \exp (eV_o/kT)$  montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. Un ordre de grandeur courant de la perte est de  $2.3mV/^{\circ}C/cellule$ .

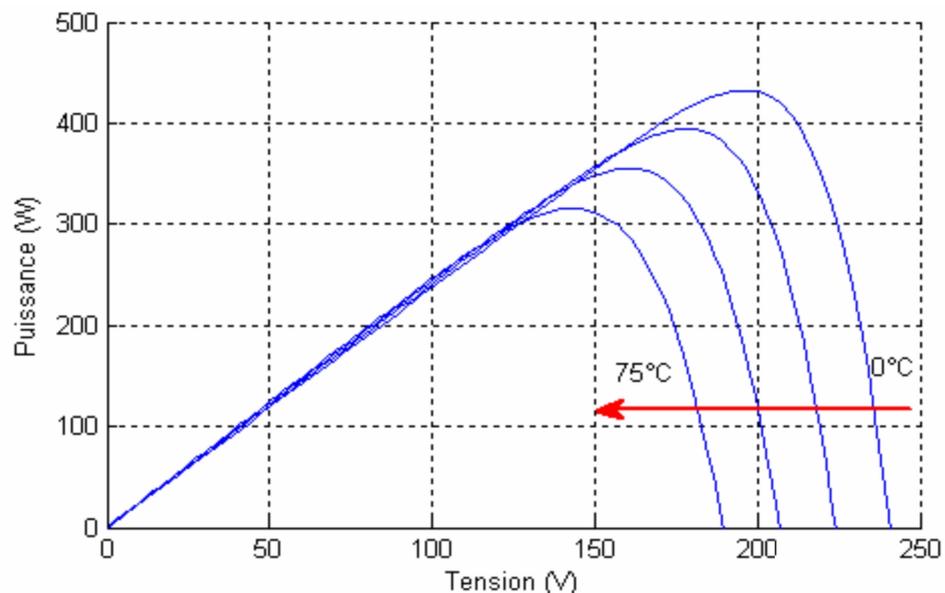
On présente dans la figure suivante la caractéristique  $I = f(v)$  d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures [7].

Le courant dépend de la température, puisque le courant augmente légèrement fur et à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.



**Fig. I.11: Caractéristique courant tension pour différentes valeurs de la température**

La variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température elle est représentée dans la figure (I.12). Ces variations permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique  $P = f(v)$ .



**Fig. I.12: Influence de la température sur la caractéristique  $P = f(v)$**

## I.8. Architecture classique d'un générateur photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard ( $1000W/m^2, 25^\circ C, AM1.5$ ), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2.3\text{ W}_c$  sous une tension de  $0.5V$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [2].

### I.8.1. Module et groupement de cellules en série

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (figure I.13-a). Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet, c'est pour ça, il ne faudra connecter en série que des cellules identiques. L'équation (I.3) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules [2].

$$V_{Cons} = n_s * V_{Co} \quad \text{Avec} \quad I_{CC} = I_{CCn_s} \quad (I.3)$$

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{cons} = 0.6V * 36 = 21.6V$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{opt}$  proche de celle d'une tension de batterie de  $12V$ .

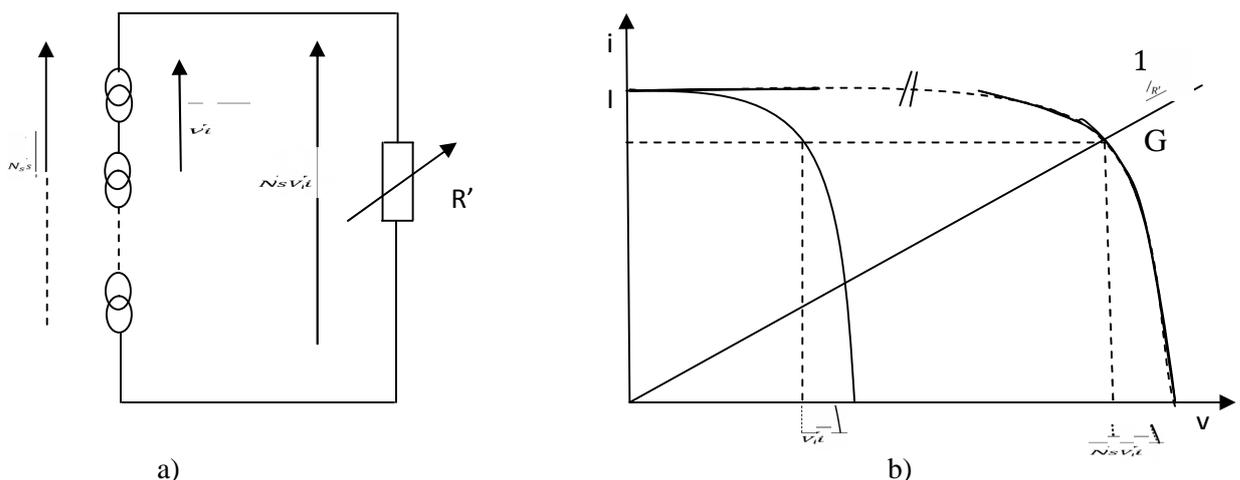


Fig. I.13: Groupement des cellules PV en série

La figure (I.13-b) présente la courbe de puissance (caractéristique courant-tension) du groupement de l'une des  $N_s$  cellules du groupement série. La caractéristique du groupement (G) est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension par  $N_s$ . Fermé sur

l'impédance  $R'$ , le groupement série délivrera le courant  $I$  sous la tension  $N_s \times V_i$ . Chacune des  $N_s$  cellules générant ce courant  $I$  et la tension  $V_i$ . La construction graphique de la figure (I.13-b) suppose que la connexion en série des cellules n'introduit pas de résistances parasites (série ou shunt) supplémentaires [3].

### I.8.2. Groupement de cellules ou modules en parallèle

L'association parallèle de  $N_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (figure I.12-a). L'équation (I.4) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules [2].

$$I_{SCnp} = n_p * I_{SC} \text{ avec } V_{OCnp} = V_{OC} \quad (I.4)$$

Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant [2].

Sur cette figure, les générateurs de courant représentent soit des cellules individuelles, soit des cellules en série (modules), soit des modules en série (branches). On constate dans ce cas que c'est la tension générée qui est la même pour toutes les cellules (ou tous les modules ou toutes les branches).

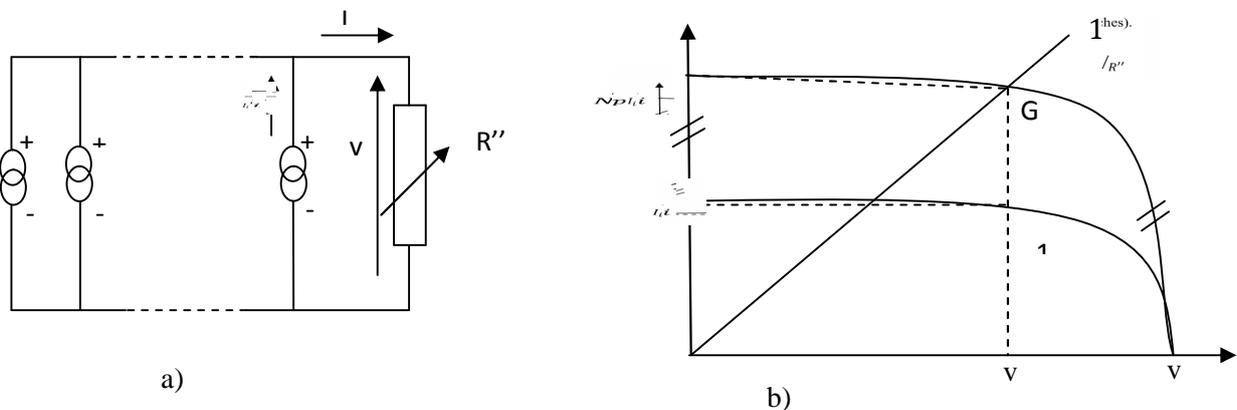


Fig. I.14: Groupement des cellules PV en parallèle

La deuxième règle est donc qu'il ne faudra connecter en parallèle que des cellules des modules, ou des branches identiques comme il est illustré à la figure (I.14-a). La figure (I.14-b) présente la courbe de puissance résultante ( $G$ ) pour le groupement parallèle considéré.

Cette courbe est obtenue en multipliant point par point par  $N_p$  (nombre d'éléments en parallèle) et pour chaque valeur de la tension, le courant de la courbe correspondant à une cellule élémentaire fermé sur une résistance  $R''$ , chacune des  $N_p$  branches en parallèle générant le courant  $I_i$ . La construction

graphique de la figure (I.14-b) suppose que la connexion en parallèle n'introduit pas des résistances parasites (série ou shunt) supplémentaires [3].

### **I.9. Avantages et Inconvénients du solaire photovoltaïque**

Le système photovoltaïque en tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients [2] [6].

#### **a) Les Avantages**

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujette à l'usure, mais demande peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et elles sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse, ce qui est contraire aux installations éoliennes. C'est une énergie inépuisable, propre et non polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchet.
- Le cout de fonctionnement des systèmes photovoltaïques est très faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible ni transport ni personnel hautement spécialisé.

#### **b) Les Inconvénients**

Le système photovoltaïque a également des limites que nous résumons ainsi :

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technique demandant énormément de recherche et de développement et donc des investissements couteux d'où le prix d'installation qui reste très cher.
- Le rendement des panneaux photovoltaïques est de l'ordre de 28% pour les cellules au silicium cristallin.
- Le stockage de l'énergie sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur photovoltaïque est accru.
- La fiabilité et les performances du système restent équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

**I.10. Conclusion**

Depuis quelques années, le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir.

Nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement. Puis nous avons cité les différents types d'utilisation de générateur photovoltaïque. Et cela, par exemple, le groupement des modules ou des cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque, et le groupement des cellules ou des modules en parallèle permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé.

En fin nous avons rappelé quelque avantage et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.

# **Chapitre II :**

## **Principes de suivre le soleil**



## II.1. Introduction

Un tracker solaire ou suiveur de soleil est une structure portante qui permet d'orienter des panneaux solaires afin d'augmenter la productivité en utilisant le principe de l'héliostat.

Parmi l'ensemble des technologies mobilisables pour répondre à cet enjeu, deux familles de solutions existent:

- Les suiveurs programmés, nécessitant des calculs de prévision de la trajectoire solaire.
- Les suiveurs à capteurs, nécessitant la détection en temps réel de la position solaire.

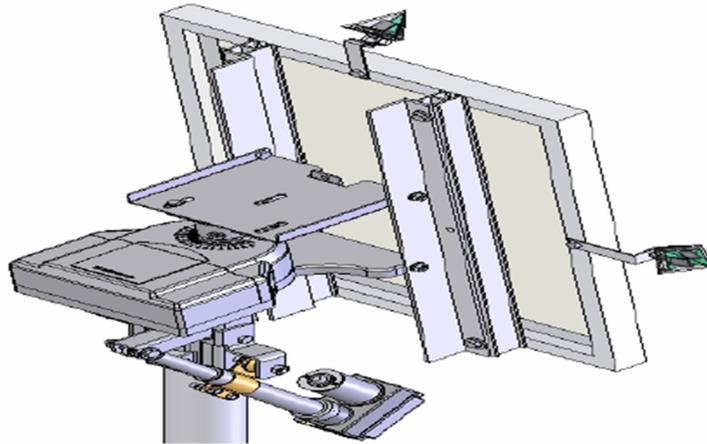


Fig. II.1: Système poursuite de soleil [9]

## II.2. Intérêt des suiveurs

Lorsqu'un panneau photovoltaïque est fixe par rapport au soleil et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord), son rendement énergétique n'est pas constant au cours de la journée: au début et à la fin de journée, le panneau est situé dans des mauvais angles d'éclairement, le rendement de la production électrique se diminue (fig. II.2).

Lorsqu'un système suiveur oriente le panneau solaire en le faisant pivoter en direction du soleil et en maintenant en permanence un angle d'incidence des rayons voisin de  $90^\circ$ , la production électrique par mètre carré de panneau atteint son maximum (fig. II. 2) [9].

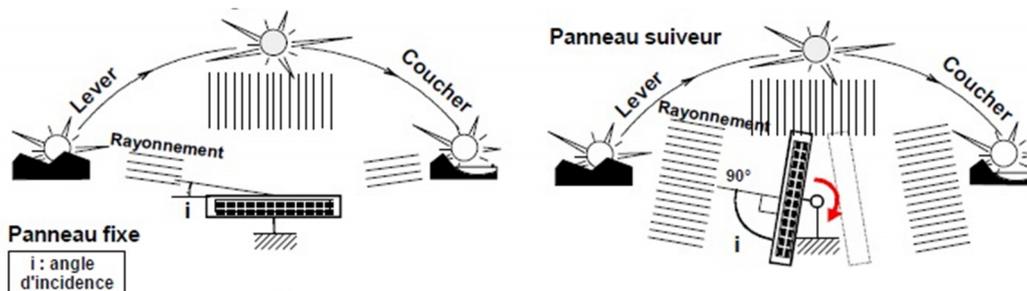


Fig. II.2: Schéma comparatif entre panneau fixe et panneau suiveur [9].

Le principe de fonctionnement d'un suiveur est de s'orienter vers le soleil tout au long de la journée, ce qui a pour effet d'augmenter la production d'énergie de manière substantielle. En effet, la position du soleil varie constamment, à la fois pendant la journée, mais aussi pendant les différentes périodes de l'année. Le tracker permet ainsi de placer au mieux le panneau par rapport au positionnement du soleil (perpendiculaire au rayonnement si possible).

Suivre le soleil peut se faire sur deux axes : en azimut (d'est en ouest, à mesure de l'avancée de la journée) et en hauteur (selon la saison et l'avancée de la journée). L'idéal est d'utiliser un tracker à deux axes, mais il en existe aussi avec un seul (typiquement avec un suivi seulement en azimut, l'angle par rapport au sol étant fixé selon l'optimum local, qui dépend de la latitude).

Le diagramme comparatif de production électrique illustré dans la figure (II.3) montre que pour une journée ensoleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire [9]. Des études théoriques montrent que la quantité d'énergie fournie par une cellule photovoltaïque en mode suiveur de soleil (sun tracking) est de 30 % à 40 % supérieure à celle qui est fixe (orientée plein Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude) [9].

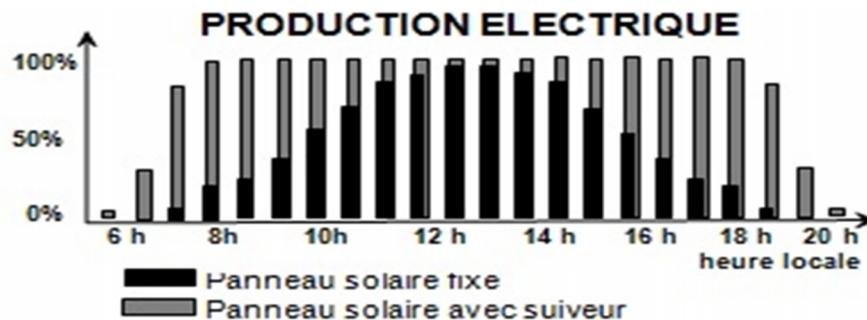


Fig. II.3: Le diagramme comparatif de production électrique [9]

### II.3. Position du soleil par rapport à un observateur

L'énergie solaire que reçoit une surface est régie uniquement par des lois astronomiques et géométriques. Ces dernières faisant intervenir la latitude du lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et enfin l'orientation de la surface réceptrice.

La position du soleil dépend du temps solaire, du numéro du jour et de l'année, elle est exprimée par différents angles [11]:

#### 1- Angle de zénith ( $\theta_z$ ) :

C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil, il est donné par l'équation suivante [11] [12]:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (\text{II.1})$$

$u$  : Déclinaison solaire.

$\{$  : Latitude du lieu.

$S$  : Angle horaire.

## 2- Angle d'azimut ( $\gamma$ ) :

C'est l'angle sur le plan horizontal mesuré à partir du sud avec la projection horizontale des rayons directs du soleil. Il est également donné comme angle entre le méridien local et la projection de la ligne de la vue du soleil dans le plan horizontal, défini par l'équation suivante [20]:

$$\gamma_s = \sigma_{ew} \sigma_{ns} \gamma_x + \left( \frac{1 - \gamma_{ew} \gamma_{ns}}{2} \right) \sigma_w 180^\circ \quad (\text{II.2})$$

$$\gamma_{so} = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z} \right) \quad (\text{II.3})$$

$$\sigma_{ew} = \begin{cases} 1 & \text{si } |W| \leq \omega_{ew} \\ -1 & \text{autrement} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$$\sigma_{ns} = \begin{cases} 1 & \text{si } \varphi(\varphi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{autrement} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$$\sigma_w = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{autrement} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$\omega_{ew} = \cos^{-1}(\cos \varphi \tan \delta) \quad (\text{II.7})$$

## 3- Angle extérieur d'azimut ( $\gamma_s$ )

C'est l'angle mesuré à partir du sud sur le plan horizontal avec la projection horizontale de la normale sur la surface, il est également donné comme l'angle entre le méridien local et la projection horizontale de la normale avec la surface [20].

## 4- Angle d'incidence ( $\theta$ )

C'est l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure de la surface du plan, il est donné par l'équation suivante [20]:

$$\theta = \sin^{-1}[\cos \theta_z + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)] \quad (\text{II.8})$$

$S$  : Inclinaison de surface.

$x$  : Angle d'azimut.

$\chi_s$  : Angle extérieur d'azimut.

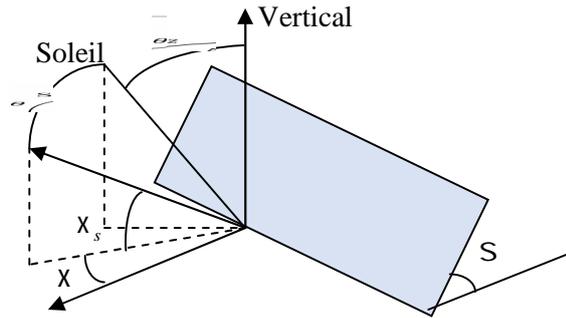


Fig. II.4: Position du soleil par rapport à une surface inclinée [11]

### II.4. Orientation de la surface

La position du soleil dans le ciel change tout au long du jour et de l'année. Pour une surface : suivre le mouvement apparent du soleil équivaut à orienter cette surface par la rotation de ses axes. Certains types de collecteur à concentration fonctionnent avec la rotation autour d'un seul axe, il existe deux modes :

#### 1- Axe vertical et inclinaison fixe de la surface :

Ce mode utilise une surface orientable avec une pente extérieure fixe  $\beta$  et l'angle extérieur d'azimut variable  $\gamma$ , tournant autour d'un axe vertical comme il est illustré sur la figure (II.4). Pour ce cas, le rayonnement solaire est maximum quand  $\gamma = \gamma_s$ .

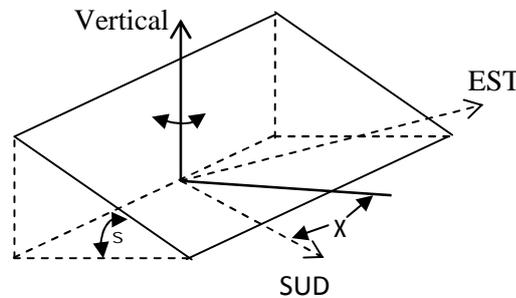


Fig. II.5: Orientation d'une surface (axe vertical)

#### 2- Axe horizontal, surface parallèle à l'axe

Pour ce deuxième mode, la surface tourne autour d'un axe simple qui est toujours parallèle à la surface. Pour un axe horizontal, l'inclinaison extérieure de la surface est donnée par :

$$\beta = \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos(\gamma - \gamma_s)) \tag{II.9}$$

Où l'angle extérieur d'azimut est donné par :

$$\gamma = \gamma' + 90^\circ \text{ si } \gamma_s - \gamma' \geq 0 \tag{II.10}$$

$$\gamma = \gamma' + 90^\circ \text{ si } \gamma_s - \gamma' < 0 \tag{II.11}$$

Si la surface tournant autour d'un axe simple qui est toujours parallèle à la surface mais n'est pas vertical ou horizontal, l'angle extérieur d'azimut et la pente de la surface change avec le temps [19].

$$\gamma = \gamma' + \tan^{-1} \left[ \frac{\sin \theta_z \sin(\gamma - \gamma')}{\cos \theta \sin \beta'} \right] \quad (\text{II.12})$$

$$\beta' = \tan^{-1} \left[ \frac{\tan \beta'}{\cos(\gamma + \gamma')} \right] \quad (\text{II.13})$$

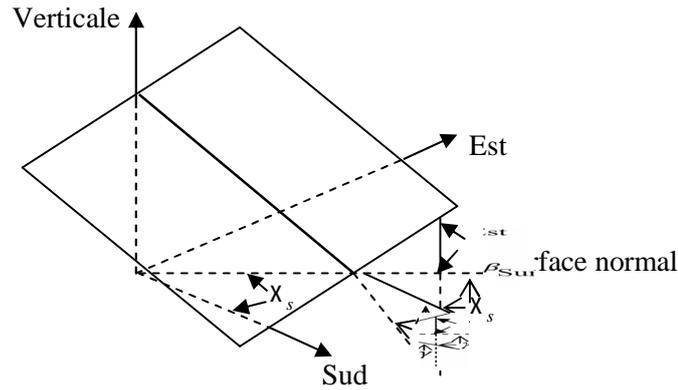


Fig. II.6: Orientation d'une surface (axe horizontal)

### 3- Rotation suivant deux axes

Le collecteur tournant autour de deux axes (b-axiales), dans ce cas l'ouverture du collecteur sera toujours normale au soleil, par conséquent l'angle d'incidence est zéro tout le long de la journée ( $\cos \theta = 1$ ).

Ceci est défini par :

$$\gamma = \gamma_s \quad (\text{II.14})$$

Et

$$\beta = \theta_z \quad (\text{II.15})$$

Cette rotation est toujours exigée pour des collecteurs qui suivent le déplacement du soleil à tout moment de la journée. Cela signifie que le collecteur devra être placé sur une monture permettant de suivre le mouvement du soleil.

## II.5. Différents types de montures

### II.5.1. Monture al azimutale

La monture al azimutale est mobile autour de deux axes perpendiculaires, l'un vertical l'autre horizontal. Le panneau solaire tourne autour d'un axe horizontal porté par une monture qui elle-même tourne autour d'un axe vertical. Ce système est couramment utilisé pour les radars, les cinéthéodolites, les canons anti-aériens.

La rotation autour de l'axe horizontal assure la poursuite en hauteur (de haut en bas), en d'autres termes la normale du capteur solaire suit la hauteur angulaire du soleil. L'autre axe assure le déplacement en azimut (de gauche vers la droite). Cette disposition très simple ne pose pas de problèmes mécaniques particuliers [11].

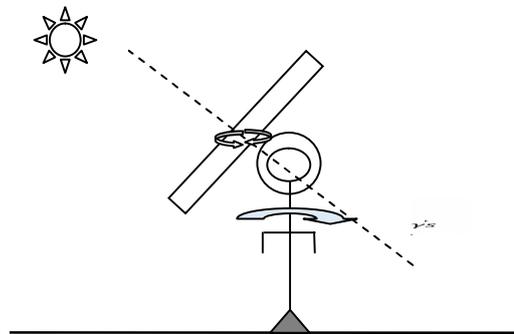


Fig. II.7: Monture al azimutale.

### II.5.2. Monture équatoriale

La monture équatoriale est la monture idéale pour assurer un suivi sidéral. Elle emploie une rotation autour d'un axe parallèle à l'axe polaire du globe terrestre (mouvement en angle horaire), et un axe orthogonal au précédent (mouvement en déclinaison).

Cette solution est plus délicate sur le plan mécanique, mais le mouvement autour de l'axe polaire est pratiquement uniforme au cours de la journée. Donc la poursuite du soleil est plus facile [11].

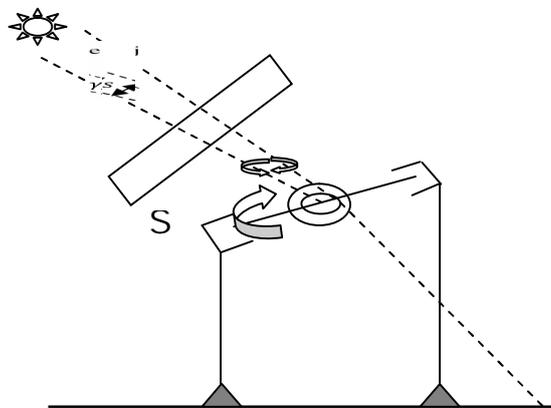
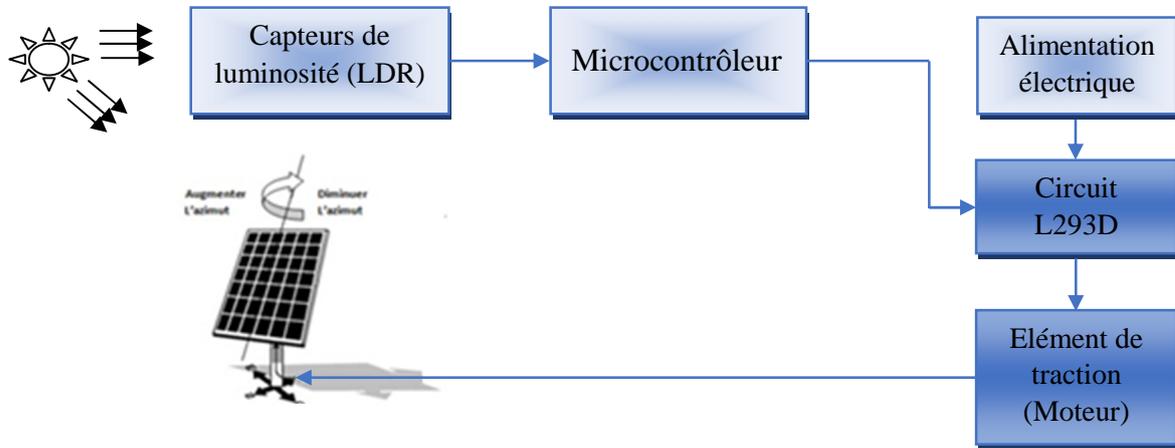


Fig. II.9 : Monture équatoriale

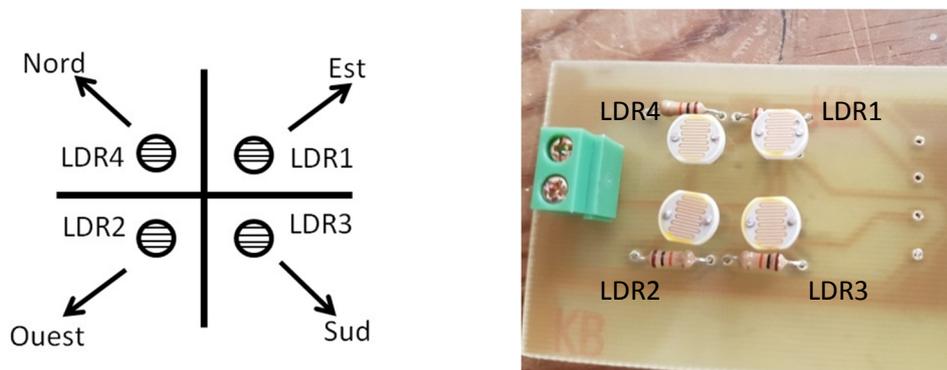
**II.6. Système suiveur de soleil utilisant des capteurs LDRs**

Leur conception est simple avec une consommation énergétique réduite. Le fonctionnement est supervisé par un capteur de lumière de type de photorésistance, est une résistance variable en fonction de la lumière ou LDR (Light Dépendent Résistor) [21].



**Fig. II.9: Schéma de principe du système suiveur de solaire**

Les capteurs sont configurés d'une manière que, LDR1 et LDR2 sont utilisés pour suivre le soleil horizontalement attendant, et LDR3 et LDR4 permettent de suivre le soleil verticalement. Dans le dispositif de commande (microcontrôleur) le traitement des données est basé sur une analyse comparative des tensions de chaque paire des photorésistances, LDR1-LDR2 et LDR3-LDR4 respectivement, voire la figure (II.10). En l'occurrence des LDRs, une commande via un microcontrôleur permet d'actionner les moteurs qui effectueront la rotation nécessaire pour maintenir le panneau solaire perpendiculairement aux rayonnements solaire.



**Fig. II.10: Principe d'emplacement des capteurs du lumière (LDR)**

## II.7. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation du système poursuite solaire par observateur et les différences des types de rotation et montures. Ainsi, une étude de la variation journalière de la position du soleil par rapport à un point fixe sur la terre a été faite. Cette étude est très importante pour entamer l'étude de la réalisation du système mécanique de poursuite solaire et de son circuit électrique de commande et de contrôle.

Dans la grande majorité des cas, le générateur photovoltaïque est fixe. L'énergie solaire incidente sur les modules n'est donc pas optimale en fonction de la variation du temps dans la journée et par rapport aux chargements des saisons. D'autre part, la quantité d'énergie fournie par une cellule photovoltaïque en mode suiveur de soleil (Sun tracking) est très importante à celle qui est fixe (orientée plein Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude).

## **Chapitre III**

# **Calculateur et Actionnaire dans un suiveur de soleil**

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la représentation et l'étude d'une part du calculateur (Microcontrôleur PIC) qui fait les calculs des angles nécessaires pour que le panneau soit perpendiculaire aux rayons solaires, et ce la après la conversion des grandeurs mesurées via des capteurs de lumière. Nous avons utilisé dans notre projet des capteurs de lumière de type LDR (Light Dépendent Résistor).

D'autre part, nous représentons dans ce chapitre le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu (MCC) qui joue le rôle d'un actionneur, il convertit les ordres du calculateur (angles calculés) donnés sous forme d'énergie électrique à une énergie mécanique (position du panneau).

### III.2. Le microcontrôleur 16F877A

Un microcontrôleur est un circuit intégré programmable rassemble les éléments essentiels d'un ordinateur: processeur, mémoires, unités périphériques et interfaces d'entrées-sorties. Les microcontrôleurs se caractérisent par un plus haut degré d'intégration, une plus faible consommation d'énergie électrique «quelques milliwatts en fonctionnement, quelques nano watts en veille», avec une vitesse de fonctionnement plus faible «quelques mégahertz» et un coût réduit par rapport aux microprocesseurs polyvalents utilisés dans les ordinateurs personnels.

Par rapport à des systèmes électroniques à base de microprocesseurs et autres composants séparés, les microcontrôleurs permettent de démocratiser l'utilisation de l'informatique dans le domaine d'industrie pour la commande et contrôle des systèmes. Et dans les systèmes embarqués, comme les contrôleurs des moteurs automobiles, les télécommandes, les appareils de bureau, l'électroménager, les jouets, la téléphonie mobile, etc.

Des nombreux fabricants se sont implantés sur le marché des microcontrôleurs, la société américaine Micro-chip a mis au point un microcontrôleur CMO «Complémenter Métal Oxyde Semi-conducator» appelé PIC, cette dénomination est sous copyright de Micro-chip, donc l'autre fabricant sont étés dans l'impossibilité d'utiliser ce terme pour leur propre microcontrôleur.

#### III.2.1 Les différentes familles des Pics

La famille des Pics est subdivisée en trois grandes familles :

- Base-line: Famille où l'unité centrale travaille sur 12-bits, exemple: 12CXXX...
- Mid-range: Famille où l'unité centrale travaille sur 14-bits, exemple: 16F877A.
- High-end: Famille où l'unité centrale travaille sur 16-bits, exemple: 18FXXX, 18CXXX.

Pour identifier un pic on utilise son numéro, Les 2 numéros indiquent la catégorie du PIC (16) indique un PIC MID-RANGE, (F) pour indiquer la mémoire programme de type FLASH et les

derniers chiffres identifient précisément le PIC. Finalement on trouve le suffixe <-XX> dans lequel XX représente la fréquence d'horloge maximale que le PIC peut recevoir.

### III.2.2. Les caractéristiques du PIC 16F877A

Le PIC 16F877A est un microcontrôleur de Micro-chip, fait partie intégrante de la famille Mid-rang (16) dont la mémoire programme et de type flash (F). Ce  $\mu\text{c}$  est un circuit intégré à 40 broches dont les caractéristiques générales peuvent être résumées comme suit [12]:

- Fréquence de fonctionnement allant jusqu'à 20Mz.
- Jeu d'instructions de 35 instructions
- Mémoire de programme de type FLASH sur 8K mots (1 mot=14 bits).
- Mémoire de données de type RAM sur 368 octets.
- Mémoire de données de type EEPROM sur 256 octets.
- Pile (Stack) à 8 niveaux.
- 14 sources d'interruptions.
- Chien de garde WDT (Watch Dog Timer).
- Trois Timers (Timer0, Timer1 et Timer2)
- Convertisseur Analogique-Numérique 10-bits à 8 entrées multiplexées.
- Deux modules de capture/comparaison/PWM.
- Ports Entrées/Sorties: A, B, C, D et E.
- Interface de communication série (MSSP, USART).
- Interface de communication parallèle (PSP).
- Tension de fonctionnement est entre 2.0V et 5.5V.

### III.2.3. L'architecture externe et interne du PIC 16F877A

Le microcontrôleur **16F877A** fait partie de la sous famille des **16F87X**. Cette branche fait partie intégrant de la famille des **PICs** Mid-Range, Ce **PIC** se présente sous la forme d'un boîtier (figure III.1) **PDIP40** pins dont :

- 33 pins d'entrées/sorties multiplexées avec d'autres fonctions, Ces pins sont subdivisés sur 5 ports : port A, B, C, D et E.
- 4 pins pour l'alimentation «VDD» et «VSS» : Ce sont les broches d'alimentation du circuit, les tensions qui peuvent être appliqués sont de 4V à 6V pour la gamme standard et de 2V à 6V pour la gamme étendue.
- 2 pins pour l'oscillateur « OSC0 » et « OSC1 » : Ce sont 2 broches recevant quartz externe qui peuvent être utilisées de plusieurs manières, ce la dépend de l'oscillateur ou de l'horloge employés.

- 1 pin pour le RESET (MCLR) : Cette broche sert à initialiser le **PIC**, ce dernier dispose de plusieurs sources de **RESET**.

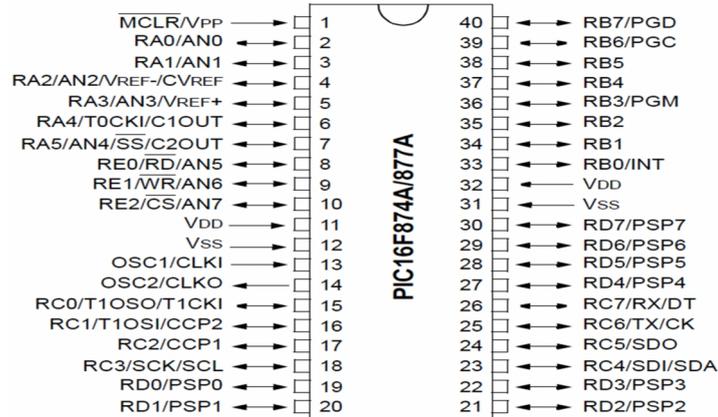


Fig. III.1: Boîtier du PIC16F877A

Le PIC 16F877A peut fonctionner en 4 modes d’oscillateur:

- **Oscillateur à quartz (Low Power LP):** version à quartz également, mais prévue spécialement pour les applications à très faible consommation. C'est donc une version dont la fréquence maximale de fonctionnement est limitée à 20MHz. En mode LP, XT ou HS, un quartz est connecté aux pins OSC1/CLKIN et OSC2/CLKOUT équivalent à les pates 13 et 14 sur le boîtier du PIC 16F877A, pour établir l’oscillation.

Toujours dans l’un de ces modes de fonctionnement, le microcontrôleur peut avoir une horloge externe connectée à la broche OSC1/CLKIN comme le montre la figure suivante :

- **Oscillateur RC:** capable de fonctionner jusqu'à 4MHz mais avec une stabilité de fréquence plus faible que les versions à quartz [12]. La fréquence de l’oscillation dépend du voltage, des valeurs de R et C et de la température de fonctionnement.

Pour générer un « cycle d’instruction », il faut 4 cycles d’horloge. Autrement dit, l’horloge système dite aussi horloge instruction est obtenue en divisant la fréquence par 4. Avec un quartz de 4 MHz, les instructions du programme s’exécutent à une cadence de 1 MHz [12].

- **XT:** version à oscillateur à quartz «standard» fonctionnant jusqu'à une fréquence maximale de 4MHz.
- **HS:** « High Speed » : version à oscillateur à quartz capable de fonctionner jusqu'à une fréquence maximale de 20MHz.

Dans la figure (III.2) nous représentons architecture interne du PIC16F877A et les principaux organes qui le composent.

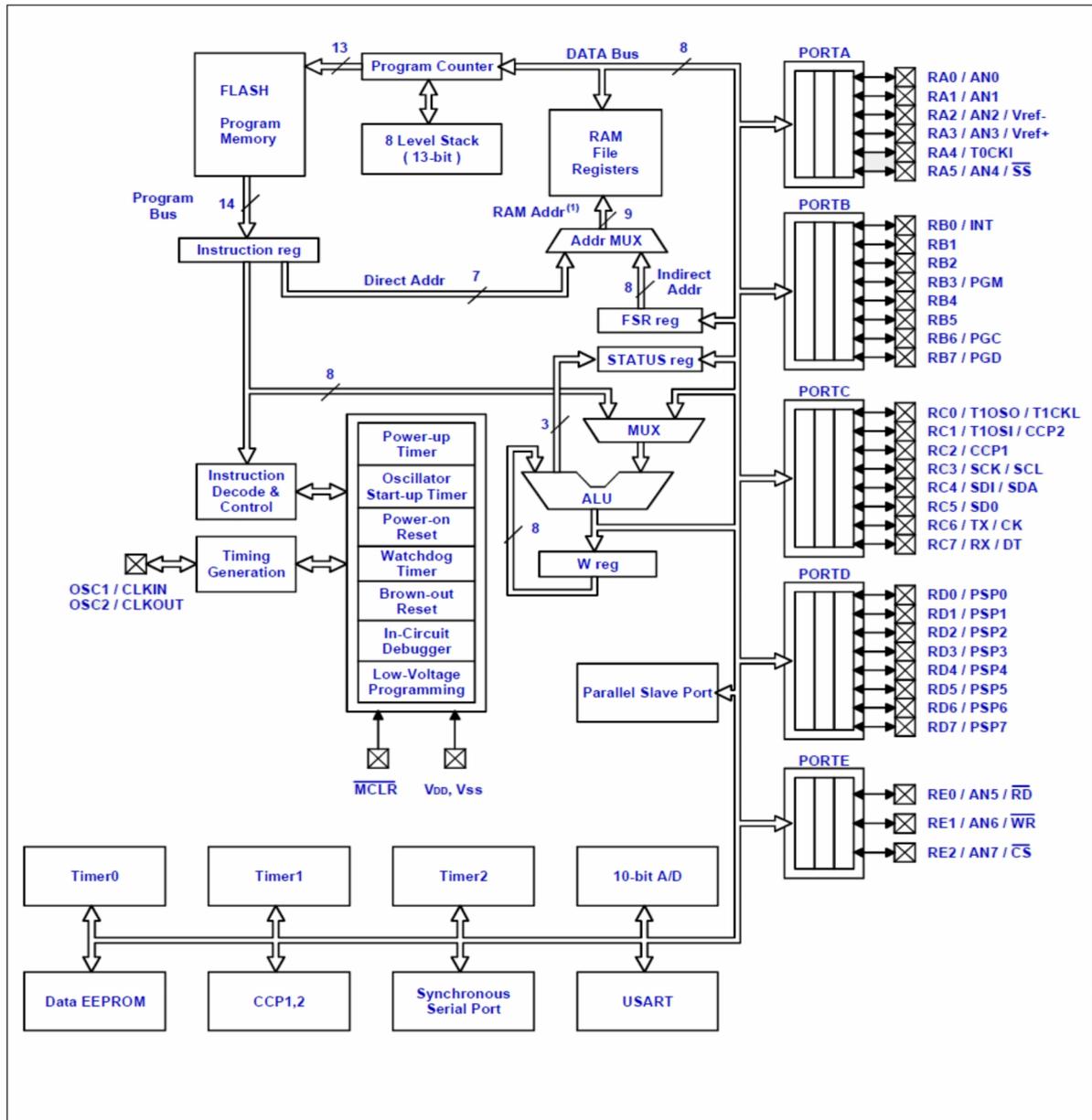


Fig. III.2: Architecture interne du PIC16F877A.

### III.2.4. Organisation de la mémoire du PIC16F877A

La mémoire du PIC16F877A est divisée en trois parties:

- **La mémoire du programme :** La mémoire du programme (mémoire FLASH) est constituée de 8k mots de 14 bits. C'est dans cette zone que nous allons écrire notre programme. Le PIC exécute une à une les instructions logées dans la mémoire de programme.
- **La mémoire EEPROM:** La mémoire de donnée EEPROM «Electrical Erasable Programmable Read Only Memory » est constitués de 256 octets, Ces octets sont conservés après une coupure de courant et sont très utiles pour conserver des paramètres

semi-permanents.

- **La mémoire RAM et organisation:** La mémoire de donnée RAM est celle qui est souvent utilisée. Toutes les données qui y sont stockées sont perdues lors d'une coupure de courant. cette mémoire disponible du 16F877 est de 368 octets. Elle est répartie de la manière suivante:
  - 80 octets en banque 0, adresses 0\*20 à 0\*6F
  - 80 octets en banque 1, adresses 0\*A0 à 0\*EF
  - 96 octets en banque 2, adresses 0\*110 à 0\*16F
  - 96 octets en banque 3, adresses 0\*190 à 0\*1EF
  - 16 octets commun aux 4 banques, soit 0\*70 à 0\*7F = 0\*F0 à 0\*FF.

### III.2.5. Registres du PIC 16F877A

Un registre est une petite partie de mémoire intégrée au PIC, dans le but de recevoir des informations spécifiques, notamment des adresses et des données stockées durant l'exécution d'un programme. Nous allons décrire les registres les plus souvent utilisés pratiquement [12]:

- **Le registre W:** C'est le registre de travail (work register) possède 14 bits. Il est utilisé par les Pics pour réaliser toutes sortes de calculs. La destination du résultat peut en général être un emplacement dans la RAM ou le registre de travail (W). C'est donc un registre fondamental.
- **Le registre STATUS ou registre d'états:** Le registre d'état appelé STATUS est un registre 8 bits, son rôle est de donner diverses informations à l'utilisateur sur l'état de fonctionnement ou sur le résultat d'une opération.
- **Le registre INTCON ou registre de contrôle d'interruptions:** Ce registre permet de configurer les différentes sources d'interruption.
- **Le registre OPTION-REG:** Ce registre peut être lu et écrit, il contient les bits de contrôle qui permettent de configurer le pré-diviseur du Timer0, les interruptions externes et le choix du pull-up sur le port B.
- **Le registre T1CON:** Ce registre permet de contrôler le Timer1.
- **Le registre T2CON:** C'est un registre 8bits qui permet de paramétrer le pré diviseur et le post diviseur ainsi que d'autoriser ou non le fonctionnement du Timer2.
- **Les registres CCP1CON et CCP2CON:** Ces registres permettent de contrôler deux modules identiques CCP1 et CCP2.
- **Les registres ADCON0 et ADCON1:** Sont des registres de configuration du convertisseur analogique numérique.

### III.2.6. Les interruptions

Le PIC 16F877A possède 15 sources d'interruptions, les plus importantes à connaître, car ce sont les plus utilisées en pratique:

Interruption	Source d'interruption
TMR0I	Dépassement du TIMER0 « débordement le passage de 255 à 0 »
TMR1I	Dépassement du TIMER1 « débordement le passage de 65535 à 0 »
TMR2I	Débordement de TIMER2
INT	Une interruption externe, action sur la broche INT/RB0
PSPI	Lecture/Ecriture sur le port parallèle(PORTD)
ADI	Fin de conversion analogique numérique
CCP1I	Capture/comparaison/PWM avec module CCP1
CCP2I	Capture/comparaison/PWM avec module CCP2
RCI	Réception sur le port RS232
TXI	Emission sur le port RS232
SSPI	Caractère émis/reçu sur SSP (port série synchrone)
E EI	Ecriture dans EEPROM
BCLI	Collision sur bus SSP en mode I <sup>2</sup> C
RBI	Changement d'état du port B « RB7 :RB4 »
CMI	Comparateur

Tableau III.1 : Différent Interruptions et sources d'interruption dans le PIC 16F877A [12]

### III.2.7. Les Timers

Le PIC 16F877A dispose de 3 timers [12]:

- **Le Timer0:** C'est un compteur 8 bits (0 à 255), Il peut être incrémenté par des impulsions extérieures via la broche «T0CKI/RA4 » du port A (mode compteur) ou par l'horloge interne « $F_{osc}/4$  » (mode timer).

- **Le Timer1**

Le Timer1 fonctionne sur le même principe que le Timer0, mais avec un registre de comptage plus gros : 16 bits au lieu de 8, ce qui étend notablement ces capacités de comptage. De plus, il possède un mode de fonctionnement particulier : on peut l'utiliser en association avec un des modules CCP (modules de capture et de comparaison).

- **Le Timer2**

Le Timer2 est un registre en lecture et écriture, a un fonctionnement différent des Timer0 et Timer1. C'est un compteur 8bits avec pré-diviseur et post-diviseur. On s'en sert pour générer des signaux carrés, ou, en association avec le module CCP, des signaux PWM.

L'entrée du compteur est l'horloge cycle interne:  $F_{osc}/4$  qui passe à travers un pré-diviseur programmable par 1, 4, 16.

La sortie du compteur passe dans un post-diviseur programmable sur 4 bits entre 1 et 16.

La fréquence est calculée comme suit :

$$T_{\max} = T_{\text{quartz}} \times \text{Valeur.du.pre.diviseur.fixe} \times \text{Valeur.du.pre.compteur.reglage.max} \times (\text{Valeur.definie} + 1)$$

$$f = \frac{1}{T_{\max}}$$

### III.3. Capteur de lumière

Un capteur est un dispositif qui sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite connaître et caractériser délivre une grandeur physique exploitable (mesurable) « signal électrique par exemple ». On parle aussi de transducteur (Figure III.1), puisque la grandeur physique d'entrée est généralement transformée en une autre grandeur physique de sortie comme un signal électrique tel qu'un courant, une tension, une charge, une impédance, etc.

Le capteur permet de prélever une grandeur abstraite, appelée information, qui sélectionne un événement particulier parmi un ensemble d'événements possibles. Pour pouvoir être traitée, cette information sera portée par un support physique, appelé alors de signal. L'information délivrée par un capteur pourra être logique (2 états), numérique (valeur discrète) ou analogique. D'une façon générale, les capteurs peuvent être classés selon deux critères [13] [14]:

- Grandeur mesurée: capteur de position, de température, de vitesse, de force, de pression, etc.
- Caractère de l'information délivrée : capteurs logiques appelés aussi capteurs tout ou rien (TOR), capteurs analogiques ou numériques.

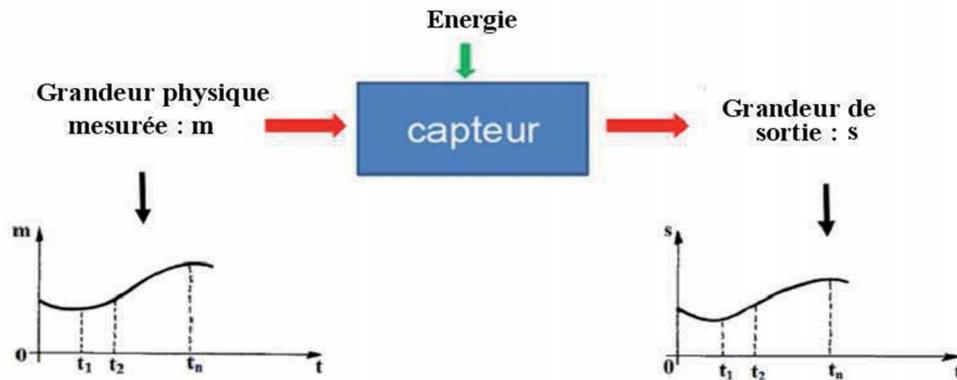


Fig. III.3: Principe d'un capteur

### III.3.1. Principales caractéristiques des capteurs

Suivant les applications souhaitées, le choix d'un capteur adéquat nécessite l'établissement préalable d'un cahier des charges dans lequel sont énumérés :

- le type de l'événement à détecter,
- la nature de cet événement,
- la grandeur de l'événement,
- l'environnement de l'événement,

A partir de ces paramètres, le choix du capteur est effectué. Par ailleurs, l'utilisation d'un capteur dans les meilleures conditions, nécessite un étalonnage qui permet de connaître les incertitudes de mesure relatives aux paramètres caractéristiques du capteur. Un certificat d'étalonnage d'un capteur contient généralement les caractéristiques suivantes : étendue de mesure, résolution, fonction de transfert, linéarité, caractéristiques statistiques, temps de réponse, sensibilité, limite de détection, etc. [10].

### III.3.2. Principe de fonctionnement d'une photorésistance

Une photorésistance de type LDR (Light Dépendant Resistance) est un capteur de lumière dont la résistance varie en fonction de l'éclairement, est une cellule photo-électrique sensible à la quantité de lumière reçue. Une variation de lumière (ou d'ombre) provoque une variation de signal.



Fig. III.4: Photo d'une photorésistance (LDR)

Ce capteur est constitué d'un cristal de semi-conducteur à température basse contient peu d'électrons libres. La conductivité du cristal est très faible, proche de celle d'un isolant. Lorsque la température du cristal augmente de plus en plus d'électrons qui étaient immobilisés dans les liaisons covalentes s'échappent et peuvent participer à la conduction. A température constante si le même cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal. Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons disponibles pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la photorésistance est inversement proportionnelle à la lumière reçue [15].

Dans l'obscurité, la valeur de la résistance d'obscurité  $R_{obs}$  d'une photorésistance dépend de sa géométrie, de la nature du matériau employé et de la température d'utilisation.

Lorsqu'elle est éclairée, la résistance  $R$  de la photorésistance diminue rapidement quand son éclairement (intensité lumineuse)  $E$  croît (figure III.5) suivant la relation  $R = K.E^\gamma$  où  $K$  est une constante dépendant du matériau, de la température, de la nature spectrale du rayonnement reçu ainsi que de la surface sensible de la photorésistance et où  $\gamma$  est une valeur numérique comprise entre 0,5 et 1 [15].

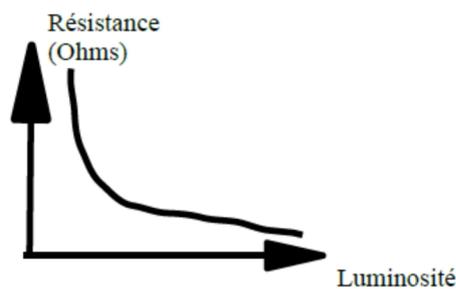


Fig. III.5: Evolution de la résistance d'un LDR en fonction de la luminosité

### III.4. Moteur à courant continu

Une machine à courant continu est un convertisseur réversible rotatif d'énergie. Lorsque l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique, la machine fonctionne en moteur. Lorsque l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique, la machine fonctionne en génératrice.

L'énergie mécanique se présente sous la forme d'un couple de moment  $T_u$  tournant à la vitesse  $\Omega$ .

La machine peut fonctionner soit comme génératrice (convertisseur mécanique-électrique), soit comme moteur (convertisseur électrique-mécanique) [16].

#### III.4.1. Organes mécaniques d'un MCC

Le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge « axiale ou radiale ». Les pôles inducteurs sont en général vissés sur le stator, ils peuvent aussi en faire partie intégrante. Un ventilateur est placé en bout d'arbre, sur le rotor, pour le refroidissement de la machine. Il peut être

complété par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes. Le collecteur, l'ensemble porte-balais et les balais se situent de l'autre côté de la machine.

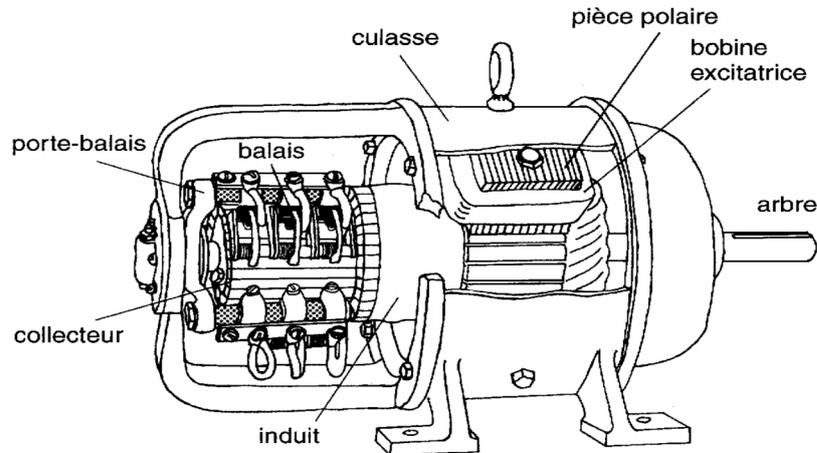


Fig. III.6: Schéma descriptive d'une machine à courant continu

**III.4.2. Stator**

Aussi appelé l'inducteur il est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique qui est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé « champ inducteur » ( $B_s$ ), qui est maximum dans l'axe des pôles et pratiquement nulle dans l'espace inter polaire. L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique ( $\phi$ ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et du rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques.

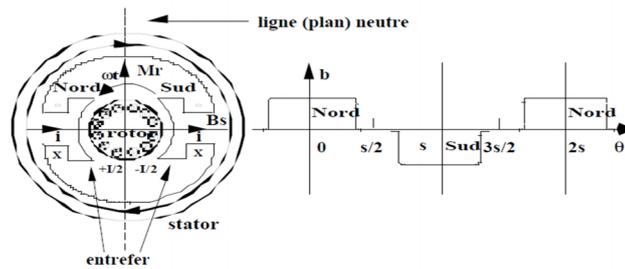


Fig. III.7: Schéma de principe d'un stator

**III.4.3. Rotor**

L'induit (ou rotor) réalise par un empilage cylindrique de tôles isolées, dans lequel des encoches ont été aménagées afin de recevoir, à sa périphérie, des conducteurs régulièrement espacés. Le rotor est mobile autour de son axe et séparé de l'inducteur par un entrefer n'excédant pas quelques millimètres. Les spires de l'induit sont soumises de ce fait à des couples de forces de Laplace qui font tourner le rotor [03].

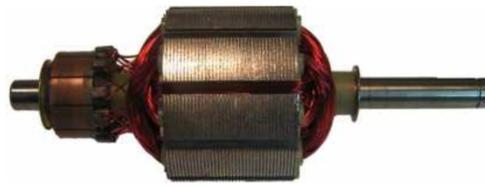


Fig. III.8: Schéma de principe d'un rotor

#### III.4.4. Collecteur et balai

Le collecteur, solidaire de l'induit mobile, dont le rôle est de transformer le courant induit alternatif en courant unidirectionnel. Il est essentiellement constitué par une juxtaposition cylindrique de lames de cuivre séparées par des lames isolantes. Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.

Les balais, fixés sur le stator sont faits en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement, assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante et en s'appuyant sur le collecteur, assurent un contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. Dans une machine à enroulements imbriqués, il y a autant de balais que de pôles magnétiques inducteurs. Le dispositif collecteur/balais permet d'alimenter les conducteurs de l'induit.

#### III.4.5. Moteur à courant continu à aimant permanent

Un moteur à courant continu à aimant permanent permet de faire une réalisation économique de moteurs, en général de faible puissance pour des usages multiples. Dans la figure (III.9) on représente une photo de quelque exemple de ce moteur [17].



Fig. III.9: Photo des MCCs à aimant permanent

Cette technologie de moteur se compose de trois parties essentielles [17]:

- **Partie mobile, l'induit (rotor)** est constitué d'un noyau métallique avec une ou plusieurs bobines de cuivre tournantes dans le champ magnétique créé par l'inducteur. Ces conducteurs sont soumis à des forces de Laplace, qui va créer un couple moteur.
- **Partie fixe, l'inducteur (stator)** constitué d'un aimant permanent qui engendre un champ magnétique dont le flux traverse le rotor. L'espace étroit entre le rotor et le stator est nommé entrefer.

- **Le collecteur qui associé aux balais**, permet de relier les enroulements du rotor à l'extérieur du moteur. Pour entretenir la rotation du moteur, le collecteur inverse le sens du courant dans les spires à chaque demi-tour.

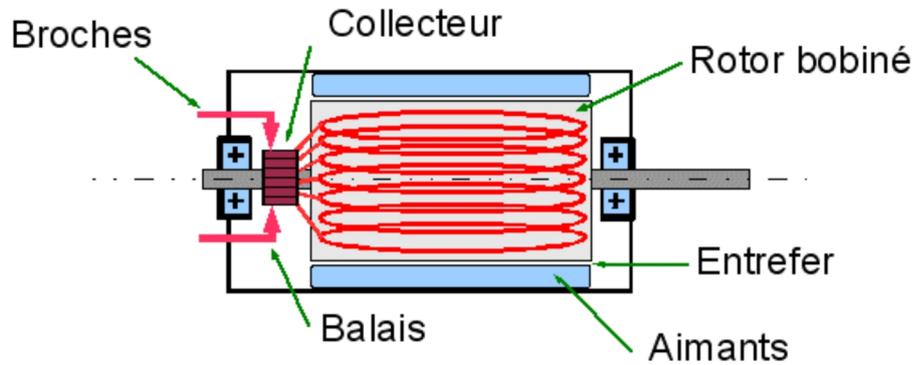


Fig. III.10: Vue de coupe du MCC à aimant permanent.

### III.5. Caractéristiques électriques d'un MCC

L'induit d'un moteur à courant continu se modéliser par:

- Une résistance  $R$  des enroulements.
- Une force électromotrice  $E$  qui représente la somme des *f. e. m.* de toutes les spires.
- Une inductance  $L$  formée par les enroulements (bobine).

#### III.5.1. Equations électriques

Dans le cas d'un régime transitoire et par l'application de la loi d'Ohm, nous avons:

$$U(t) = E(t) + R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \tag{III.1}$$

En régime permanent, le courant  $i(t)$  ne varie plus et le terme  $L \frac{di(t)}{dt}$  devient nul.

- L'équation électrique est devient:

$$U = E + R \cdot I = Cte \tag{III.2}$$

- La force électromotrice  $E$  est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur  $\Omega$ (rad/s)

$$E = K_e \cdot \Omega \text{ Avec } K_e \text{ constante caractérisant le moteur.} \tag{III.3}$$

- Le courant  $I$  est proportionnel au couple électromagnétique  $C_{em}$  (Nm). A partir de la puissance électromagnétique il est possible de déduire la relation du couple électromagnétique transmis dans l'entrefer du moteur.

$$C_{em} = K_c I, \text{ avec } K_e = K_c, \tag{III.4}$$

$K_c$ : Constante caractérisant le moteur, dans le cas d'un flux constant ce coefficient s'appelle «constante de couple» dans la documentation de constructeur.

Puisque le moteur est alimenté par une tension  $U$  constante:

- Quand  $C_r \uparrow \rightarrow C_m \uparrow \rightarrow I \uparrow (RI + E = U = Cte) \rightarrow E \uparrow \rightarrow \Omega \downarrow$

- Quand  $C_r \downarrow \rightarrow C_m \downarrow \rightarrow I \downarrow (RI + E = U = Cte) \rightarrow E \downarrow \rightarrow \Omega \uparrow$

On suppose que la charge à entraîner est constante.

Dans ce cas  $C_r = cte \rightarrow C_m = cte \rightarrow I = cte$

- Si  $U \uparrow (U = RI + E) \rightarrow E \uparrow \rightarrow \Omega \uparrow$
- Si  $U \downarrow (U = RI + E) \rightarrow E \downarrow \rightarrow \Omega \downarrow$

En conclusion, pour faire varier la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu il suffit de faire varier la valeur de sa tension d'alimentation  $U$ . Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser  $E$  et donc la tension d'alimentation à ses bornes  $U$ . Le courant varie avec le couple, on peut aussi limiter le courant pour limiter le couple.

### III.5.2. Bilan des puissances

- La puissance électromagnétique est:

$$P_e = E.I, P_e \text{ s'exprime en Watt (W)}. \quad (III.5)$$

- La puissance absorbée par l'induit sur le réseau est la puissance électrique prélevée sur l'alimentation

$$P_a = U.I, P_a \text{ s'exprime en Watt (W)}. \quad (III.6)$$

- La puissance utile  $P_u$  est la puissance mécanique disponible sur l'arbre moteur en sortie. C'est la puissance qui est donnée dans les catalogues de constructeurs.

$$P_u = C_u.\Omega, P_u \text{ s'exprime en Watt (W), avec } C_u \text{ couple utile} \quad (III.7)$$

- Puissance dissipée  $P_d$ : Cette puissance correspond aux pertes électriques par effet joules ( $R.I^2$ ), aux pertes mécaniques et aux pertes magnétiques, La puissance utile est donc toujours plus faible que la puissance absorbée.

$$P_d = P_a - P_u, P_d \text{ s'exprime en Watt (W)}. \quad (III.8)$$

Le bilan représenté ici, prend en compte les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement moteur. La puissance absorbée  $P_a$ , correspond au total des puissances consommées par les circuits induits et inducteurs, soit:

$$P_a = UI(\text{induit}) + ui(\text{inducteur}) \quad (III.9)$$

Les pertes sont d'origines mécanique, magnétique et électrique:

- les pertes mécaniques et magnétiques sont constantes et notées  $P_c$
- Les pertes électriques par effet joule sont:

$$\text{Pour l'induit } P_j = rI^2 \quad (III.9)$$

$$\text{Pour l'inducteur } P_j = Ri^2 = ui \quad (III.10)$$

La puissance mécanique utile  $P_u$ , est égale à la puissance absorbée diminué de l'ensemble des pertes:

$$P_u = P_a - \text{Pertes} \quad (III.10)$$

D'où:

$$P_u = (UI + ui) - ri^2 - ui - P_c = UI - rI^2 - P_c \tag{III.11}$$

Donc  $P_u = I(U - rI) - P_c$

De plus on sait que  $E' = U - rI$

Donc on en déduit :

$$P_u = E'I - P_c = P_{em} - P_c \tag{III.12}$$

### III.6. Caractéristiques mécaniques d'un MCC

#### III.6.1. Couple moteur (couple utile) et couple de pertes

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  n'est pas égal au couple moteur  $C_m$  disponible sur l'arbre du moteur. Il y a une perte de couple  $C_{pertes}$  due aux frottements des diverses pièces en rotation et aux pertes fer (courants de Foucault).

Pour un moteur donné  $C_{pertes}$  est constant:

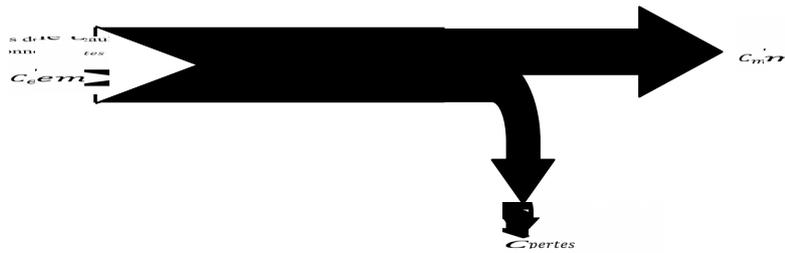


Fig. III.11: Représentation de bilan des couples moteur

Avec  $C_m = C_{em} - C_{pertes}$

Le couple utile sur l'arbre moteur peut être déduit de la relation de la puissance utile, soit :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \tag{III.5}$$

#### III.6.2. Couple résistant

Le couple résistant  $C_r$  est le couple qu'exerce sur l'arbre, la charge que le moteur doit entraîner en rotation. Plus la charge est importante plus  $C_r$  est important. Equation mécanique c'est écrit:

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{III.6}$$

$J$  : Moment d'inertie ( $g. m^{-2}$ )

- Quand  $C_m > C_r \rightarrow J \frac{d\Omega}{dt} > 0 \rightarrow \Omega \uparrow \rightarrow$  le moteur accélère.
- Quand  $C_m = C_r \rightarrow J \frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow \Omega = cte \rightarrow$  le moteur tourne à une vitesse constante.
- Quand  $C_m < C_r \rightarrow J \frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow \Omega \downarrow \rightarrow$  le moteur décélère.

Dans le cas, où le moteur est alimenté par une tension  $U$  constante, le couple moteur  $C_m$  cherche toujours à compenser le couple résistant  $C_r$  pour atteindre le point d'équilibre  $C_m = C_r$ . Ceci est illustré par les chronogrammes ci-dessous:

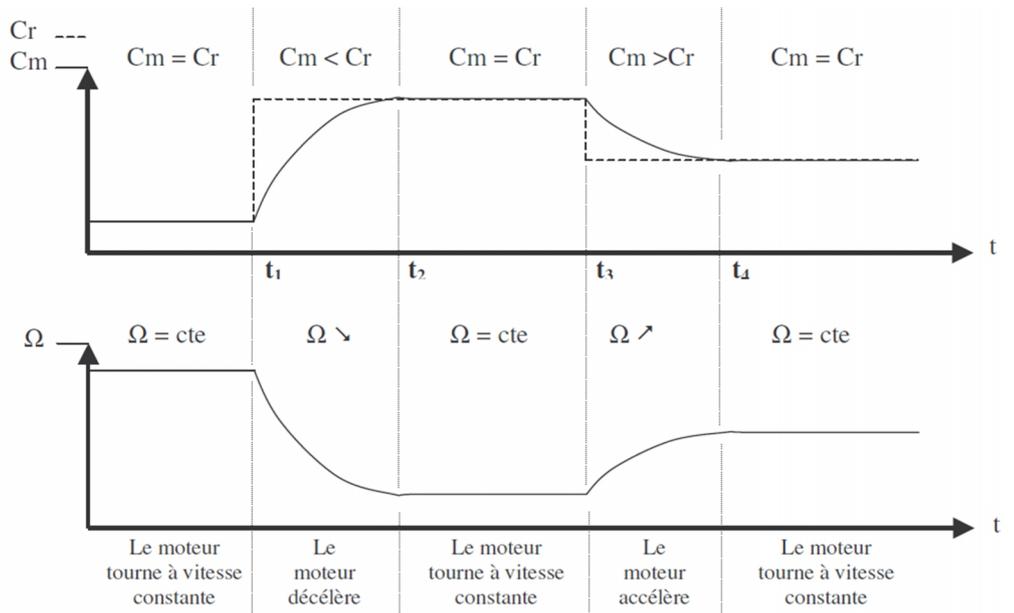


Fig. III.12: Chronogrammes de vitesse, de couple électromagnétique et couple résistant

- Entre les instants  $t_2$  et  $t_3$  le moteur tourne à vitesse constante.
- A l'instant  $t_3$ , la charge à entraîner diminue ( $C_r \downarrow$ ),  $C_m$  devient supérieur à  $C_r$ , le moteur accélère ( $\Omega \uparrow$ ).  $C_m$  diminue pour essayer d'égaliser  $C_r$ . Il y parvient à l'instant  $t_4$ .
- A l'instant  $t_1$ , la charge à entraîner augmente ( $C_r \uparrow$ ),  $C_m$  devient inférieur à  $C_r$  le moteur décélère ( $\Omega \downarrow$ ).  $C_m$  augmente pour essayer d'égaliser  $C_r$ . Il y parvient à l'instant  $t_2$ .

### III.6.3. Rendement

C'est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée, il est toujours inférieur à 1.

Appelé aussi le rendement industriel  $\eta_i$ , avec

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_a} \tag{III.13}$$

Le rendement électrique  $\eta_e$  du moteur est égal au rapport de la puissance électromagnétique sur la puissance absorbée:

$$\eta_e = \frac{P_{em}}{P_a} \tag{III.14}$$

Dans notre travail nous avons utilisé un moteur à courant continu à aimant permanent dont les caractéristiques suivantes:

Tension d'alimentation de 12V

Courant absorbé maximal de 0.34A

Puissance utile de

### III.7. Circuit de pilotage d'un MCC

Le moteur peut être alimenté simplement par un relais électromécanique ou par un transistor associé à une diode de roue libre (figure II.13-a). Le plus souvent, le moteur à besoin de tourner dans les deux sens de rotation, on utilise alors un dispositif nommé pont en H (figure II.13-b) [19].

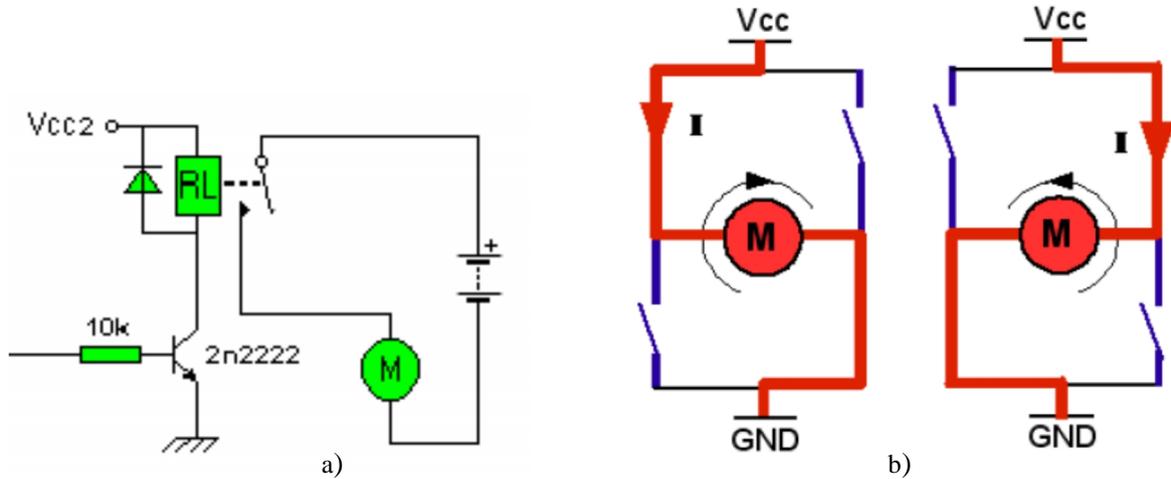


Fig. III.13: Schéma de principe de pilotage du MCC

Dans notre travail nous avons utilisé le circuit L293D (Pont en H), est un circuit intégré très connu et facile à mettre en œuvre, ce circuit permet de contrôler le sens et la vitesse de rotation d'un ou deux moteurs au maximum de 8 à 20 Volts et délivre un courant maximal de 1,2A. Dans son principe de base, le pont H est un assemblage de 4 transistors (2 PNP et 2 NPN) monté de telle façon que le courant puisse passer soit dans un sens, soit dans l'autre au travers de la charge [18].



Fig. III.14: Circuit L293D

L293D contient deux circuits d'attaque de pont en H intégrés. Dans son mode de fonctionnement commun, deux moteurs à courant continu peuvent être entraînés simultanément, à la fois en avant et en sens inverse. Les opérations du moteur de deux moteurs peuvent être commandées par une logique d'entrée aux broches 2 et 7 et 10 et 15.

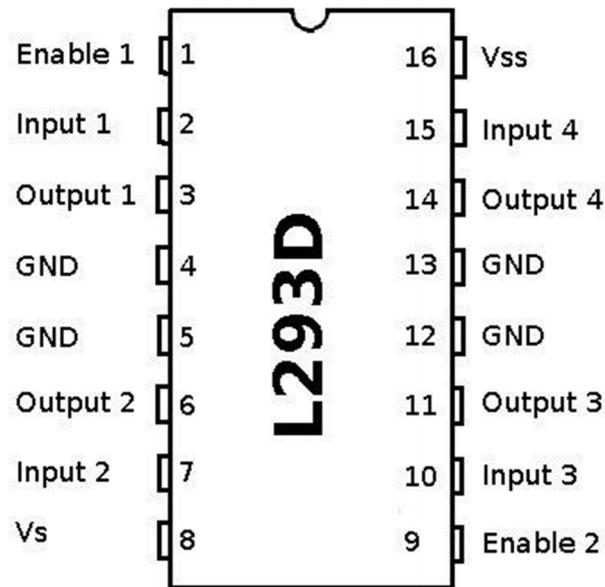


Fig. III.15: Brochage du L293D

L'entrée logique 00 ou 11 arrête le moteur correspondant. Logic 01 et 10 tournent dans des directions droite et à gauche, respectivement. On active les broches 1 et 9 (correspondant aux deux moteurs) doivent être élevés pour les moteurs de commencer à fonctionner. Quand une entrée de validation est élevée, le pilote associé obtient activé. En conséquence, les sorties deviennent actifs et fonctionnent en phase avec leurs entrées. De même, lorsque l'entrée de validation est faible, ce pilote est désactivé, et leurs sorties sont hors tension et dans l'état haute impédance [20].

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous fait une brève étude sur les principales parties de notre système de contrôle à réaliser. Nous avons trois partis:

- Un calculateur, nous avons utilisé le microcontrôleur PC 16F877a, pour quelque avantage indispensable; le nombre des entrés/sortis importantes et surtout les convertisseurs analogique numériques.
- Un capteur de lumière, nous avons adopté un capteur de type de résistance variable proportionnellement à la lumière (LDR), ce capteur est basé sur la technologie de semi-conducteur.
- Un à courant continu, nous avons utilisé un MCC à aimant permanent à faible puissance pour sa simple commande.
- Un circuit de pilotage, nous avons utilisé le circuit L293D (Pont en H), est dispositif facile à mettre en œuvre et très connu dans le domaine de commande des MCCs.

**Chapitre IV :**  
**Simulations, réalisations et résultats**  
**obtenus**

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté dans un premier temps, les schémas de simulation de notre système, nous avons utilisé le PROTEUS comme un environnement de simulation, ainsi, nous avons donné les résultats des simulations obtenus sous cet environnement.

Ce chapitre a été consacré dans un deuxième temps à la représentation des résultats expérimentaux, tel que la carte de commande réalisée et les mesures effectuées pour évaluer et valider notre travail par rapport au celui de simulation.

### IV.2. Simulations et résultats obtenus

Dans le développement de notre simulation, nous avons procédé à subdiviser notre travail en trois étapes :

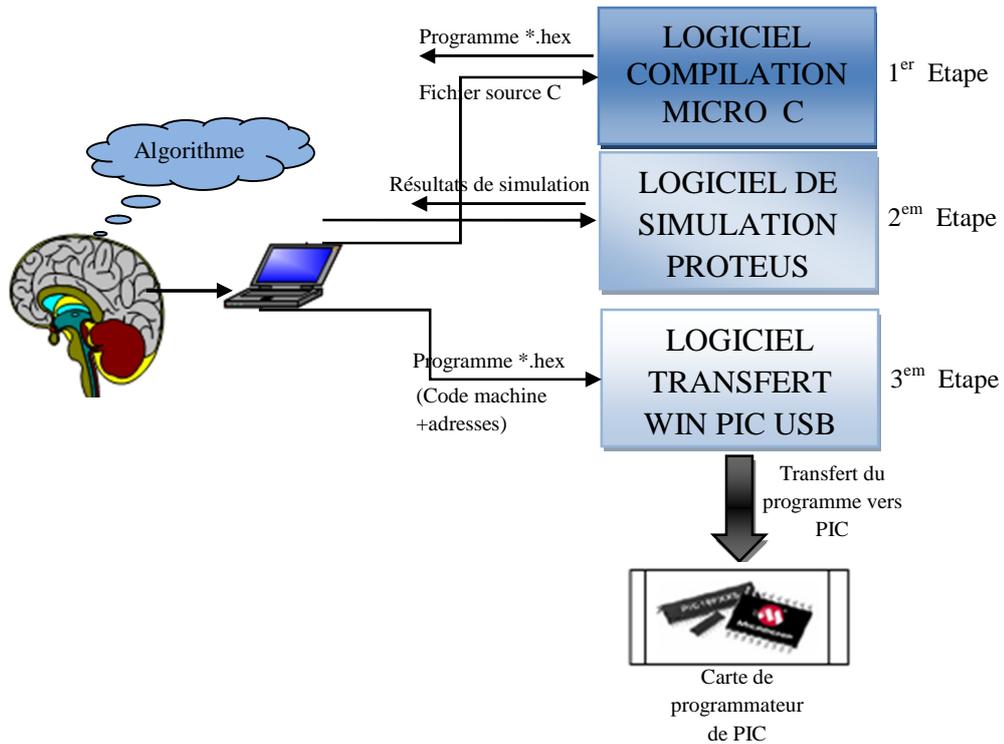
**Etape 1:** Dans notre cas, nous avons utilisé le logiciel de compilation « Mikro C for PIC ». Cet environnement est ensemble des instructions nous permettent de modéliser notre problème en langage C.

Etape 2: Après l'obtention d'un programme compilé, le besoin de simuler son bon déroulement devient une nécessité puisqu'il nous permet d'avoir une idée claire sur le côté matériel, de plus nous pouvons visualiser le comportement du PIC avec ses périphériques. Dans notre cas nous avons opté pour le logiciel « PROTEUS » qui nous permettra de charger facilement le programme compilé dans le PIC.

**Etape 3:** dans la phase terminal, une fois le fichier source compilé et simulé, il va falloir le transférer dans la mémoire PIC.

Pour cela il faut un programmeur et un logiciel de transfert, dans notre situation nous avons utilisé « WIN PIC USB ».

La figure (IV.1) résume les étapes de développement de notre algorithme de simulation.



**Fig. IV.1: Cheminement de programmation et simulation**

Nous avons adopté la simulation sous PROTEUS, afin de vérifier le fonctionnement du PIC avec tous les périphériques de la carte de commande. De plus, pour vérifier le fonctionnement du programme avant le transférer vers la mémoire de microcontrôleur réel, et cela nous permet d'économiser le temps et également d'augmenter la durée de vie de notre PIC.

Dans la figure (IV.2) nous représentons le schéma de la carte de commande et la carte des capteurs LDR, ce schéma inclus aussi les moteurs (M1 pour le mouvement horizontal et M2 pour le mouvement verticale) du mécanisme de suiveur. Nous avons utilisé des sources de lumière qui nous permettent de varier l'intensité de la luminosité afin de créer une différence de potentielle entre les photorésistances LDR.

Nous avons utilisé des LEDs indicatifs, pour indiquer l'état et le sens de rotation des moteurs.

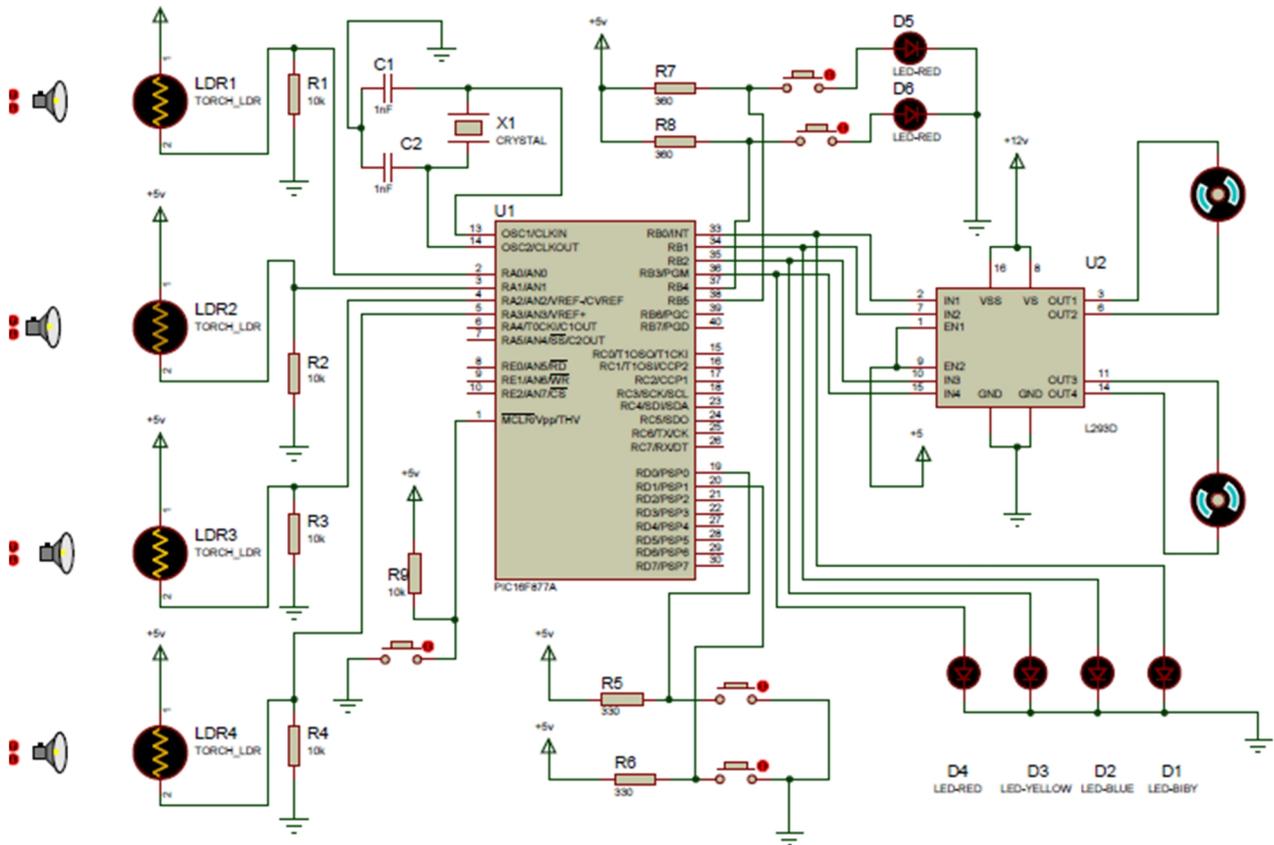
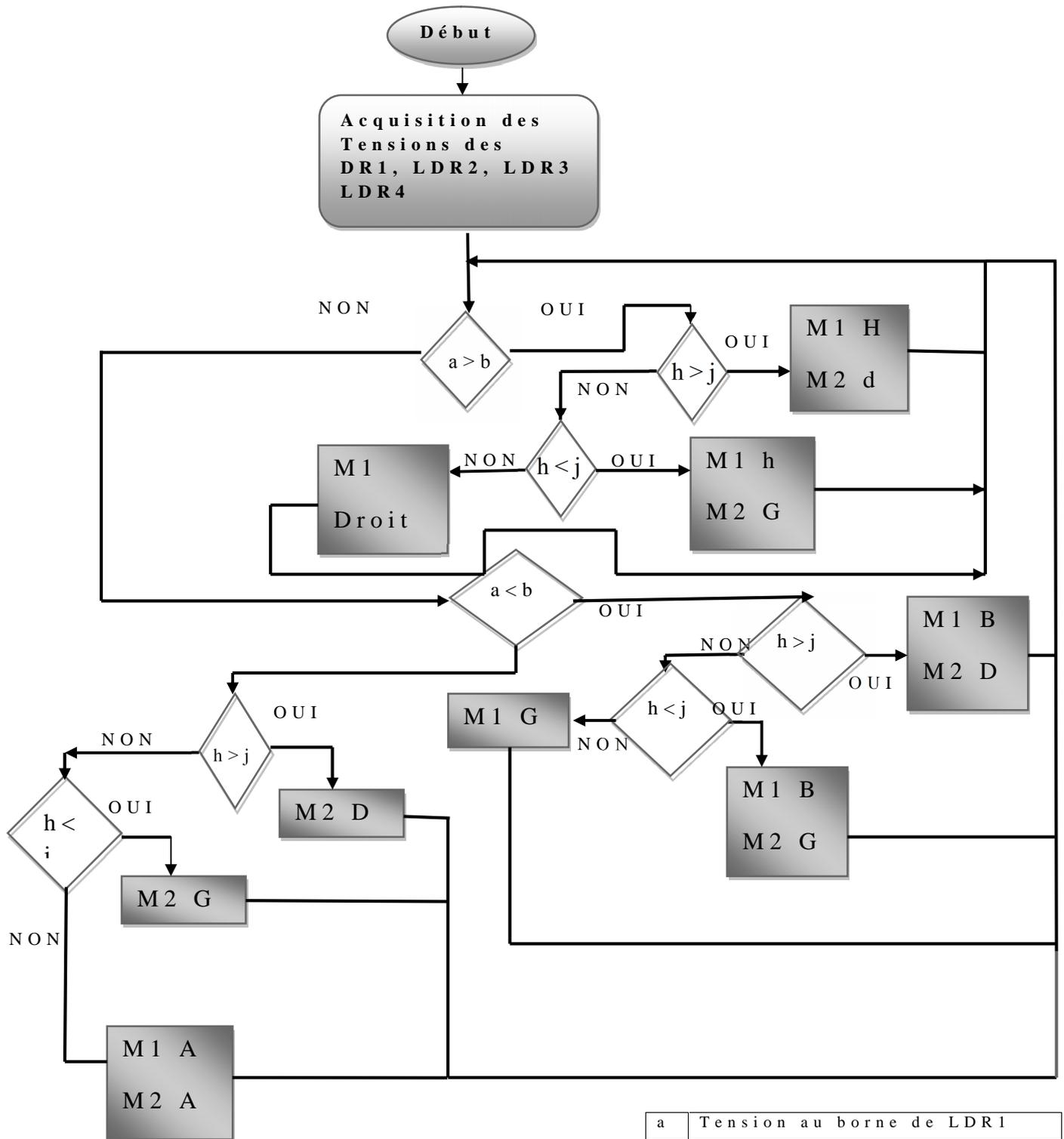


Fig. IV.2: Schéma de simulation du système de contrôle pour suiveur de soleil

Les tensions aux bornes des résistances R1, R2, R3 et R4 en série avec les photorésistances LDR1, LDR2, LDR3 et LDR4 respectivement sont appliqués aux ports analogique RA0/AN0 RA1/AN1 RA2/AN2 RA3/AN3 du microcontrôleur respectivement.

S'il y a une différence d'intensité de luminosité entre les deux capteurs, LDR1, LDR2 et LDR3, LDR4, respectivement, aux ports RB0 RB1 RB2 RB3 du microcontrôleur configurés en sortie on reçoit un niveau logique '1' (+5Volt) suivant la différence de l'intensité de la lumière. A travers le circuit L293D on démarre le moteur M1 ou M2.

S'il n'y a pas d'une différence de l'intensité de la lumière revient aux LDR1, LDR2 et LDR3, LDR4 respectivement, le deux moteurs M1 et M2 s'arrêtent. L'algorithme de cette procédure est donné sous les organigrammes suivants, sachant que, la figure (IV.3) représente le diagramme principal et la figure (IV.4) représente l'organigramme des interruptions des fins de cours.



a	Tension au borne de LDR1
b	Tension au borne de LDR2
h	Tension au borne de LDR3
j	Tension au borne de LDR4
H	Moteur tourne vers le haut
B	Moteur tourne vers le bas
D	Moteur tourne vers la droite
G	Moteur tourne vers la gauche

Fig. IV.3 : Organigramme de programme principal

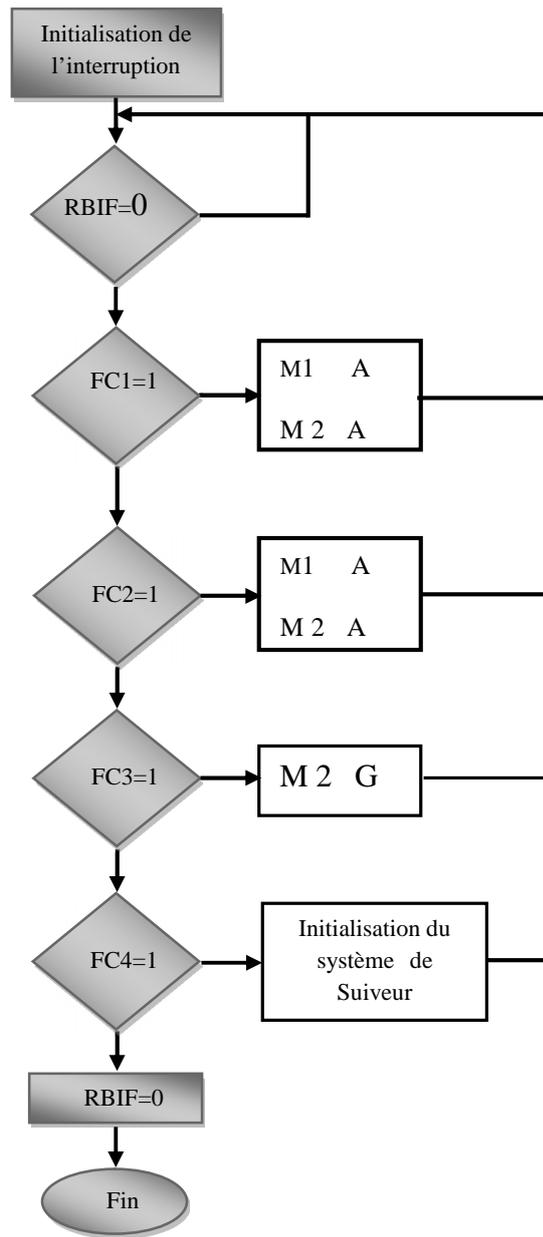
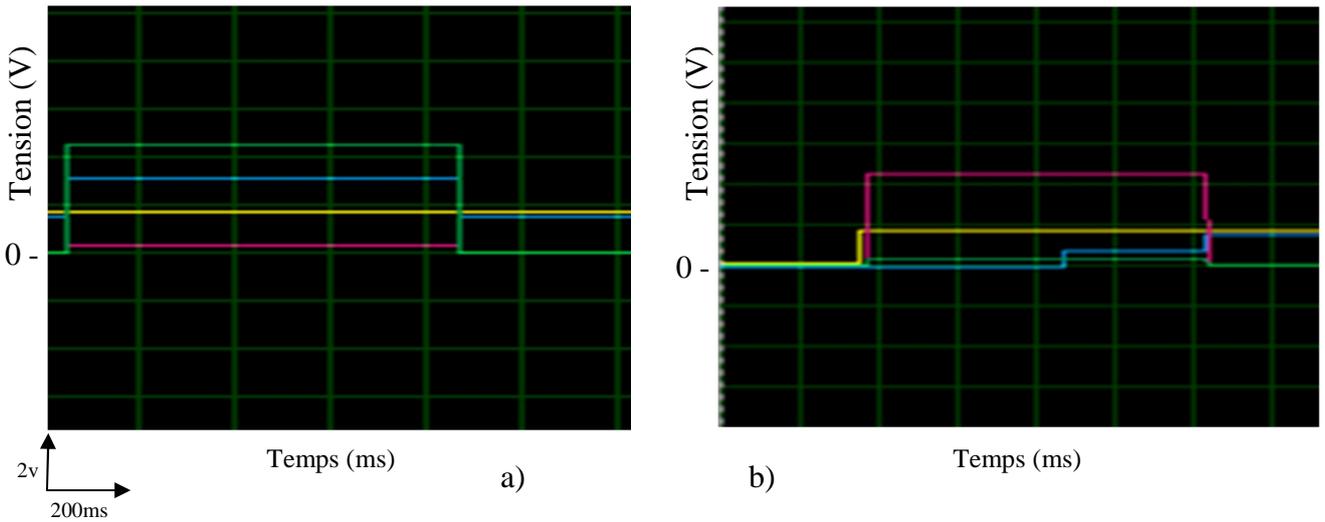


Fig. IV.4 : Organigramme des interruptions des fins de cours

L’organigramme des interruptions basé sur le teste de toutes les interruptions provenant des fins de course du système, ces interruptions sont aux entrées RD0, RD1, RB4, RB5 du microcontrôleur.

**✚ Résultats et interprétations**

Dans les figures suivantes nous illustrons les résultats de simulation obtenus sous PROTEUS. Nous représentons les tensions aux bornes des résistances en série avec les LDRs, c’est les tensions appliquées aux pins de microcontrôleur configurées en entrées. Ainsi, nous représentons les états des moteurs (marche, arrêt) et les tensions des interruptions des fins de cours.

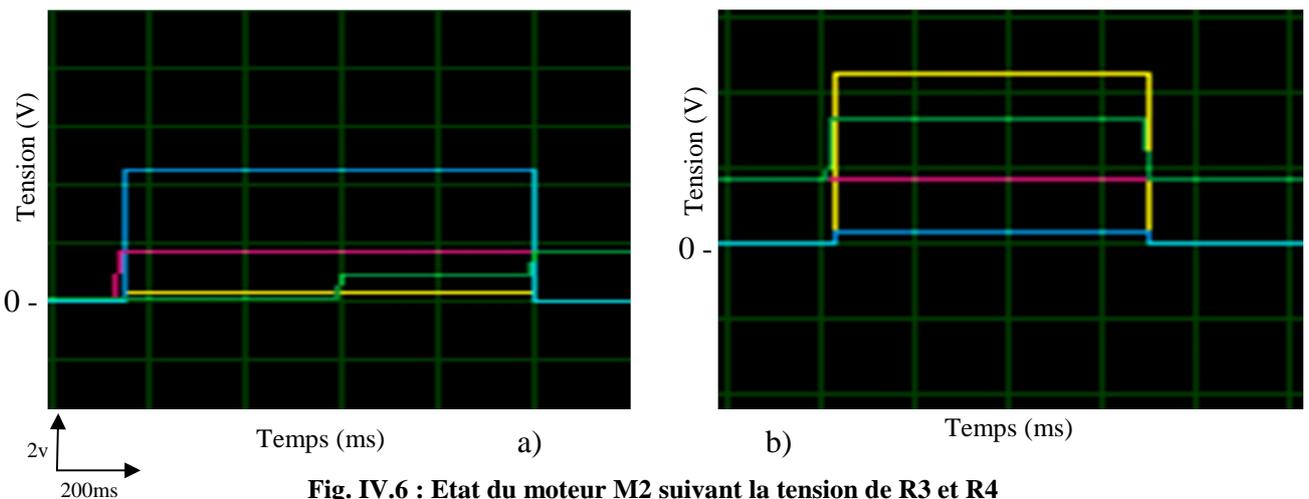


**Fig. IV.5: Etat du moteur M1 suivant la tension de R1 et R2**

- Tension aux bornes de R1.
- Tension aux bornes de R 2
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à droit
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à gauche

D’après le résultat illustré dans la figure (IV.5-a), en constat que la tension aux bornes de R2 supérieure à celle R1, cela nous indique que le moteur M1 tourne à gauche. Lorsque la tension aux bornes des deux résistances R1 et R2 sont égaux, le moteur M1 s’arrêt.

D’après le résultat illustré dans la figure (IV.5-b), on remarque que la tension aux bornes de R1 supérieure à celle de R2, dans ce cas le moteur M1 tourne dans le sens à droite. Lorsque la tension aux bornes des deux résistances R1 et R2 sont égaux, le moteur M1 s’arrêt. Lorsque la tension aux bornes des deux photos résistance sont égaux le moteur M1 s’arrêt.

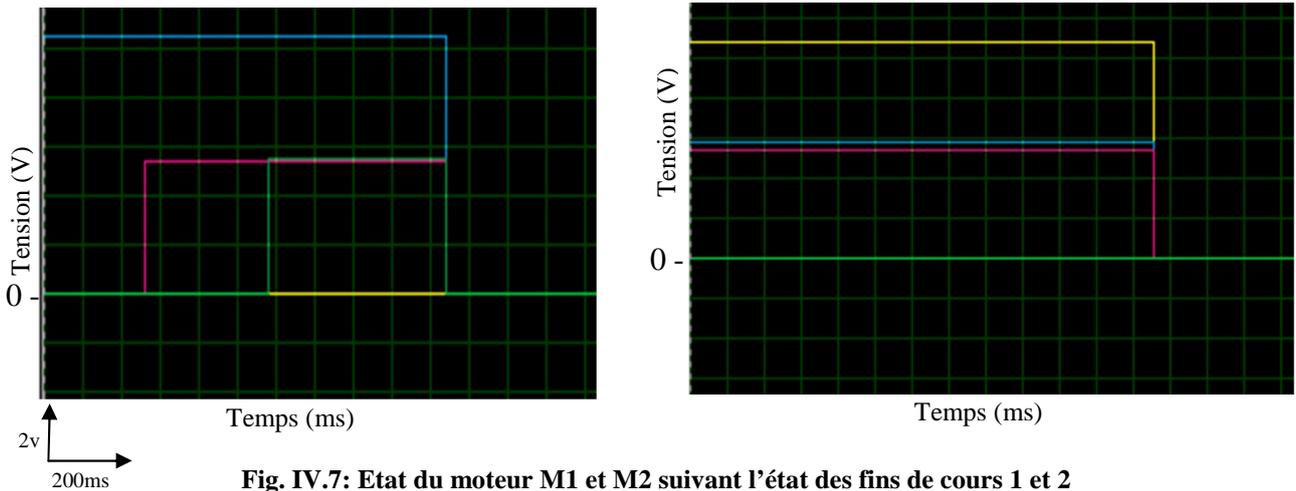


**Fig. IV.6 : Etat du moteur M2 suivant la tension de R3 et R4**

- Tension aux bornes de R3
- Tension aux bornes de R 4
- Tension alimente le moteur M2 -Sens à droite
- Tension alimente le moteur M2 -Sens à gauche

D'après le résultat illustré dans la figure (IV.6-a) en constat que la tension aux bornes de R3 supérieure à celle de R4, cela nous indique que le moteur M2 tourne dans le sens à droite. Lorsque la tension aux bornes des deux résistances R3 et R4 sont égaux, le moteur M2 s'arrête.

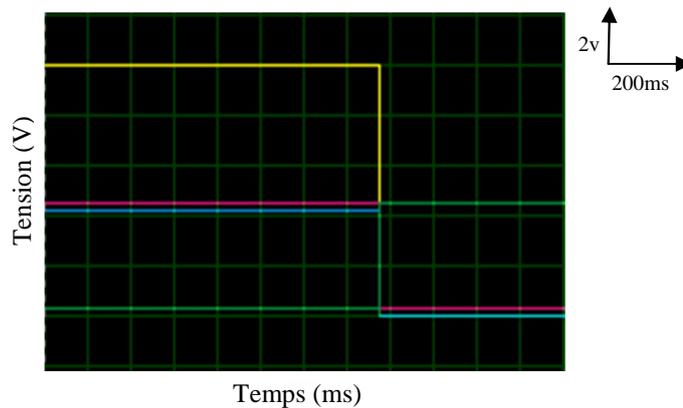
D'après le résultat illustré dans la figure (IV.6-b) on remarque que la tension aux bornes de R4 supérieure à celle de R3, dans ce cas le moteur M2 tourne dans le sens à gauche. Lorsque la tension aux bornes des deux résistances R3 et R4 sont égaux, le moteur M2 s'arrête.



**Fig. IV.7: Etat du moteur M1 et M2 suivant l'état des fins de cours 1 et 2**

- |  |  |
|--|--|
| — Tension alimente le moteur M1 -Sens à droite | — Tension alimente le moteur M2 -Sens à gauche |
| — Tension alimente le moteur M2 -Sens à gauche | — Non utilisée                                 |
| — Fin de cours (1)                             | — Tension alimente le moteur M1 -Sens à droite |
| — Non utilisée                                 | — Fin de cours (2)                             |

Les résultats illustrés dans la figure (IV.7) montrent que lorsqu' on appuie sur les fins de cours 1 et 2, les deux moteurs s'arrêtent. Bien attendu que les fins de cours 1 et 2 sont les fins de cours de protection du système contre le dépassement dans l'axe vertical.



**Fig. IV.8. Etat du moteur M1 et M2 suivant L'état de la fin de cours 3**

- |  |
|--|
| — Tension alimente le moteur M1 -Sens à droite |
| — Tension alimente le moteur M2 -Sens à gauche |
| — Tension alimente le moteur M2 -Sens à droite |
| — Fin de cours (3)                             |

D'après les résultats représentés dans la figure (IV.8), on constate que lorsqu'on appuie sur la fin de cours 3, le moteur M1 s'arrête et le moteur M2 tourne à gauche quelque soit son sens de rotation initial. Cette fin de cours représente le point final du mouvement de suiveur horizontalement à gauche, en réalité c'est le point final du soir.

### IV.3. Réalisations et résultats expérimentaux

Dans le cadre d'effectuer notre projet de fin d'étude et afin de valider les résultats de simulations obtenus et enrichir notre connaissance expérimentale, nous avons réalisé la carte électronique de commande pour notre système de contrôle. Ce travail est effectué au niveau du laboratoire de l'asservissement (Dép. Génie Electrique).

Le circuit réalisé est celui utilisé à la simulation, il est illustré à la figure (IV.2). Dans la figure (IV.9) et (IV.10) nous représentons la carte des capteurs LDRs réalisée et celle de circuit de commande respectivement.

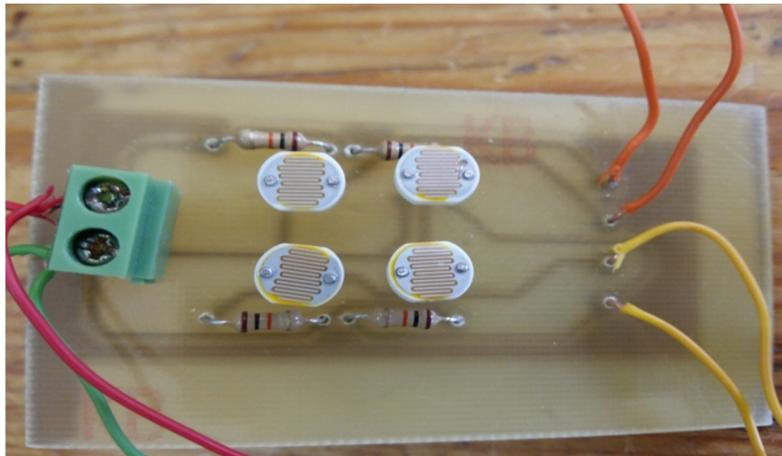


Fig. IV.9: Représentation de la carte des capteurs LDRs

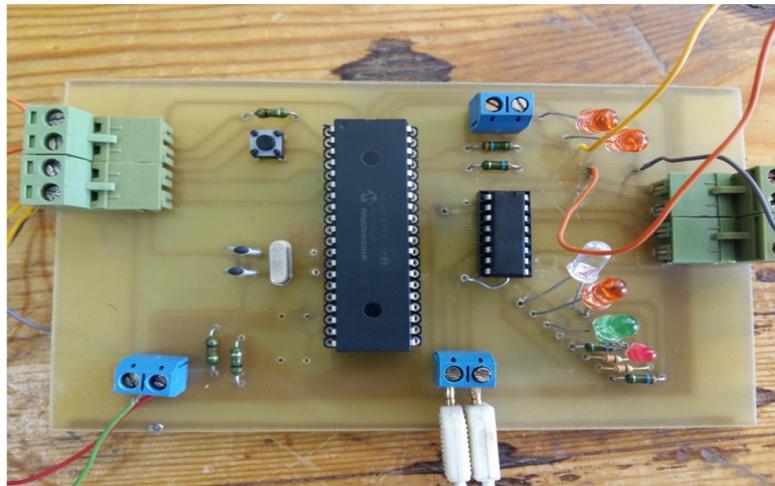
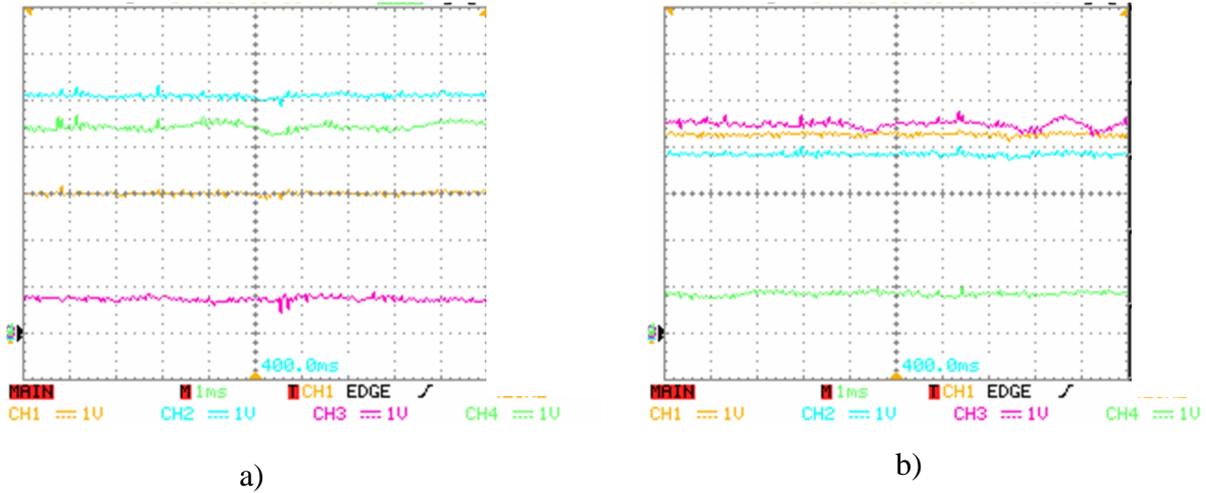


Fig. IV.10: Représentation de la carte de commande

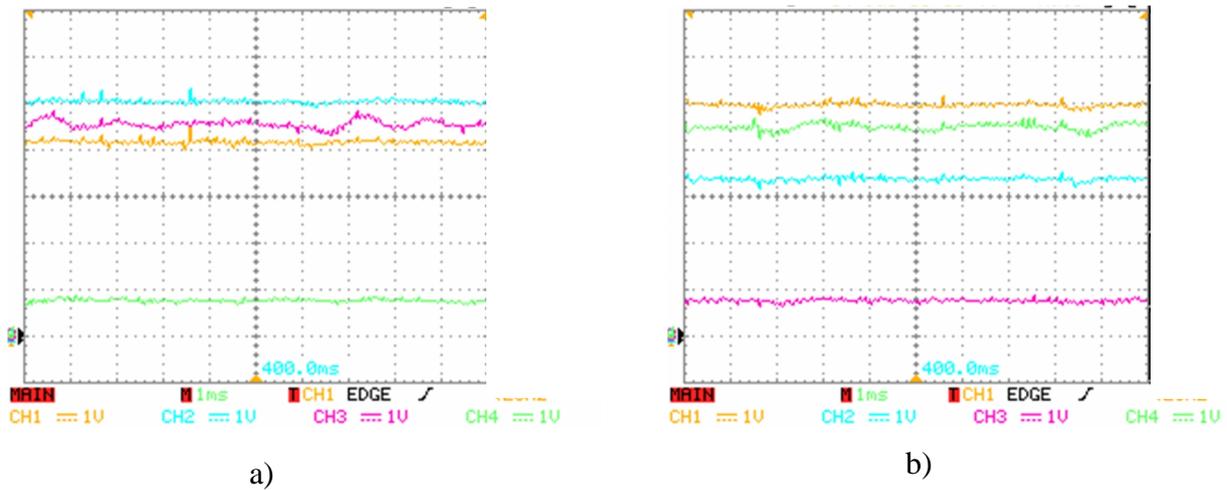
**✚ Résultats et interprétations**

Nous représentons dans les figures suivantes les résultats expérimentaux obtenus. Nous représentons les tensions aux bornes des résistances en série avec les LDRs. Ainsi, nous représentons les états des moteurs (marche, arrêt) et les tensions des interruptions des fins de cours.



**Fig. IV.11: Etat du moteur M1 suivant la tension de R1 et R2**

- La tension aux bornes de R1
- La tension aux bornes de R2
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à droite
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à gauche

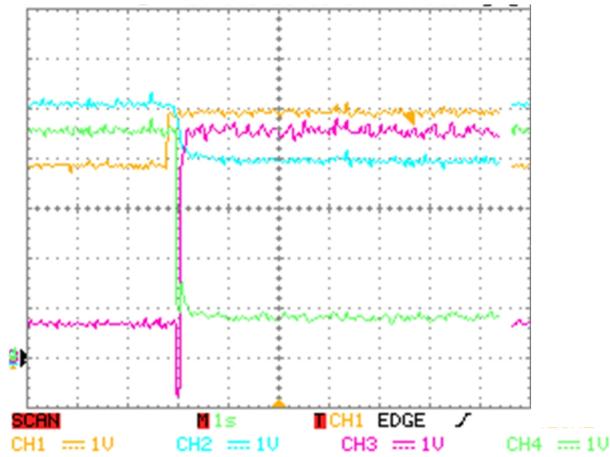


**Fig. IV.12: Etat du moteur M2 suivant la tension de R3 et R4**

- La tension aux bornes de R3
- La tension aux bornes de R4
- Tension alimente le moteur M2 -Sens à droite
- Tension alimente le moteur M2 -Sens à gauche

A partir de ces résultats, nous pouvons montrer que:

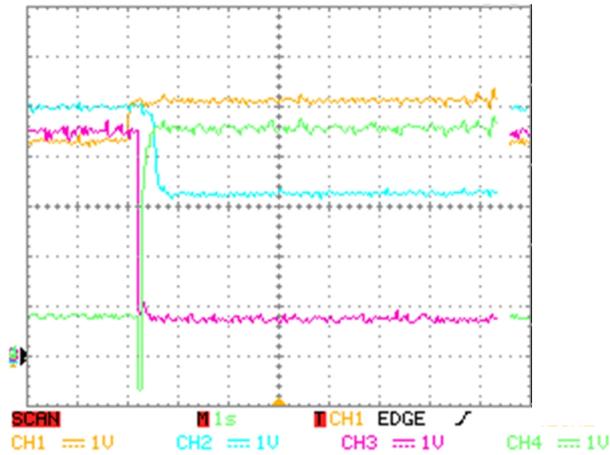
- Si la tension aux bornes de R2 est supérieure à celle aux bornes de R1, le moteur M1 tourne dans le sens à gauche (figure IV.11-a).
- Si la tension aux bornes de R1 est supérieure à celle aux bornes de R2, le moteur M1 tourne dans le sens à droite (figure IV.11-b).
- Si la tension aux bornes de R3 est supérieure à celle aux bornes de R4, le moteur M2 tourne dans le sens à droite (figure IV.12-a).
- Si la tension aux bornes de R4 est supérieure à celle aux bornes de R3, le moteur M1 tourne dans le sens à gauche (figure IV.12-b).



**Fig. IV.13: Evolutions d'état du moteur M1 suivant la tension de R1 et R2**

- La tension aux bornes de R1
- La tension aux bornes de R2
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à droite
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à gauche

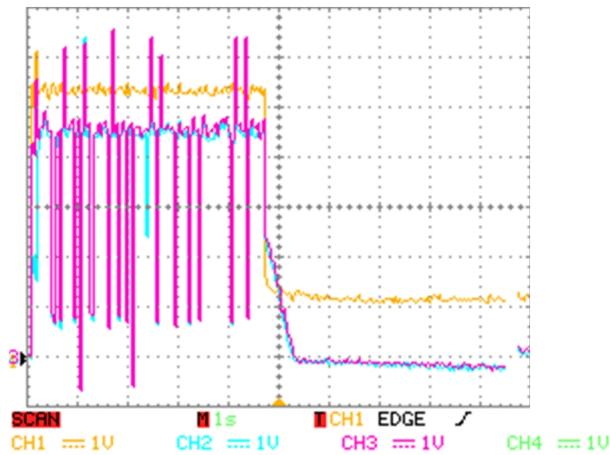
D'après le résultat illustré dans la figure (IV.13), en constat qu'au départ, la tension aux bornes de R2 est supérieure à celle aux bornes de R1, dans ce cas, le moteur M1 tourne à gauche. Lorsque on inverse l'intensité de la lumière entre les LDR1 et LDR2, alors la tension aux bornes de R1 devient supérieure à celle aux bornes de R2, dans ce cas, le moteur M1 change son sens de rotation de l'à gauche à l'à droite.



**Fig. IV.14: Evolutions d'état du moteur M2 suivant la tension de R3 et R4**

- La tension aux bornes de R3
- La tension aux bornes de R4
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à droite
- Tension alimente le moteur M1 -Sens à gauche

A partir des résultats représentés dans figure (IV.14), nous pouvons remarquer clairement qu'au départ, la tension aux bornes de R3 est supérieure à celle aux bornes de R4, le moteur M2 dans ce cas, tourne à droite. Lorsque on inverse l'intensité de la lumière entre les LDR3 et LDR4, alors la tension aux bornes de R4 devient supérieure à celle aux bornes de R3, dans ce cas, le moteur M2 change son sens de rotation de l'à adroit à l'à gauche.



**Fig. IV.15: Etat du moteur M1 et M2 suivant l'état des fins de cours 1 et 2**

- Interruption (fin de cours 1 ou 2)
- Tension alimente le moteur M1
- Tension alimente le moteur M1

D'après la figure (IV.15) on remarque que lorsque on appui sur la fin de cours (1ou 2) les moteurs M1 (vertical) et M2 s'arrêtent.

**IV.4.conclusion**

Ce chapitre a été consacré, dans un premier temps, à la partie de simulation. Nous avons montré la commande des deux moteurs M1 et M2 à l'aide d'un microcontrôleur et par l'intermédiaire d'un circuit d'adaptation L293D. Ce circuit nous permet de piloter les moteurs dans les deux sens, en plus ce circuit nous permet d'amplification de la puissance. Nous avons montré aussi que l'utilisation des capteurs de lumière de type LDR présentent beaucoup d'avantage, on cite la fiabilité et la précision qui atteint l'ordre de 0.01 volt.

De même, dans la seconde étape nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus grâce à notre réalisation pratique. Afin de prouver l'influence des grandeurs délivrées par les capteurs LDRs sur les sens des moteurs, nous avons visualisé et les tensions à la sortie des ces capteurs qui sont proportionnelles à l'intensité de la lumière et les tensions qui commandent les moteurs.

D'après les spectres obtenus, nous constatons qu'il y a une bonne concordance entre les résultats de simulation et celles obtenus par la réalisation pratique.

# **Conclusion générale**

Dans ce travail nous avons montré que le rendement d'exploitation de l'énergie solaire sur une surface bien déterminée reste très faible, et cela à cause du rendement énergétique faible des panneaux, qui est moyennement de l'ordre de 12 à 15%. Pour augmenter le taux d'exploitation de l'énergie solaire, les chercheurs scientifiques et l'industrie ont pris un autre axe de recherche, c'est le développement d'un système qui suit le soleil.

Nous avons montré les démarches de conception et la réalisation d'un système de contrôle d'un suiveur de soleil. Nous avons commencé par la simulation sous le compilateur Micro C et le PROTEUS. Des résultats sont représentés concernant la commande des deux moteurs M1 et M2 par l'intermédiaire de circuit L293D. Nous avons montré aussi que l'utilisation des capteurs de lumière de type LDR donne un bon résultat grâce à ses sensibilités de mesure.

Nous avons pu apercevoir que cette étape est très importante, surtout pour la prédiction des résultats et pour résoudre les problèmes de programmation qu'on peut les rencontrer au développement de notre algorithme.

Dans la partie expérimentale, et malgré les problèmes qu'on a rencontrés durant la réalisation, nous avons pu réussir à atteindre notre objectif désiré. Les différentes cartes réalisées sont fonctionnelles, et les tests de mouvement ont été concluants et très satisfaisants. A titre d'exemple, on peut remarquer dans les graphes expérimentaux que la variation de l'intensité de lumière de l'un des capteurs LDR donne une variation de la tension aux bornes de la résistance en série avec, et par conséquent, la variation du sens de rotation du moteur correspond.

D'après les résultats obtenus, nous constatons qu'il y a une bonne concordance entre les résultats de simulation et celles obtenus par la réalisation pratique.

Enfin, nous espérons que ce travail puisse ouvrir de nouvelles perspectives pour de futures améliorations. Nous proposons dans ce sens la réalisation d'un système de poursuite pour un générateur photovoltaïque plus lourd.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

[1] : www. L'énergie renouvelable.com.

[2] :Y. Ibrahim, << Etudes, Modélisation et Contrôle en MATLAB/SIMULINK>>, L'UNIVERSITE LIBANAISE, 2013.

[3] :S.PETIBON ,<< Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques>>, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2013.

[4] :w. BENSACI,<< Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT>>, Université KasdiMerbah–Ouargla,2012.

[5] : www.Energie éoliene.com

[6] : CHAUPRADE, R, <<; Commande électronique des moteurs à courant continu, Eyrolles,>>Paris, 1978

[7] : S. Ndoye et al / J. Sci.Vol. 9, N°) 45 – 552 (2009)

[8]: BUHLER, H. Électronique de puissance, Georgi, Lausanne, 1978.

[9] : «Suiveur de trajectoire pour panneau solaire», Sujet Baccalauréat français, 2008.

[10] :K.Ismail, Mémoire de fin d'étude master professionnel, «Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ».

[11] : ZaghibIlhem, mémoire de magister « Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique », Université de Constantine, 2005.

[12] : BIGONOFF, La programmation des PICS, La gamme MID-RANGE par l'étude des16F87X (16F876-16F877).

[13]:S.Yacouba,<<conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la sans tête de l'environnement ,l'école NORAL supérieur de Cachan ,2012.

[14] : capteur et courbe d'étalonnage.

[15] : étude d'un capteur de lumière la photo résistance.

[16] CHARLES-HENRI VIGOUROUX <<Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques>> Septembre 2002

[17] :Alain,charbonnel,<<le moteur à courant continue à aiment permanant >>, 2007 .

[18] : Fabrice Sincère ; version 3.0.5,<< Electrotechnique>>.

Chapitre3

[20] :C.Housseyn et C.Mokhtar, Mémoire de fin d'étude, «Réalisation d'un système de poursuite solaire» Université IBN KHALDOUN DE TIARET, 2015.

الهدف من هذا العمل هو تجسيد دائرة إلكترونية للتحكم في نظام تعقب الطاقة الشمسية يمكن أن يتبع الشمس في أعقاب تحقيق أقصى قدر من الكفاءة مولد الطاقة الفوتونية ، بما أن الجهد الذي تولده الألواح الشمسية ينسب إلى التدفق الضوئي، مراقبة الزاوية  $\varphi$  و طولية للطاقة الفوتونية بالنسبة إلى الإشعاع الساقط من الواجهة و الذي يجب أن يكون عمودي على الطاقة الفوتونية. وهذا يتطلب تجسيد دائرة إلكترونية للسيطرة على الجزء الميكانيكي للمتتبع يتحقق باستخدام ملتقطات ضوئية تولد التيار الكهربائي الذي يسمح بالسيطرة على الزاوية لتحقيق أقصى قدر من مردود لوح الشمسي.

في البداية قدمنا العموميات على المولدات الكهربائية الضوئية، ومبدأ التشغيل من الخلايا الشمسية وتقنيات مختلفة للخلايا الكهروضوئية. ثم وصف اعدادات الخلية الكهروضوئية بالنسبة مع أداء شدة الإضاءة ودرجة الحرارة.

وقمنا بعد ذلك بدراسة مبدأ متتبع الشمس، مصالحوه وأثاره على أداء التحول من الطاقة الشمسية.

في الجزء الثالث تطرقنا الى ذكر معالم المتحكم ، وذكرنا كذلك المحرك ذو التيار المستمر، خصوصا المحرك في النظام الدائم. ثم قدمنا مبدأ تشغيل LDR ملتقط الضوء ودارة السائق L293D.

في الجزء الأخير من هذا العمل تطرقنا الى المحاكاة والتطبيق العملي , وقمنا كذلك بعرض نتائج التجربة وتفسيرها.

## Résumé

L'objectif de ce travail est de réaliser un circuit électronique pour le contrôle d'un système suiveur de soleil qui peut suivre le soleil dans le but de maximiser le rendement de générateur (PV), étant donné que la tension générée par le panneau solaire est relative au flux lumineux, un contrôle de l'angle  $\varphi$  longitudinal du PV par rapport au rayonnement incident d'une façon à ce que ce dernier soit vertical au PV. Ce la nécessite la réalisation d'un circuit électronique de contrôle pour commander un héliostat réalisé mécaniquement en utilisant un capteur optique différentiel génère une tension qui permet de réguler l'angle  $\varphi$  pour aboutir au rendement maximal correspondant à  $\varphi = 0$ .

Dans un premier temps nous avons présenté des généralités sur la les générateurs photovoltaïques, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire et les différentes technologies des cellules PV. Nous décrivons ensuite les paramètres d'une cellule PV et ses performances vis-à-vis l'intensité de l'éclairage et la température.

Nous avons ensuite étudié le principe de constitution d'un suiveur de soleil, ses intérêts et ses effets sur le rendement de transformation de l'énergie solaire.

Dans la troisième partie nous avons évoqué un rappel sur le microcontrôleur et ses caractéristiques, et sur la machine à courant continu, en particulier la machine à aimant permanent. Nous avons ensuite présenté le principe de fonctionnement d'un capteur de lumière de type LDR (Light Dépendant Resistance) et le circuit de pilotage des moteurs L293D.

Dans la dernière partie de ce travail nous nous sommes intéressés à la simulation et à la réalisation pratique, des résultats de simulation et expérimentaux sont obtenus et interprétés.