

Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Génie électrique*

**Spécialité :** *Automatique*

**Par :** *M<sup>me</sup>* **MOULAY LAKHDAR KHADIDJA**

**Thème**

**Commande d'un moteur électrique utilisé dans un système de poursuite solaire pour un panneau photovoltaïque**

**Soutenu publiquement le : 01/06/2016**

**Devant le jury :**

***M<sup>lle</sup> : TRABELSI Amel***

Maitre-Assistant

Univ. Ghardaïa

**Président**

***M<sup>R</sup> BITEUR Kada***

Maitre-Assistant

Univ. Ghardaïa

**Examineur**

***M<sup>R</sup>: ARIF Mohamed***

Maitre-Assistant

Univ. Ghardaïa

**Examineur**

***M<sup>R</sup>: DJELLOULI Tahar***

Maitre-Assistant

Univ. Ghardaïa

**Encadreur**

**Année universitaire 2015/2016**

## *Dédicaces*

*Ce travail, je le dédie particulièrement à :*

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

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

*Mon cher mari 'Abdallah' qui m'a aidé et m'encouragé à terminer  
ce travail*

*Ma chère ZIZI*

*Mes frères et mes sœurs ainsi toute la famille MOULLAY ET la  
famille ELHAMEDI*

*ET Tous les enseignants et les étudiants de master 02 énergie  
renouvelable et automatique*

*À tous ce qui m'ont aimé et m'ont respecté*

*KHEDDJA*

## **Remerciements**

- ❖ *Avant toute chose, je remercie ALLAH, le tout Puissant, pour m'avoir donné la force et la patience.*
  
- ❖ *J'exprime d'abord mes profonds remerciements et mon vive reconnaissance à Mr.DJELLOULI .T, enseignant au département génie électrique d'avoir encadré et diriger ce travail avec une grande rigueur scientifique, sa disponibilité, ses conseils et la confiance qu'il m'accordé de permis de réaliser ce travail.*
  
- ❖ *Il m'est particulièrement agréable de remercier ma famille Et mes amies*
  
- ❖ *Enfin, ma plus sincères remerciements à tout le personnel qui m'a aidé à la Réalisation de ce travail.*

# *Sommaire*

## Sommaire

<b>Sommaire .....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>VI</b>
<b>Liste de figures .....</b>	<b>VII</b>
<b>Nomenclature .....</b>	<b>X</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>01</b>
<i><b>CHAPITRE I : généralité sur l'énergie solaire</b></i>	
<b>I.1 .Introduction .....</b>	<b>03</b>
<b>I.2 .Le gisement solaire .....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.1 . La géométrie du soleil .....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.2 :.Spectre du soleil .....</b>	<b>04</b>
<b>I .2.3 .Mouvement apparent du soleil.....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.4 . sphère céleste .....</b>	<b>05</b>
<b>I .2.4.1 : Coordonnées célestes.....</b>	<b>07</b>
<b>I.2.5: Les temps solaires .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6 : La relation entre le temps légale et la position du soleil (angle horaire)</b>	<b>11</b>
<b>I.2.7 : Le Repérage de la position du soleil .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.8 : Les types des rayonnements solaires .....</b>	<b>13</b>
<b>I.2.9 : Rayonnement en Algérie .....</b>	<b>14</b>
<b>I.3 : Énergie solaire .....</b>	<b>14</b>
<b>I : 3 :1 :L'énergie solaire photovoltaïque .....</b>	<b>15</b>
<b>I : 3 :2 : Principe de l'effet photovoltaïque.....</b>	<b>16</b>
<b>I : 3 :3: Avantages et inconvénient de l'énergie solaire .....</b>	<b>16</b>
<b>I : 3 :4: Conclusion .....</b>	<b>17</b>
<i><b>CHAPITRE II : les panneaux solaire photovoltaïques</b></i>	
<b>II.1 : Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2 : Les principaux composants d'un système solaire PV</b>	<b>18</b>
<b>II.2.1 : Le générateur photovoltaïque .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.2: Le stockeur d'énergie .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.3 : Le système de contrôle (régulateur) .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.4 : Le système d'interconnexion .....</b>	<b>19</b>
<b>II.3 : Les Propriétés des Semi-conducteurs.....</b>	<b>20</b>
<b>II.4 : Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque.....</b>	<b>20</b>
<b>II.4.1 : Matériaux utilisés dans les cellules PV .....</b>	<b>21</b>
<b>II.5 : Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>24</b>
<b>II.5 :1 : Circuit électrique idéal .....</b>	<b>24</b>

## Sommaire

<b>II.5 :2: Circuit électrique réel .....</b>	<b>25</b>
<b>II.6: Méthode de définition des caractéristiques de I-V de sortie .....</b>	<b>27</b>
<b>II.7 : Branchement des cellules Photovoltaïques .....</b>	<b>27</b>
<b>II.7.1 : Branchement parallèle des cellules .....</b>	<b>28</b>
<b>II :7:3: Branchement série parallèle des cellules.....</b>	<b>28</b>
<b>II :8: Influence de l'éclairement et de la température .....</b>	<b>29</b>
<b>II :8 :1 :Influence de l'éclairement .....</b>	<b>30</b>
<b>II.9 : Protections d'un groupe photovoltaïque .....</b>	<b>31</b>
<b>II .9.1: Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV</b>	<b>31</b>
<b>II.9.2 : Protection du groupe photovoltaïque .....</b>	<b>35</b>
<b>II .9.3 : Protection contre les surtensions et la foudre :.....</b>	<b>32</b>
<b>II.9.4 : Protection du générateur photovoltaïque.....</b>	<b>32</b>
<b>II.10: Installation des panneaux .....</b>	<b>34</b>
<b>II.11 : Calcul du rayonnement solaire direct sur un plan récepteur....</b>	<b>35</b>
<b>II.11.1 : Rayonnement solaire globale sur un Plan horizontal .....</b>	<b>36</b>
<b>II : 11.2 : Rayonnement solaire direct sur un plan horizontal .....</b>	<b>36</b>
<b>II.11.4 : Calcul du rayonnement diffus sur un plan horizontal.....</b>	<b>36</b>
<b>II.11.5 : Rayonnement solaire direct sur un plan incliné.....</b>	<b>36</b>
<b>II.11.6 : Calcul du rayonnement diffus sur un plan incliné.....</b>	<b>37</b>
<b>II.12 Conclusion .....</b>	<b>37</b>
<i><b>CHAPITRE III : Système de poursuite solaire</b></i>	
<b>III.1 : Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2 : Système poursuite solaire.....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.1Principe de fonctionnement d'un suiveur solaire .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.2 : Description du prototype de suiveur .....</b>	<b>39</b>
<b>III.2.3 : Les différents types de suiveurs .....</b>	<b>42</b>
<b>III.2.3.1. Mécanisme d'orientation</b>	<b>40</b>
<b>III.2.3.2 : Degré de liberté de mouvement</b>	<b>43</b>
<b>III.2.3 .3 : Type de commande</b>	<b>43</b>
<b>III :2.4 :L'intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes</b>	<b>44</b>
<b>III.2.5 : Les Avantages et Les inconvénients des systèmes de suivi solaire</b>	<b>44</b>
<b>III : 2.6 : Position du soleil par rapport à un observateur.....</b>	<b>47</b>
<b>III : 2.6.1 : Orientation de la surface .....</b>	<b>47</b>
<b>III : 2.6.1 .1 : Rotation suivant un axe .....</b>	<b>47</b>
<b>III : 2.6.1 .2 : Rotation suivant deux axes .....</b>	<b>48</b>

## Sommaire

<b>III.2.7 : Capteur de la position du soleil .....</b>	<b>48</b>
<b>III.3 : Le principe du tracker solaire avec l'Arduino .....</b>	<b>50</b>
<b>III.4 : Les moteurs utilisés dans un suiveur solaire .....</b>	<b>50</b>
<b>III.4 .1 : Les moteurs pas à pas .....</b>	<b>51</b>
<b>III.4.1.1 : Généralité sur les moteurs pas à pas.....</b>	<b>51</b>
<b>III.4.1.2 : Les différents types de moteur pas à pas .....</b>	<b>52</b>
<b>III.4.2 : Les moteurs à courant continu .....</b>	<b>54</b>
<b>III.4.2.1: Description d'un moteur à courant continu .....</b>	<b>54</b>
<b>III.4.2.2: Le principe physique fondamental .....</b>	<b>55</b>
<b>III.4.2.3: Les différents types de circuit inducteur .....</b>	<b>56</b>
<b>III.4.2.4: Mode de connexion de l'induit et de l'inducteur .....</b>	<b>57</b>
<b>III.4.2.5: Les avantages et les inconvénients d'un moteur à courant continu</b>	<b>58</b>
<b>III.4.2.6 : Conclusion .....</b>	<b>59</b>
<b><i>CHAPITRE IV : Commande d'un moteur utilisé dans un système de poursuite solaire</i></b>	
<b>IV1 : Introduction .....</b>	<b>60</b>
<b>IV.2 : Expressions électriques et mécanique de la MCC .....</b>	<b>60</b>
<b>IV .2 .1 : Description des pertes .....</b>	<b>60</b>
<b>IV .2 .2 : Expression du couple électromagnétique .....</b>	<b>60</b>
<b>IV.3 : Réglage de la vitesse d'un moteur .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.3.1 : Réglage par rhéostat .....</b>	<b>62</b>
<b>IV.3.2 : Réglage par flux .....</b>	<b>63</b>
<b>IV.4 : Point de fonctionnement d'un moteur .....</b>	<b>64</b>
<b>IV.5: Modélisation d'un moteur à courant continu .....</b>	<b>65</b>
<b>IV.5.1 : Fonction de transfert du MCC .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.6 : L'asservissement .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.6.1 : Fonction d'un régulateur .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.6.2 : Boucle de régulation ouverte .....</b>	<b>68</b>
<b>IV.6.3 : Boucle de régulation fermée .....</b>	<b>68</b>
<b>IV.6.4 : Régulateur PID .....</b>	<b>69</b>
<b>IV.7: Résultat de simulation .....</b>	<b>70</b>
<b>IV.8: Conclusion .....</b>	<b>70</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>76</b>
<b>Bibliographie .....</b>	

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau : II.1</b>	comparaison entre les rendements de différent type de cellule	32
<b>Tableau : III.1</b>	comparaison entre les MCC et les moteurs pas à pas	64

## *Liste des figures*

<b>Figure</b>	<b>titre</b>	<b>P</b>
<b>Figure :I.1</b>	La structure interne du soleil	<b>3</b>
<b>Figure :I.2</b>	Situation Terre – soleil	<b>4</b>
<b>Figure :I.3</b>	spectre de rayonnement solaire	<b>5</b>
<b>Figure :I.4</b>	Mouvement apparent de soleil	<b>6</b>
<b>Figure :I.5</b>	Sphère céleste	<b>6</b>
<b>Figure :I.6</b>	Définition des coordonnées géographique d'un lieu donné	<b>7</b>
<b>Figure :I.7</b>	Repère équatorial	<b>8</b>
<b>Figure :I.8</b>	variation de la déclinaison en fonction des jours de l'année	<b>8</b>
<b>Figure:I.9</b>	L'angle horaire $\omega$ .	<b>9</b>
<b>Figure :I.10</b>	Repère horizontal	<b>10</b>
<b>Figure :I.11</b>	représentation graphique de l'équation du temps en fonction des mois	<b>11</b>
<b>Figure :I.12</b>	les rayons solaires sur un plan incliné	<b>13</b>
<b>Figure :I.13</b>	Types des rayonnements solaires	<b>14</b>
<b>Figure :I.14</b>	les différentes zones énergétiques de l'Algérie	<b>15</b>
<b>Figure:I.15</b>	Plan de l'utilisation de l'énergie solaire	<b>16</b>
<b>Figure : I.16</b>	Convention photovoltaïque	<b>17</b>
<b>Figure :II.1</b>	chaîne des panneaux solaires photovoltaïques	<b>19</b>
<b>Figure : II.2</b>	Les étapes de la fabrication d'un système PV	<b>21</b>
<b>Figure : II.3</b>	jonction de type PN	<b>21</b>
<b>Figure :II.4</b>	Représentation schématique d'une cellule solaire	<b>22</b>
<b>Figure : II.5</b>	les types des cellules	<b>24</b>
<b>Figure :II.6</b>	Céllule solaire tout organique sur substrat souple	<b>25</b>
<b>Figure :II.7</b>	schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque	<b>25</b>
<b>Figure :II.8</b>	le schéma électrique équivalent d'une cellule PV.	<b>27</b>
<b>Figure :II.9</b>	caractéristique $I=f(v)$ .	<b>29</b>
<b>Figure :II.10</b>	caractéristique $P=f(v)$	<b>30</b>
<b>FigureII.11</b>	schéma des mesures du panneau photovoltaïque.	<b>29</b>
<b>Figure :II.12</b>	Branchement série des cellules PV	<b>30</b>
<b>Figure :II.13</b>	Branchement parallèle des cellules PV	<b>31</b>
<b>Figure :II.14</b>	Branchement série parallèle des cellules PV	<b>31</b>
<b>Figure :II.15</b>	influence de l'éclairement sur la tension du circuit ouvert	<b>32</b>
<b>Figure :II.16</b>	Influence de l'éclairement sur l'intensité du circuit-ouvert	<b>32</b>
<b>Figure :II.17</b>	influence de la température sur la tension du circuit ouvert	<b>33</b>

<b>Figure :II.18</b>	Influence de la température sur le courant de court-circuit	<b>33</b>
<b>Figure :I.19</b>	influence de la température sur la puissance optimale	<b>33</b>
<b>Figure :II.20</b>	Schématisation d'un groupe photovoltaïques élémentaire avec diodes by pass et diode anti-retour	<b>34</b>
<b>Figure : II.21</b>	Nettoyage panneau solaire	<b>36</b>
<b>Figure :III.1</b>	un champ des panneaux photovoltaïque motorisé	<b>40</b>
<b>Figure :III.2</b>	présentation de la structure mécanique	<b>41</b>
<b>Figure :III.3</b>	suiveur solaire passif	<b>43</b>
<b>Figure :III.4</b>	suiveur de soleil a une cellule bifaciale	<b>43</b>
<b>Figure :III.5</b>	Principe d'équilibrage d'ombre.	<b>44</b>
<b>Figure :III .6</b>	comparaison entre système fixe et système suiveur l'année[14]	<b>46</b>
<b>Figure :III.7</b>	position du soleil par rapport à une surface inclinée	<b>49</b>
<b>Figure :III.8</b>	Orientation d'une surface (axe vertical)	<b>49</b>
<b>Figure :III.9</b>	Orientation d'une surface (axe horizontal)	<b>50</b>
<b>Figure :III.10</b>	Monture al azimutale	<b>51</b>
<b>Figure :III.11</b>	Monture équatoriale	<b>51</b>
<b>Figure :III.12</b>	la photorésistance	<b>53</b>
<b>Figure :III.11</b>	capteur pour le mouvement vertical	<b>53</b>
<b>Figure:III.12</b>	capteur pour le mouvement horizontal	<b>53</b>
<b>Figure :III.13</b>	Une carte Arduino	<b>53</b>
<b>Figure :III.14</b>	un suiveur solaire	<b>54</b>
<b>Figure :III.15</b>	Un moteur installé au suiveur	<b>54</b>
<b>Figure :III.16 :</b>	principe d'un moteur pas à pas	<b>55</b>
<b>Figure :III.17</b>	Moteur à réluctance variable (MRV) a circuit magnétique simple	<b>57</b>
<b>Figure :III.18</b>	le moteur pas à pas hybride.	<b>58</b>
<b>Figure :III.19</b>	circuit de base d'une alimentation en tension	<b>59</b>
<b>Figure :III.20</b>	Alimentation en courant	<b>59</b>
<b>FigureIII.19</b>	symbole du moteur	<b>59</b>
<b>Figure :III.20</b>	Schéma d'un moteur à courant continu	<b>60</b>
<b>Figure :III.21</b>	le stator	<b>60</b>
<b>Figure :III.22</b>	le rotor	<b>61</b>
<b>Figure :III.23</b>	le collecteur	<b>61</b>
<b>Figure :III.24</b>	fonctionnement en Moteur	<b>62</b>
<b>Figure III .25</b>	fonctionnement en Génératrice ( <b>dynamo</b>	<b>62</b>
<b>Figure :III .26</b>	moteur à excitation shunt	<b>62</b>

<b>Figure : III.27</b>	.moteur à excitation série	<b>63</b>
<b>Figure :III.28 :</b>	moteur à excitation séparée	<b>63</b>
<b>Figure : VI.1</b>	Bilan de la puissance d'un MCC	<b>66</b>
<b>Figure : VI.2</b>	Moteur à excitation séparé	<b>68</b>
<b>Figure : VI.3</b>	Réglage rhéostatique	<b>68</b>
<b>Figure :VI.4</b>	Réglage par flux	<b>69</b>
<b>Figure : IV.5</b>	Variation de la vitesse en fonction du flux	<b>69</b>
<b>Figure : IV.6 :</b>	Réglage par tension d'induit	<b>70</b>
<b>Figure : VI.7 :</b>	point de fonctionnement	<b>71</b>
<b>Figure : VI.8:</b>	Schéma équivalent d'un MCC	<b>71</b>
<b>Figure : VI.9</b>	Schéma fonctionnel du moteur DC avec charge en vitesse	<b>72</b>
<b>Figure : IV.10</b>	Schéma fonctionnel du moteur DC avec charge en position	<b>73</b>
<b>Figure : IV.10</b>	représentation d'un régulateur PID	<b>75</b>
<b>Figure IV.11</b>	Régulation à boucles multiples en cascade	<b>76</b>
<b>Figure :VI .12</b>	La réponse en vitesse	<b>76</b>
<b>Figure: VI.13</b>	La réponse en courant de moteur	<b>77</b>
<b>Figure : VI.14</b>	La réponse en position du moteur	<b>77</b>
<b>Figure :VI.15</b>	la position de moteur ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )	<b>78</b>
<b>Figure :VI.16</b>	la vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref}30^\circ$ )	<b>78</b>
<b>Figure :IV.17 :</b>	CEM après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )	<b>78</b>
<b>Figure :IV.18</b>	Le courant d'induit après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )	<b>79</b>
<b>Figure :IV.19 :</b>	La position de moteur $\theta_{ref} = 60^\circ$	<b>79</b>
<b>Figure :VI.20</b>	la vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 60^\circ$ )	<b>79</b>
<b>Figure : VI.21</b>	la position de moteur ( $\theta_{ref} = 90^\circ$ )	<b>80</b>
<b>Figure :VI.22</b>	La vitesse après asservissement de position( $\theta_{ref} = 90^\circ$ )	<b>80</b>
<b>Figure : VI.23</b>	La position de moteur ( $\theta_{ref} = 180^\circ$ )	<b>80</b>
<b>Figure : VI.24</b>	la position de moteur ( $\theta_{ref} = -15^\circ$ )	<b>80</b>
<b>Figure :VI.25</b>	vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref}= -15^\circ$ )	<b>81</b>
<b>Figure :IV.26</b>	le CEM après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = -15^\circ$ )	<b>81</b>
<b>Figure :IV.27</b>	$I_d$ après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = -15^\circ$ )	<b>82</b>

## *Nomenclateur*

<b>symboles</b>	définitions
$E_{ph}$	'énergie de ces photons
$h$	la constante de Planck
$c$	est la vitesse de la lumière
$\nu$	la fréquence
$\lambda_1$	la longueur d'onde
UA	l'unité astronomique
$\varphi$	La latitude
$\lambda$	La longitude
$\delta$	la déclinaison
$\omega$	l'angle horaire
$n_j$	le numéro de jour de l'année
$tsv$	Temps solaire vrais
$a_z$	L'azimut
$h$	la hauteur du soleil
TU	Le Temps Universel
TSL	Le Temps Solaire Local
TSV	Le Temps Solaire Vrai
TSM	Le temps solaire moyen
ET	l'équation du temps
TSL	Temps solaire au lever
TSC	Temps solaire au coucher
$\theta$	Angle incident
$\beta$	Angle d'inclinaison
G	le rayonnement global reçu par une surface horizontale.
D	le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface horizontale.
S	le rayonnement direct reçu par une surface horizontale.
TL	le facteur de trouble de Linke
B	est le coefficient de trouble atmosphérique
Pv	la pression partielle de vapeur d'eau
HR	le taux moyen d'humidité
Pvs	la pression de vapeur saturante,
T	la température de l'air
F	le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires.
CI	le coefficient d'orientation,
D	Le rayonnement solaire diffus'
S	rayonnement solaire direct sur un plan incliné

<b>D</b>	Calcul du rayonnement diffus sur un plan incliné
<b><i>I<sub>ph</sub></i></b>	Le photo courant
<b><i>I<sub>d</sub>(V)</i></b>	courant d'obscurité de la diode.
<b><i>I</i></b>	Le courant résultant de la jonction
<b>(<i>I<sub>cc</sub></i>)</b>	Le courant de court-circuit
<b>(<i>ff</i>)</b>	Le facteur de forme
<b><math>\eta</math></b>	Le rendement
<b>U</b>	tension.
<b><i>I<sub>s</sub></i></b>	Courant de saturation de la diode
<b>Q</b>	charge de l'électron.
<b>UT</b>	tension thermique
<b>A</b>	le facteur d'idéalité de la jonction
<b><i>I<sub>0</sub></i></b>	Courant de diode
<b><i>R<sub>p</sub></i></b>	Résistances shunt
<b><i>R<sub>s</sub></i></b>	Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur,.
<b>T<sub>c</sub></b>	température de jonction
<b><i>E<sub>g</sub></i></b>	Éclairement.
<b>K</b>	constant de Boltzmann
<b>NOCT</b>	température nominal de fonctionnement de la cellule
<b><i>p<sub>m</sub></i></b>	Puissance maximal
<b><i>P<sub>p</sub></i></b>	La puissance du panneau constitué des cellules parallèle
<b><i>P<sub>s</sub></i></b>	La puissance du panneau constitué des cellules série
<b><i>V<sub>m</sub></i></b>	La tension maximale.
<b><i>N<sub>s</sub></i></b>	Le nombre des cellules associé en série
<b><i>N<sub>p</sub></i> :</b>	Le nombre des cellules associé en parallèle
<b><i>P<sub>s</sub></i></b>	La puissance du panneau constitué des cellules série
<b><i>P<sub>p</sub></i></b>	La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle
<b><i>I<sub>i</sub></i></b>	le courant généré par chaque cellule
<b><math>\theta_z</math></b>	Angle de zénith
<b><math>\gamma_s</math></b>	Angle d'azimut
<b><math>\gamma</math></b>	Angle extérieur d'azimut
<b>R</b>	la résistance
<b><math>\phi_l</math></b>	Le flux lumineux
<b>LDR</b>	Light Dépendent Résistor

<b>MRV</b>	Moteur à réluctance variable
$\vec{B}$	Champ magnétique
<b>MCC</b>	Moteur à courant continu
$P_{em}$	puissance électromagnétique.
<b>Ke</b>	Constant du machine
<b>a</b>	Nombre de pair de voie d'enroulement
$\phi$	flux utile
<b>p</b>	Nombre de pair de pole
$\Omega$	la vitesse angulaire
$t_{em}$	Couple électromagnétique
$P_U$ :	Puissance utile en sortie moteur (sur l'arbre)
$P_{abs}$ :	Puissance absorbée par l'inducteur en entrée
$U_i$	la tension appliquée aux bornes de l'induit
<b>E</b>	Tension d'iduit
$R_h$	rhéostat
<b>j</b>	Moment d'inertie de l'axe du rotor
$K_t$	Constant de couple (Nm/A)
<b>f</b>	coefition de frottement

*Introduction*  
*générale*

## Introduction générale

---

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes, nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est convaincu du danger de ce processus sur l'environnement.

Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne et hydraulique représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire. Elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées.

Le rendement des panneaux solaires photovoltaïques a toujours été jugé insuffisant pour que ces derniers puissent produire une énergie importante capable d'assurer l'alimentation d'un système plus au moins puissant. Parmi plusieurs paramètres influençant ce rendement, on cite le flux d'ensoleillement projeté sur le panneau solaire et donc capté par les cellules photovoltaïques. Plusieurs études ont été faites afin d'améliorer le rendement global et de profiter ainsi au maximum de la conversion énergétique obtenue. Dans ce qui suit, on propose un système optimal de poursuite d'un panneau solaire par le contrôle de la position d'un moteur à courant continu utilisé dans un système de positionnement solaire.

En passant par l'importance du système de poursuite solaire et les rayonnements solaires globaux pour différents plans (horizontale, incliné, et tracking), ce mémoire est partagé en quatre chapitres principaux qui se résument comme suit :

- Au premier chapitre nous présenterons une vue générale sur l'énergie solaire et le gisement solaire

-Le deuxième chapitre sera consacré aux panneaux solaires (composant principe de fonctionnement ...), en présentant les caractéristiques électriques des cellules solaires PV

## Introduction générale

---

-Le troisième chapitre sera présenté en deux parties dans le premier l'exposition et la description du système poursuite solaire et .le deuxième partie les moteur plus utilisés dans ces systèmes on va parler spécialement au moteur à courant continu

-Le quatrième chapitre tiendra en compte la commande de position du moteur (MCC) à l'aide d'un capteur de lumière qui indique la position de rayonnement solaire sur un panneau PV .

Cette étude consiste à obtenir des résultats de simulation Matlab/ Simulink, pour valider la poursuite de position pour un moteur à courant continu afin de motoriser les panneaux solaires et enfin d'améliorer le rendement global de la conversion énergétique obtenue.

*Chapitre I :*  
*Généralités*  
*sur l'énergie*  
*solaire*

## I.1 : Introduction :

Dans le monde, la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. C'est pour cela tous les pays du monde cherchent ou bien ils orientent leurs perspectives aux énergies renouvelables (propre, durable, inépuisable à l'échelle humaine,...)

Dans ce chapitre, notre étude va consacrer aux généralités sur l'énergie solaire notamment l'énergie photovoltaïque en commençant par le gisement solaire, les coordonnées géographiques, les composants des rayonnements solaires. Ainsi des notions fondamentales sur l'énergie solaire photovoltaïque.

## I.2 : Le gisement solaire :

On appelle gisement solaire l'ensemble des caractéristiques de la ressource locale en énergie solaire, c'est-à-dire ces fluctuations temporelles.

Le gisement solaire est lui-même fluctuant et instantané, il est renouvelable, mais ce qui n'a pas été utilisé ne le sera plus. Pour dimensionner un système énergétique solaire il faut, pour la région intéressée, définir le profil des fluctuations du rayonnement solaire, en intensité et en quantité, à partir d'une étude statistique sur plusieurs années.

### I.2.1 : La géométrie du soleil :

Le soleil est une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète (soit  $2.1030 \times 10^{30}$  kg). Le soleil est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...)[1]

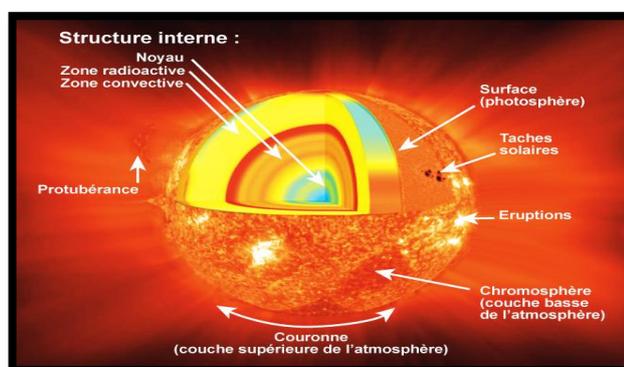


Figure I.1 : La structure interne du soleil.[14]

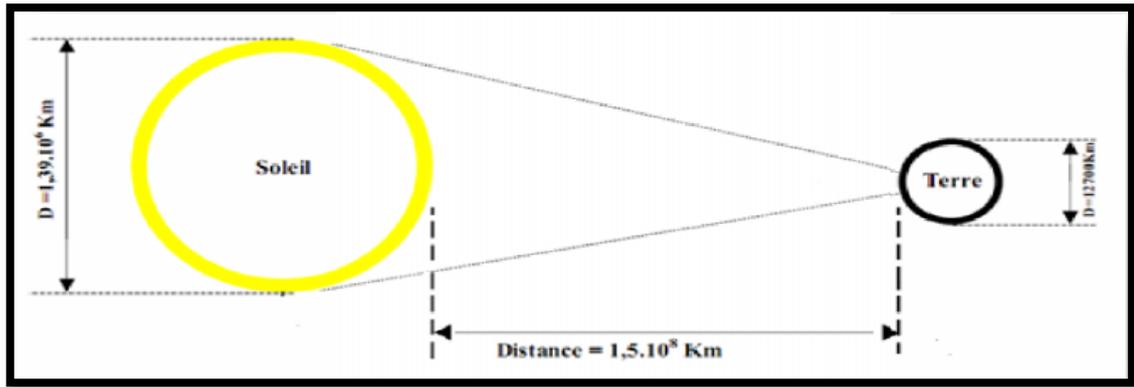


Figure I.2 : Situation Terre – soleil [2]

## I.2.2 : Spectre du soleil :

Le soleil nous envoie un rayonnement électromagnétique qui se situe dans le domaine de la lumière. Ce rayonnement est composé d'infrarouge, de lumière visible et d'ultraviolet:

- ✓ La lumière visible à des longueurs d'onde comprises entre  $0.4\mu\text{m}$  et  $0.8\mu\text{m}$ , elle comprend 48% du rayonnement.
- ✓ Le rayonnement ultraviolet (UV) à des longueurs d'onde inférieures à  $0.4\mu\text{m}$ , il représente 6% du rayonnement.
- ✓ Le rayonnement infrarouge (IR) à des longueurs d'onde supérieures à  $0.8\mu\text{m}$ , il englobe 46% du rayonnement.

L'énergie de ces photons est représentée par la formule suivante :

$$E_{ph} = hv = h\frac{c}{\lambda} \quad (eV) \quad (I.1)$$

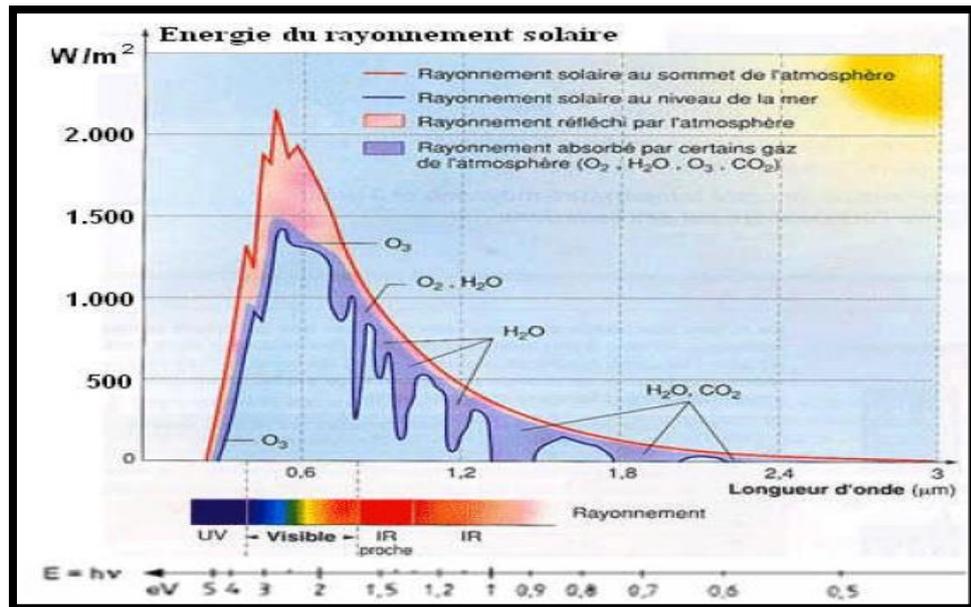
$h$  : est la constante de Planck

$c$  : est la vitesse de la lumière ( $\frac{m}{s}$ )

$v$  : la fréquence ( $s^{-1}$ )

$\lambda_1$  : la longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde dont 98% l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ\text{K}$ . La répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde est: [2]



## I.2.3 Mouvement apparent du soleil :

La planète Terre tourne autour de l'axe des pôles (axe du monde ou axe de rotation) en 24 heures. Ce phénomène génère ainsi une alternance de jour (l'hémisphère du site considéré est alors non éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre).

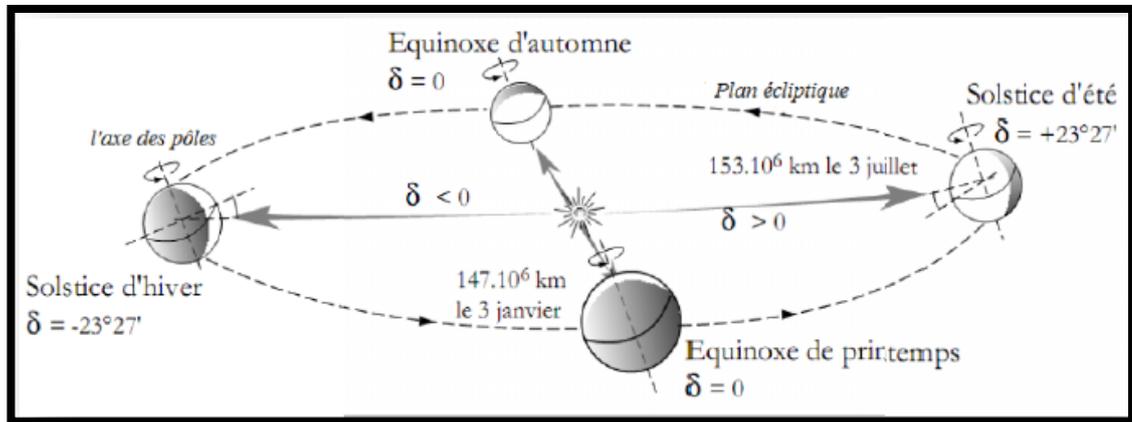
La trajectoire de la Terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité (c'est-à-dire proche d'un cercle), réalisée en environ 365 jours. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan de l'écliptique (**L'écliptique** est le plan de l'orbite de la Terre autour du soleil) est constante et égale à 23,27°; elle est à l'origine du phénomène de saison que nous connaissons. La distance Terre-soleil varie entre 147.106 km (Le 3 janvier) et 153.106 km (le 3 juillet); sa valeur moyenne vaut 150.106 km. Cette valeur définit l'unité astronomique [UA] : **1 UA = 149 597 890 +/- 500 km.**

Les distances minimale et maximale entre les deux astres valent donc respectivement 0,983 et 1,017 UA.

Aussi, la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil n'est pas un mouvement uniforme. Elle est plus grande en hiver qu'en été. Il en résulte que la durée du printemps et de l'été est plus longue que la durée de l'automne et l'hiver ( la durée de l'été est de 93,6 jours, celle du printemps, 92,8 jours, la durée d'automne est de 89,8 jours et enfin celle de l'hiver 89,0 jours). Cette variation des longueurs des saisons est une conséquence immédiate de la seconde loi de Kepler (loi des aires).

# Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

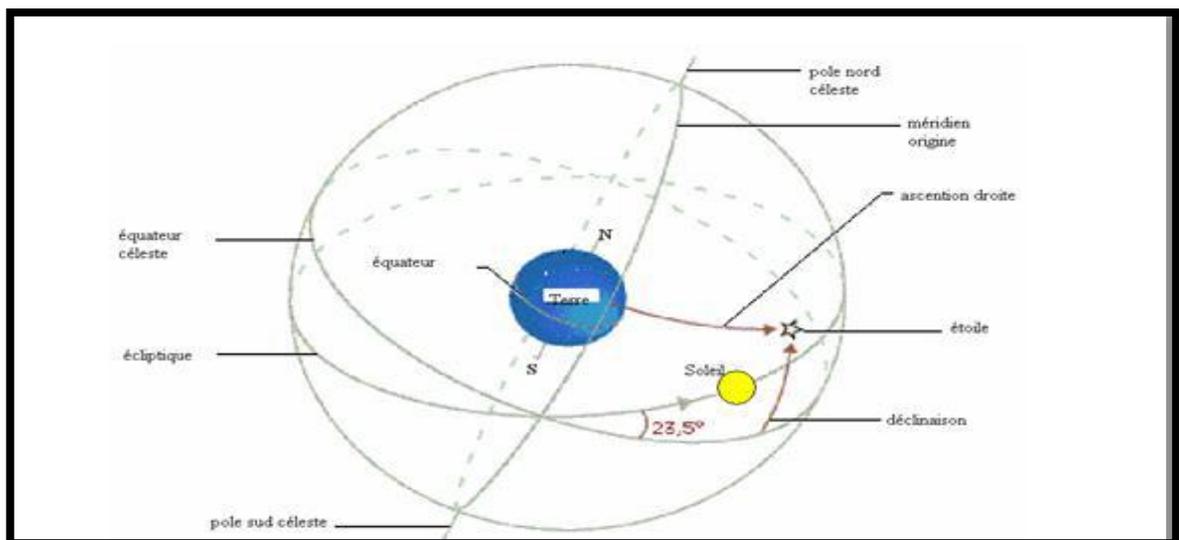
La vitesse orbitale n'est pas constante, et par conséquent, lorsque la Terre est au plus près du Soleil (à son périhélie) sa vitesse est maximale et lorsqu'elle est au plus loin du Soleil (à son aphélie) sa vitesse est minimale. donc en déduit que la force exercée sur la Terre est constamment dirigée vers le soleil, donc celui-ci émane une force qui saisit notre planète.



**Figure I.4:** Mouvement apparent du soleil [3]

Ainsi, la combinaison des mouvements de la Terre sur elle-même et autour du soleil induit un mouvement apparent du soleil en tout point terrestre. A partir des données spatiales relatives à ces deux astres, il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du site (latitude et longitude) et de l'instant (jour de l'année et heure) d'une part, et la durée du jour d'autre part. [3]

## I.2.4 : sphère céleste :



**Figure I.5:** sphère Céleste [4]

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de

coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps ces coordonnées sont : [4]

### I.2.4.1 : Coordonnées célestes:

#### 1 : Paramètres géographiques :

La Terre est séparée par l'équateur en deux demi sphères, l'hémisphère Nord pour celle située du côté du pôle Nord, et l'hémisphère Sud pour celle qui est située du côté du pôle Sud. D'autre part, elle est partagée d'Ouest en Est, par le méridien d'origine qui passe par Greenwich (près de Londres en Angleterre).

##### ✓ La latitude

La latitude d'un lieu est une valeur angulaire, expression du positionnement nord-sud de l'équateur, d'un point sur la Terre. Théoriquement, elle a pour valeur,  $0^\circ$  à l'équateur jusqu'à  $90^\circ$  aux pôles, elle est comptée positivement de ( $0$  à  $+90^\circ$ ) vers le Nord et négativement de ( $0$  à  $-90^\circ$ ) vers le Sud. Généralement, cette grandeur est notée  $\varphi$

##### ✓ La longitude

La longitude d'un lieu est une valeur angulaire, expression du positionnement Est-Ouest d'un point sur Terre par rapport au méridien d'origine. C'est donc une mesure angulaire sur  $360^\circ$  par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de  $+180^\circ$  à  $-180^\circ$  ou  $180^\circ$  Est à  $180^\circ$  Ouest. Généralement, cette grandeur est notée L ou bien  $\lambda$  .[5]

##### ✓ L'altitude

L'altitude exprime un écart entre un point donné et un niveau moyen, le plus souvent le niveau de la mer (ou niveau 0zéro). Les sommets sont associés à une altitude, calculée par divers moyens indirects (géodésie, triangulation). [2]

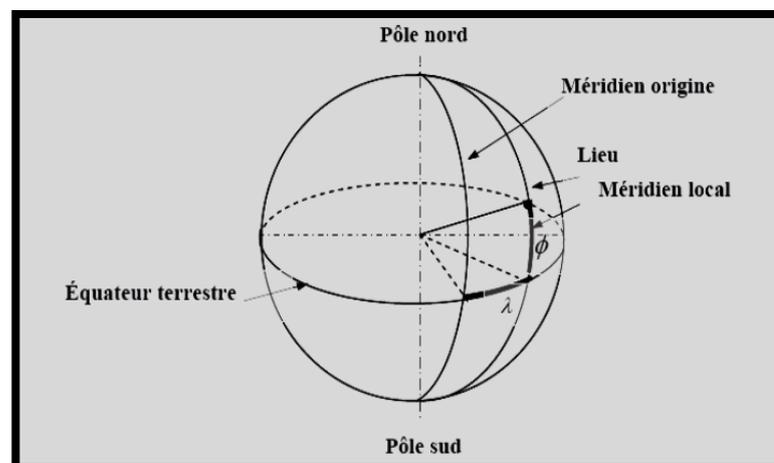
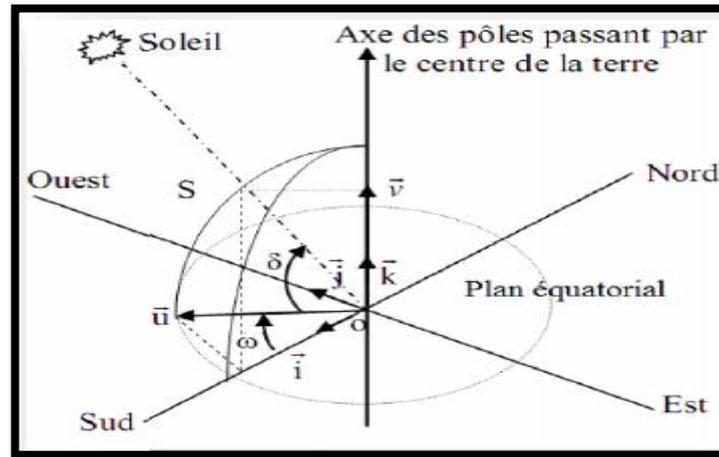


Figure I.6 : Définition des coordonnées géographiques d'un lieu donné [5]

## 2: Paramètres astronomiques

### A. Coordonnées équatoriales

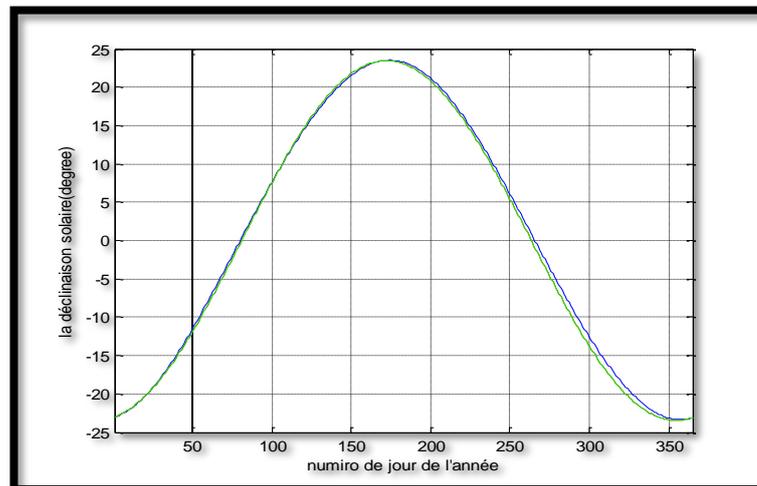
Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la Terre à l'aide de deux angles ; la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$



**Figure I.7:** Repère équatorial [7]

#### ✓ Déclinaison du soleil

La déclinaison solaire : «  $\delta$  » solaire est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle varie entre  $+23,45^\circ$  au solstice d'été (le 21 Juin) et  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver (le 21 Décembre). Et  $\delta = 0$  pour le 21 Mars et le 21 Septembre, ce qui correspond aux équinoxes de printemps et d'automne.[6]



**Figure :I.8** :variation de la déclinaison en fonction des jours de l'année [2]

Elle est calculée par une équation simple approximative:

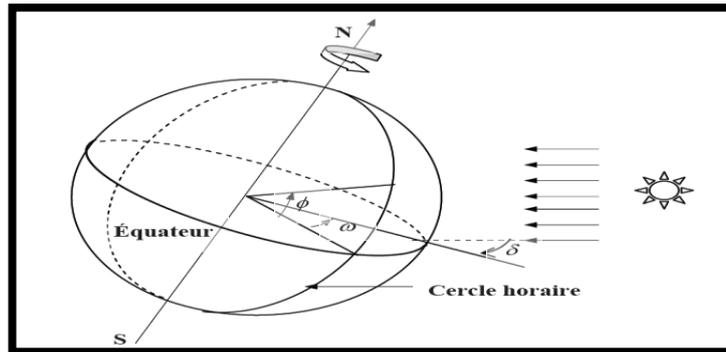
$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} (nj + 284)^\circ \right] \quad (I.2)$$

On a aussi l'équation proposé par P. Brichambaut :

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0,4 \sin \left[ \frac{360}{365} (nj - 82)^\circ \right] \right\} \text{ degré} \quad (I.3)$$

$nj$  est le numéro de jour de l'année, variant de 1 à 365. (Pour le 1er Janvier,  $nj = 1$  et pour le 31 Décembre,  $nj = 365$ ).

### a) Angle horaire du soleil



**Figure:I.9** : L'angle horaire  $\omega$ . [14]

A chaque moment, il est plus pratique de calculer le temps en degrés qu'en heures. L'unité est l'angle horaire (24 h représente 360° horaires). L'angle horaire est l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection de la direction du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

$$\omega = 15(12 - tsv) \text{ degré} \quad (I.4)$$

L'angle horaire se mesure a partir du midi solaire, il est positif s'il est avant midi et négatif s'il est après midi ( $\omega$  vaut 0° à midi, -90° à 18 heures et 90° à 6 heures, en temps solaire vrai, chaque heure le décale de 15°, positifs le matin et négatifs l'après-midi).

### B. Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur du soleil, 'h' et l'azimut ' $a_z$ '.

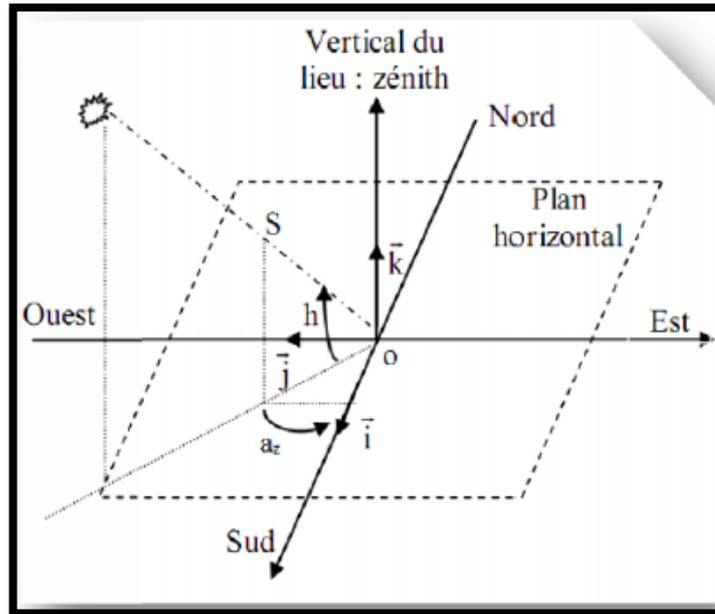


Figure : I.10 : Repère horizontal [9]

✓ **Hauteur du soleil**

La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à  $0^\circ$  au lever et au coucher du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai.

L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (I.5)$$

$\varphi$  : La latitude du lieu

$\delta$  : La déclinaison du soleil

$\omega$  : L'angle horaire

✓ **Azimut du soleil**

L'azimut du soleil est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

$$\sin(a_z) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.6)$$

Il est nul à midi et maximal au lever et au coucher du soleil.[2]

**I.2.5 : Les temps solaires :**

Pour les applications de l'énergie solaire, il faut faire intervenir le temps solaire vrai, qui est calculé en tenant compte de l'écart entre le temps solaire moyen et le temps local.

### ✓ Le Temps Universel :

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil à la méridienne origine de Greenwich (GMT).

### ✓Le Temps Solaire Local :

En temps solaire locale (TSL) on fait la correction de longitude avec le temps universel (TU) avec la formule :

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (I.7)$$

### ✓Le Temps Solaire Vrai :

C'est le temps solaire local corrigé du l'équation du temps, donnée astronomique universel liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil :

$$TSV = TSL + \Delta t \quad (I.8)$$

### ✓Le temps solaire moyen

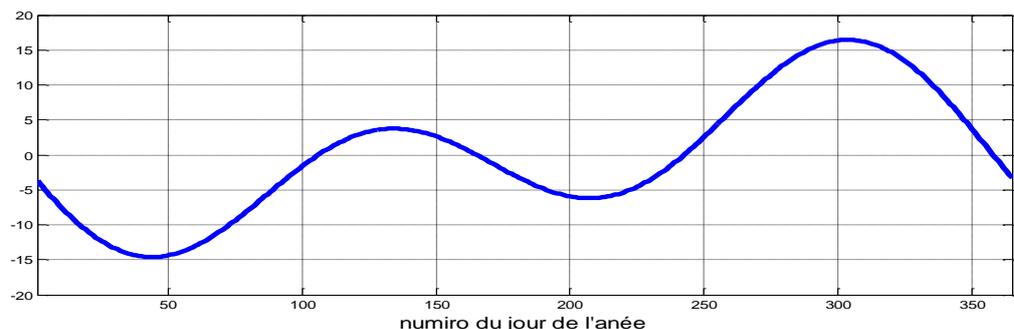
Donné par la relation  $TSV - TSM = Et$  (I.9)

$Et$ : Equation du temps pour corriger TSV par rapport TSM, elle est donnée par l'équation :

$$Et = 9.87 \sin 2n - 7.53 \cos n - 1.5 \sin n \quad (I.10)$$

$$n = \frac{360}{365}(n_j - 81) \quad (I.11)$$

$n_j$ : le numero du jour dans l'année.



**Figure : I.11** : représentation graphique de l'équation du temps en fonction des mois [2]

La figure ci-dessus illustre l'évolution de l'équation du temps ET (qui indique la différence entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV) au cours de l'année, nous pouvons aisément constater que l'équation du temps varie entre -15 et 17.[7]

✓ **Temps solaire au lever(TSL) :**

Le temps solaire au lever est donné par la relation suivant

$$TSL = 12 + \left(\frac{WL}{15}\right) \quad (I.12)$$

✓ **Temps solaire au coucher (TSC) :**

$$TSC = 12 - \left(\frac{WL}{15}\right) \quad (I.13)$$

### **I.2.6 : La relation entre le temps légale et la position du soleil (angle horaire) :**

Nous avons l'ensemble des relations suivant

$$TSV = 12 + \left(\frac{\omega}{15}\right) \quad (I.14)$$

$$TSM = tsv - 60.ET \quad (I.15)$$

$$TU = TSM - \left(\frac{\lambda}{15}\right) \quad (I.16)$$

$$TL = TU + C \quad (I.17)$$

$$\omega = \lambda + 15(ET + T\lambda - 12 - C) \quad (I.18)$$

Avec :

ET : Equation de temps en minute

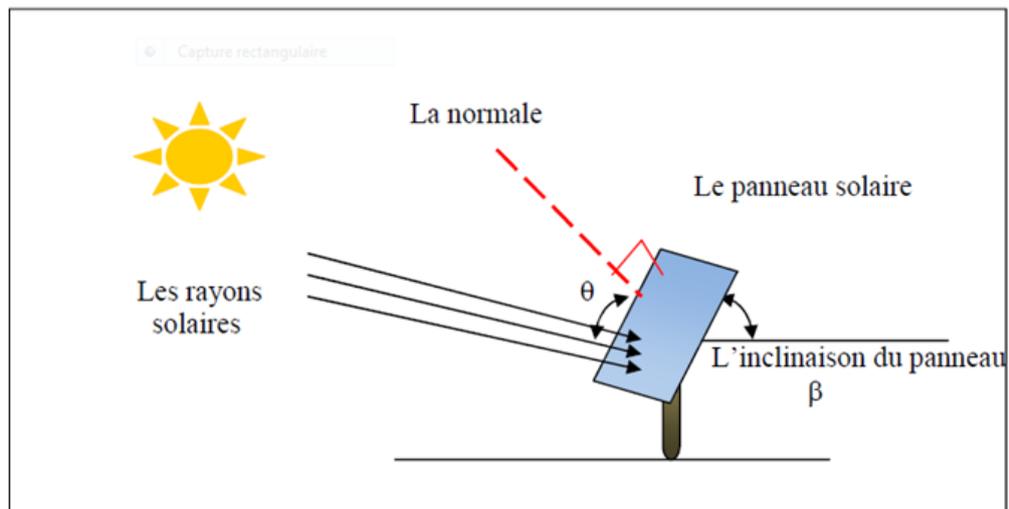
$\omega$  : L'angle horaire en degré

$\lambda$  : Longitude du site en degré [8]

### **I.2.7 : Le Repérage de la position du soleil :**

Le repérage de la position du Soleil s'effectue par les deux angles l'azimut ' $a_z$ ' et la hauteur ' $h$ '. Trois cas peuvent se présenter : le panneau en position horizontale, le panneau incliné fixé et le panneau perpendiculaire suivant la trajectoire des rayons solaires..

Les rayons solaires forment un angle incident  $\theta$  avec la normal au plan considéré, comme Le montre la figure suivante :



**Figure : I.12 :** les rayons solaires sur un plan incliné .[10]

Le panneau est incliné d'un angle 'β', les rayons solaires arrivent avec une hauteur 'h', les deux angles doivent être complémentaires et former 90°. Nous devons incliner le panneau de telle sorte que les rayons solaires arrivent perpendiculairement sur la surface. Cela revient donc à annuler l'angle incident  $\theta$  et à déterminer l'angle d'inclinaison du panneau.

L'équation générale qui nous permet de calculer les angles ( $a_z$ , h) pour les différentes positions du panneau est:

$$\cos(\theta) = \sin(\lambda) \sin(\delta) \cos(a_z) - \cos(\lambda) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(a_z) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(a_z) + \sin \lambda \cos(\delta) \sin(\beta) \cos(\omega) \cos(a_z) + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\beta) \sin(a_z) \quad (I.19)$$

- Cas d'un plans horizontal : inclinaison est nulle et l'équation devient

$$\sin(h) = \cos(\theta) = \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (I.20)$$

- Cas d'un plan perpendiculaire

: L'équation devient

$$\cos(\theta) =$$

$$- \cos(\lambda) \sin(\delta) \cos(a_z) + \sin(\lambda) \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(a_z) + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(a_z)$$

$$(I.21)$$

- Pour une poursuite du soleil suivant deux axes, avec le panneau orienté en permanence face au soleil, sous une incidence normale l'angle incident  $\theta$  doit être nul  
Cos ( $\theta$ ) =1

- L'inclinaison du panneau se détermine finalement par la relation  $\beta = 90 - h$

### I.2.8 : Les composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement Solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. le cumul du rayonnement global par jour. Ce sont toutes les valeurs cumulées d'année et l'on en réalise avec des moyennes pour chaque mois de l'année.

Ce qui ne permet que la réception aux soldes composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus. L'albédo ou la partie réfléchié par le sol du rayonnement solaire global comme représentés dans la figure suivante :

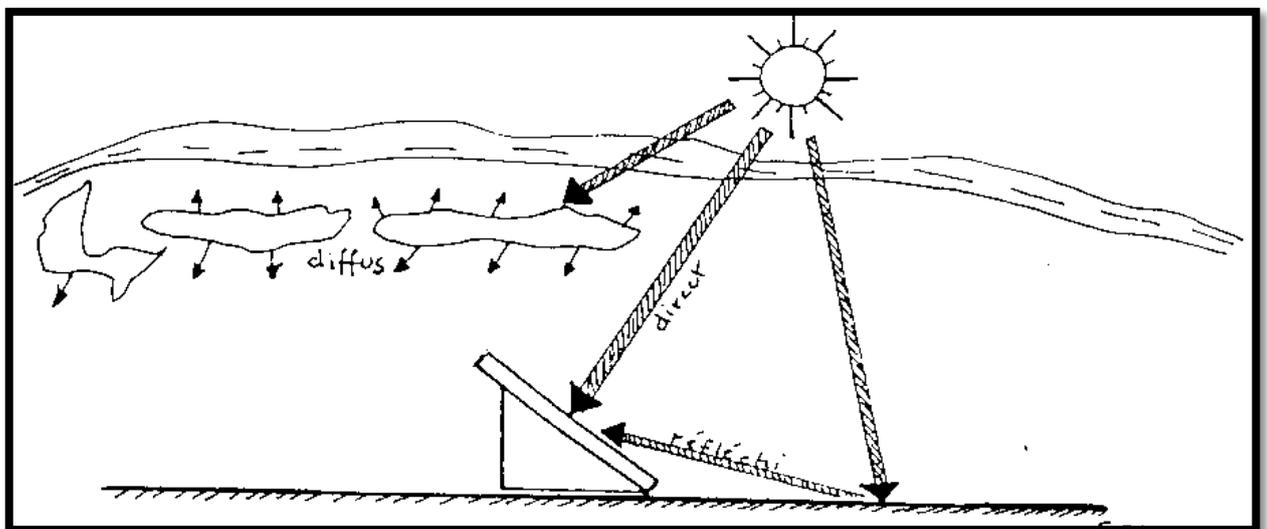


Figure :I.13 : composantes du rayonnement solaire [9]

#### ✓ Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil c'est un flux uniforme de rayons parallèles entre eux et de puissance incidente  $I$  ( $W/m^2$ ). C'est le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres.

#### ✓ Rayonnement diffus :

Parmi les photons qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse  $D$  ( $W/m^2$ ) provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer

## ✓ Rayonnement Global :

Le rayonnement global est simplement la somme des composantes directe et diffuse. On distingue deux types de données d'ensoleillement :

- Rayonnement instantané : on considère les courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de l'heure de la journée.[9]

### I.2.9 : Rayonnement en Algérie :

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ  $1\text{Kw/m}^2$ . L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les  $6\text{Kw/m}^2$  et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de  $2500\text{ Kw/m}^2$

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie

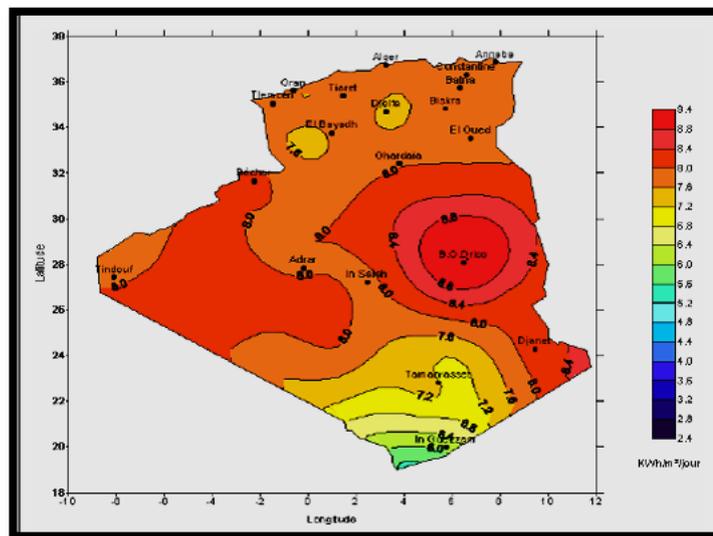


Figure : I.14 : les différentes zones énergétiques de l'Algérie [10]

## I.3 : Énergie solaire :

L'énergie solaire correspond au type d'énergie que le soleil diffuse dans l'atmosphère par son rayonnement. Elle est obtenue grâce à des panneaux solaires et est utilisée par les humains sous deux formes différentes : électrique et thermique. L'énergie solaire photovoltaïque permet de transformer les rayons du soleil en électricité, par une réaction photovoltaïque par l'utilisation des cellules solaires photovoltaïque, tandis que l'énergie thermique est plutôt utilisée pour produire de la chaleur.

Les panneaux solaires peuvent être installés partout où le soleil brille toute l'année, comme c'est le cas pour les pays situés aux abords de la ligne équatoriale, mais peuvent également servir de source d'énergie d'appoint dans les régions plus nordiques Par l'utilisation de deux

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

types de capteur, capteurs solaires plan qui est utilisé pour le chauffage de l'eau, le séchage des récoltes agricoles, et des capteurs solaires à concentration dont leur accès à très haute température produit la vapeur chaude et comprimée par la concentration du rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur par des surfaces réfléchissantes, ce deuxième type de capteur (capteur solaires à concentration) permet aussi de produit l'électrice comme les cellules solaires photovoltaïque.

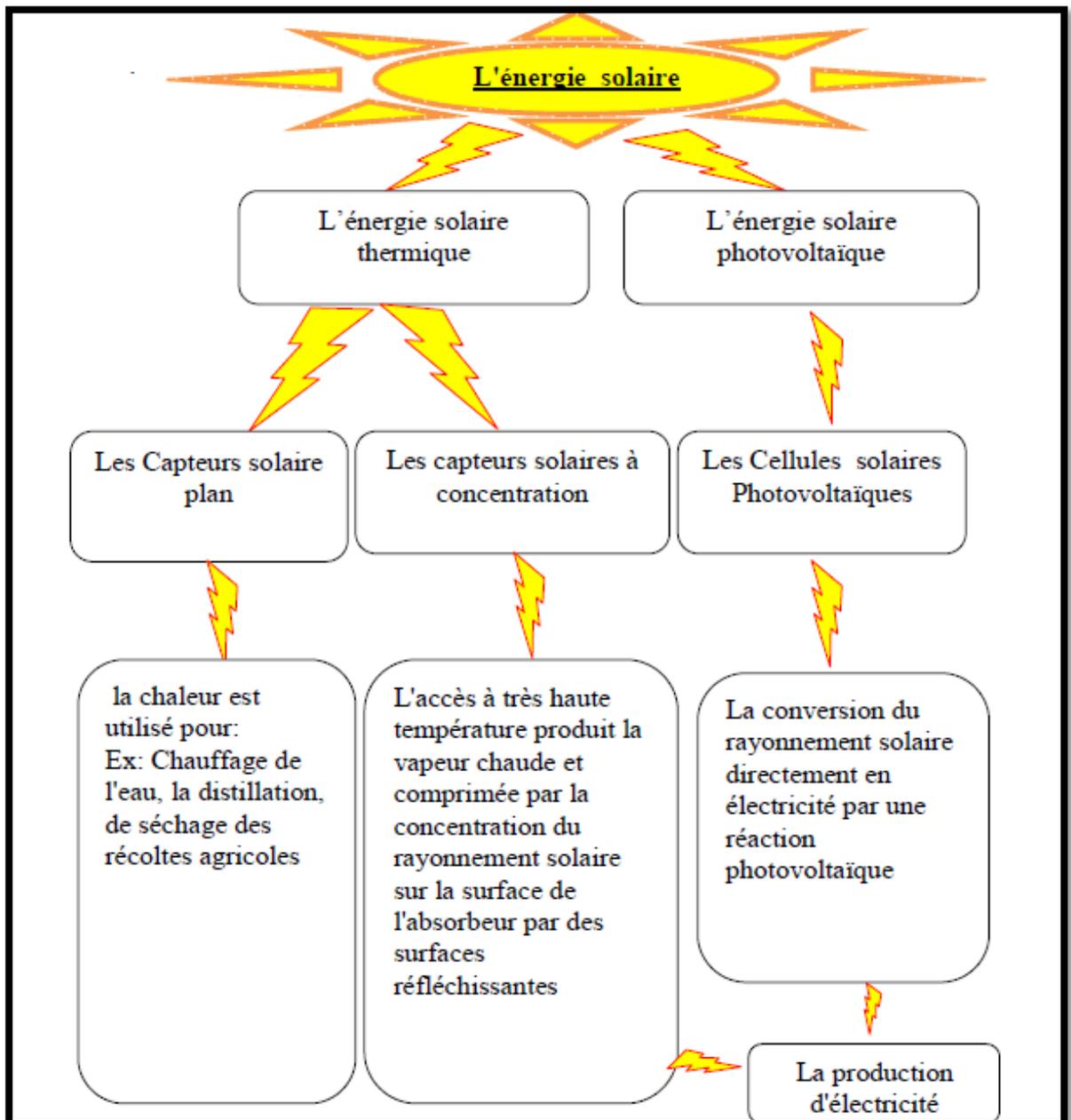


Figure:I.17 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.[37]

### **I :3 :1 :L'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs.



**Figure:I.18 :** Convention photovoltaïque. [14]

### **I : 3 :2 : Principe de l'effet photovoltaïque :**

Le mot « photovoltaïque » vient des grecques « photos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique.

L'effet photovoltaïque a été découvert par E. Becquerel en 1839. il découvrit que certains matériaux délivreraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein explique le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5% . La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge électrons et trous, dans un matériau. [15]

### **I : 3 :3: Avantages et inconvénient de l'énergie solaire**

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

#### **Avantage :**

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ces systèmes n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système

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

### **Inconvénients :**

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

### **I : 3 :4: Conclusion :**

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

Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil. Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base... nous avons également présenté des notions de base L'énergie solaire photovoltaïque qui est convertie en électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire sur les cellules photovoltaïques qui sont montées dans des panneaux solaires ce que nous allons présenter dans le chapitre suivant

*Chapitre II :*  
*Les panneaux*  
*solaires PV*

**II.1.Introduction :**

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. En utilisant pour cela des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou des photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie. L'utilisation des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser par la technique de poursuite du soleil.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les panneaux solaires photovoltaïques.

**II.2. Les principaux composants d'un système solaire photovoltaïque :**

Un système solaire photovoltaïque est généralement constitué de trois ou quatre éléments principaux que sont :



**Figure : II.1** : chaine des panneaux solaires photovoltaïques [9]

**II.2.1.Le générateur photovoltaïque :**

Qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangés de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) pour obtenir une puissance plus.[16]

- **Cellule photovoltaïque** : Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque

qui est à l'origine du phénomène. la cellule photovoltaïque produit un courant continu [17]

- **Les modules (ou panneaux) :** La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.

### II.2.2. Le stockeur d'énergie :

Batterie ou accumulateur qui a le rôle de stocker l'énergie émise par le générateur photovoltaïque dans le cas où il y'a excès en énergie par rapport à celle demandé par la charge, l'énergie accumulée est utilisée pendant la nuit. Généralement le stockeur d'énergie est utilisé dans les systèmes autonomes.

### II.2.3. Le système de contrôle (régulateur) :

Il est employé dans les systèmes qui contiennent la batterie, le fonctionnement de ce régulateur est d'éviter la surcharge de la batterie par le panneau solaire, et éviter le déchargement excessif par la déconnection de la batterie de la charge.

### II.2.4. Le système d'interconnexion :

Qui relie le générateur photovoltaïque (producteur d'électricité) au consommateur (consommateur d'électricité). C'est un système simple généralement les câbles [18][19]

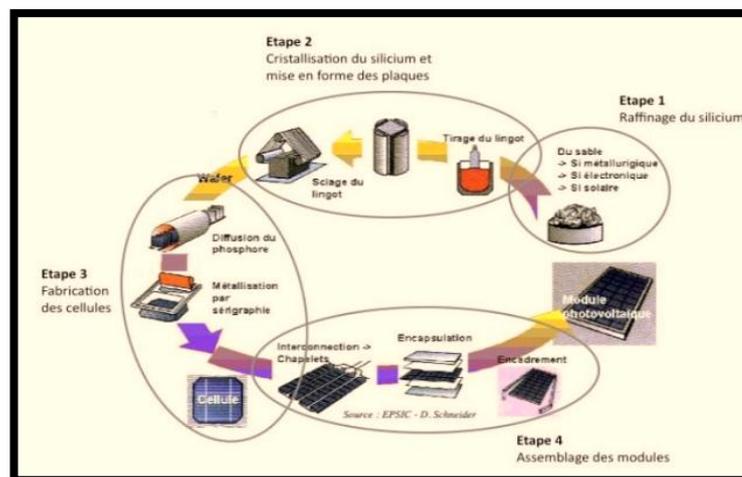


Figure :II.2: Les étapes de la fabrication d'un système PV

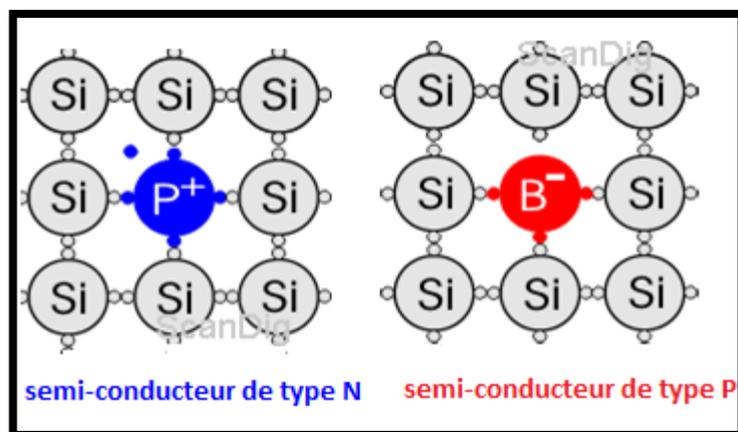
### II.3 : Les Propriétés des Semi-conducteurs

Un Semi-conducteur est un composant dont la conductivité électrique (plus importante que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure.

Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium **Si** un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice **SiO<sub>2</sub>**, donc très abondant dans la nature.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un Semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés.

Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type **N**, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type **P**.



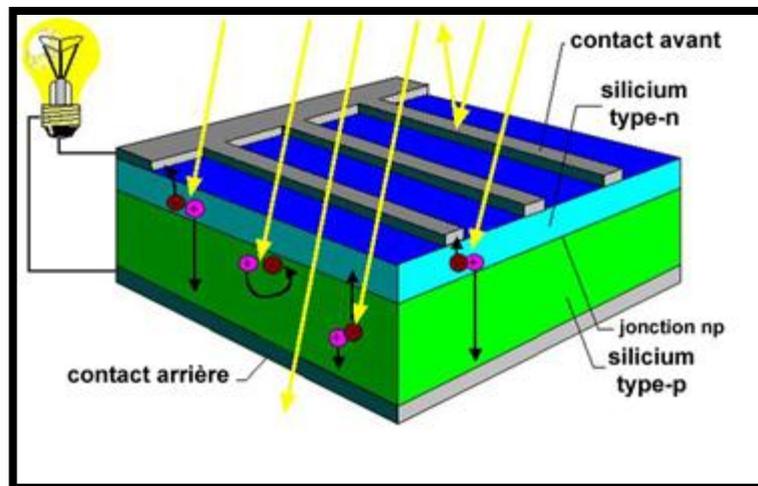
**Figure : II.3** : jonction de type NP[20]

Chaque (**Si**) comporte 4 électrons périphériques, appelés électrons de valence, et chacun de ses quatre voisins apporte un électron à mettre en commun pour créer quatre liaisons avec ses plus proches voisins. Il y a donc huit électrons externes autour de chaque Si (configuration stable). Le principe est ensuite d'utiliser les éléments voisins dans la classification périodique l'une présentant un excès d'électrons grâce au phosphore (**Ph**) et l'autre un déficit en électrons grâce au Bore (**Bo**), sont dites respectivement dopée de type N et dopée de type P

### II.4.Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière .La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore [18][20]

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés



**Figure : II.4:** Représentation schématique d'une cellule solaire[20]

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ✓ Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- ✓ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- ✓ Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [20]

#### **II.4.1. Matériaux utilisés dans les cellules PV :**

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique

(dioxyde de silicium) et un minéral de formule  $\text{SiO}_2$ . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [20]

Les différents types de cellules PV existants sont :

✓ **Les cellules mono-cristallines :**

La première génération de photopiles

Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire)

Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère

Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

✓ **Les cellules poly-cristallines**

Coût de production moins élevé

Procédé nécessitant moins d'énergie

Rendement 11-13% (18% en Labo)

✓ **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)**

Coût de production bien plus bas

Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo)

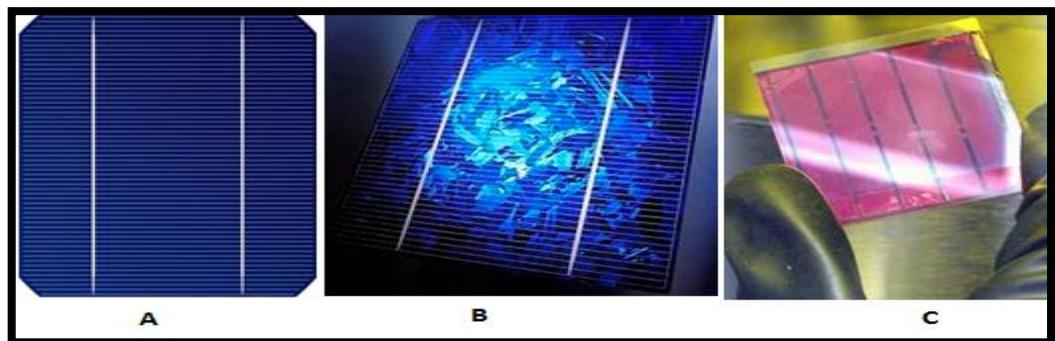
Durée de vie plus faible ;

✓ **Les cellules nanocristallines (couche mince)**

Une des dernières générations de photopiles ;

Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;

Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire ,Procédé et coût de production encore plus bas .[21]



(A) silicium mono-cristallin

(B) silicium poly-cristalline

(C) Silicium amorphe

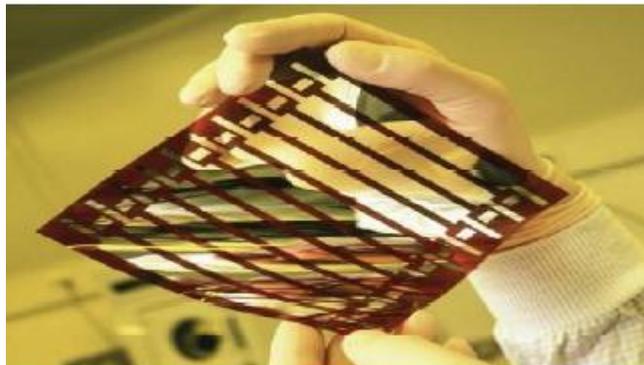
**Figure: II.5:** les types des cellules

✓ **Les Cellule en matériaux organiques :**

Le (rendement : 3.6%) Observée depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière un grand essor.

Initialement donnant des valeurs très faibles rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de **tang** montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables conformément aux prédictions de **merritt** en 1978.

la cellule composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide atteint 0,95% de rendement de conversion ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastique ». les progrès de ces technologies sont très rapides des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6 %) le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leur performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures)



**Figure : II.6 :** Célule solaire tout organique sur substrat souple [22]

l'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que , contrairement aux cellules à base des matériaux inorganiques elles offrent l'avantage de pouvoir être déposée en grande surface à grande vitesse par des techniques d'impression classiques Elles ouvrent la voie aux applications légères nomades et souples .En fin ,grâce à des couts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendement de différents type de cellules :[22]

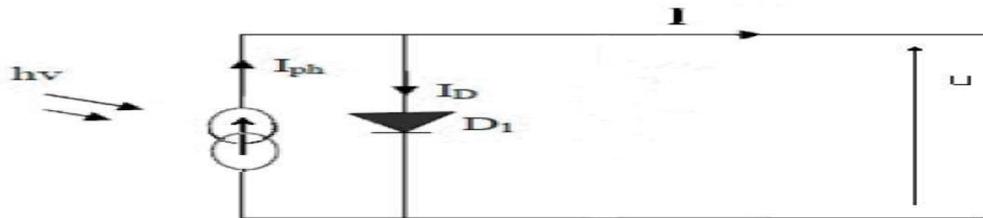
Type	Cellule (labo)	Module (labo)	Module (commercial)
Silicium mono-cristallin	24,70 %	22,70%	12-20%
Silicium poly-cristallin	20,30%	16,20%	11-15%
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%
Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%
CIS	19,30%	13,50%	9-11%

CdTe	16,70%		6-9%
Cellule organique	5,70%		
Cellule de gratzel	11%	8,40%	
Cellules multi-jonction	39%	25-30%	

**Tableau : II.1** : comparaison entre les rendements de différents types de cellule [22]

## II.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

### II.5 :1. Circuit électrique idéal :



**Figure (II-7)** : schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque [24]

La cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique équivalent donnée par la figure (II-7) composé d'un générateur de courant et d'une diode parallèle. Le courant  $I$  généré par la cellule s'écrit alors:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (II.1)$$

Avec:  $I_{ph}$  : La photo courant et  $I_D(V)$  : Le Courant d'obscurité de la diode

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{u}{ut}} - 1 \right) \quad (II.2)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{u}{ut}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

$U$  : tension.

$UT$  :  $KT/q$  tension thermique.

$K$  :  $1.38 \times 10^{-23}$  constant de Boltzmann.

$q$  :  $1.602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron.

$T$  : température absolue en °K.

$I_s$  : Courant de saturation de la diode.[24]

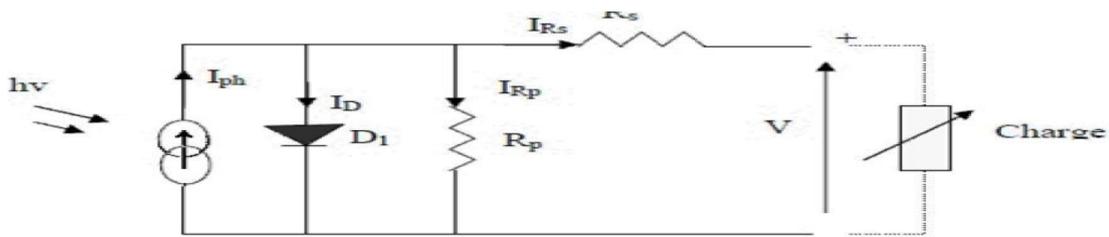
Cette relation entre les trois grandeurs,  $I$ ,  $I_{ph}$  et  $I_D(V)$  permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires:

- ✓ Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ): Soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle .en pratique ce courant est très proche de la photo courant  $I_{ph}$ .
- ✓ La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ): Soit la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

- ✓ Le facteur de forme ( $ff$ ) : Qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport  $ff = \frac{P_m}{V_{co.lcc}}$
- ✓ Le rendement de conversion d'énergie photovoltaïque  $\eta = \frac{P_m}{E.S}$  [17][23]

**II.5 :2.Circuit électrique réel :**

En réalité, il existe l'influence de résistances dans la génération du courant, et le circuit électrique équivalent est alors représenté par la figure (II-8)



**Figure :II-8 :** le schéma électrique équivalent d'une cellule PV.[24]

La caractéristique courant-tension pour une température donnée et un éclairement solaire fixé

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

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{q(v+R_s I)}{A.K.T_c}} - 1 \right) \tag{II.5}$$

$$I_{sh} = \frac{(v + R_s I)}{R_p} \tag{II.6}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(v+R_s I)}{A.K.T_c}} - 1 \right) - \frac{v+R_s I}{R_p} \tag{II.7}$$

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

**$I_{ph}$  :** Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

**$I_0$  :** Courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la Jonction p - n de la cellule.

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

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

**q :** la charge de l'électron ( $1,6. 10^{-16}$  C).

**K :** constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}$  J/K).

**$T_c$  :** température de jonction (K).  $T_c = T + (NOCT - 20) E_g / 800$

**T :** la température ambiante.

**$E_g$  :** Éclairement.

**NOCT** : (Nominal operating cella température), température nominal de fonctionnement de la cellule qui est mesurée sous les conditions suivantes :

- Journée claire d'ensoleillement moyenne 800(w/m<sup>2</sup>).
- Température ambiante de (20°C).
- Vitesse moyenne du vent (1m/s).

En négligeant le terme  $(V+R_s.I) / R_p$  pour une résistance shunt très grande.[25]

$$I = p_h - I_o \left( e^{\frac{q(v+R_s.I)}{A.K.TC}} - 1 \right)$$

### c) La puissance

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle que génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule.

$$p_m = I_m \times V_m \quad (II.8)$$

La puissance du panneau constitué des cellules parallèle :

$$P_p = N_p \times I \times V \quad (II.9)$$

La puissance du panneau constitué des cellules série :

$$P_s = N_s \times I \times V \quad (II.10)$$

La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle : [26]

$$P_p = N_p \times I \times V \times N_s \quad (II.11)$$

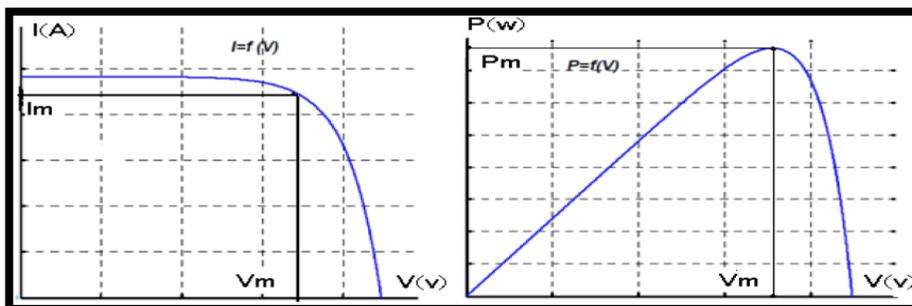
$P_m$  : La puissance maximale.

$I_m$  : Le courant maximum.

$V_m$  : La tension maximale.

$N_s$  : Le nombre des cellules associé en série.

$N_p$  : Le nombre des cellules associé en parallèle.

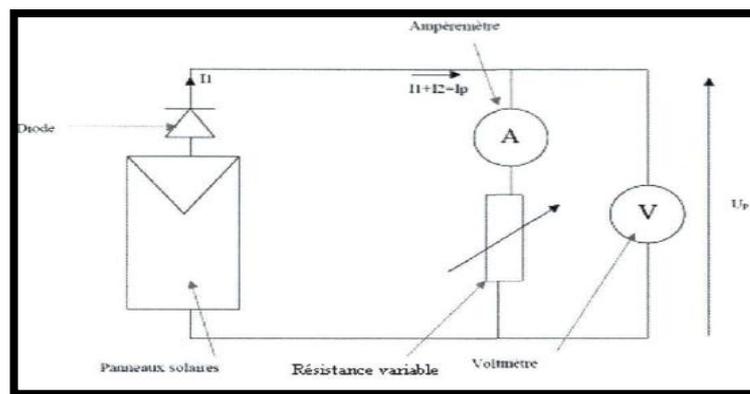


**Figure (II-9)** : caractéristique  $I=f(v)$ . **Figure (II-10)** : caractéristique  $P=f(v)$ [9]

## II.6. Méthode de définition des caractéristiques de I-V de sortie :

La méthode la plus simple pour tracer une caractéristique  $I(V)$  d'un panneau PV est de connecter directement à ses bornes une résistance variable pour permettre d'étudier l'évolution de la tension en fonction de l'intensité à différents niveaux d'ensoleillement.

Lorsque la résistance est faible, le rhéostat doit supporter le courant de court-circuit du panneau. Pour l'autre côté de la caractéristique  $I(V)$ . Une valeur de résistance suffisamment grande est nécessaire pour se rapprocher du circuit ouvert. Pour satisfaire ces deux contraintes, on doit placer deux rhéostats en série.



**Figure : II.11** : schéma des mesures du panneau photovoltaïque.[42]

Au démarrage, les deux rhéostats ont leur valeur maximale (l'ouverture du circuit permet de mesurer la tension de circuit ouvert), on diminue progressivement le rhéostat B de forte valeur (la tension diminue, on surveille le courant pour avoir des points à intervalles réguliers).

Une fois **B** complètement court-circuité, on diminue alors progressivement le rhéostat A. Si le ciel est sans nuage, cette méthode peut s'utiliser très simplement avec des appareils portatifs (ampèremètre, voltmètre). En revanche si le ciel est nuageux, l'irradiation change parfois en quelques secondes et sur de grandes amplitudes même si l'on ne le ressent pas à l'œil. Il faut alors réaliser les mesures rapidement.[42]

## II.7. Branchement des cellules Photovoltaïques :[25]

### II.7.1. Branchement série des cellules :

Lorsque les cellules sont connectées en série le courant  $I$  à travers chaque cellule est le même, ce dernier génère la tension  $V_i$  multiplié par le nombre de cellules en série  $NS$ , fermé sur une impédance  $R'$ . Le groupement (**G**) des cellules délivrera le courant  $I$  sous la tension  $NS \times V_i$ . L'impédance optimale pour le groupe série est  $NS$  plus grande que l'impédance optimale pour une cellule de base. Il faudra dans la majorité des cas associer un certain nombre de cellules  $NS$  en série pour obtenir des tensions compatibles avec des charges à alimenter. C'est ce qui

est réalisé dans un module photovoltaïque, où les cellules sont positionnées dont les extrémités sont ramenées vers une boîte de connexion

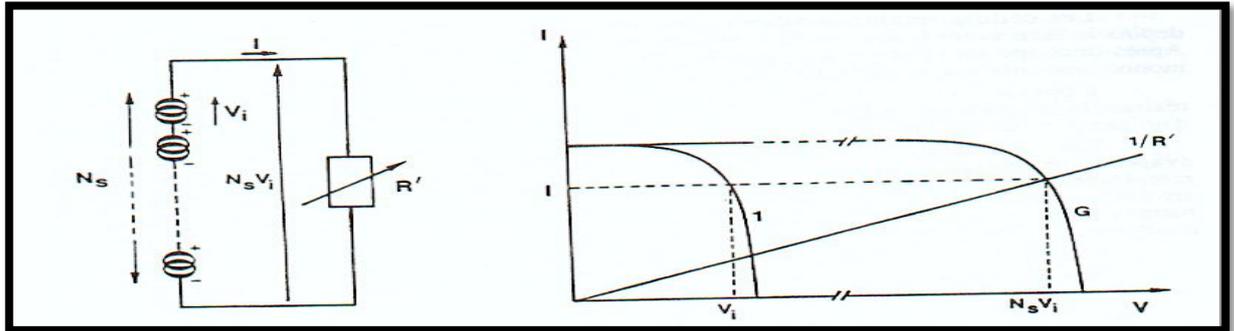


Figure : II.12 : Branchement série des cellules PV [9]

**II.7.2. Branchement parallèle des cellules :**

Il est possible d'augmenter le courant fourni à une charge R en plaçant en parallèle plusieurs cellules ou modules photovoltaïques. Le groupement parallèle délivrera le courant  $NP \times I_i$  sous la tension V, où NP est le nombre de cellules connectées en parallèle,  $I_i$  est le courant généré par chaque cellule et V est la tension à la sortie du groupement. L'impédance optimale pour le groupement est NP fois plus faible que l'impédance optimale pour une cellule.

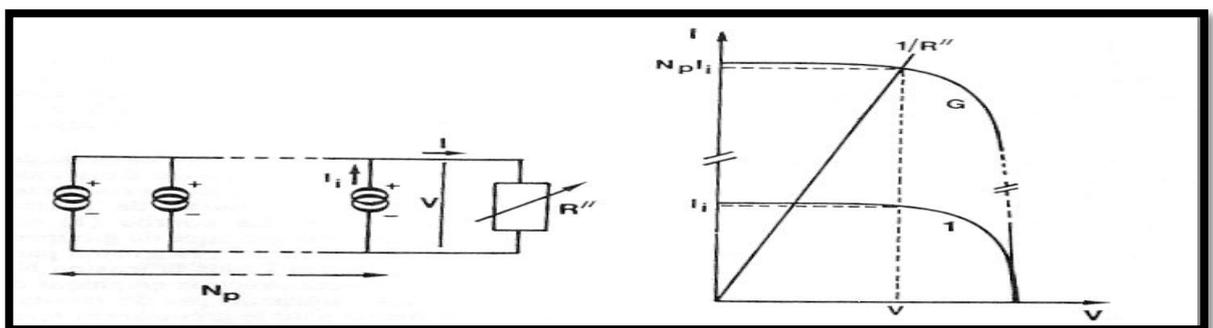
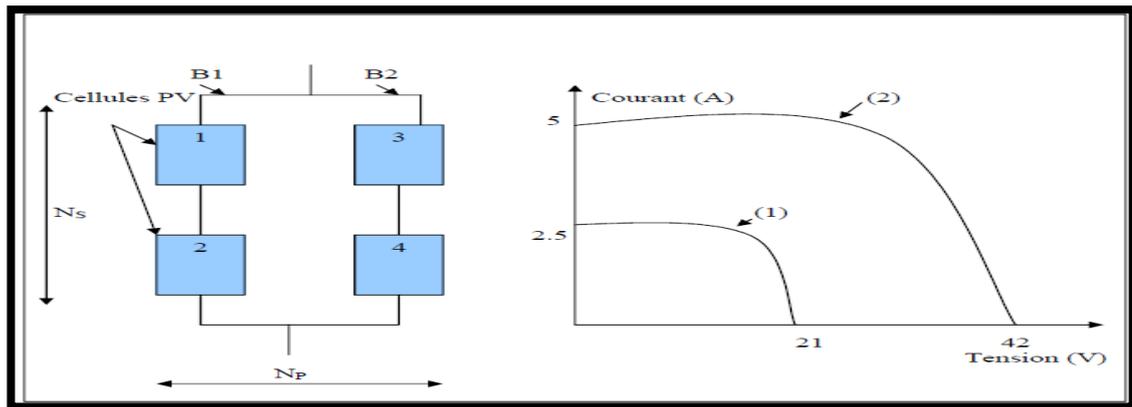


Figure : II.13 : Branchement parallèle des cellules PV [9]

**II :7:3. Branchement série parallèle des cellules**

La puissance des modules disponibles sur le marché étant limitée d'où l'association des cellules ou modules photovoltaïques en série – parallèle pour obtenir des caractéristiques {courant-tension} exploitables pour certaines applications : éclairage, pompage, ...

Nous ne pouvons associer que des cellules identiques pour obtenir un module fiable, et des modules identiques pour obtenir un champ photovoltaïque stable. Comme nous le montre la figure II.13 :



**Figure : II.14:**Branchement série parallèle des cellules PV [10]

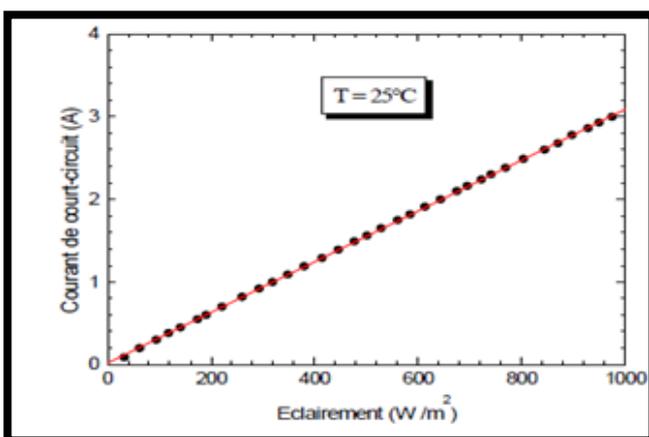
$N_S$  est le nombre de cellules associé en série et  $N_P$  le nombre de branches associées en parallèle. La courbe (1) représente la caractéristique courant –tension des cellules [1, 2] montées en série, la courbe (2) représente la caractéristique des deux branches {B1, B2} montées en parallèle.

Une association série parallèle de cellules aura la même caractéristique (I, V) théorique que celle de la courbe de la cellule de base. En modifiant les échelles sur les deux axes, dans le cas idéal où toutes les cellules (ou modules) ont des caractéristiques électriques rigoureusement identique [26]

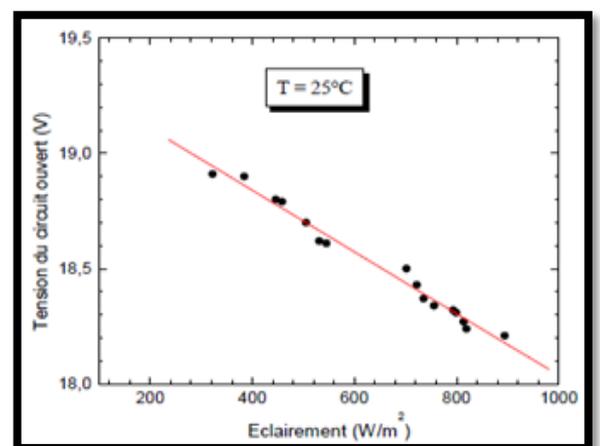
**II :8.Influence de l'éclairement et de la température [25]**

**II :8 :1.Influence de l'éclairement :**

Les variations de la tension du circuit ouvert et du courant du court-circuit en fonction de l'éclairement du module PWX 500 sont illustrées par les figures 14 et 15.



**Figure : II.15 :** influence de l'éclairement sur la tension du circuit ouvert[25]



**Figure : II.16 :** Influence de l'éclairement sur l'intensité du circuit-ouvert [25]

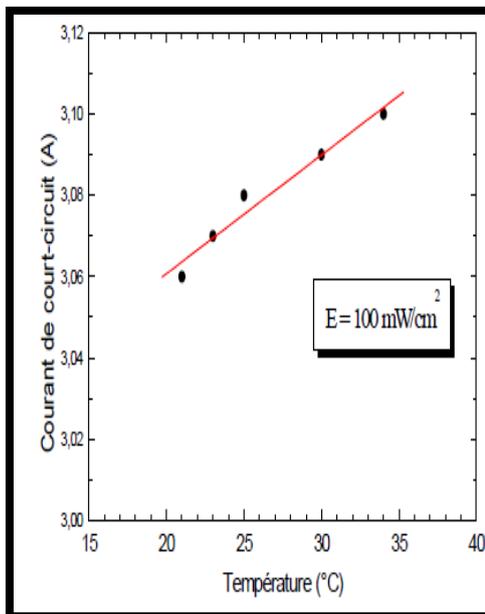
**II :8 :2.Influence de la température**

Pour des applications à faible température, le courant et la tension générés par un module PV sont supposés linéaires. Ceci permet de décrire l'effet de la température sur les performances d'un module PV par des coefficients. Si nous désignons par P un paramètre physique du module à la température T, on définit le coefficient de température correspondant comme suit:

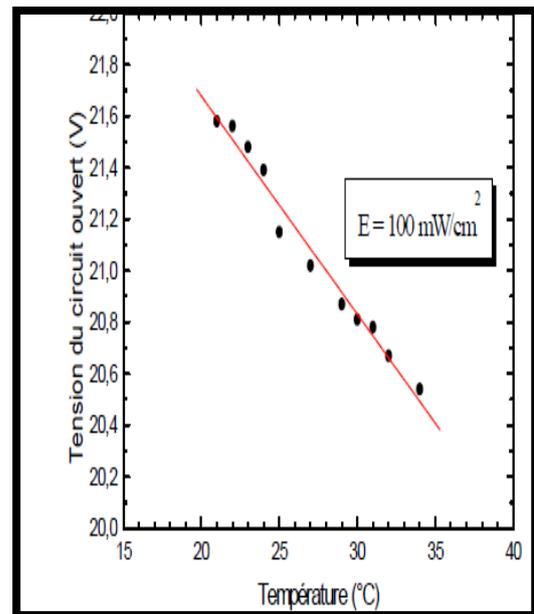
$$\beta_1 = \frac{p(t) - p(t_{ref})}{t - t_{ref}} \quad (II. 12)$$

Le coefficient de température réduit est donné par:  $\beta_2 = \frac{\beta_1}{p(t_{ref})} 100\%$  (II. 13)

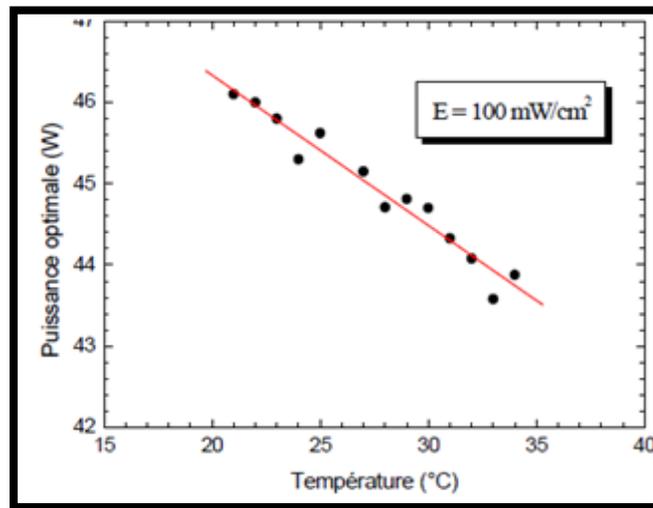
L'évolution du courant de court-circuit, la tension du circuit ouvert, la puissance optimale PWX 500 sont illustrées par les figures16, 17, 18 respectivement, sous un éclairement constant de 100 mW/cm<sup>2</sup>.



**Figure :II.17** : influence de la température sur la tension du circuit ouvert



**Figure : II.18** :Influence de la température sur le courant de court-circuit [25]



**Figure :II.18** : influence de la température sur la puissance optimale [25]

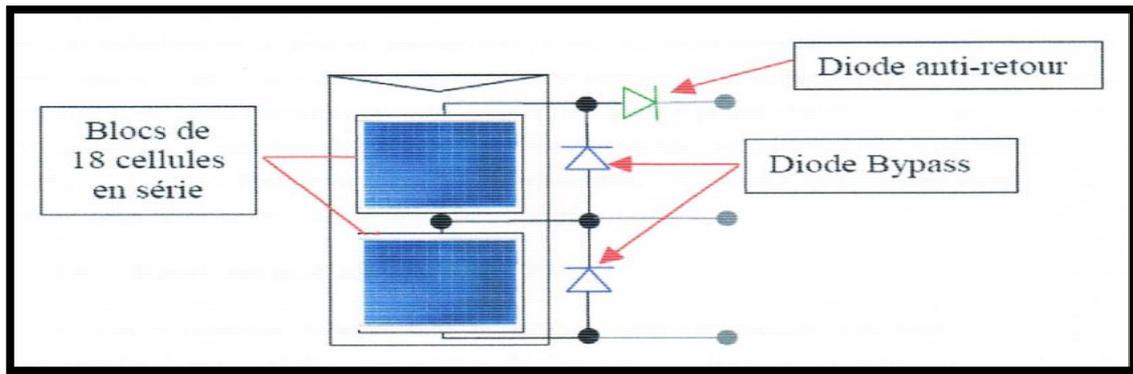
### II.9. Protections d'un groupe photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules photovoltaïque pour éviter les courants négatifs dans les générateurs photovoltaïques (diode anti-retour)
- La protection lors de la mise en série de modules photovoltaïque permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode-by-passe) et les points chauds.

#### II .9.1. Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs générateurs photovoltaïques :

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge, le risque est que des chaînes de cellules éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la charge ne se recharge pas à travers le générateur. On dispose pour cela des diodes anti-retour mises en série avec le générateur photovoltaïque (de blocage) comme la montre la figure (II.30). Cette diode est indispensable quand la charge du module photovoltaïque est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie ne débite pas sur le module photovoltaïque pendant la nuit.



**Figure II. 19:** Schématisation d'un groupe photovoltaïque élémentaire avec diodes by pass et diode anti-retour [29]

### II.9.2. Protection du groupe photovoltaïque :

La mise en série de cellules photovoltaïques implique que le courant traversant chaque cellule soit le même que celui que l'ensemble du groupe photovoltaïque associé. Ainsi, quand un groupe photovoltaïque ou une partie de ce groupe est ombrée, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse et devenir réceptrice, dissipant alors la puissance ne pouvant pas être extraite. Cette dissipation a comme effet immédiat un échauffement de la zone sous-irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des points chauds qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module photovoltaïque entier. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées à un sous-réseau de cellules .

### II .9.3. Protection contre les surtensions et la foudre :

La plupart des fabricants solaires de module offrent une garantie de 20 ans et plus sur leur produit. Le coût de tels dispositifs est calculé sur cette très longue période. Toutefois ces installations sont très régulièrement exposées aux foudres et aux surtensions, qui peuvent considérablement réduire l'espérance de vie. À cause de l'exposition et de l'étendue des systèmes photovoltaïques, les impacts directs et indirects de foudre présentent un risque élevé pour de telles installations. Les surtensions sur les systèmes photovoltaïques ont pour origine les tensions générées par couplage capacitif ou inductif provenant de coups de foudre ou de manœuvres de communication issues du réseau électrique. Les surtensions générées par la foudre sur les systèmes photovoltaïques peuvent endommager les modules photovoltaïques ainsi que les onduleurs. Ceci peut avoir de graves conséquences sur l'exploitation du système. Les coûts de réparation élevés (par ex : ceux de l'onduleur mais aussi les pertes d'exploitation non négligeables dues à la défaillance de l'installation qui ont pour conséquence une diminution du bénéfice pour l'exploitation. Afin de prévenir des pannes de systèmes

photovoltaïques par des surtensions dues à la foudre, il est nécessaire de coordonner de manière adéquate les concepts de protection contre la foudre et les surtensions. En règle générale, un système de protection contre la foudre destiné à un générateur photovoltaïque se compose des éléments suivant :

- ✓ Système de protection contre la foudre.
- ✓ Installation de mise à la terre et équilibrage de potentiel.
- ✓ Blindage magnétique et câblage. Cette protection est assurée par : En partie courant continu, par des varis tors en entrée onduleur. En parti courant alternatif
- ✓ L'interconnexion de toutes les masses (modules et onduleur) doit être assurée par câble en cuivre nu de 25mm<sup>2</sup>. Toutes les masses doivent être mises à la terre en évitant les boucles.

#### **II.9.4. Protection du générateur photovoltaïque**

La mise en série de cellules photovoltaïque implique que le courant traversant chaque cellule soit le même que celui que l'ensemble du groupe photovoltaïque associé. Ainsi, quand un générateur photovoltaïque ou une partie de ce générateur photovoltaïque (par exemple une cellule) est ombrée, cette partie sous-irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse et devenir réceptrice, dissipant alors la puissance ne pouvant pas être extraite. Cette dissipation a comme effet immédiat un échauffement de la zone sou-irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des <point chaud> (hot spot en anglais) qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module photovoltaïque entier. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes by-pass sont associées à un sous-réseau de cellules.

En plus, L'encrassement lié à la poussière, à la pollution et au pollen peut faire diminuer de 20 % les performances des panneaux photovoltaïques. Les nettoyeurs naturels que sont la pluie, la rosée et le vent ne suffisent pas à les nettoyer efficacement. Pour garantir un rendement électrique élevé et constant, il est indispensable de procéder régulièrement à un nettoyage adapté des installations



**Figure : II.20 : Nettoyage panneau solaire**

**II.10. Installation des panneaux**

Pour l'installer les panneaux solaire dans un site, il est nécessaire de vérifier les conductions suivantes:

**a) Disposition des panneaux :** Les structures doivent être solides, fixées au sol, pour résister à des vents d'au moins de 150 Km/h. De plus, elles doivent être fiables dans le temps, elles doivent utiliser un matériau de bonne fiabilité (autre l'aluminium anodisé, la visserie inox et la visserie inoxydable).

**b) Fixation des panneaux :** La fixation des panneaux doit assurer correctement les fonctions suivantes :

- Maintien de l'orientation.
- Résistance contre le vent et les autres intempéries.
- Résistance contre les agressions mécaniques.
- Protection contre les salissures, et agressions venant du sol.
- ventilation des panneaux afin de limiter leur échauffement.

**c)-L'orientation des panneaux :** L'installation des modules peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou à même le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé. On les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord). Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à 10° pour assurer une auto nettoyage lors des pluies.

**d) Installions des éléments de la batterie:** L'utilisation de la batterie peut présenter des dangers :

Risque d'explosion, dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acide sulfurique).

En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation. Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec un grand soin.

Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité par la tension de décharge est supérieur à 1000. Ce local doit satisfaire à certaines exigences, qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé pour garantir la circulation des gaz.
- D'être à une température proche de 25°C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments.

**e) Câblage électrique :** Ils seront à l'extérieur, exposés au vent, au gel, au soleil et autres agressions. Il est strictement nécessaire d'utiliser des câbles adaptés à des sections (diamètre) suffisantes croissance marines et autres. La section sera d'au moins 1.5 mm<sup>2</sup>, 2.5mm<sup>2</sup> dès que la longueur excède 25m ou que la puissance du module soit supérieure à 100W .

**f) Câblage de liaison :**

Il se trouve entre les modules et le régulateur, il doit être d'une section d'au moins 2,5mm<sup>2</sup> ou plus si la longueur excède 15cm. Pour une intensité inférieure à 4A, sa section sera calculée de façon à ne pas avoir plus de 6% de chute de tension [40]

## **II.11. Calcul du rayonnement solaire direct sur un plan récepteur :**

### **II.11.1. Rayonnement solaire globale sur un Plan horizontal :**

Le rayonnement globale sur un plan horizontal est la somme du rayonnement direct et diffus donné par :

$$G = S + D \quad (\text{II. 14})$$

**S :** le rayonnement direct reçu par une surface horizontale.

**D :** le rayonnement diffus provenant du ciel, reçu par une surface horizontale.

**G:** le rayonnement global reçu par une surface horizontale.

### **II :11.2 : Rayonnement solaire direct sur un plan horizontal :**

Le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal peut être déterminé par:

$$S = F * \sin(h) \quad (\text{II. 15})$$

F est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires et peut être évalué par :

$$F = E - SOL * \exp\left(\frac{TL}{0.9} + 0.9 \sin(h)\right) \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (\text{II. 16})$$

Avec E-SOL = 1370 w/m<sup>2</sup>

Et TL le facteur de trouble de Linke défini comme suit :

$$TL = 2.4 + 14.6B + 0.4 (1 + 2B) \ln(Pv) \quad (\text{II. 17})$$

Où B est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend une des valeurs :

B = 0.02 pour un lieu situé en montagne

B = 0.05 pour un lieu rural

B = 0.10 pour un lieu urbain

B = 0.20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée)

Et Pv est la pression partielle de vapeur d'eau, qui se calcule par :

Pv = Pvs \*HR avec : Pvs la pression de vapeur saturante, HR le taux moyen d'humidité relative et :

$P_{vs} = 2.165 \cdot (1.098 + T/100)$  où  $T$  est la température de l'air en °C.

### II.11.3 : Calcul du rayonnement diffus sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal peut être déterminé par :

$$D = 54.8 \sqrt{\sin(h)} * (T - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}) \quad (II.18)$$

Où  $TL$  est le facteur de trouble de Linke calculé par la formule.

### II.11.4 : Rayonnement solaire direct sur un plan incliné

Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est possible de l'estimer par la formule suivante :

$$S = F * CI \quad (II.19)$$

Où  $F$  est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires.

$CI$  étant le coefficient d'orientation, c'est l'angle formé par le rayonnement solaire avec la perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil ( $h$ ) et son azimut  $\alpha_z$  et d'autre part par l'orientation ( $o$ ) et l'inclinaison ( $\beta$ ) du plan récepteur.

L'orientation ( $o$ ) est négative vers l'Est, positive vers l'Ouest et nulle vers le sud.

Le calcul du coefficient d'incidence  $CI$  est obtenu par la formule suivante:

$$CI = (\sin(\beta) \cos(h) \cos(o - \alpha) \cos(\beta) \sin(h)) \quad (II.20)$$

Pour calculer le rayonnement solaire sur un plan incliné fixe, les angles d'inclinaison ( $\beta$ ) et d'orientation ( $o$ ) sont choisis suivant le cas étudié et remplacés dans l'équation.

Le calcul du rayonnement solaire incliné fixe est un cas particulier du calcul du rayonnement Solaire pour un plan perpendiculaire orienté à la poursuite des rayons solaires calculé par:

### II.11.5 : Calcul du rayonnement diffus sur un plan incliné:

Le rayonnement solaire diffus  $D$  arrive sur le plan récepteur incliné après avoir été diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, il n'a pas de direction privilégiée, de ce fait, l'orientation du plan (l'azimut) n'a pas d'importance, seule son inclinaison en ' $\beta$ '

Ainsi sur un plan récepteur d'inclinaison ( $\beta$ ),  $D$  se calcule :

$$D = 125 * \sin(h)^{0.4} \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + 221.86 \sin(h)^{1.22} \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad [w/m^2] \quad (I.20)$$

Le rayonnement diffus pour un plan incliné fixe est un cas particulier du rayonnement diffus pour un plan incliné mobile, l'inclinaison ( $\beta$ ) doit être prédéfinie. [11]

**II.12 Conclusion :**

Ce chapitre est consacré à l'étude des panneaux solaires photovoltaïques.

On a présenté les différents composants d'un système solaire photovoltaïque, les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans les cellules PV, les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque ainsi le branchement de ces cellules PV et l'influence de l'éclairement et de la température sur le rendement des panneaux PV.

En fin on a effectué le calcul du rayonnement solaire direct sur un plan récepteur après la disposition et l'orientation de ces panneaux dans son installation.

*Chapitre III :*  
*Systeme de*  
*poursuite*  
*salaire*

### III.1.Introduction :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans les sites isolés et même dans les villes et les cités avec des puissances crêtes qui varient des centaines à quelques MW. Mais dans la grande majorité des cas, les générateurs photovoltaïques sont fixes. L'énergie solaire incidente sur les cellules n'est pas optimale en fonction de l'heure d'une part et de la saison, d'autre part. Le rendement d'un module photovoltaïque est assez faible (autour de 15%), c'est pourquoi, il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes énergétiques reçues du soleil. [32].

Des études ont prouvé que le rendement optimal s'obtient si les cellules sont placées perpendiculairement par rapport au rayon solaire incident. Ainsi et pour garder cette perpendicularité aussi longtemps que possible, nous avons opté pour un système suiveur solaire. Ce chapitre est consacré à l'exposition et la description du système poursuite solaire..

### III.2.Système poursuite solaire:



**Figure : III.1 :** un champ des panneaux photovoltaïque motorisé

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

Un tracker solaire : est donc un dispositif de commande d'un panneau solaire photovoltaïque d'une partie mécanique. [33]

#### III.2.1.Principe de fonctionnement d'un suiveur solaire :

Son principe de fonctionnement 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 suiveur solaire permet ainsi de placer au mieux le panneau par rapport au positionnement perpendiculaire au rayonnement du Soleil.

L'idée derrière est que le surplus d'énergie produite grâce à la meilleure orientation du panneau sera plus important que l'énergie perdue pour orienter le panneau de manière optimale. En effet, un tracker peut augmenter le rendement des panneaux solaires jusqu'à 40% par rapport à une installation fixe orientée plein Sud [14]

### III.2.2. Description du prototype de suiveur :

- a) **Description de la partie mécanique :** Il est constitué essentiellement des différents éléments constitutifs comprenant :
- ✓ Un cadre du panneau (élément1) en aluminium pour protéger les cellules photovoltaïques
  - ✓ Deux règles de fixation (élément2) placées suivant la largeur du panneau munies de pattes d'attache de l'axe de rotation verticale .
  - ✓ Un rotor (élément3) doté d'un moteur disposant d'un engrenage d'entraînement et de réduction des couples de rotation dans les mouvements à l'horizontal du panneau. Ce rotor est une pièce maitresse fixant et portant les supports du vérin ainsi que le panneau.
  - ✓ Un vérin électrique (élément4) composé d'un moteur à courant continu, accouplé à un système de transformation de mouvement rotatif en mouvement linéaire qui permet d'orienter le panneau sur les différentes positions verticales.
  - ✓ Un support métallique tubulaire muni d'une base à cinq pieds (élément5) dont le rôle est d'assurer l'assise et la stabilité.

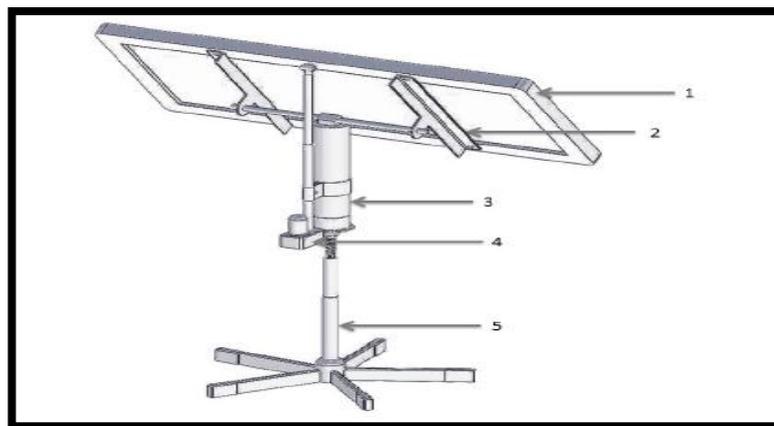


Figure : II.2 : Présentation de la structure mécanique [33]

- b) Description de la partie électronique :** Dans cette partie s'intéressés principalement à la commande et l'alimentation du système. Les quelles interviennent pour l'orientation du panneau par rapport aux rayons du soleil [33]

### III.2.3 . Les différents types de suiveurs :

Il est possible d'identifier trois facteurs principaux permettant de classer les différents types de suiveurs solaires :

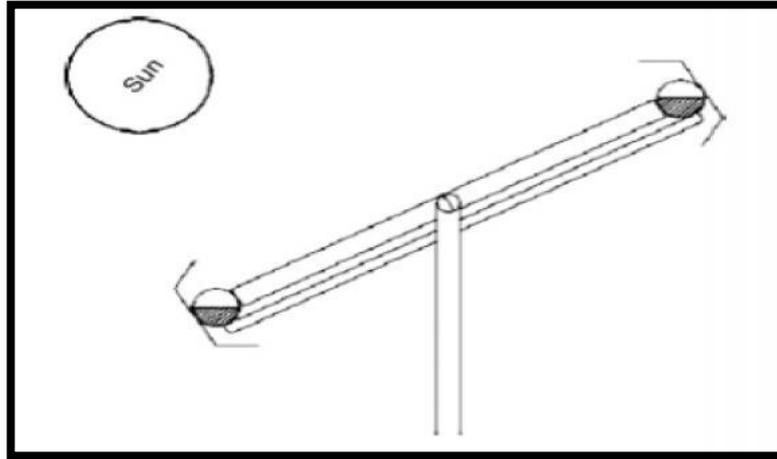
- Mécanisme d'orientation
- Degré de liberté de mouvement
- Type de commande

#### III.2.3.1. Mécanisme d'orientation

##### a) les capteurs passifs

Une option possible pour le suivi est un système chimique/mécanique, Ce système utilise l'idée de dilatation thermique des matériaux comme une méthode de poursuite comme le chlorofluorocarbone (CFC), habituellement les suiveurs passifs sont composés de deux actionneurs qui fonctionnent d'une manière opposée. Lorsque les deux actionneurs sont soumis à la même illumination le suiveur se trouve en repos perpendiculaire avec le soleil. Une fois que le soleil se déplace l'illumination se change entre les deux actionneurs le suiveur se déplace vers un nouveau point d'équilibre ou l'illumination devient égales pour les deux actionneurs. L'une des inconvénients de ce type qu'ils ne fonctionnent pas dans les basses températures et une efficacité de 23% et ils ne sont pas disponible commercialement.

La figure (III.3) montre un suiveur de soleil passif présenté par 'Clifford 'et' al'. Ce suiveur consiste à utiliser deux tubes cylindriques identiques contenant un liquide sous une pression partielle. Ces tubes sont positionnés sur un cadre en bois, symétriquement par rapport à l'axe horizontale. Les deux tubes sont ombrés tels que le tube le plus éloigné du soleil absorbe la radiation solaire alors que le deuxième reste ombré ce qui provoque le mouvement du système, pour éviter une réponse excessive et les oscillations on équipe le suiveur par système d'amortissement.[14][34]

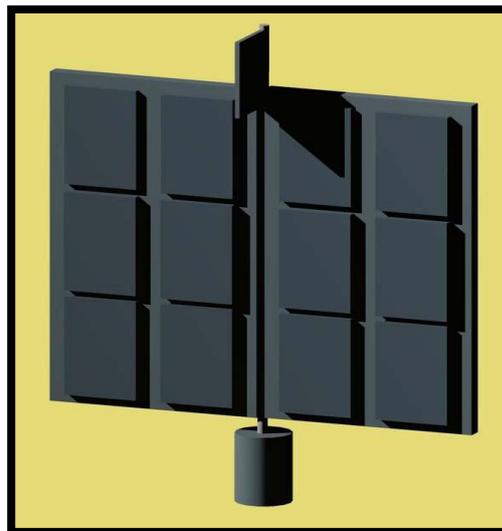


**Figure:III.3 :** suiveur solaire passif.[34]

### b) les capteurs actifs

Il y'a trois types principales de suiveurs actifs : suiveur a une cellule solaire bifaciales auxiliaire, suiveur électro-optiques, et suiveurs à base de microprocesseur.

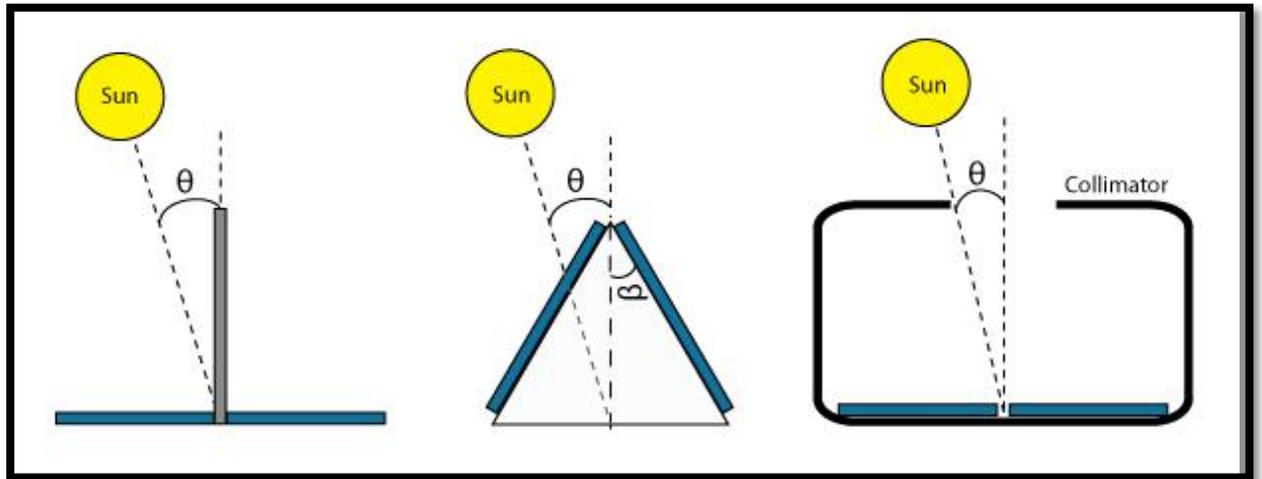
Suiveur a une cellule solaire bifaciales auxiliaire est le plus simple, la cellule solaire bifaciales auxiliaire qui agit comme un capteur de lumière est fixé sur l'axe de rotation, elle est placée perpendiculaire sur le panneau solaire, la cellule est connectée directement à un moteur à courant continue, lorsque le soleil déplace, l'angle d'incidence augmente sur la cellule, ce qui produit une énergie capable à faire tourner le moteur qui tourne par son tour le panneau solaire. La figure III.4 montre le schéma de ce type de suiveur.



**Figure : III .4 :** suiveur de soleil a une cellule bifaciale.[34]

Les suiveurs électro-optiques sont aussi des systèmes simples qui consistent à utiliser deux photorésistances comme capteurs pour les suiveurs mono-axe, Ces capteurs sont

positionnés très proche l'un par rapport à l'autre et ont un diviseur, ou montés sur des plans inclinés par un angle bien déterminé pour créer un courant ou différence de potentiel entre les deux capteurs comme il est montré dans la figure:(III.5).



**Figure : III.5 :** Principe d'équilibrage d'ombre. [14]

Une combinaison de résistances, capacitances, portes logiques, et transistors sont utilisés pour former un circuit de comparaison et un circuit de commande, la sortie de circuit de comparaison alimente le circuit de commande qui alimente le moteur et change son sens de rotation selon le capteur qui récrive le maximum d'illumination.

Lorsque les capteurs de la lumière sont employés, on obtient une commande du suiveur en boucle fermé, parce que l'image du soleil est envoyée à l'organe de commande pour voir si la position du soleil est changée ou non. L'avantage de commande en boucle fermé est la précision de suivi qui atteinte jusqu'à  $0.1^\circ$ , par contre les désavantages sont la nécessité à une structure mécanique très compliqué pour le suiveur, en plus si le ciel devient nuageux il n'y'a plus d'asservissement de la position de soleil et par conséquent pas de suivi, le dernier désavantage est la limitation de champs visuel des capteurs

Les suiveurs à base de microprocesseur utilisent des algorithmes pour déterminer la position de soleil au lieu des capteurs de lumière. Ce type de suiveur est utilisé dans la commande en boucle ouvert. L'avantage de cette commande est que le suiveur suit le soleil quel que soit l'état du ciel (nuageux / claire), par contre la désavantage est la précision qui est dégradé par rapport à la commande en boucle fermé [14]

**III.2.3.2 .Degré de liberté de mouvement :**

a) **suiveurs de soleil mono-axe** : Cette catégorie se compose de différents types de suiveurs :

- **Les suiveurs a axe horizontale** : Ils ont un axe de rotation est parallèle à la surface de terre, il est dirigé soit de l'Est vers l'Ouest ou bien de nord vers le sud.
- **Les suiveurs a axe vertical** : Ils se caractérisent par un axe de rotation verticale à la surface de terre, ils tournent de l'Est vers l'Ouest, dans les hautes altitudes ils sont plus efficaces que ceux a axe horizontale. Pendant l'installation il faut prendre en considération l'ombre, ce qui provoque une diminution de l'énergie collecté.
- **Les suiveurs a axe incliné** : Tous les suiveurs possédant un axe de rotation entre l'horizontale et la verticale sont considérés comme suiveurs a axe incliné, les panneaux sont montés directement sur l'axe de rotation

b) **suiveurs de soleil biaxe** : Ils disposent de deux degrés de liberté grâce auxquels l'axe perpendiculaire aux panneaux photovoltaïques est aligné parfaitement et en temps réel avec les rayons du soleil, au détriment en revanche d'une plus grande complexité de construction Cette catégorie se compose de différents types de suiveurs :

- **Suiveurs de soleil azimute-altitude** : Dans cette configuration l'axe primaire ou bien l'axe d'azimute doit être parallèle à l'axe de zénith, et l'axe d'élévation est perpendiculaire à l'axe primaire. L'angle de suivi autour l'axe d'azimute est l'angle d'azimute solaire et l'angle de suivi autour l'axe de l'élévation est l'angle de d'élévation solaire.
- **suiveurs de soleil polaire** : Ces suiveurs ont un axe primaire parallèle à l'axe polaire de la terre qui est orienté vers l'étoile polaire, l'axe primaire fait avec l'horizon un angle d'inclinaison égale à l'angle de latitude locale, le deuxième axe de rotation est perpendiculaire au l'axe polaire, l'angle de suivi autour l'axe polaire est égale à l'angle heure de soleil et l'angle de suivi autour le deuxième axe dépend de l'angle déclination.[34]

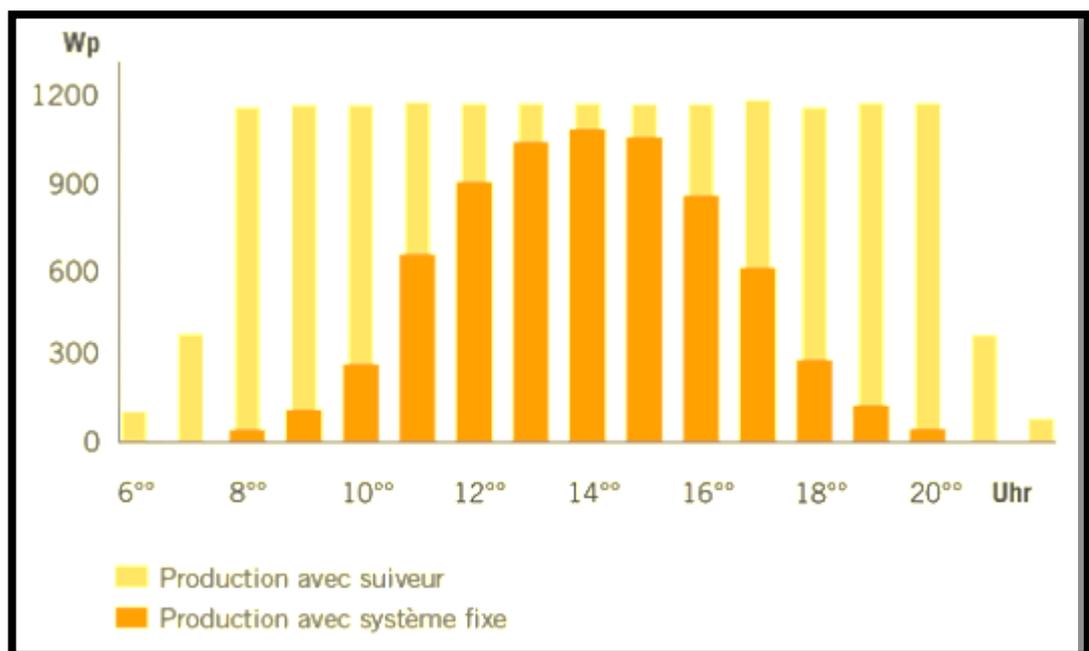
**III.2.3 .3 .Type de commande :**

- Analogiques : la commande est générée en fonction des informations fournies par un capteur qui identifie la position du point le plus lumineux dans le ciel.
- Numériques : la commande provient d'un microprocesseur qui, à l'aide de tableaux mémorisés, connaît à tout moment la position du soleil dans le ciel.[14]

### III : 2.4 .L'intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes :

Lorsqu'un panneau photovoltaïque est fixe par rapport au sol et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord), son rendement énergétique n'est pas constant au cours de la journée : en début et en fin de journée, le mauvais angle d'éclairement du panneau diminue le rendement de la production électrique.

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 idéal, voisin de  $90^\circ$ , la production électrique par  $m^2$  de panneau atteint alors son maximum.



**Figure :III.6** : comparaison entre système fixe et système suiveur toute l'année

Le diagramme comparatif de production électrique montre 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.

### III.2.5. Les Avantages et Les inconvénients des systèmes de suivi solaire :

#### Les Avantages :

Les Systèmes de suivi solaire sont utilisés pour orienter les panneaux photovoltaïques continuellement vers le soleil et peuvent aider à maximiser L'investissement dans le système PV. Ils sont bénéfiques car la position du soleil dans le ciel va changer progressivement au cours d'une journée et au fil des saisons tout au long de l'année.

- Les avantages à l'aide d'un système de suivi comme celui-ci dépendra principalement de son placement dans la détermination de la façon dont elle va augmenter l'efficacité des panneaux. Ils peuvent être utilisés plus efficacement dans certaines zones. et horizons des endroits qui sont l'ombre libre de l'aube au crépuscule chaque jour. Tout au long de l'année, le tableau de suivi sera en mesure d'utiliser l'accès grand ouvert à gagner chaque électron disponible à partir du soleil.

- De cette façon, le produit d'énergie a un rendement optimal. Ceci est particulièrement important dans les mois d'été avec ses longues journées de soleil pour la capturer et quand, à de nombreuses latitudes du Nord, le soleil se lève dans le nord-est et se couche à l'ouest, pas d'énergie perdue.

- Pour ceux avec un espace limité, cela signifie qu'un petit tableau ne doit être installé, un énorme avantage pour les sites plus petits avec seulement une petite zone pour placer les équipements, ils seront en mesure de produire l'énergie maximale, mais il suffit d'utiliser l'un des petits systèmes solaires domestiques.

- Le rendement des panneaux photovoltaïques est accru de 30 à 40%

- La surface du parc solaire est réduite tout en gardant le même potentiel

- Le temps de retour sur investissement est réduit

- Amortissement du système en 4 ans (en moyenne)

#### **Les inconvénients:**

- Le PV maison kit système (installation fixée) nécessitent peu d'entretien. En ajoutant un système de suivi solaire pour les panneaux solaires, en ajoutons des pièces mobiles et des appareils qui nécessitent un entretien régulier de système solaire et de la réparation ou le remplacement des pièces cassées..[35]

#### **III : 2.6.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 de 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 [36]

**a) Angle de zénith :** C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil, il est donné par L'équation suivante :

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

- b) **Angle d'azimut** : 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: [31]

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

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{\sin w \cos \delta}{\sin \theta_z}\right) \quad (III.3)$$

$$\sigma_{ew} = \begin{cases} 1 & \text{si } |w| \leq w_{ew} \\ -1 & \text{autrement} \end{cases} \quad (III.4)$$

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

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

$$\sigma_w = \cos^{-1}(\cos \varphi \tan \delta) \quad (III.7)$$

- c) **Angle extérieur d'azimut  $\gamma$**  :

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 angle entre le méridien local et la projection horizontale de la normale avec la surface.

- d) **Angle d'incidence**

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:

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

$\gamma$ : Angle d'azimut extérieur.

$\gamma_s$ : Angle d'azimut.

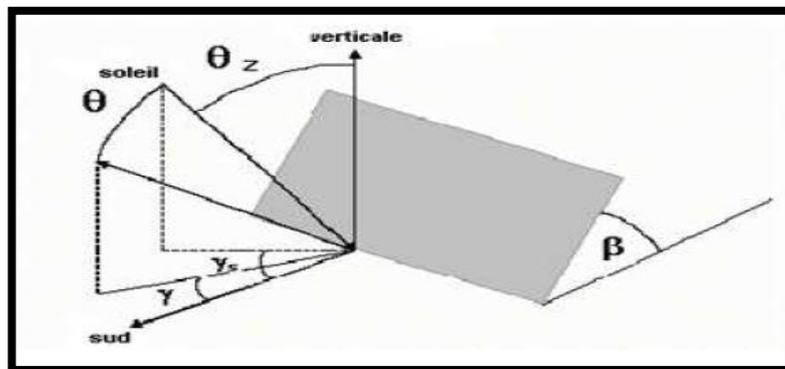


Figure : III.7 : position du soleil par rapport à une surface inclinée [37]

**III : 2.7 : Orientation de la surface :**

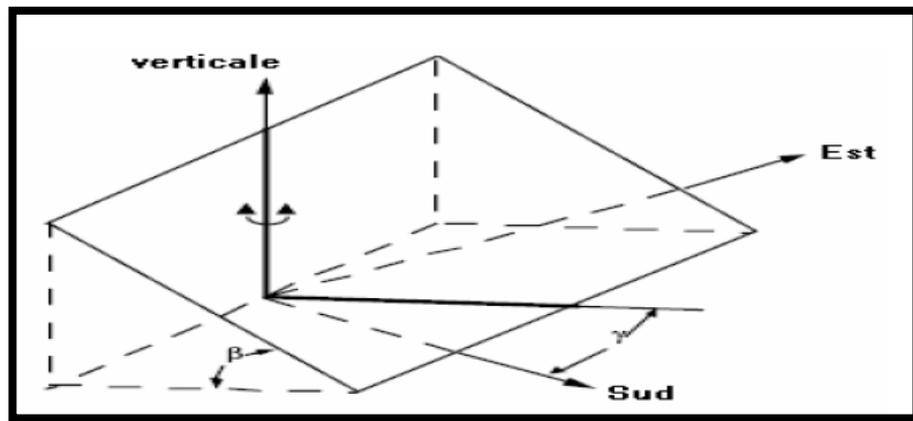
La position du soleil dans le ciel change tout au long du jour et de l'année. Pour une Surface : suivre le mouvement apparent du soleil équivaut à orienter cette surface par la rotation de ses axes.

**III : 2.7 .1 : Rotation suivant un axe :**

Certains types de collecteur à concentration fonctionnent avec la rotation autour d'un seul axe, il existe deux modes :

**a) 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 montré sur la figure(III.8) Pour ce cas, le rayonnement solaire est maximum quand  $\gamma = \gamma_s$



**Figure : III.8** Orientation d'une surface (axe vertical)[36]

**b) 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 :

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

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

$$\gamma = \gamma' + 90^\circ \text{ si } \gamma_s - \gamma' \geq 0 \quad (III.10)$$

$$\gamma = \gamma' - 90^\circ \text{ si } \gamma_s - \gamma' < 0 \quad (III.11)$$

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.



Les capteurs photosensibles peuvent être passifs ou actifs. Les capteurs actifs à Cellules solaire ou photopiles au silicium amorphe ou poly cristallin. Ces composants sont très onéreux et le courant de sortie disponible est très faible pour de petite taille. Les photodiodes dont le courant de court-circuit est fonction du flux lumineux, La petite taille de la surface active  $7,5mm^2$  est la cause de la saturation. Les capteurs passifs à LDR (Light Dépendent Résistor) a résistance photo-dépendante sont des composants électroniques dans la résistivité varie en fonction du flux lumineux incident. La relation liant la résistance  $R$  au flux lumineux  $\phi_l$  est de la forme :  $R = A/\phi_l^\alpha(\Omega)$

Les constantes  $A$  et  $\alpha$  sont respectivement des constante de l'ordre de [ 340 103] et 0.85 et  $\phi_l$  représente l'éclairement lumineux. La taille d'une LDR de 5 mm, le cout vraiment très bas par rapport aux photopiles les LDR présentent une solution optimale. L'étendu de mesure d'une LDR est beaucoup plus important qu'une photopile et utilisation en plein air il faut utiliser un filtre (vitre teintée).



Figure:III.10: la photorésistance [31]

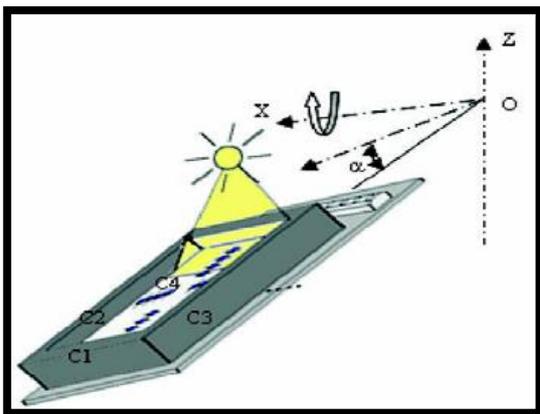


Figure : III.11: capteur pour le mouvement vertical[35]

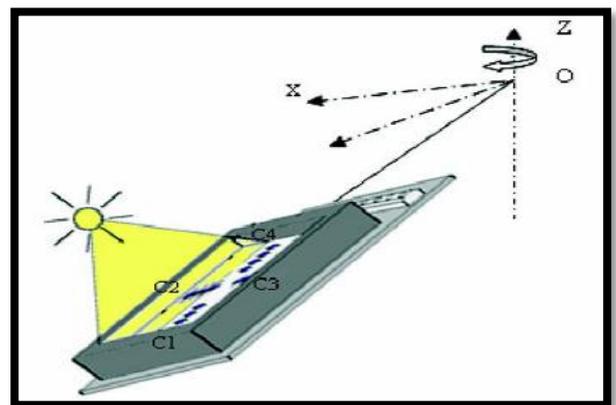


Figure : III :12 : capteur pour le mouvement horizontal[35]

### III.3 : Le principe du tracker solaire avec l'Arduino :

Tracker solaire avec Arduino se base principalement sur un automate capable de suivre une source lumineuse en s'orientant de façon optimale en direction des rayons lumineux. Les mouvements de rotations se produisant selon deux axes (vertical et horizontal) en utilisent donc deux moteurs commandés par carte Arduino (le microcontrôleur).

La méthode utilisée est comparable à celle de l'asservissement. Le panneau solaire est équipé de quatre capteurs photosensibles et il s'oriente en fonction de la luminosité reçue par chaque capteur. Programme compare la luminosité reçue par chaque capteur et ajuste la position si une différence est détectée. Par exemple, si les capteurs du haut reçoivent plus de lumière que ceux du bas, le programme va détecter cette différence et va orienter le panneau vers le haut pour compenser. Ce sera le même principe pour la gauche et la droite.

La programmation de la carte Arduino a été nécessaire pour que le montage puisse fonctionner sans connexion avec l'ordinateur, le code étant enregistré sur la carte Arduino



Figure :III.13 : Une carte Arduino[14]

### III.4. Les moteurs utilisés dans un suiveur solaire :

La rotation de panneau se fait par un moteur électrique. Les moteurs les plus utilisés ceux sont les moteurs pas à pas et les moteurs à courant continu dans ce qui suit en vont présenter ces types des moteurs.



Figure : III.14: un moteur installé au suiveur solaire

### III.4 .1 : Les moteurs pas à pas :

Le moteur pas à pas fut inventé en 1936 par Marius Lavet , ce type de moteur est un convertisseur électromécanique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsionnel en un déplacement mécanique (angulaire ou linéaire)

Ils sont très courants dans tous les dispositifs où l'on souhaite faire du contrôle de vitesse ou de position en boucle ouverte . L'usage le plus connu du grand public est dans les imprimantes et les scanner, les photocopieurs, robotique, instrumentation, système de positionnement sur machine industriel

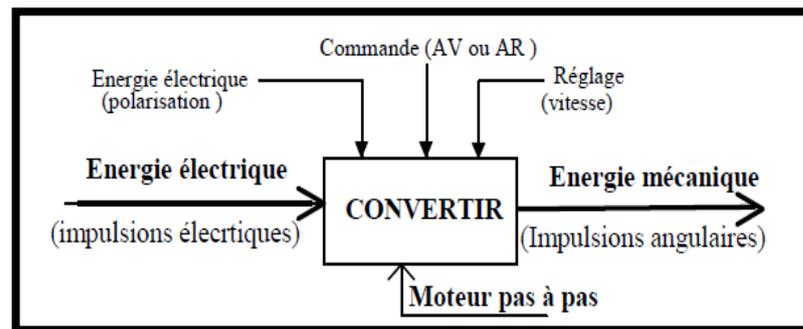


Figure :III.15 :principe d'un moteur pas à pas

#### III.4.1.1 : Généralité sur les moteurs pas à pas :

-Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques reçues dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas

-Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor. L'interaction électromagnétique entre ces deux parties assure la rotation

- Le moteur pas à pas a été conçu à partir de deux démarches logiques très différentes :

- d'une part on a cherché un moteur capable de développer un couple important à faible vitesse voire même à l'arrêt.

- d'autre part on a étudié un dispositif capable de convertir des informations de caractère discret.

- Le moteur pas à pas est actuellement le principal élément intermédiaire entre les dispositifs de traitement d'information et le monde électromécanique extérieur. Par ailleurs, ses capacités à contrôler la position et la vitesse, par un train d'impulsions de commande, assurent à ce

convertisseur des applications comme : la traction des robots mobiles, le fonctionnement en moteur couple de grande puissance, l'indexage rotatif ou linéaire.

- Malgré les différences existant entre les moteurs, le résultat recherché est l'avance d'un seul pas en général compris entre  $0.9^\circ$  et  $90^\circ$ . Les moteurs les plus couramment rencontrés présentent des pas de :

- $0.9^\circ$  soit 400 pas par tour.
- $1.8^\circ$  soit 200 pas par tour.
- $3.6^\circ$  soit 100 pas par tour.
- $7.5^\circ$  soit 46 pas par tour.
- $15^\circ$  soit 24 pas par tour.

Il est évident que les moteurs pas à pas, de par leurs technologies, présentent une très grande précision et une durée de vie quasi illimitée, l'usure mécanique étant pratiquement inexistante (absence de frottement).

-Les moteurs pas à pas existent entre différentes tailles qui varient entre 1 cm et plus d'une dizaine de centimètres. Tout dépendra des applications dans lesquelles ils seront utilisés.

[42][43]

#### **III.4.1.2. Les différents types de moteur pas à pas :**

Les moteurs pas à pas sont identiques dans leurs fonctionnements, ils diffèrent cependant dans leur constitution et leur domaine de travail, ils peuvent être rangés en trois catégories constructives.

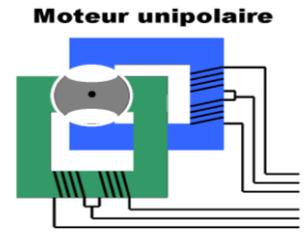
- les moteurs à aimant permanent
- les moteurs à reluctance variable
- les moteurs hybrides [44]

❖ **Les moteurs à aimant permanent :** Le rotor comporte des aimants permanents radiaux et le stator est constitué de bobinages. Lorsque chaque phase statorique est alimentée séquentiellement, le flux statorique réagit avec le flux rotoriques des aimants ce qui tend à aligner les deux flux le long d'un axe de réluctance minimum (Loi d'attraction des pôles de noms contraires).

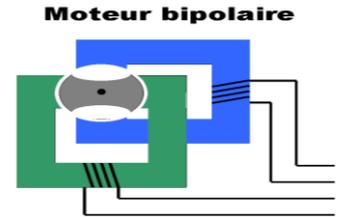
Le rotor se met en mouvement rotatif pas à pas pour suivre l'alimentation successive des phases statorique. Ces moteurs sont assez efficaces, souples et délivrent un couple

relativement important même lorsque le moteur n'est plus alimenté, mais le nombre des pas par tour est faible, cette catégorie de moteur se subdivise en deux types :

**A) Moteur unipolaire** : Le stator comprend deux circuits magnétiques décalés de  $90^\circ$ . Les enroulements à point milieu sont alimentés avec une polarité toujours du même signe, d'où le nom d'unipolaire.

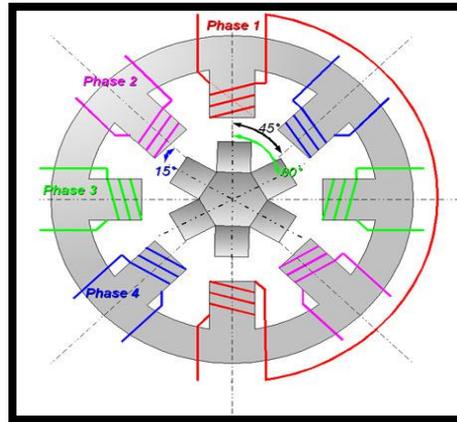


**b) Moteur bipolaire** : Les enroulements au stator n'ont pas de point milieu, chaque borne de chaque enroulement est alimentée successivement par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire). phases est égale au nombre d'enroulements.[14]



❖ **Les moteurs à réluctance variable** : Le couple moteur est dû à la variation de la réluctance du circuit magnétique de la machine. On obtiendra avec ces moteurs des fréquences de travail élevée. Ces moteurs existent sous forme de plusieurs structures ; moteurs à simple circuit magnétique et moteur à plusieurs circuits magnétiques.

**A) Moteur réluctance a simple circuit** : Ce moteur est plus compact. Sa structure est simple. Son pas angulaire peut prendre pour chaque moteur une valeur entre  $1.8^\circ$  et  $30^\circ$



**Figure III.16:** Moteur à réluctance variable (MRV) a circuit magnétique simple.[42]

**B) Moteur réluctance multi-circuit** : Ces moteurs sont les plus anciens, L'avantage de cette structure permet d'éliminer toute inductance mutuelle entre phases statiques. La disposition du rotor peut se faire de deux façons différentes :

Les stators sont en phase et les rotors sont régulièrement décalés.

Les rotors sont positionnés de manière identique et les stators sont décalés.

- ❖ **Les moteurs pas à pas hybride** : Le moteur pas à pas hybride ou moteur possède l'avantage d'associer le phénomène de la réluctance variable à une excitation par aimant permanent.

On superposant le principe du moteur à réluctance variable et à aimant permanent on obtient un moteur hybride qui combine les avantages des deux moteurs, d'où le nom hybride.

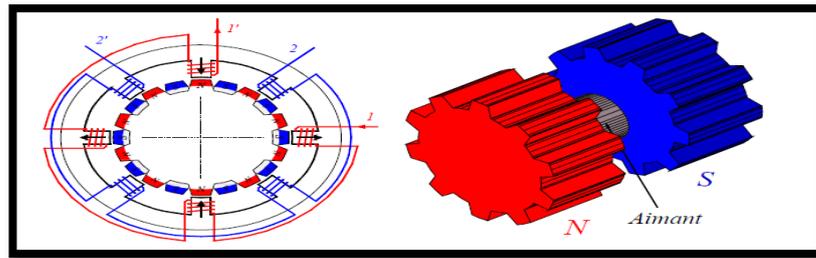


Figure : III.17 : le moteur pas à pas hybride. [42]

#### III.4.2. Les moteurs à courant continu :

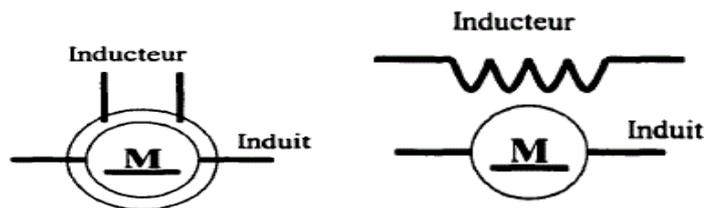
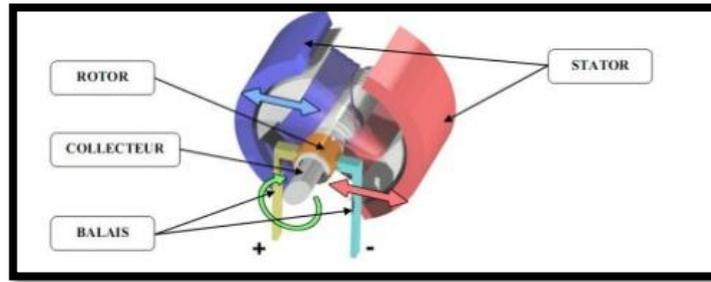


Figure : III.18: symbole du moteur

##### III.4.2.1. Description d'un moteur à courant continu :

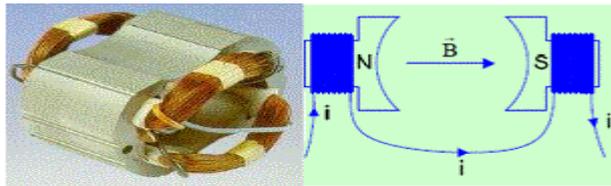
Un moteur à courant continu est une machine électrique il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique d'où l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique [47]



**Figure : III.19 :** Schéma d'un moteur à courant continu [47]

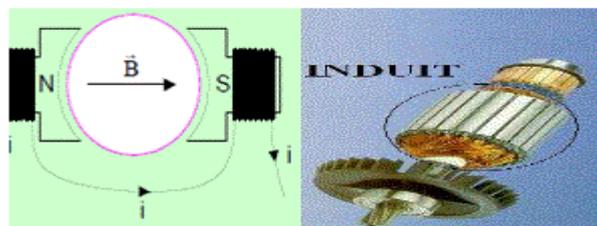
**Un moteur à courant continu est constitué : [47]**

D'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un fluide magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statorique (bobinage) soit par aimants permanent à l'arrière du stator il trouve la partie porte balais et les balais assurant les contacts électrique avec le rotor il est aussi appelé inducteur



**Figure : III.20:** le stator [49]

D'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulement d'induits



**Figure : III.21:** le rotor [49]

Le collecteur et les balais : Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres, réunies aux conducteurs de l'induit en certains points.

Les balais, portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur, et permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine.[47]

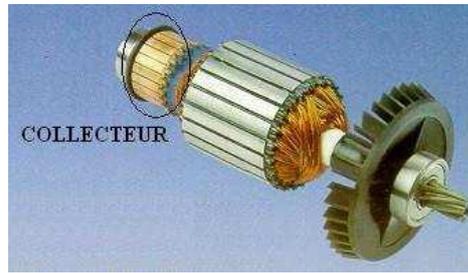


Figure : III .22: le collecteur [49]

### III.4.2.2.Le principe physique fondamental :

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique. De ce principe il découle que tout moteur comporte deux circuits magnétiques, stator (partie fixe) et rotor (partie mobile).

Dans le cas du moteur à courant continu le stator, crée un champ magnétique  $\vec{B}$  Le rotor est alimenté par un courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ  $\vec{B}$ , or le physicien Laplace découvrit que le conducteur est soumis à une force  $\vec{B} \wedge \vec{I}$  ( produit vectoriel entre les deux vecteurs). C'est cette force qui va faire tourner le rotor et créer le couple moteur.

La constitution technologique du moteur matérialise ce principe de fonctionnement.

La machine MCC peut de Fonctionnement en moteur (La Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique) aussi en générateur (La Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique)[48]

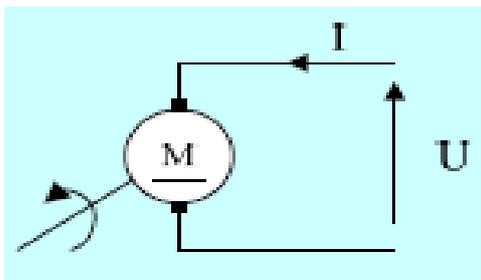


Figure : III .23: fonctionnement en Moteur [49]

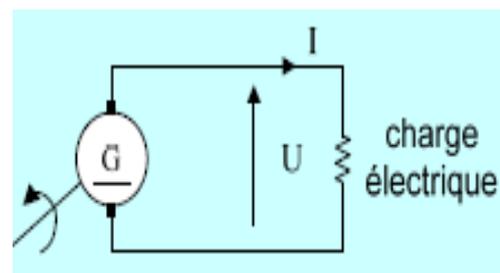


Figure : III.24: fonctionnement en Génératrice (dynamo)[49]

### III.4.2.3: Les différents types de circuit inducteur :

Le circuit inducteur du moteur à courant continu peut être :

- **stator à aimants permanant** : ce type d'excitation est utilisé pour les moteurs de faible et moyenne puissances
- **stator à enroulements et pièces polaires** : ce circuit inducteur est accessible le courant d'excitation est réglable ce qui rend possible le fonctionnement en survitesse [48]

### III.4.2.4: Mode de connexion de l'induit et de l'inducteur :

Il existe plusieurs modes de connexion entre le circuit induit et le circuit inducteur :

Les types des moteurs :

**MCC à excitation shunt** : l'induit est montré en parallèle avec le circuit inducteur

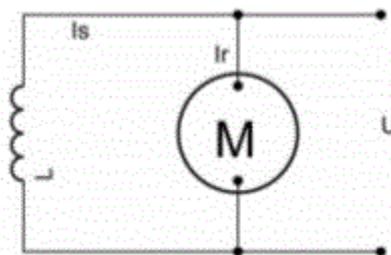


Figure :III.25 :moteur à excitation shunt

**MCC à excitation série** : l'induit est monté en série avec le circuit d'inducteur ce type de moteur est caractérisé par un fort couple à basse vitesse .il est utilisé dans les applications exigeant un couple au démarrage assez élevé (cas de la traction électrique)

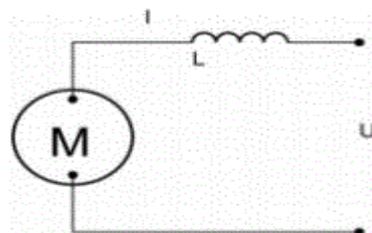


Figure :III .26: .moteur à excitation série

**MCC à excitation indépendante** : l'inducteur est indépendant de l'induit c'est le cas le plus fréquent dans les entraînements électriques à courant continu .le champ d'excitation peut-être constant (cas des aimant permanant)ou maintenu constant (tension et courant d'excitation constant)

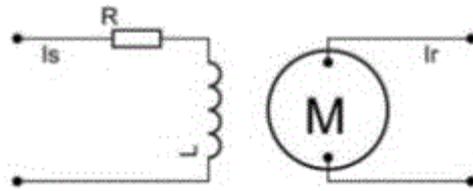


Figure :III .27:moteur à excitation séparée

**MCC à aimant permanent** : ces moteurs sont identiques au moteur à excitation séparée les pôles principaux bobinés étant remplacés par des aimants permanents La perte d'excitation n'est plus possible et les risques d'emballement causés par la perte de celle-ci sont éliminés Les caractéristiques couple-vitesse de ce moteur sont identiques à celles du moteur à excitation séparée cependant le courant de démarrage doit être limité en général à 150% pour éviter de démagnétiser les pole principaux[49]

#### III.4.2.5.Les avantages et les inconvénients d'un moteur à courant continu :

##### Avantage :

- ✓ L'adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation variateurs de vitesse, voire leur raccordement direct à la source d'énergie (batteries d'accumulateur, piles, etc.
- ✓ Ils ne nécessitent pas d'électronique pour les piloter, et peuvent être branchés directement sur une alimentation, des batteries, un variateur de vitesse, ou une carte de positionnement associée à un signal de copie.
- ✓ possibilité d'entraîner de très fortes inerties
- ✓ forte constante de temps mécanique

##### Inconvénients

- ✓ La commutation du moteur à balais nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de pièces mécaniques pour faire la liaison par frottement entre les charbons et le collecteur. Il en découle que :
  - ✓ plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important ;
  - ✓ aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement ;
  - ✓ La température est limitée au niveau du collecteur par l'alliage utilisé pour braser les conducteurs du rotor aux lames du collecteur. Un alliage à base d'argent doit être utilisé lorsque la température de fonctionnement dépasse la température de fusion de l'alliage classique à base d'étain.[50]

Le tableau ci-après donne un certain nombre d'éléments de comparaison entre les MCC et les moteurs pas à pas [44]

<b>Moteur pas à pas</b>	<b>Les moteurs à courant continu</b>
Commande relativement complexe	Commande simple
Pas de réinjection pour le repérage de la position (régulation en boucle ouverte)	Nécessite d'un repérage (potentiomètre-codeur tachymètre)
Robuste usure lente moteur pouvant être étanche	Usure de balais
Bonnes caractéristiques d'immobilisation asservie électriquement	Blocage par dispositif mécanique
Couple massique important obtenu à faible fréquence d'alimentation	La vitesse dépend de la tension d'alimentation
Il y a un champ tournant et une position définie	Il y a pas de champ tournant car celui-ci est sans cesse maintenu en quadrature par le collecteur et pas de position définie
La position est définie par le séquence de commutation	Couple indépendant de la vitesse et la position
La vitesse dépend uniquement de la tension d'alimentation	

#### **III.4.2.6 .Conclusion**

Dans Ce chapitre on à vue une description du système poursuite solaire ,ainsi les avantage de système de poursuit .en fin l'élément essentiel composant du suiveur c'est le moteur électrique.

*Chapitre IV :*  
*Commande d'un*  
*moteur utilisée dans*  
*un suiveur solaire*

### VI.1 : Introduction :

Les moteurs à courant continu asservis en position (ou en vitesse) sont utilisés dans de très nombreuses applications : Pilote automatique de bateau, volets de freinage sur les ailes des avions, systèmes de pointage des télescopes, et le suiveur solaire à cause de leur facilité de commande. dans ce chapitre nous allons présenter la commande d'un moteur à courant continu utilisé dans un suiveur solaire de telle façon le panneau solaire sera exposé au rayon solaire pendant toute la journée (optimisation de rendement) alors la commande de position de moteur à l'aide d'un capteur solaire fixé sur ce panneau.

### IV .2.Expression électrique et mécanique de la MCC :

#### IV .2 .1.Description des pertes

- ✓ **Pertes dans le fer** : Elles sont dues aux phénomènes d'hystérésis. Elles sont fonction du champ magnétique et de la vitesse de rotation. On les appelle aussi *pertes magnétiques*.
- ✓ **Pertes mécaniques** : Elles sont produites par la ventilation et les divers frottements (frottements de l'arbre dans les paliers, frottements des balais sur le collecteur). Ces pertes sont à peu près indépendantes de la charge, donc de  $I$  ; par contre elles dépendent de la vitesse.
- ✓ **Pertes par effet joule dans l'induit** Pratiquement négligeables à vide elles varient fortement avec la charge. Dépend de la résistance  $R$  du circuit induit et du courant  $I$  qui traverse ce dernier [52]

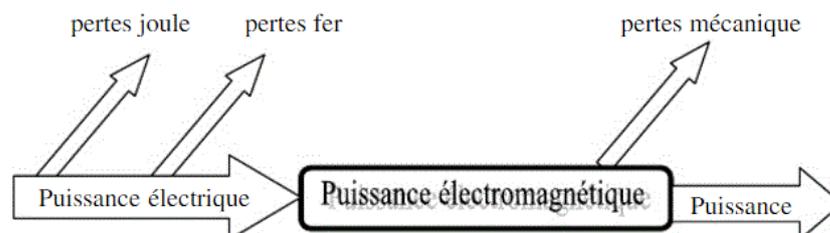


Figure : VI.1 : Bilan de la puissance d'un MCC

#### IV .2 .2.Expression du couple électromagnétique :[51]

Si l'induit présente une f.é.m. induite  $E$  et s'il est parcouru par un courant  $I$ , il reçoit une puissance électromagnétique.  $P_{em}$

$$P_{em} = E \times I \quad (IV .1)$$

$E$  : Tension d'induit

La puissance développée par le couple électromagnétique est:

$$p_{em} = T_{em} \times \Omega \quad (\text{IV.2})$$

D'après le principe de conservation de l'énergie, on a  $P_{em} = P$ .

D'où 
$$E \times I = T_{em} \times \Omega \Leftrightarrow T_{em} = \frac{E \times I}{\Omega} \quad (\text{IV.3})$$

$$E = K_e \times \phi \times \Omega \quad (\text{IV.4})$$

$$T_{em} = K_e \times I \times \phi \quad (\text{IV.5})$$

$E$ : tension d'induit

$\Omega$ : la vitesse angulaire ( $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ )

$\phi$ : le flux utile (Wb)

$K_e$ : le constant de la machine  $K = \frac{p}{2\pi a} N$

$P$ : Nombre de pair de pole

$a$ : Nombre de pair de voie d'enroulement

$N$ : Nombre de conducteur

✓ **Rendement** :  $\eta = \frac{P_U}{P_{abs}}$

$P_U$ : Puissance utile en sortie moteur (sur l'arbre) (W)

$P_{abs}$ : Puissance absorbée par l'inducteur en entrée (W)

### IV.3. Réglage de la vitesse d'un moteur :

Soit un moteur à excitation séparée shunt fonctionnant en régime établi, la tension appliquée aux bornes de l'induit est  $U_i$  et la machine tourne à la vitesse angulaire  $\Omega$ . [48]

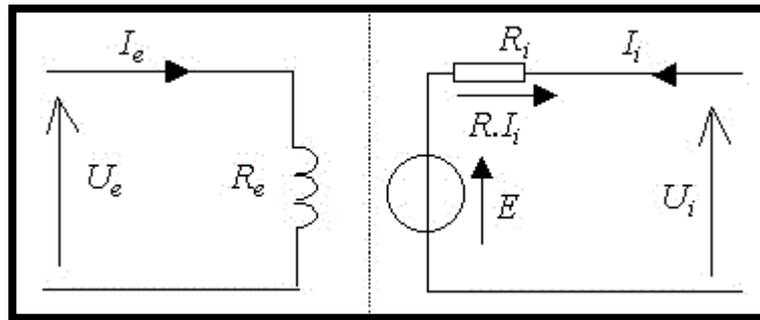


Figure : VI.2 : Moteur à excitation séparé

Les équations de base sont :

$$U_i = E + R_i \cdot I_i \quad (VI.6)$$

Et 
$$E = K \times \phi \times \Omega \quad (VI.7)$$

Donc l'expression de vitesse est donnée par : 
$$\Omega = \frac{U_i - R_i I_i}{K \times \phi} \quad (VI.8)$$

Elle peut donc être modifiée en agissant sur les trois paramètres :  $R_i$ ,  $\phi$ ,  $U_i$ , Le couple moteur. Donc le courant d'induit étant considéré constant (couple résistant constant) il en résulte trois modes de réglage de vitesse

### IV.3.1. Réglage par rhéostat :

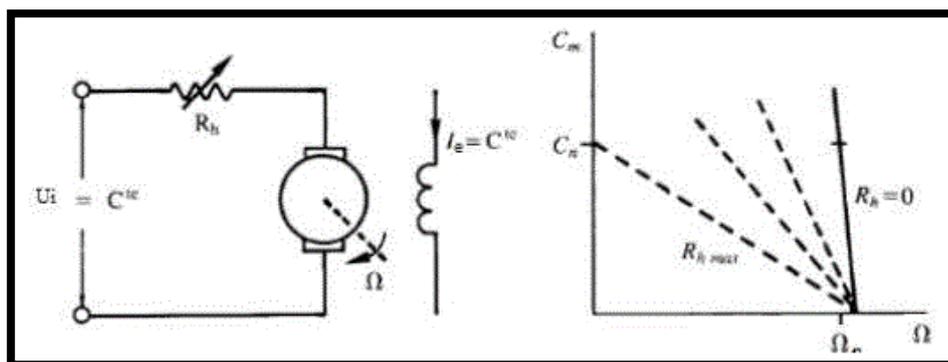


Figure : IV.3 : Réglage rhéostatique

Les paramètres  $U_i$  et  $\phi$  étant fixés à leur valeur nominale et le couple moteur étant constant, la vitesse peut être variée en introduisant un rhéostat  $R_h$

$$\Omega = \frac{U_i}{k \times \phi} - (R_i + R_h) \frac{I_i}{k \times \phi} \quad (VI.9)$$

Au démarrage on obtient :  $\Omega=0$  et  $I_i = \frac{U_i}{R_i+R_h}$  (VI.10)

Au mesure que la vitesse augmente la valeur de la résistance série  $R_h$  est diminuée permettant et maintenir le courant donc le couple constant la caractéristique mécanique est une série de droites

$$T_{em} = 0 , I_i = 0 , \quad \Omega = \frac{U_i}{k \times \phi} \quad (VI.11)$$

**Les inconvénients de cette solution sont :**

- Des caractéristiques d'allure série le point de fonctionnement devant fortement dépendant du couple résistant
- Une importante dissipation d'énergie dans le rhéostat

Ce système n'est donc employé que pour le démarrage ou freinage du moteur en particulier en traction électrique

### IV.3.2. Réglage par flux :

Afin d'obtenir le couple maximal au démarrage, le flux d'excitation doit être à sa valeur nominale aux vitesses faibles toute réduction de flux ne peut donc entraîner qu'une augmentation de la vitesse au – dessus de la vitesse nominale

Il faut noter cependant que dans ce mode de réglage le couple correspondant au courant nominal de la machine diminue dans les mêmes proportions que la réduction du flux de plus dans cette région la tension d'alimentation d'induit étant constante pour un courant d'induit constant égal à la valeur nominale le moteur fonctionne à puissance constant donc avec un couple maximum décroissant avec la vitesse

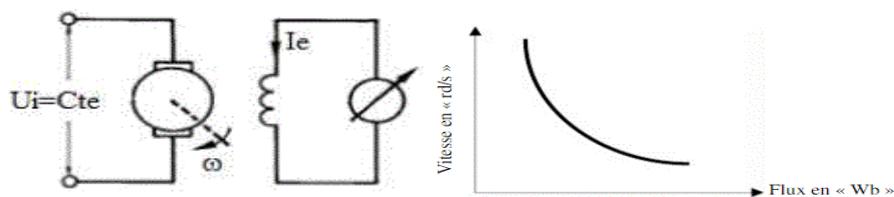


Figure : IV.4 : Réglage par flux

Figure : VI.5 :Variation de la vitesse en fonction du flux

Le flux étant réglé à sa valeur nominale la vitesse peut être variée d'une valeur nulle à la valeur nominale en variant la tension d'alimentation de l'induit de zéro à la valeur nominale

On obtient alors des caractéristiques parallèles à la caractéristique nominale[48]

### Les avantages de cette solution sont :

- un contrôle de vitesse sans pertes d'énergie contrairement au réglage rhéostatique
- la conservation de caractéristique mécaniques à l'allure shunt

Cette solution est donc la plus couramment employée pour le réglage de vitesse elle requiert cependant une alimentation en courant continu variable de puissance environ égale à la puissance maximale du moteur

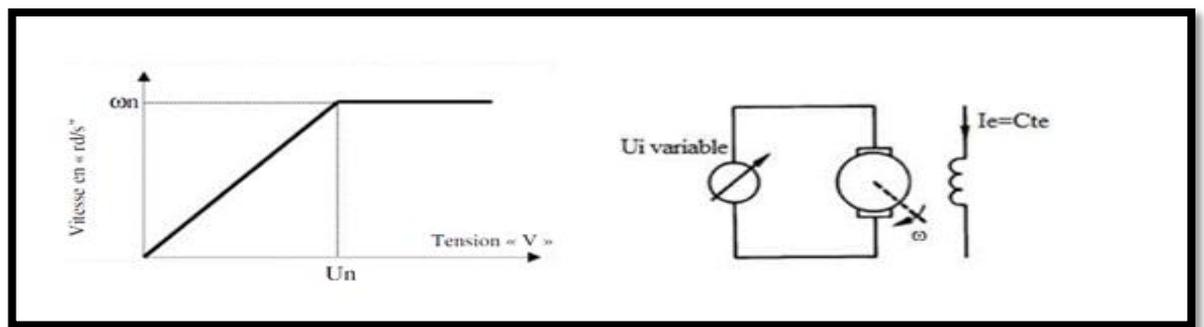


Figure : VI.6 : Réglage par tension d'induit

### IV.4 : Point de fonctionnement d'un moteur :

Une charge oppose au moteur un couple résistant  $T_{rés}$  pour que le moteur puisse entraîner cette charge le moteur doit fournir un couple utile  $T_u$  de telle sorte que  $T_{rés} = T_u$  c'est de fonctionnement de l'ensemble moteur + charge[53]

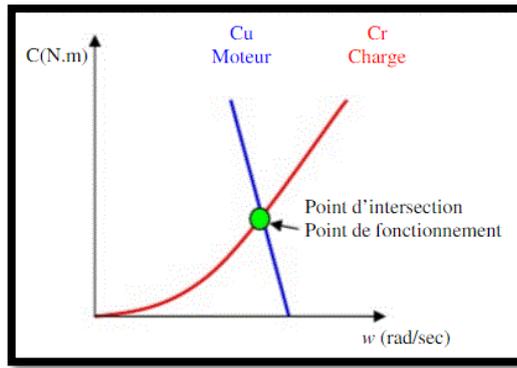


Figure :VI.6 :point de fonctionnement

**IV.5 : Modélisation d'un moteur à courant continu :**

Circuit équivalent d'un moteur est donné par la figure (VI.7) suivant : [54]

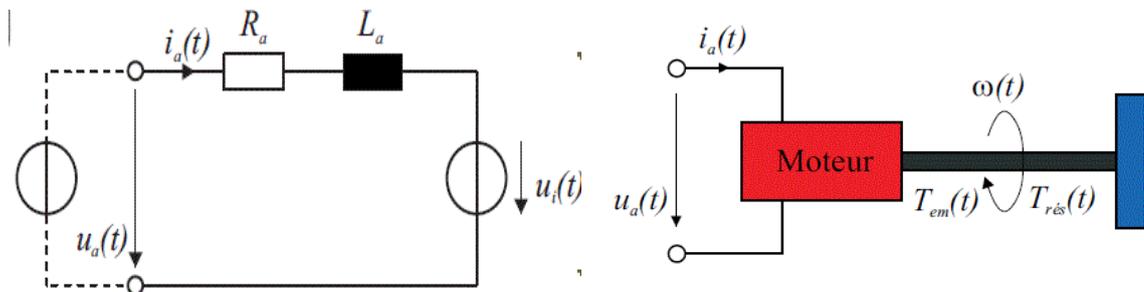


Figure : IV.7 : Schéma équivalent d'un MCC

Un moteur à courant continu est régi par les équations physique découlant de ses caractéristique électrique et mécanique et magnétique

- **Équation électrique :**

$$U_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + U_i(t) \tag{IV.12}$$

$$u_i(t) = K_e \cdot \omega(t) \tag{IV.13}$$

- **Equation mécanique :**

$$T_{em}(t) - T_{res}(t) - f \cdot \omega = \sum j_{tot} \cdot \omega(t) \tag{IV.14}$$

$U_a(t)$  : Force électro motrice (V)

$K_e$  : Constant de la machine (V. s/rad)

$\omega(t)$ :vitesse de rotation de rotor (Rad /S)

$T_{em}(t)$ : Couple électromagnétique (N.m)

$T_{res}(t)$  : Couple résistant (N.M)

$J_{tot}$  : Moment d'inertie (Kg.m<sup>2</sup>)

$K_t$  : Constant de couple (Nm/A)

$f$ : coefition de frottement(kg. m ou N. ms/rad)

$u_i(t)$ : tension appliqué au moteur

#### IV.5.1 : Fonction de transfère du MCC :

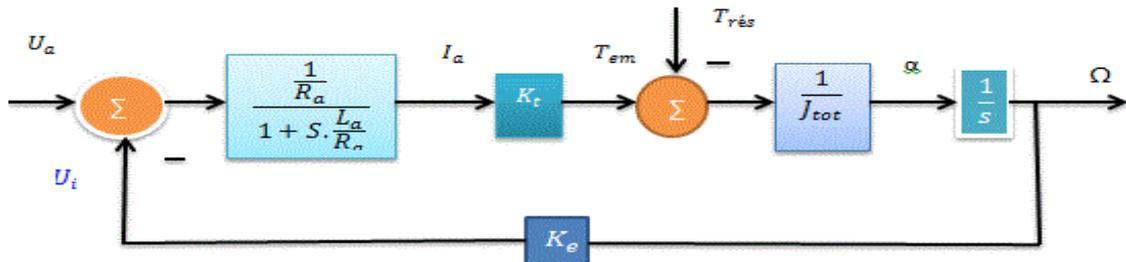


Figure : IV.8 : Schéma fonctionnel du moteur DC avec charge en vitesse

Equation électrique : 
$$U_a(t) - +U_i(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt}$$

La transformé de LAPLLAS

$$U_a(S) - +U_i(S) = R_a \cdot i_a(S) + L_a \cdot S \cdot I_a(S) \quad (IV.15)$$

$$I_a(s) = \frac{U_a(s) - u_i(s)}{R_a + L_a \cdot S} \quad (IV.16)$$

$$I_a(s) = [U_a(s) - U_i(s)] \cdot \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + S \cdot \frac{L_a}{R_a}} \quad (IV17)$$

Equation cinématique sans frottement :  $T_{em}(t) - T_{res}(t) = \sum j \cdot \omega(t) \quad (IV.18)$

$$T_{em}(s) - T_r(s) = J_{tot} \cdot s \cdot \Omega(s) \quad (IV.19)$$

$$\Omega(s) = \frac{T_{em} - T_r}{J_{tot} \cdot s} \quad (IV.20)$$

$$\Omega(s) = [T_{em} - T_r] \cdot \frac{1}{J_{tot} \cdot s} \quad (IV.21)$$

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{1/R_a}{1+s \cdot L_a/R_a} \cdot K_T \cdot \frac{1}{s \cdot J_{tot}}}{1 + \frac{1/R_a}{1+s \cdot L_a/R_a} + K_T \cdot \frac{1}{s \cdot J_{tot}} \cdot K_E} \quad (IV.22)$$

$$G(s) = \frac{K_T}{\left(1 + s \cdot \frac{L_a}{R_a}\right) \cdot R_a \cdot s \cdot J_{tot} + K_T \cdot K_E} \quad (IV.23)$$

$$G(s) = \frac{K_T}{K_T \cdot K_E + s \cdot J_{tot} \cdot R_a + s^2 \cdot \frac{L_a}{R_a} \cdot J_{tot} \cdot R_a} \quad (IV.24)$$

La constante de temps électrique :  $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$  (IV.25)

Et la constante de temps mécanique :  $\tau_m = \frac{J_{tot} \cdot R_a}{K_T \cdot K_E}$  (IV.26)

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{K_E} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_m + s^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_e} \quad (IV.27)$$

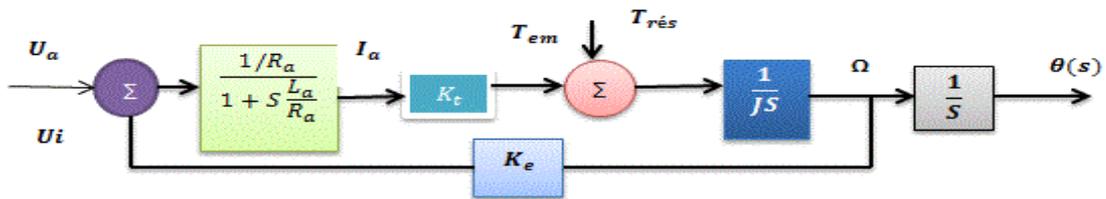


Figure : IV.9 : Schéma fonctionnel du moteur DC avec charge en position

#### IV.6 : L'asservissement :

Un système asservi est un système dit suiveur, c'est la consigne qui varie .Le but du système asservi à feedback est d'obtenir un signal de sortie relié au signal d'entrée par une relation quelconque avec la précision requise. Cette tâche ne constitue qu'une partie de l'objectif du régulateur.[48]

##### IV.6.1 : Fonction d'un régulateur :

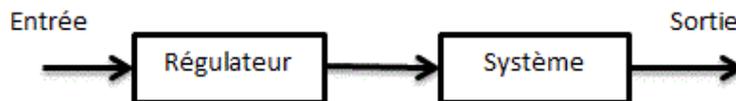
Les fonctions d'un régulateur tel que le régulateur de position ou de courant découlent de l'étude précédente sur les principes de régulation .elles sont principalement :

- La compensation et l'optimisation d'une boucle de régulation indépendamment des autres boucles dans la mesure du possible

- Le contrôle de la rapidité d'évolution des variables asservies (gradient de courant d'induit...)
- La limitation précise de la grandeur d'entrée ou de sortie permettant la limitation des variables asservies, (sortie d'un régulateur de vitesse fournissant la référence de courant dans une régulation en cascade...)
- Le transfert souple du contrôle d'un mode à un autre, ou d'une variable à une autre (commutation du régulateur de vitesse au régulateur de courant dans une régulation de courant dans une régulation parallèle [53])

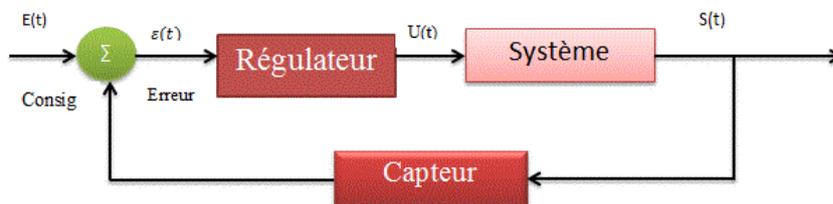
### IV.6.2 : Boucle de régulation ouverte :

Aucune information venant du procédé n'est fournie au contrôleur. Ainsi la sortie de procédé n'affecte pas la sortie du contrôleur.



### IV.6.3 : Boucle de régulation fermée :

Dans le contrôle de boucle fermée, la sortie du procédé est retournée au contrôleur et est utilisée pour ajuster automatiquement la sortie de contrôleur



La grandeur désirée est constamment comparée à la valeur réelle et l'erreur, la régulation en boucle fermée permet en effet de :

- ✓ Réaliser les relations désirées entre une tension de référence et la grandeur de sortie (vitesse, couple, position)
- ✓ Compenser les variations, les imprécisions et les dérives des caractéristiques des éléments du système (moteur, capteur)
- ✓ Réduire l'effet des perturbations externes (variation de la charge du moteur...) sur la grandeur de sortie.[54]

### IV.6.4. Régulateur PID :

La fonction première d'un régulateur en régime dynamique, la compensation et l'optimisation des performances d'une boucle de régulation, est en générale réalisée à

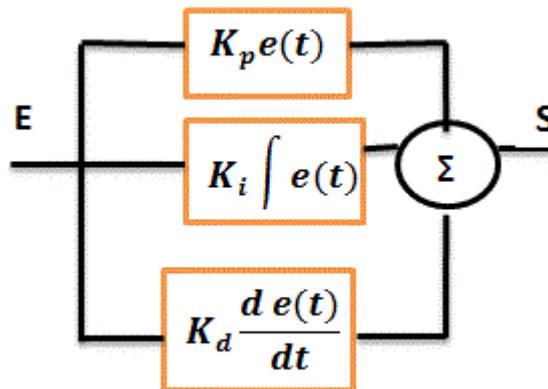
l'aide d'un régulateur du type proportionnelle-intégrateur- dérivateur ou **PID**. Ce régulateur du type peut être considéré comme universel, permettant de compenser la plupart des asservissements, en particulier ceux des machines électriques La sortie du régulateur PID est formée de la somme de trois termes :

- un terme proportionnel de gain **K<sub>p</sub>**, qui dicte la rapidité de réaction de la boucle
  - un terme intégrateur, de gain **K<sub>i</sub>**, qui élimine l'erreur entre la référence et la sortie
  - un terme de dérivée, de gain **K<sub>d</sub>** qui compense les retards et réduit le temps de réponse
- L'équation caractéristique du régulateur est donc :

$$S(t) = K_p E(t) + K_i \int E(t) dt + K_d \frac{d(t)}{dt} \quad \text{IV.28}$$

Ou **E(t)** et **S(t)** sont respectivement les variables d'entrée et de sortie dans le domaine de Laplace on obtient :

$$\frac{S(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad \text{IV.29}$$



**Figure :VI .10** :la représentation d'un régulateur PID

Le terme intégrateur agit aux basses fréquences et le terme dérivateur aux hautes fréquences :  $K_i \gg K_d$

Dans ce cas , la fonction de transfert peut être réduite à :

$$R = \frac{E}{S} = \frac{(1+\tau_1 P)(1+\tau_2 P)}{(1+\tau_3 P)} \quad \text{(IV.30)}$$

Ou :

$$\tau_1 = \frac{K_p}{K_i} = \tau_i \quad \text{( IV.31)}$$

$$\tau_2 = \frac{K_d}{K_p} = \tau_d \quad \text{( IV.32)}$$

$$\tau_3 = 1/K_i \quad \text{( IV.33)}$$

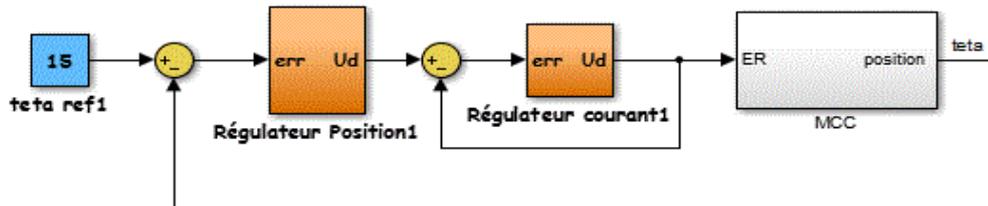
Les régulateurs élémentaires sont un cas particulier du régulateur PID et sont caractérisés par les fonctions de transfert suivantes :

➤ **Régulateurs P**, gain  $K_p$ :  $K_i = K_d = 0$        $R = K_p$       (IV. 33)

➤ **Régulateur PI**, gain  $K_i K_p$ :  $K_d = 0$        $R = \frac{1 + \tau_1 P}{\tau_3 P}$       (IV. 34)

➤ **Régulateur PD**, gain  $K_p, K_d$ :  $K_i = 0$        $R = K_p(1 + \tau_2 P)$       (IV. 35)

➤ **Régulateur I**, gain  $K_i$ :  $K_p = K_d = 0$        $R = \frac{1}{\tau_3 P}$       (IV. 36)



**VI.11 :Régulation à boucles multiples en cascade :**

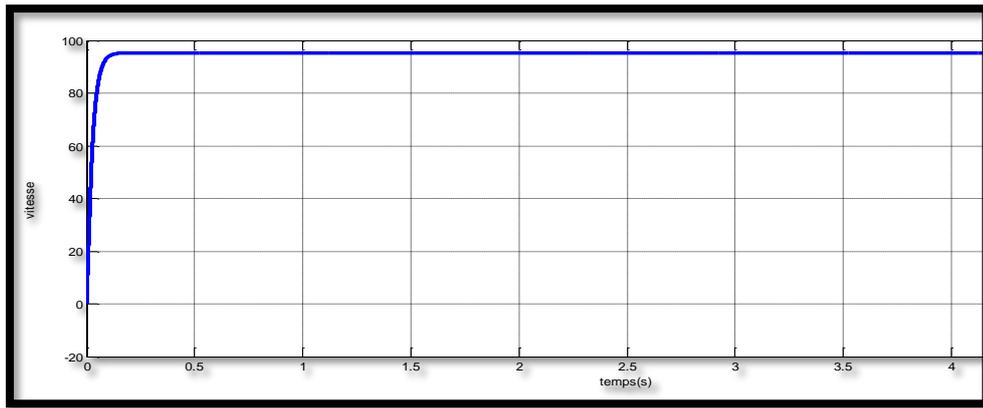
Ce système comporte un régulateur par variable contrôlée la variable principale ou (position) est réglée par la boucle extérieure : la sortie du régulateur de position sert de signal de référence à la boucle intérieure, fixant la référence de la variable secondaire ou (courant)[47]

### IV.7 : Résultat de simulation :

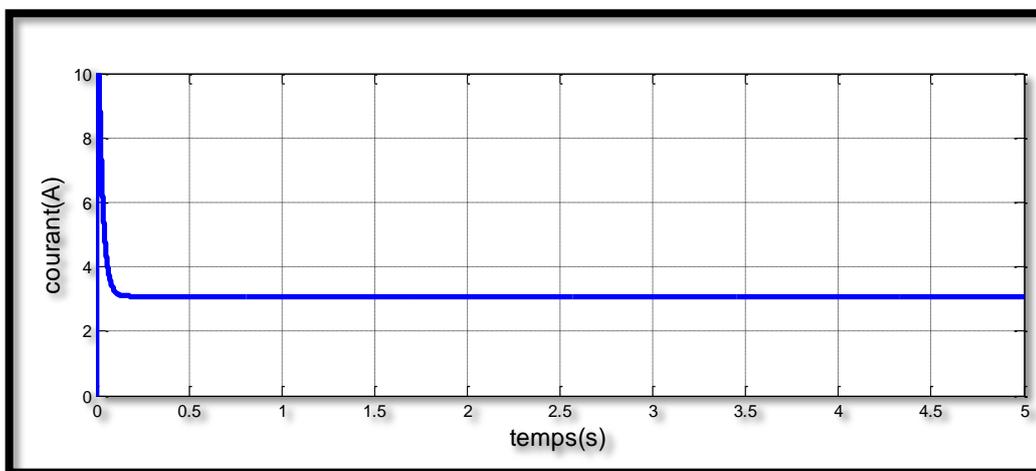
MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, il peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.

Simulink : est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes.[54]

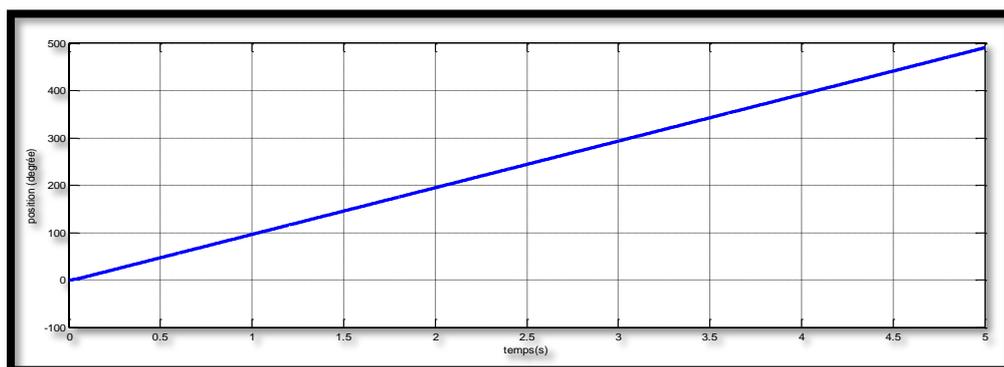
A l'aide de l'extension graphique de MATLAB 'Simulink' on peut simuler le moteur à courant continu asservi par le régulateur PID de vitesse ou de position et par la suite on peut l'implanter ou le réaliser.



**Figure IV.12 :** la réponse en vitesse de la MCC sous MATLAB/SIMULINK



**Figure : IV.13 :** La réponse en courant de la MCC

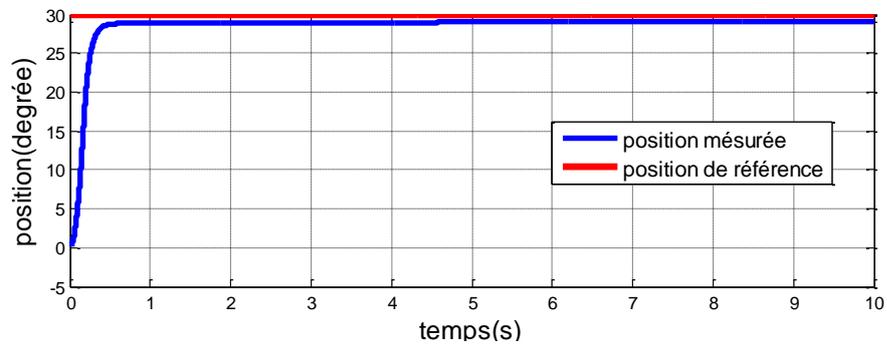


**Figure : IV .14 :** La réponse en position du moteur

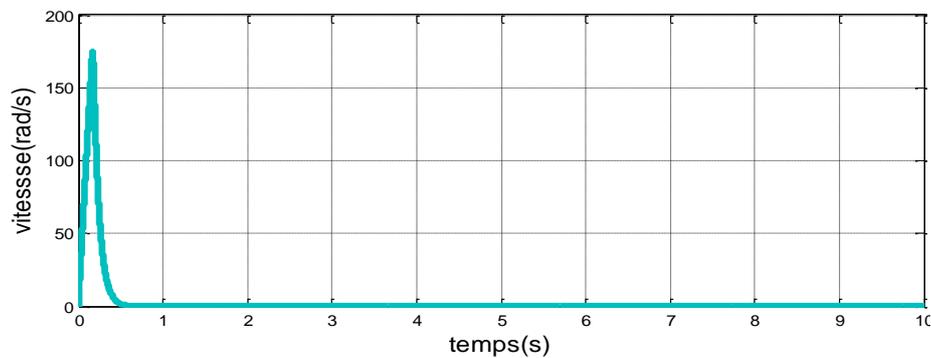
La réponse en position : On voit bien que la réponse en position est un rampe ce qui signifie que le système dans un asservissement en vitesse est stable mais on peut pas designer l'angle (la position) d'où il nécessite un asservissement pour la position ,

Ce qu'on a fait et obtenu comme des résultats de simulation

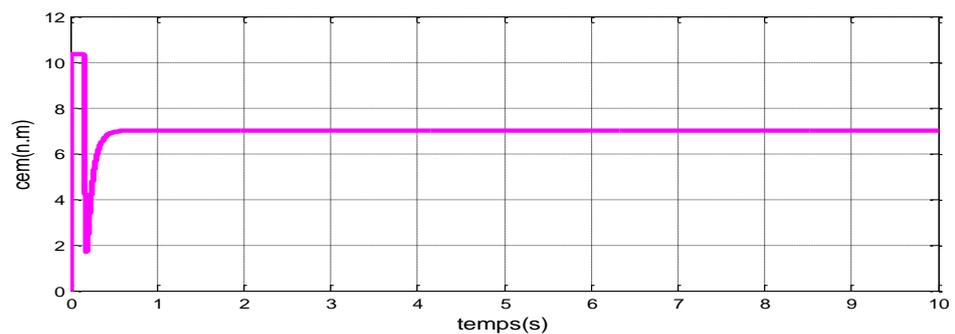
Pour  $\theta_{référence} = 30^\circ$  (position de référence)



**Figure :IV.15** : la position de moteur ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )



**Figure :IV.16** :la vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )



**Figure :IV.17** :le couple électromécanique après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )

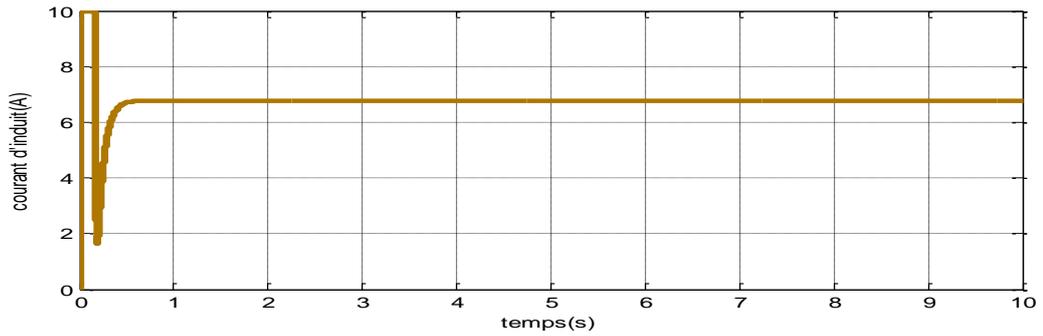


Figure :IV.18 :le courant d'induit après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 30^\circ$ )

Une deuxième essai pour  $teta_{reference} = 60^\circ$  :

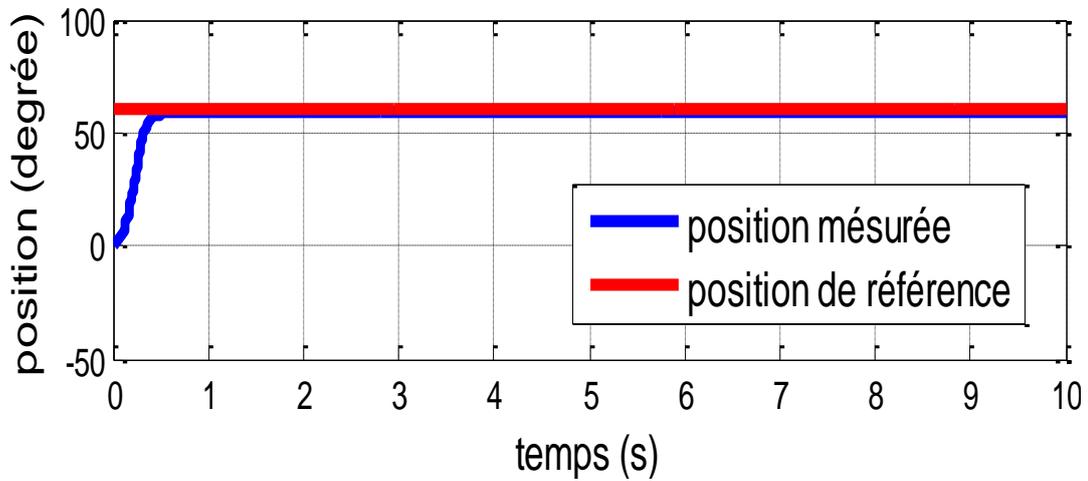


Figure : IV.19 : La position de moteur  $\theta_{ref} = 60^\circ$

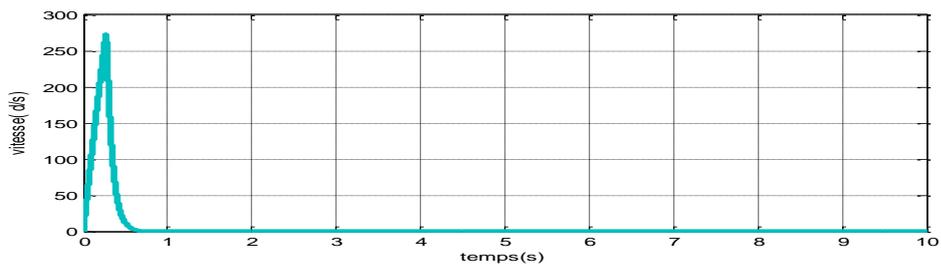
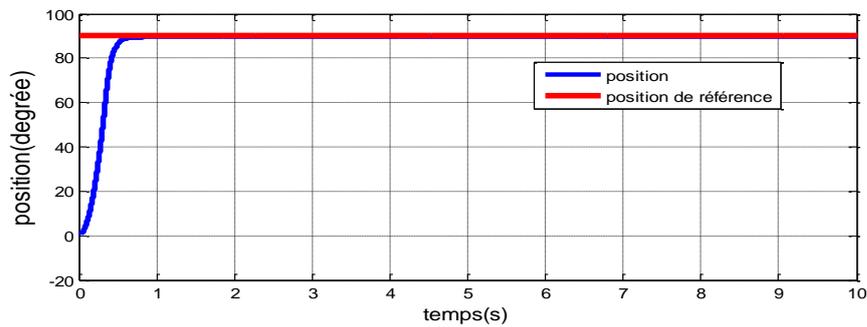
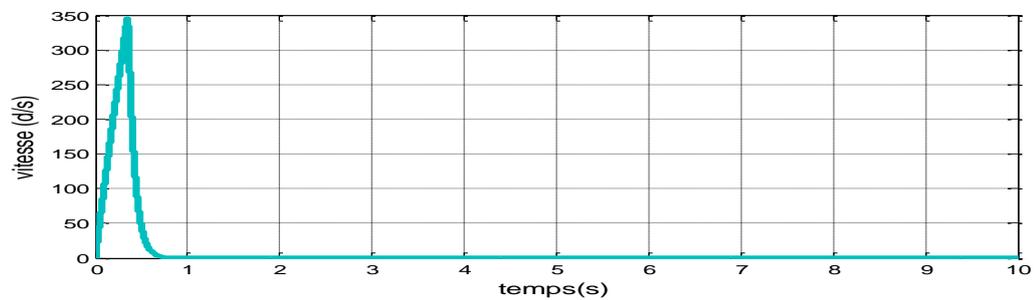


Figure :VI.20:la vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 60^\circ$ )

Une essai pour  $teta_{reference} = 90^\circ$  :

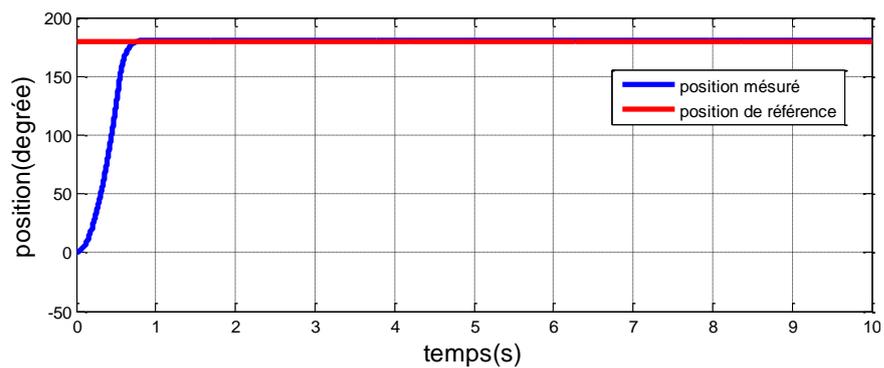


**Figure :IV.21** : la position de moteur ( $\theta_{ref} = 90^\circ$ )



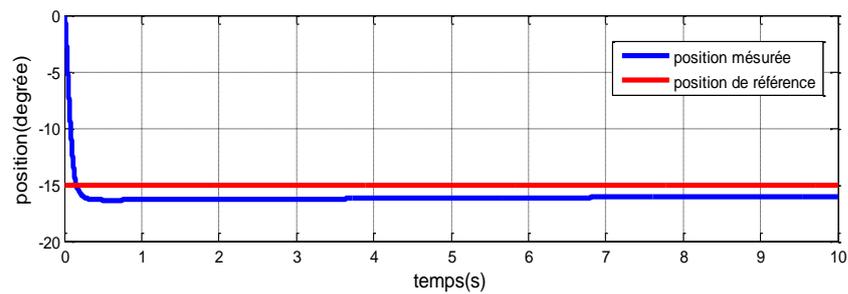
**Figure :IV.22** :la vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = 90^\circ$ )

Un autre essai pour  $teta_{reference} = 180^\circ$  :

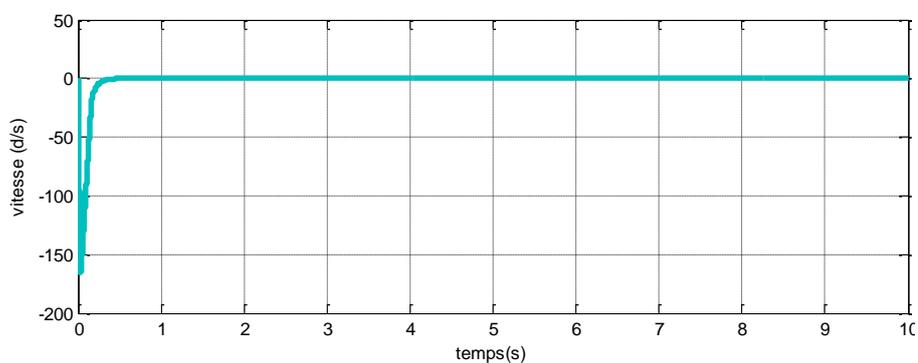


**Figure :IV.23** : la position de moteur ( $\theta_{ref} = 180^\circ$ )

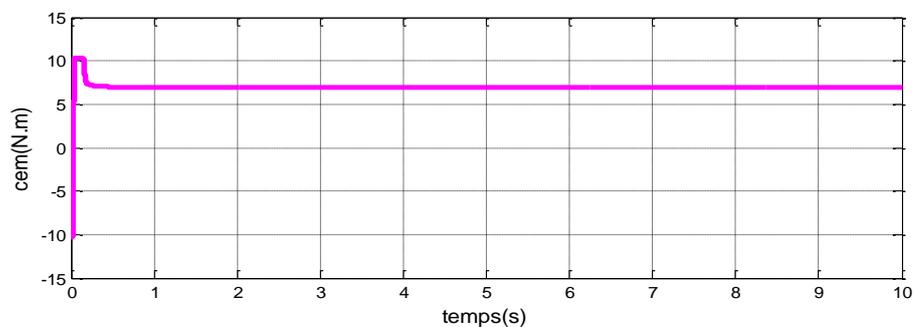
Une essai pour  $\theta_{reference} = -15^\circ$



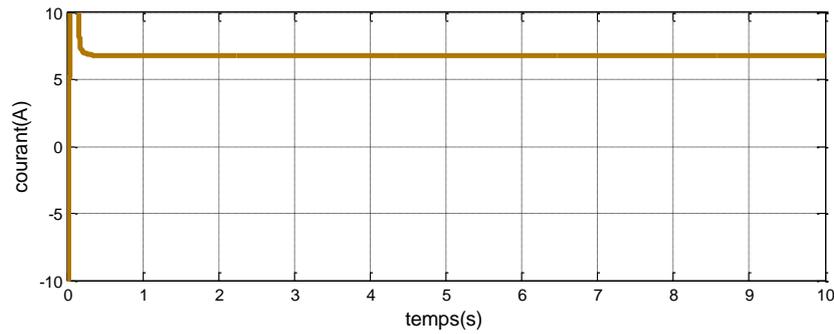
**Figure :IV.24 :** la position de moteur ( $\theta_{ref} = -15^\circ$ )



**Figure :IV.25 :** la vitesse après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = -15^\circ$ )



**Figure :IV.26 :** le couple électromécanique après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} = -15^\circ$ )



**Figure :IV.27** :le courant d'induit après l'asservissement de position ( $\theta_{ref} - 15^\circ$ )

On remarque que le moteur MCC prend plusieurs positions relativement aux positions de soleil, et chaque fois la position de référence est bien suivie par celle du moteur.

La commande est robuste vis-à-vis aux variations des échelons de position. Avec un système stable du courant, du couple et de vitesse.

### **Conclusion :**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons fait un rappel sur les équations électrique électromagnétique et mécanique d'un MCC et nous avons exposé aussi les différents modes de réglage de la vitesse ainsi le modèle d'un moteur à courant continu dans la deuxième partie nous avons présenté un asservissement de vitesse et de position en utilisant sur les régulateurs **PID** pour un moteur à courant continu , dans le but d'annuler l'erreur statique , diminuer le dépassement et améliorer la rapidité de notre système pour obtenir une meilleure réponse.

*Conclusion  
générale*

## Conclusion générale

---

L'énergie solaire est une énergie relativement chère, de ce fait, reste encore peu développée, elle a l'avantage de permettre la réalisation d'importantes économies d'énergie, mais c'est aussi une énergie propre qui ne produit pas de déchets toxiques et qui ne dégage pas de gaz à effet de serre. Par ailleurs, les technologies de l'énergie solaire domestique tendent à se répandre et sont particulièrement efficaces et prouvées. Car l'énergie solaire est toutefois une solution d'avenir qui vaut le coup d'être plus exploitée, d'autant plus que de nombreuses améliorations sont encore possibles

L'objectif de ce modeste travail est d'obtenir par simulation, un régulateur de position pour un moteur à courant continu utilisé dans un suiveur solaire a fin d'améliorer le rendement et la puissance du panneau photovoltaïque (PV). L'exploitation de l'énergie maximale captée permet de tirer le maximum de puissance électrique disponible dans le générateur PV.

Le moteur prend plusieurs positions relativement aux positions de soleil(position de référence )

Dans notre simulation nous avons fait un régulateur PID d'un moteur à courant continu pour valider la poursuite de position en fin Nous avons présente quelques résultats obtenue

# *Bibliographie*

## Bibliographie

---

- [1] : [http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2004/chain/05\\_chapitre\\_1.pdf](http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2004/chain/05_chapitre_1.pdf)
- [2] : Merad née Mesri Mokhtaria, Cheknane Ali, M. Rougab Ilyes « **Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications** », Université Amar Telidji – Laghouat.
- [3] M. Iqbal “**An Introduction to Solar Radiation** “, Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, 1983
- [4]: chiba younes, mémoire de magister, «**étude de l'utilisation d'un bassin d'eau comme capteur solaire**» université Mentouri Constantine 2005
- [5] : Bennoui Mohamed Salah, Mémoire magistère « **optimisation des procédés de climatisation solaire** » Université Mentouri Constantine
- [6] : Pierre Bessemoulin, Jean Olivieri, « **Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette** », Meteo-France, Service central d’exploitation de la météorologie Toulouse, La Météorologie 8eme série - n°31 - septembre 2000.
- [7] : Roger Zogbi, rapport de stage «**étude et réalisation d’un suiveur solaire** » Université de Dakar
- [8] : Sahra Mouhamed, Djediai Lazhari, Mémoire fin d’étude « **Optimisation d'un Système poursuit solaire appliquée au champ photovoltaïque**» Université de Ouargla, 2011
- [9] : Meloudi Laila, Mémoire de magister, «**Etude et Simulation de la poursuite de la trajectoire du soleil par un panneau solaire**» Université de boumerdas 2012
- [10] : Zeghib ilhem, Mémoire de magister « **Etude et Réalisation d’un Concentrateur Solaire parabolique** » université Mentouri Constantine 2005
- [11] : M. Mesri-Merad, I. Rougab, A. Cheknane et N.I. Bachari « **Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques** », Université Amar Tilidji Laghouat
- [12] : Sekhri Toufik, Mémoire de fin d’étude, «**Etude comparatif entre deux concentrateur solaire**» Université de Ouargla, 2012
- [13] : **ALAIN RICAUD CYTHELIA ar@cythelia.fr**
- [14] : Benkortbi Abdelhakim mémoire master “ **conception et réalisation d’un suiveur solaire bi-axiale a orientation numérique à l’aide d’arduino uno** » Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et Automatique. Université de Médéa, Algérie

## Bibliographie

---

- [15] : Mohamed Ouled Salem mémoire de magister « **Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin** » université *abou bekr belkaid-tlemcen 2009.2010*
- [16] : Boukhers Djamil, mémoire magister « **optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage** » Université. Mentouri Constantine) 2006/2007
- [17] : Mohamed Lakhdar Louazene Mémoire de Magister « **Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla** » université el hadj Lakhdar – Batna
- [18] : Bendjellouli Zakaria Mémoire Magistère « **contribution à la modélisation d'une cellule solaire** » 2008/2009
- [19] Mohamed Arrouf Docteur d'Etat « **optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe Branche sur un générateur photovoltaïque** » université Mentouri de Constantine 2007
- [20] : Mlle Benhaddouche Nesrine Fatima mémoire master « **La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite** » université abou bekr belkaid – tlemcen
- [21] MORNAY Thomas, VERNAY Alexis VOLLE Marion « **Les cellules photovoltaïques** », Classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux ,2004/2005
- [22] : HELALI KAMELIA mémoire de magister en electrotechnique « **modélisation d'une cellule photovoltaïque étude comparative** » université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2011/2012
- [23] : B. Flèche, D. Delagnes « **Energie solaire photovoltaïque** », doc / juin 07.
- [24] : Bernard EQUER « **Energie solaire photovoltaïque** », volume 1, publié par Ellipses Editions Marketing et l'UNESCO 1993
- [25] : K. Agroui A. Belghachi et S. Kadri « **Caractérisations Electriques et Thermiques d'un Module PV au Silicium Multicristallin en Milieu Contrôlé et sur Site Saharien** »
- [26]: A. Ould Mohamed Yahya1, A. Ould Mahmoud et I. Youm « **Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque CERER'**, B.P. 476, Dakar, Sénégal le 30 Septembre 2008)

## Bibliographie

---

- [27] E. Benkhelil ,A. Gherbi « **Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque avec un étage d'adaptation DC/DC** » , Université Ferhat Abbas , Sétif,
- [28] D.Saheb-Koussa , M.Haddadi « **Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement Matlab** » ,Centre of development of renewable energies
- [29] AOUI Saliha « **modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque** » université ferhat abbas — SETIF-1 UFAS (ALGERIE)
- [30]: E. Lorenz , « **Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems.** », report of the Universidad Politécnica de Madrid., 2000.
- [31] : BOUAYED Abderrahmen mémoire master « **commande à deux axes d'un panneau photovoltaïque** » université abou bekr belkaid tlemcen 2014
- [32] : I. Laib, Y. Elgouni, S. Boukhous, A. Hamidat « **Etude et réalisation d'un système de poursuite solaire pour générateur photovoltaïque** », Le 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, USTHB, BP.32, Bab-Ezzouar, 16111, Alger
- [33] : MARLIYANI BINTI OMAR « **LOW COST TRACKER SOLAIRE** », Faculté de Génie électrique et électronique, Université Malaisie
- [33] : S.Boukhenous et M. Aissat « **contribution a Réalisation d'un Suiveur Automatique pour Panneau Solaire** » Laboratoire d'Instrumentation, LINS, Faculté d'Electronique & d'Informatique USTHB, BP.32, Bab-Ezzouar, 16111, Alger,
- [34] : benzine Ayoub, jeudi ad el Djalil mémoire fin d'étude « **étude et mis en œuvre de la commande d'un moteur pas à pas pour le positionnement d'un panneau solaire** » université de Médéa 2012 2014
- [35] :T. Bendib, B. Barkat, F. Djeflal, N. Hamia et A. Nidhal,, « **Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A** » par Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4, 2008.
- [36] :Hatim el Yazid et Younes Chouklat «**système électromécanique de poursuite pour un concentrateur thermique**» Université de ibn zohr ourzazate morce.2011
- [37] *Khoudrane Ismail* mémoire master « **Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques** » université kasdi merbah – Ouargla
- [38] C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « **Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'Observatoire Pierre Auger** ».2006
- [39]Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaic», Fraunhofer Institute

## Bibliographie

---

For Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004

[40]Belhadj Mohammed Mémoire de Magister« **Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome** » Centre Universitaire De Bechar

[41]Sofiane abada, « **étude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur spic** » UNIVERSITE LAVAL QUEBEC 2011

[42] Taleb Bendiab Zakaria **mémoire master** « **étude et réalisation d'une carte de commande de trois moteurs pas à pas pour machine de prototypage rapide** » Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen

[43] NL « **technique moteur pas à pas** » S.chari

[44] Kercha Mébarka Mémoire de magister « **Commande par mode de glissement d'un Moteur pas à pas à Aimant Permanent** » université de Batna 2006/2005

[45] Justin Petersen and Yolande Petersen 2008Machinations: A Step-by-Step Project Guide Version 1.

[46] : Anouar Halila « **étude des machines à courant continu** » Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.) l'Université de Laval MAI 2001

[47] : M.Mohammed Arhoujidam mémoire fin d'étude « **mise en œuvre d'une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu** » université Mohammed V

[48] : CEA Technologies Inc. Tous droits réservés. « **Guide de référence sur l'efficacité énergétique de moteurs** » 2007

[48] : Aissaoui Nassima **mémoire magister** « **élaboration du système de commande automatique de l'entraînement électrique à moteur à courant continu** » université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

[49] :Bapio Bayala «**Machines à courant continu** » **techniciens supérieurs – ingénieurs électrotechniciens** »

[50] : Philippe LE BRUN Florence.vadee@wanadoo.fr

[51] :Lycée Louis ARMAND «**Technologie, choix et alimentation des machines à courant continu** »

[52] : <http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/>

[53] : Hussein Hassan « **télémanipulation synchrone et commande D'instruments physiques dans le cadre D'un laboratoire virtuel** » UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

## Bibliographie

---

[54]: Hoang Le-Huy : Introduction à MATLAB et Simulink : Université Laval, Québec, CANADA, Septembre 1998

[55] : Michel Girardin et Bernard Schneider « **régulation du moteur DC** » haute école d'ingénierie et de gestion du canton de vaud .

# *Résumé*

## Résumé

---

### Résumé :

L'énergie solaire est une énergie relativement chère et qui, de ce fait, reste encore peu développée. Elle est pratiquement inépuisable, n'implique aucun résidu de pollution ou émission de gaz participant à l'effet de serre.

L'énergie solaire photovoltaïque, utilisée sous forme électrique à partir d'un phénomène physique qui consiste à la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique. Nous souhaitant au moyen d'un module PV obtenir un rendement maximal et cela lorsqu'il est maintenu perpendiculaire aux rayons solaires (poursuit solaire)

Ce travail consiste à réaliser un régulateur de position d'un moteur à courant continu afin de motoriser les panneaux solaires à l'aide de logiciel MATLAB

**Mots clés :** Energie solaire, photovoltaïque, poursuit solaire, moteur courant continu, position, angle, régulateur de position

### ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرا هاما من مصادر الطاقات المتجددة فهي لا تتسبب بالتلوث حيث نستعمل الألواح الكهروضوئية لتحويل الاشعاع الشمسي الى طاقة و من اجل الاستغلال المثالي لكمية الطاقة المنتجة من هذا المصدر نقوم بتوصيلها بمتتبع الشمس والهدف من هذه الدراسة تحقيق تحكم في زاوية التوجيه لمحرك تيار مستمر بواسطة منظم زاوية التوجيه للتحكم بالألواح الشمسية

### كلمات مفتاحية :

الطاقة الشمسية الضوئية، الألواح الشمسية متتبع الشمس المحرك تيار مستمر، زاوية التوجيه، تحكم

### Abstract

Solar energy is a relatively expensive energy and, thereby, remains undeveloped. Photovoltaic solar energy, used in electrical form a physical phenomenon that involves the direct conversion of solar radiation into electrical energy, We wish using a PV module maximum yield and that when held perpendicular to the sun (solar continues)

This work is to achieve a position controller for a DC motor to power the solar panels using MATLAB

The aim of this study we have:

achieved a position of a DC motor controller which indicates the panel orientation angle

**Key words:** Solar energy, photovoltaic, , DC motor, position, angle, controller

*Anexxe*

## Les coordonnées de la wilaya de Ghardaïa en degrés décimaux :(PV syst)

Latitude : 32.4909400

Longitude : 3.6734700

L'altitude par rapport au niveau de la mer :503 m

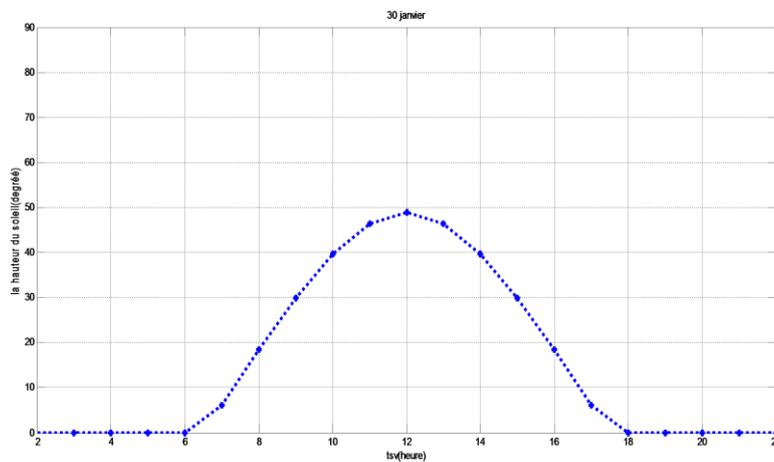
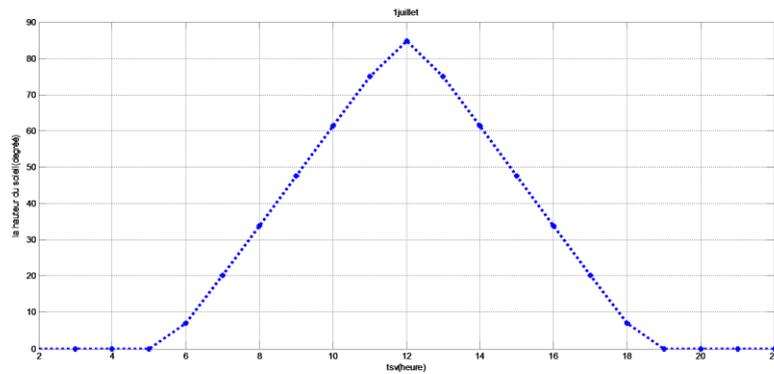
azimut

```
clc
clear all
cor=pi/180
nj=input('donner numéro du jour dans l''année =')
lat=input('introduire la latitude du lieu =')
lon=input('introduire la longitude du lieu =')
dec=23.45*sin(cor*360*(284+nj)/365)
vef=acos(tan(dec*cor)/tan(lat*cor))/cor
g=0
for j=1:24
    g=g+1
    tsv(j)=g
    w(j)=15*(12-tsv(j))
    h(j)=
asin(sin(lat*cor)*sin(dec*cor)+cos(lat*cor)*cos(dec*cor)*cos(w(j)*cor))/cor
    if abs(w(j))<=vef
        c1=1
    else
        c1=-1
    end
    if w(j)<0
        c3=-1
    else
        c3=1
    end
    if (lat-dec)>=0
        c2=1
    else
        c2=-1
    end
    az1(j)=asin(sin(w(j)*cos(dec))/sin(acos(sin(dec)*sin(lat)+cos(dec)*cos(w(j))))
    az(j)=(c1*c2*az1(j))+180*(1-c1*c2)*c3/2
end
```

## hauteur

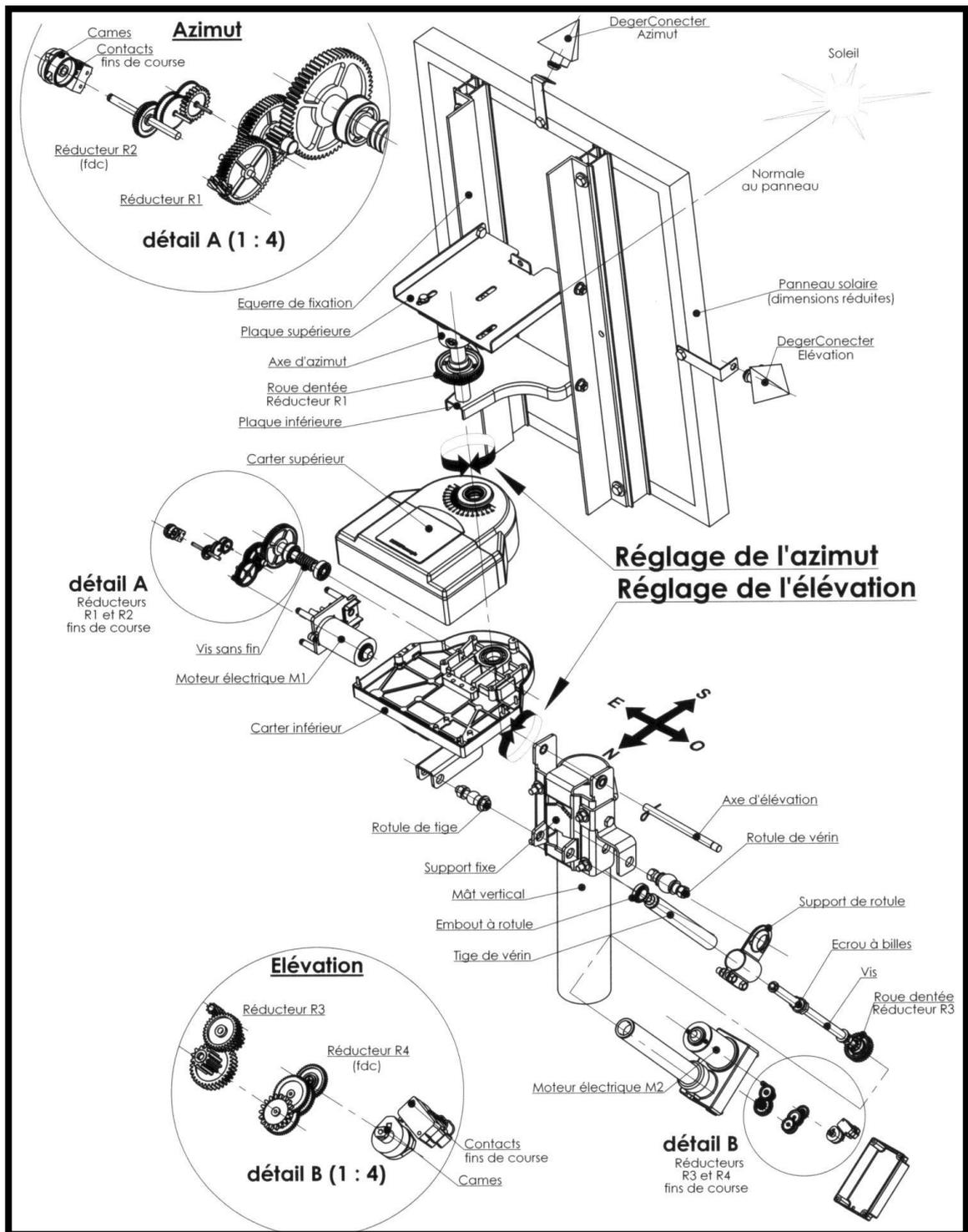
```
clc
clear
cor=pi/180
lat=input('introduire la latitude du lieu=');
NJ=input('donner le numéro du jour dans l''annee')
dec=23.45*sin(cor*360*(284+NJ)/365);
g=0
for j=1:24;
    g=g+1;
    tsv(j)=g;
    w(j)=15*(12-tsv(j));

h(j)=asin(sin(lat*cor)*sin(dec*cor)+cos(lat*cor)*cos(dec*cor)*cos(w(
j)*cor))/cor
    if h(j)<0
        h(j)=0
    end
end
end
plot(tsv,h,'b*:')
xlabel('tsv(heure)')
ylabel('la hauteur du soleil(degré)')
axis([2 22 0 90])
grid on
```

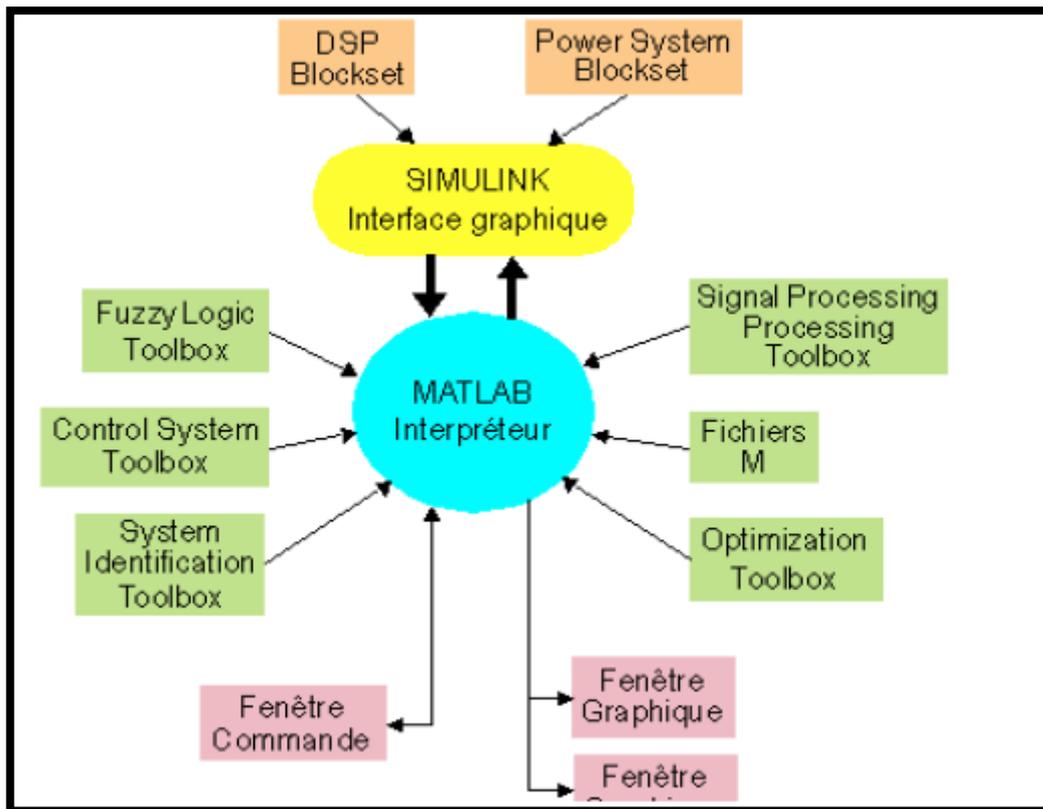


Paramètres électriques		Module solaire
Tension de point au puissance max $V_{mpp}$	[V]	15.9
$I_{mpp}$ Courant de point au puissance max	[A]	3.15
Courant débité par le module PVP $I_{sc,STC}$	[A]	3.35
$V_{oc}$	[V]	19.8
$V_{pv,STC}$ Tension aux bornés du modulé	[A]	12
Température ambiante de référence $T_a, \text{réf}$	[°C]	25
NOCT	[°C]	45
Résistance de connexion du panneau $R_s$	[ $\Omega$ ]	0.8
GSTC Ensoleillement reçu à la surface	[W/m <sup>2</sup> ]	1000
$\alpha_{STC}$	[mA/°C]	1.4
$\beta_{oc}$	[mV/°C]	70-
Constante fixé par le constructeur, k	0.01175	

Caractéristiques d'un module solaire (SM50-H, simens)



**Prototype d'un suiveur solaire bi axial**



**Fig. (IV - 1) : Environnement MATLAB**

```

%-----paramètres-----
Ra=8
La=0.001%0.0597
Tm=(La/Ra)
K=0.9667 %0.01
J=0.003
f=0.002
Km=1.03431

```

**Paramère de moteurt**

