

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : RESEAU ELECTRIQUE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**ETUDE DU LIEU ET LA PUISSANCE OPTIMALES D'UNE  
CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE DANS UN RESEAU  
ELECTRIQUE**

Présenté par : *Ferhati Amira*

*Ferhati Soumaya*

Encadrant : *Labar Hocine*

*Prof*

*U- Badji Mokhtar - Annaba*

## Jury de Soutenance :

Hamed Mostefa	MCB	U- Badji Mokhtar - Annaba	Président
Labar Hocine	Prof	U- Badji Mokhtar - Annaba	Encadrant
Naidji Mourad	MCB	U- Badji Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciement

Avant tous. Nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Nous remercions très sincèrement *Pr. Labar hocine*, notre encadreur, pour ses conseils, ses orientations judicieuses, sa patience et diligence, et par ses suggestions qui ont grandement facilités la réalisation de ce travail.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous vifs remerciements s'adressent également à tous les membres de nos familles notamment;

Nous parents pour leur aide et pour leur soutien précieux.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation depuis le primaire jusqu'à l'université.

Nous remercions tous nos collègues et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail,

Nous les remercions tous.

- *Ferhati Amira*
- *Ferhati soumaya*



## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à mes chères parents « Kamel et Laila » qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.*

*A moi même .*

*A mes chères soeurs Aida et Farah et à mon frère Sidi Ali.*

*À mes chères amies Soumaya et Manar .*

*À mon grand-père, que Dieu ait pitié de lui .*

*A ma tante Jemaa que dieu la protège .*

*A ma cousin Nadjib*

*A tout les familles Ferhati et Khaledine*

*A tout la promo d'électrotechnique 2023/2024.*

*Amira Ferhati*



## Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على أشرف المرسلين نبينا وحبينا وقدوتنا محمد عليه  
افضل الصلاة والسلام

أولا نحمد الله كثيرا الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات

*Je dédie d'abord ce fruit de mes efforts à C'est un morceau de mon âme et la chose la plus précieuse que je possède Le cœur de sa mère Ma fille bien-aimée," Assil" Et aux très chers qui Qui a contribué à J'ai atteint ce niveau Ma mère, qui m'a appris la patience et la diligence face aux difficultés, a un visage gentil "Nadjet" Mon père, qui m'a appris que le monde est un combat et que son arme est la connaissance et la connaissance, et qui n'a jamais été avare avec moi tout au long de ma vie "Chabane" Et à mon deuxième père compatissant, " Azzedine " que Dieu les garde Et à mon mari, qui est plus précieux que mon âme, qui m'a soutenu pour terminer mes études malgré mes responsabilités La bénédiction d'un mari et du soutien , que Dieu bénisse sa vie "Oussama" Et à mes frères, les roses et le parfum de ma vie "Chaïma" Un merci spécial pour votre soutien et vos efforts "Douaa et Mouhamed islem" Que Dieu t'accorde la réussite dans ta vie et tes études et illumine ton chemin avec les lampes de la connaissance, ma rose "Zaki , Youssra et Maher " Que Dieu vous protège tous, mes chers frères Et à "Moayed et Soujoud" Et aux compagnons de ma vie qui me sont proches, que Dieu les protège " Amira et Manar"*

*Et aux toutes les familles "Ferhati et Nehalla"*

*À tous les départements électrotechniques 2024*

*À tous ceux que la plume a oubliés et que le cœur a préservé*

*Soumaya Ferhati*

## Sommaire

Remerciements .....	I
Dédicaces .....	II
Sommaire .....	IV
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux .....	XII
Liste des symboles.....	XIII
Résumé.....	XIV
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les énergies renouvelables</b>	
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Définition de l'énergie renouvelable .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Les types de l'énergie renouvelable .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1. L'énergie éolienne.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1.1. Définition .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1.2. Principe de Fonctionnement L'énergie éolienne .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1.3. Les types d'éoliennes utilisées pour produire de l'énergie .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1.4. Les avantages d'énergie éolienne.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1.5. Les inconvénients de l'énergie éolienne .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2. L'énergie biomasse .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2.1. Définition et catégories .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2.2. Les types d'énergie biomasse .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.2.3. Fonctionnement technique ou scientifique.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.2.4. Présentation des technologies relatives à la filière biomasse.....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2.5. Les avantages d'énergie biomasse .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2.6. Les inconvénients de l'énergie biomasse.....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.3. L'énergie solaire .....</b>	<b>14</b>

## *Sommaire*

---

I.3.3.1. Définition.....	14
I.3.3.2. Principe physique de l'énergie solaire .....	14
I.3.3.3. Les types d'exploitations de l'énergie solaire.....	15
I.3.3.4. Les avantages de l'énergie solaire.....	16
I.3.3.5. Les inconvénients de l'énergie solaire .....	17
I.3.4. L'énergie hydraulique .....	17
I.3.4.1. Définition.....	17
I.3.4.2. Les types des centrales hydrauliques .....	18
I.3.4.3. Les avantages de l'énergie hydraulique .....	19
I.3.4.4. Les inconvénients de l'énergie hydraulique .....	19
I.3.5. L'énergie géothermique.....	19
I.3.5.1. Définition.....	19
I.3.5.2. Principe de fonctionnement.....	20
I.3.5.3. Les types des centrales géothermiques .....	21
I.3.5.4. Les avantages de l'énergie géothermique.....	22
I.3.5.5. Les inconvénients de l'énergie géothermique .....	22
I.4. L'énergie renouvelable dans le monde .....	23
I.5. L'énergie renouvelable dans l'Algérie .....	23
I.6. Conclusion.....	24

## **CHAPITRE II : Généralités sur le système photovoltaïque**

II.1. Introduction .....	26
II.2. L'effet photovoltaïque.....	26
II.3. Les panneaux photovoltaïques.....	29
II.3.1. Les panneaux photovoltaïques dans l'histoire .....	29
II.3.2. Définition du panneau photovoltaïque .....	30
II.3.3. Les avantages du panneau solaire photovoltaïque .....	30
II.3.4. Fonctionnement des panneaux photovoltaïques .....	30

<b>II.3.5.</b> Les deux grandes familles de panneaux solaires .....	<b>31</b>
<b>II.4.</b> La Cellule Photovoltaïque .....	<b>31</b>
<b>II.4.1.</b> Différents type de technologies de cellules photovoltaïques .....	<b>32</b>
<b>II.4.2.</b> Les trois principales filières technologiques.....	<b>35</b>
<b>II.4.3.</b> Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque .....	<b>38</b>
<b>II.4.4.</b> Principe de fonctionnement d'un régulateur .....	<b>40</b>
<b>II.4.5.</b> Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	<b>41</b>
<b>II.5.</b> Paramètres de cellules photovoltaïques.....	<b>41</b>
<b>II.5.1.</b> La caractéristique I-V .....	<b>41</b>
<b>II.5.2.</b> Tension à circuit ouvert, $V_{oc}$ .....	<b>42</b>
<b>II.5.3.</b> Rendement de conversion .....	<b>44</b>
<b>II.5.4.</b> Facteur de forme, FF .....	<b>44</b>
<b>II.5.5.</b> Puissance maximale .....	<b>45</b>
<b>II.6.</b> Différents types des cellules solaires .....	<b>46</b>
<b>II.6.1.</b> Les cellules monocristallines .....	<b>46</b>
<b>II.6.2.</b> Cellules poly-cristallines.....	<b>46</b>
<b>II.6.3.</b> Cellules amorphes .....	<b>46</b>
<b>II.7.</b> Module photovoltaïque .....	<b>51</b>
<b>II.8.</b> Générateur photovoltaïque .....	<b>53</b>
<b>II.8.1.</b> Principe photovoltaïque .....	<b>54</b>
<b>II.8.2.</b> : Production d'électricité .....	<b>55</b>
<b>II.9.</b> Modélisation de cellule photovoltaïque .....	<b>55</b>
<b>II.9.1.</b> Circuit équivalent d'une cellule solaire .....	<b>56</b>
<b>II.9.2.</b> Caractéristiques courant - tension d'un module.....	<b>59</b>
<b>II.9.3.</b> Influence de la Température .....	<b>61</b>
<b>II.9.4.</b> Influence de l'Éclairement.....	<b>62</b>
<b>II.10.</b> Les hacheurs.....	<b>63</b>

<b>II.10.1.</b> Type des hacheurs .....	<b>64</b>
<b>II.11.</b> La commande Mppt.....	<b>66</b>
<b>II.11.1.</b> Définition .....	<b>66</b>
<b>II.11.2.</b> Le principe de la commande MPPT .....	<b>67</b>
<b>II.11.3.</b> Méthode perturbation et observation (P&O) .....	<b>68</b>
<b>II.12.</b> Conclusion .....	<b>70</b>

### **CHAPITRE III : Généralités sur le réseau électrique**

<b>III.1.</b> Introduction .....	<b>72</b>
<b>III.2.</b> Structure du réseau électrique et son rôle .....	<b>72</b>
<b>III.2.1.</b> Le réseau de transport et de répartition .....	<b>72</b>
<b>III.2.2.</b> Le réseau de distribution .....	<b>73</b>
<b>III.3.</b> Architecture de Réseaux Electrique.....	<b>73</b>
<b>III.3.1.</b> Critères de choix .....	<b>73</b>
<b>III.3.2.</b> Type d'architecture .....	<b>74</b>
<b>III.3.2.1.</b> Simple antenne.....	<b>74</b>
<b>III.3.2.2.</b> Double antenne .....	<b>75</b>
<b>III.3.2.3.</b> Double antenne avec double jeu de barres .....	<b>76</b>
<b>III.4.</b> Modélisation des éléments du réseau électrique .....	<b>77</b>
<b>III.4.1.</b> Modélisation d'une ligne de transport.....	<b>77</b>
<b>III.4.2.</b> Modélisation d'une charge.....	<b>77</b>
<b>III.4.3.</b> Modélisation de générateur .....	<b>78</b>
<b>III.4.4.</b> Modélisation des lignes aériennes .....	<b>79</b>
<b>III.4.5.</b> Modélisation Du Transformateur.....	<b>81</b>
<b>III.4.6.</b> Modélisation des nœuds du réseau électrique .....	<b>82</b>
<b>III.5.</b> Construction de la matrice d'admittance d'un réseau électrique .....	<b>82</b>
<b>III.6.</b> L'écoulement de puissance .....	<b>83</b>
<b>III.6.1.</b> Equations générales de la puissance .....	<b>83</b>

<b>III.6.2.</b> Méthodes de calcul .....	<b>86</b>
<b>III.6.2.1.</b> Méthode de Newton Raphson .....	<b>86</b>
<b>III.7.</b> Conclusion .....	<b>88</b>
 <b>CHAPITRE IV : Simulation et interprétation des résultats</b>	
<b>IV.1.</b> Introduction.....	<b>90</b>
<b>IV.2.</b> Topologie du réseau étudié .....	<b>90</b>
<b>IV.3.</b> Données du réseau étudié .....	<b>91</b>
<b>IV.4.</b> Résultats de simulation .....	<b>96</b>
<b>IV.4.1.</b> Réseau avec Centrale PV sans l'éclairage et le temps .....	<b>96</b>
<b>IV.4.2.</b> Réseau avec Centrale PV avec l'éclairage et le temps .....	<b>101</b>
<b>IV.5.</b> Schéma de l'algorithme .....	<b>107</b>
<b>IV.6.</b> L'algorithme .....	<b>108</b>
<b>IV.7.</b> Conclusion .....	<b>109</b>
Conclusion générale.....	<b>111</b>
Références Bibliographiques.....	<b>113</b>

### Liste des figures :

<b>Figure I.1</b> Généralité sur les énergies renouvelables.....	5
<b>Figure I.2</b> L'énergie éolienne.....	6
<b>Figure I.3</b> L'énergie biomasse .....	11
<b>Figure I.4</b> L'énergie solaire.....	14
<b>Figure I.5</b> L'énergie hydraulique. ....	18
<b>Figure I.6</b> L'énergie géothermique.....	20
<b>Figure I.7</b> Principe de fonctionnement .....	21
<b>Figure I.8</b> Programme algérien des Energies Renouvelables .....	24
<b>Figure II.1</b> Principe du transfert des électrons via l'apport .....	29
<b>Figure II.2</b> Coupe schématique d'une cellule photovoltaïque au silicium.....	32
<b>Figure II.3</b> Etape de fabrication des cellules .....	33
<b>Figure II.4</b> Cellule mono cristalline et poly cristalline.....	33
<b>Figure II.5</b> Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11% .....	34
<b>Figure II.6</b> Cellule monocristallin .....	35
<b>Figure II.7</b> Cellule multi cristallin.....	36
<b>Figure II.8</b> Cellule solaire tout organique sur substrat souple .....	38
<b>Figure II.9</b> Installation photovoltaïque .....	39
<b>Figure II.10</b> Principe de fonctionnement photovoltaïque.....	39
<b>Figure II.11</b> Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	40
<b>Figure II.12</b> Production d'électricité par la séparation électron-trou.....	41
<b>Figure II.13</b> Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle .....	42
<b>Figure II.14</b> Courant de court-circuit, $I_{cc}$ .....	43
<b>Figure II.15</b> Courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule .....	43
<b>Figure II.16</b> Représente le rapport entre la puissance maximale que ladite cellule peut fournir .....	44
<b>Figure II.17</b> La puissance électrique maximale .....	45
<b>Figure II.18</b> Cellule, module et panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass).....	47
<b>Figure II.19</b> Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série .....	48
<b>Figure II.20</b> Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle np cellules identiques .....	49

## Liste des figures

---

<b>Figure II.21</b> Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques .....	49
<b>Figure II.22</b> a)- Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection. b)- Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation IPV .....	50
<b>Figure II.23</b> Cellule photovoltaïque .....	50
<b>Figure II.24</b> La cellule individuelle . Unité de base de système photovoltaïque .....	51
<b>Figure II.25</b> Des modèles les plus courants .....	52
<b>Figure II.26</b> Les modèles verre verre .....	52
<b>Figure II.27</b> Des modèles tuiles / ardoise solaires .....	53
<b>Figure II.28</b> Les modèles sont connectés entre eux .....	53
<b>Figure II.29</b> Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie .....	55
<b>Figure II.30</b> Schéma équivalent d'une cellule idéale .....	56
<b>Figure II.31</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïques réelle .....	58
<b>Figure II.32</b> Le profil de la caractéristique courant- tension d'un module .....	59
<b>Figure II.33</b> Un exemple d'un module composé de 40 cellules connectées .....	60
<b>Figure II.34</b> Les effets de l'éclairement et la température sue le module .....	61
<b>Figure II.35</b> La Caractéristique P-V et I-V du module PV selon la température.....	62
<b>Figure II.36</b> La Caractéristique P-V et I-V du module PV selon l'éclairement .....	63
<b>Figure II.37</b> Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	64
<b>Figure II.38</b> Schéma électrique d'un hacheur Buck .....	64
<b>Figure II.39</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck .....	65
<b>Figure II.40</b> Schéma électrique d'un hacheur boost .....	66
<b>Figure II.41</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	66
<b>Figure II.42</b> Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.....	67
<b>Figure II.43</b> Principe de fonctionnement de la MPPT P&O.....	68
<b>Figure II.43</b> Organigramme de l'algorithme de la méthode P & O .....	69
<b>Figure III.1</b> Structure de réseau électrique .....	73
<b>Figure III.2</b> Architecture simple antenne .....	74
<b>Figure III.3</b> Architecture double antenne .....	75
<b>Figure III.4</b> Architecture double antenne avec double jeu de barres. ....	76
<b>Figure III.5</b> Schéma équivalent d'un transformateur.....	77
<b>Figure III.6</b> Schéma équivalent d'une charge .....	78

## Liste des figures

---

<b>Figure III.7</b> Schéma équivalent d'un générateur .....	79
<b>Figure III.8</b> Modèle en $\pi$ d'une ligne aérienne .....	80
<b>Figure III.9</b> Schéma d'un réseau électrique à (n) accès .....	83
<b>Figure IV.1</b> Topologie du réseau électrique étudié .....	90
<b>Figure IV.2</b> l'éclairement durent de la journée .....	92
<b>Figure IV.3</b> Un profil La puissance apparente 1 qui correspondent à une variation durent la journée .....	92
<b>Figure IV.4</b> Un profil La puissance apparente 1 qui correspondent à une variation durent la journée .....	92
<b>Figure IV.5</b> Un profil La puissance apparente 3 qui correspondent à une variation durent la journée .....	93
<b>Figure IV.6</b> Un profil La puissance apparente 4 qui correspondent à une variation durent la journée .....	93
<b>Figure IV.7</b> Un profil La puissance apparente 5 qui correspondent à une variation durent la journée .....	93
<b>Figure IV.8</b> Un profil La puissance apparente 6 qui correspondent à une variation durent la journée .....	94
<b>Figure IV.9</b> Un profil La puissance apparente 7 qui correspondent à une variation durent la journée .....	94
<b>Figure IV.10</b> Les courbes de tensions et courants du réseau étudiée .....	95
<b>Figure IV.11</b> Le schéma de réseau électrique avec la centrale PV en nœud 2 .....	96
<b>Figure IV.12</b> Les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 2.....	97
<b>Figure IV.13</b> Le schéma de réseau électrique avec la centrale PV en nœud 5 .....	98
<b>Figure IV.14</b> Les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 5.....	99
<b>Figure IV.15</b> Le schéma de réseau électrique avec la centrale PV en nœud 7. ....	99
<b>Figure IV.16</b> Les pertes globales totales de nœud 7 avec centrale PV.....	100
<b>Figure IV.17</b> Les pertes globales totales de nœud 2 avec centrale PV, l'éclairement et le temps .....	101
<b>Figure IV.18</b> Les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV, l'éclairement et le temps .....	102
<b>Figure IV.19</b> Les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV.....	103
<b>Figure IV.20</b> L'énergie globale en fonction de Ppv de nœud 2 .....	104
<b>Figure IV.21</b> L'énergie globale en fonction de Ppv de nœud 5 .....	105
<b>Figure IV.22</b> L'énergie globale en fonction de Ppv de nœud 7 .....	105
<b>Figure IV.23</b> Schéma de communication et contrôle .....	106
<b>Figure IV.24</b> l'algorithme p&O .....	107

**Liste des tableaux :**

<b>Tableau II.1</b> Tableau représentant le rendement de chaque type de cellule.....	37
<b>Tableau IV.1</b> Données des lignes.....	91
<b>Tableau IV.2</b> Données des nœuds.....	91
<b>Tableau IV.3</b> les pertes globales totales de nœud 2 avec centrale PV .....	97
<b>Tableau IV.4</b> les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV .....	98
<b>Tableau IV.5</b> les pertes globales totales de nœud 7 avec centrale PV .....	100
<b>Tableau IV.6</b> Les pertes globales totales de nœud 2 avec centrale PV, l'éclairage et le temps .....	101
<b>Tableau IV.7</b> Les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV, l'éclairage et le temps .....	102
<b>Tableau IV.8</b> Les pertes globales totales de nœud 7 avec centrale PV .....	103

**Liste des symboles :**

**EnR** : L'énergie renouvelable.

**PV** : Photovoltaïque.

**Cell** : Cellule Photovoltaïque.

**PPV** : Puissance photovoltaïque.

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**P&O**: Perturbation et observation.

**D** : Diode.

**PLC**: Programmable logic Contro

### **Résumé:**

Dans ce mémoire, L'étude de l'emplacement et de l'énergie optimaux de la centrale photovoltaïque dans le réseau électrique est une étape cruciale pour tirer le meilleur parti de l'énergie solaire tout en maintenant la stabilité du réseau afin que l'emplacement géographique le plus avantageux soit sélectionné pour l'installation de la centrale photovoltaïque. Des facteurs tels que l'ensoleillement, les conditions météorologiques, la proximité des infrastructures existantes et les contraintes environnementales sont pris en compte. En termes d'énergie, la puissance doit être adaptée aux besoins du réseau pour éviter les surcharges ou les pannes. essentiel pour éviter les fluctuations de tension et de fréquence, qui peuvent provoquer des pannes ou des dommages aux équipements tout en déterminant l'emplacement idéal pour l'installation ainsi que la taille optimale de la centrale

Nous avons fait dans notre travail les étapes suivantes :

Une fois, nous avons comparé les PV en termes de temps et d'éclairage, et une fois nous les avons négligés, de sorte qu'une fois nous avons testé les pv dans les nœuds 2, 5 et 7 sans tenir compte de l'importance du temps et de l'éclairage, et une autre fois nous avons testé les pv dans les nœuds 2, 5, et 7, et cette fois nous avons fait une importance au temps et à l'éclairage. Enfin, nous avons proposé un algorithme pour nous aider.

En résumé, le texte souligne l'importance vitale d'une planification minutieuse de l'installation de centrales photovoltaïques. Une telle étude garantit non seulement l'efficacité et la rentabilité de la production d'énergie solaire, mais assure également la stabilité et la fiabilité du réseau électrique. En choisissant le bon emplacement et la bonne taille, vous pouvez maximiser vos profits tout en minimisant les risques et les coûts.

### **Mots clés :**

Photovoltaïque, L'énergie optimaux, Réseau électrique.

### **Summary:**

This thesis examines the optimal placement and energy parameters of photovoltaic (PV) power plants within the electrical grid. This study is essential for maximizing solar energy utilization while maintaining grid stability. Selecting the most advantageous geographical location for PV installation involves considering factors such as solar irradiance, weather conditions, proximity to existing infrastructure, and environmental constraints. From an energy perspective, the power output must align with the grid's demands to prevent overloads or outages. Proper planning is critical to avoid voltage and frequency fluctuations, which can lead to failures or equipment damage. It is also crucial for determining the ideal installation site and the optimal plant size.

In our research, we conducted the following steps

We compared the performance of PV systems in relation to time and illumination, and in other instances, we disregarded these factors. Specifically, we tested the PV systems at nodes 2, 5, and 7 without considering time and illumination, and then repeated the tests with these factors in mind. Finally, we developed an algorithm to aid in this analysis.

In summary, this text underscores the critical importance of meticulous planning in the installation of PV power plants. Such an approach ensures not only the efficiency and profitability of solar energy production but also the stability and reliability of the electrical grid. By selecting the appropriate location and size for the PV plants, one can maximize returns while minimizing risks and costs.

### **Keywords :**

Photovoltaic, Optimal energy, Electrical network.

## ملخص:

في هذه الأطروحة، تعتبر دراسة الموقع والطاقة الأمثل لمحطة الطاقة الكهروضوئية في شبكة الكهرباء خطوة حاسمة لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية مع الحفاظ على استقرار الشبكة بحيث يتم اختيار الموقع الجغرافي الأكثر فائدة للتركيب. من محطة الطاقة الكهروضوئية. وتؤخذ في الاعتبار عوامل مثل أشعة الشمس، والظروف الجوية، والقرب من البنية التحتية القائمة والقيود البيئية. فيما يتعلق بالطاقة، يجب تكييف الطاقة مع احتياجات الشبكة لتجنب التحميل الزائد أو الانقطاع. ضروري لتجنب تقلبات الجهد والتردد، والتي يمكن أن تسبب أعطالاً أو تلفاً للمعدات أثناء تحديد موقع التثبيت المثالي بالإضافة إلى الحجم الأمثل للمحطة  
قمنا بالخطوات التالية في عملنا:

مرة قارنا الكهروضوئية من حيث الوقت والإضاءة، ومرة أهملناها، بحيث اختبرنا مرة الكهروضوئية في العقد 2 و5 و7 دون مراعاة أهمية الطقس والإضاءة، ومرة أخرى اختبرنا الكهروضوئية في العقد 2 و5 و7، وهذه المرة أولينا أهمية للطقس والإضاءة. وأخيراً، اقترحنا خوارزمية لمساعدتنا.

باختصار، يسلط النص الضوء على الأهمية الحيوية للتخطيط الدقيق لتركيب محطات الطاقة الكهروضوئية. ولا تضمن مثل هذه الدراسة كفاءة وربحية إنتاج الطاقة الشمسية فحسب، بل تضمن أيضاً استقرار وموثوقية شبكة الكهرباء. ومن خلال اختيار الموقع والحجم المناسبين، يمكنك تحقيق أقصى قدر من الأرباح مع تقليل المخاطر والتكاليف.

**الكلمات الدالة :**

الكهروضوئية، الطاقة المثلى، الشبكة الكهربائية.

# ***Introduction Générale***

### **Introduction générale :**

L'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques modernes est devenue une priorité incontournable pour assurer un développement durable et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces sources d'énergie, le solaire photovoltaïque se distingue par sa capacité à produire de l'électricité de manière propre et renouvelable. Cette étude se propose d'analyser les critères déterminants pour la sélection du site idéal et la dimensionnement approprié d'une centrale photovoltaïque dans un réseau électrique. En prenant en compte des facteurs tels que l'ensoleillement, la topographie, la proximité des infrastructures existantes, ainsi que les aspects techniques et économiques, nous visons à établir une méthodologie robuste pour guider les décisions stratégiques dans ce domaine. le bute de ce travail est tirer le meilleur parti de l'énergie solaire tout en maintenant la stabilisé du réseau .

Dans cette note, nous avons discuté de quatre chapitres.

**Le premier chapitre** présente des informations générales sur les énergies renouvelables, leurs types et la manière de les exploiter seront mis en évidence. On en parlera aussi dans le monde et en Algérie.

Dans **le deuxième chapitre**, nous discuterons du système photovoltaïque et de la commande Mppt et parlerons du hacheur et d'autres types.

Le **troisième chapitre** expose les différentes structures et architectures d'un réseau électrique, la modélisation des éléments le constituant sera aussi abordé. On parlé sur l'écoulement de puissance dans le réseau électrique et La méthode de Newton Raphson.

Dans **le quatrième et dernier chapitre**, nous présenterons les résultats de simulation obtenus à partir d'un programme en langage MATLAB. Nous avons fait dans notre travail les étapes suivantes:

Une fois, nous avons comparé les PV en termes de temps et d'éclairage, et une fois nous les avons négligés, de sorte qu'une fois nous avons testé les pv dans les nœuds 2, 5 et 7 sans tenir compte de l'importance du temps et de l'éclairement, et une autre fois nous avons testé

## *Introduction Générale*

---

les pv dans les nœuds 2, 5, et 7, et cette fois nous avons fait une importance au temps et à l'éclaircissement Enfin, nous avons proposé un algorithme pour nous aider.

Enfin, dans la conclusion nous donnerons un résumé des points importants de notre.

# ***Chapitre I***

## ***Généralités sur les énergies renouvelables***

## **Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables**

### **I. 1: Introduction**

Aujourd'hui, plus de 85% [1] d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. [2]

La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires. [3]

Une énergie renouvelable est une énergie dont le gisement se reconstitue en permanence à un rythme au moins égal à celui de la consommation. Leurs diverses formes ont chacune leurs spécificités selon leur nature. Il faut toutefois préciser que leurs potentialités, en termes d'énergie exploitable, sont très différentes. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire la pression sur les ressources naturelles et de limiter les rejets polluants dans l'atmosphère. Différentes filières d'énergies renouvelables existent à l'heure actuelle. Elles permettent la production d'énergie mécanique, d'énergie électricité et de l'énergie thermique. [4]

Nous concentrons-nous dans ce chapitre, sur les sources les plus importantes d'énergies renouvelables et les avantages et les inconvénients.

### **I.2 : Définition de l'énergie renouvelable**

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous. [5]

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle. [6]

Les énergies renouvelables se répartissent en cinq catégories : l'éolienne, le solaire, l'hydraulique, la géothermie et la biomasse. Dans chacune coexistent différentes technologies.

L'énergie solaire par exemple se divise en plusieurs filières : les panneaux photovoltaïques, les chauffe-eaux solaires, les centrales thermodynamiques ...

Côté avantages, elles sont toutes inépuisables, n'émettent pas ou peu de gaz à effet de serre et ne polluent pas l'environnement.

Toutefois, chacune a ses inconvénients et aucune ne pourra remplacer à elle seule les énergies fossiles, dont la combustion est responsable à 70% du changement climatique : il faudra compter sur un assortiment d'énergies et de technologies, propre à chaque région du monde. [7]



**Figure (I. 1) :** Généralité sur les énergies renouvelables [7]

## **I.3. Les types de l'énergie renouvelable**

### **I.3.1 : L'énergie éolienne**

#### **I.3.1.1: Définition**

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement.

L'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours l'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moudre le grain ou pomper l'eau. L'éolien est

l'une des énergies renouvelables les plus «prometteuses» à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental. Pendant ces dernières années l'éolien c'est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. Les avancements technologiques dans ce domaine, ne cessent de progresser. [8]

Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler. Toutefois, il est possible de prévoir la vitesse moyenne du vent, sa direction et son intensité dans certains lieux.

Les humains utilisent le vent depuis des milliers d'années. Dans l'Antiquité, ils l'utilisaient en tant que source d'énergie mécanique pour les bateaux à voiles vers le VIIe siècle.

La première machine à avoir utilisé le vent en tant que source d'énergie fut le moulin à vent. Le moulin à vent fut inventé au VIIe siècle en Iran et en Afghanistan. De là, il s'est développé au Moyen-Orient, en Inde et a fini par être utilisé en Chine. Les premiers moulins servirent à moudre le grain pour obtenir de la farine. Ils furent aussi utilisés pour pomper l'eau des rivières afin d'irriguer les terres. [9]



**Figure (I. 2) :** L'énergie éolienne [9]

### **I.3.1.2: Principe de Fonctionnement L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est produite grâce à la force exercée par le vent sur des pales fixées à un rotor.

Dans sa configuration la plus commune, le rotor comporte trois pales tournant autour d'un axe horizontal. Le diamètre qu'elles balaisent varie de 80 à plus de 200 mètres. Plus les pales sont longues, plus la capacité de production d'électricité est importante.

En tournant, le rotor entraîne un générateur qui produit de l'énergie électrique. Dans les éoliennes de conception classique, le générateur nécessite une vitesse de rotation entre

1 000 et 2 000 tours par minute, alors que les pales tournent plus lentement (entre 5 et 25 tours par minute). Dans ces éoliennes, un multiplicateur (ou boîte de vitesse) est installé entre le rotor et le générateur pour augmenter la vitesse de rotation. Il existe aussi des machines de conception plus récente, à entraînement direct, dont les générateurs fonctionnent avec une vitesse de rotation variable (de 5 tours à 2000 tours par minute) et qui n'utilisent pas de multiplicateur. L'ensemble constitué par le multiplicateur et le générateur forme la nacelle. [10]

### **I.3.1.3 : Les types d'éoliennes utilisées pour produire de l'énergie**

Il existe plusieurs types d'éoliennes régulièrement utilisés dans le cadre de la production d'électricité.

#### **A. L'éolienne horizontale:** la plus répandue

L'éolienne horizontale est celle que l'on connaît tous, et qu'on retrouve le plus souvent dans les paysages ruraux.

Ses pales en forme d'hélices captent le vent et tournent autour d'un axe horizontal par rapport au sol (d'où leur nom) pour actionner un générateur. Leur rendement est particulièrement important, ce qui explique en partie pourquoi elles sont si populaires.

#### **B. L'éolienne verticale:** moins commune, mais plus flexible

Il est rare de rencontrer une éolienne verticale. Pourtant, nombre d'entre elles sont intéressantes à bien des égards.

Le fonctionnement demeure similaire à l'éolienne horizontale, mis à part que cette fois-ci, les pâles tournent autour d'une tige verticale, et l'électricité mécanique générée est transformée en énergie électrique par un générateur.

Ces éoliennes sont de formes très variables, elles peuvent être bien plus esthétiques que les éoliennes horizontales et ainsi s'intégrer à merveille dans le paysage urbain ou rural.

Leur design permet de plus de bénéficier de l'énergie éolienne dans des zones où le vent est faible ou au contraire dans des zones où le vent est très intense. Certaines sont ainsi équipées de pâles à voilure tournante permettant de capter le vent et de l'ajuster à la manière d'un voilier.

#### **C. L'éolienne domestique:** fabriquez votre propre énergie éolienne

L'éolienne domestique est plus petite que les éoliennes classiques et permet de générer une partie de sa propre consommation d'énergie. Les éoliennes domestiques sont aussi bien

verticales qu'horizontales et certaines possèdent même un design élégant pour se fondre dans le paysage.

Il est peu probable que vous ne puissiez utiliser cette énergie exclusivement pour votre maison, mais elle peut être une bonne source d'énergie d'appoint si vous vivez dans un endroit venté. Idéal pour réduire sa facture d'électricité tout en faisant un geste pour la planète.

#### **D. L'éolienne offshore : production d'électricité en pleine mer**

L'éolienne offshore est le plus souvent une éolienne verticale, située en pleine mer. L'avantage de produire de l'énergie éolienne en pleine mer est bien entendu de bénéficier de plus de vent, sans les obstacles et reliefs présents sur la terre ferme qui ont tendance à l'atténuer. [11]

### **I.3.1.4: Les avantages d'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'était fixée l'Union Européenne 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).

Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.

Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.

Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original. [12]

### **I.3.1.5: Les inconvénients de l'énergie éolienne**

Les inconvénients de l'éolienne sont eux aussi assez nombreux suivant votre situation :

- Le vent n'est pas une source d'énergie constante. Pas de vent, pas de production d'électricité.
- L'énergie éolienne doit toujours ou presque être associée à une autre source d'énergie.
- Certaines éoliennes sont bruyantes
- Tout le monde n'apprécie pas la vue d'une éolienne dans le paysage.
- Les éoliennes peuvent être dangereuses pour la faune sauvage (notamment les oiseaux)
- Implanter massivement des éoliennes est compliqué puisque les zones intéressantes sont limitées.
- Les éoliennes offshore peuvent être des territoires de pêche ou de plaisance.
- Les coûts pour les particuliers qui veulent installer une éolienne restent importants. [11]

### **I.3.2: L'énergie biomasse**

#### **I.3.2.1: Définition et catégories**

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- Les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- Les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- Les gazeux (ex : biogaz).

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse est parfois considérée comme une source d'énergie renouvelable uniquement si sa régénération est au moins égale à sa consommation (par exemple, l'utilisation

du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres) [13] , Et aussi La biomasse est la première source d'énergie à avoir été exploitée par les hommes, et longtemps elle a été la plus importante. Ce n'est qu'avec la révolution industrielle et les hydrocarbures (charbon, pétrole) qu'elle a perdu de son importance dans les pays industrialisés. Cependant, en tant que source d'énergie renouvelable et neutre en carbone, la biomasse est l'objet d'un regain d'intérêt [14] , et elle La biomasse est une source d'énergie renouvelable et propre. Elle permet en outre de valoriser le cycle de vie des déchets.

La biomasse ne produit pas de polluants et son impact sur l'effet de serre est réduit. Elle rejette uniquement une quantité de CO<sub>2</sub> équivalente à celle stockée par les végétaux pendant leur croissance.

Pendant la méthanisation, les émissions de méthane sont réduites, ce qui contribue également à réduire l'impact de la production d'énergie sur l'effet de serre [e] , Aussi La biomasse est un terme qui réunit une grande quantité de matériaux, de nature extrêmement hétérogène.

La biomasse utilisable à des fins énergétiques correspond à tous les matériaux organiques pouvant être employés directement comme combustibles, soit transformés en autres substances (solide, liquide ou gazeuse), d'utilisation plus facile dans les installations de conversion. D'autres formes de biomasses peuvent également être constituées par des résidus de cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale (paille) ou de plantes cultivées seul but énergétique. Les types de biomasse les plus importants sont les résidus forestiers, les restes d'industrie de transformation du bois, les restes des entreprises zootechniques, les restes des marchés et les résidus ménagers solides.

La biomasse représente la forme la plus sophistiquée d'accumulation de l'énergie solaire. Cela permet en effet aux plantes de convertir le CO<sub>2</sub> atmosphérique en matière organique, à travers le processus de photosynthèse, durant leur croissance. De cette manière, environ 2·10<sup>11</sup> tonnes de carbone sont fixées globalement par an, avec un contenu énergétique de l'ordre de 70·10<sup>3</sup> Mtep.

L'utilisation des biomasses à des fins énergétiques ne contribue pas à l'effet de serre puisque la quantité de CO<sub>2</sub> relâché durant la décomposition, ou la conversion énergétique est équivalente à celle absorbée durant la croissance de la biomasse même. Il n'y a donc aucune contribution nette à l'augmentation du niveau de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [15].



Figure (I. 3) : L'énergie biomasse [15]

### I.3.2.2: Les types d'énergie biomasse

La transformation de la biomasse en énergie dépend du cycle de la matière vivante animale ou végétale considérée.

À partir de biomasse, nous pouvons produire :

- Des biocarburants pour le transport, fabriqués principalement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées ;
- Du chauffage domestique à partir de la combustion du bois ;
- De l'électricité grâce à la chaleur dégagée par combustion de bois, de végétaux, de déchets ménagers organiques ou encore de déchets agricoles ;
- Du biogaz à partir de la fermentation de ces mêmes matières [16], C'est en termes d'énergie Deux types de biomasse sont utilisés : la biomasse sèche et la biomasse humide ,  
En revanche, les deux types de biomasse :
  - ❖ la biomasse énergie .
  - ❖ la biomasse au sens de l'écologie.

En écologie, la biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale présente dans un espace fini, un biotope par exemple, à un instant t. On considère la biomasse terrestre et la biomasse aquatique pour déterminer la biomasse totale des organismes présents sur terre.

Cette biomasse permet de nourrir et d'alimenter en ressources tous les êtres vivants y compris les humains. [17]

### I.3.2.3: Fonctionnement technique ou scientifique

La valorisation énergétique de la biomasse peut générer trois formes d'énergie utile, selon le type de biomasse et les techniques employées :

Chaleur : Obtenue par combustion ou processus thermique.

Électricité : Générée à partir de la chaleur produite par la biomasse, souvent par le biais de turbines.

Force motrice de déplacement : Utilisée dans des moteurs pour la propulsion.

Les trois procédés de valorisation de la biomasse comprennent la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants. Chacun de ces processus offre des méthodes distinctes pour exploiter l'énergie contenue dans la biomasse, contribuant ainsi à divers besoins énergétiques. [16]

#### **I.3.2.4: Présentation des technologies relatives à la filière biomasse**

Les technologies associées à la filière biomasse permettent la transformation de la matière organique en divers produits énergétiques tels que biocombustibles, biogaz et biocarburants. Cette matière peut également être brûlée pour générer mouvement, chaleur et éventuellement de l'électricité, notamment dans des installations de cogénération.

La filière biomasse se compose de plusieurs sous-filières, caractérisées par d'importantes disparités. On peut identifier trois sous-filières, différenciées en fonction de la taille et de la production d'énergie résultante. Ces différentes branches reflètent la diversité des applications technologiques et des méthodes utilisées dans l'exploitation de l'énergie issue de la biomasse. [18]

#### **I.3.2.5: Les avantages d'énergie biomasse**

Les avantages de l'énergie biomasse, loin d'être un inconvénient pour les entreprises, est que ce type d'énergie fait appel à des ressources peu coûteuses, qui sont disponibles en grandes quantités. Celles-ci peuvent être d'origine végétale ou animale. Les matières organiques sont alors récupérées pour être ensuite exploitées. Il peut s'agir :

- Du bois extrait dans les forêts,
- Des déchets végétaux produits par l'agriculture (feuilles, paille, tiges...),
- Des déchets alimentaires générés par l'industrie ou les foyers,
- Du fumier récolté dans les exploitations agricoles...
- Le bois occupe une part importante de l'énergie de la biomasse. Récolté dans les forêts, le bois issu des arbres est exploité à hauteur de 60 % de ce qui pousse annuellement. Les forêts ont donc le temps de se régénérer. Cela constitue indéniablement un avantage majeur de l'énergie de la biomasse.
- Point positif, ces matières organiques peuvent servir à chauffer une maison. En effet, la cheminée utilise l'énergie de la biomasse. De nos jours, les appareils pour brûler le bois

sont design et permettent ainsi de profiter de cette énergie renouvelable avec style, ce qui représente un avantage de plus pour l'énergie de la biomasse.

- Disponible partout, l'énergie de la biomasse est inépuisable. Les déchets étant produits par chaque espèce vivante, leur disponibilité est donc illimitée. Ce dernier point est un atout considérable par rapport aux ressources énergétiques fossiles, comme le pétrole ou encore le charbon. On le voit donc, l'énergie biomasse dispose de nombreux avantages. Mais des inconvénients sont aussi à noter.]19] Comme nous l'avons vu, la biomasse peut être transformée en différentes sources d'énergie. Elle répond ainsi à de nombreux besoins, des entreprises comme des particuliers. Mais ses avantages ne s'arrêtent pas là.
- Une source d'énergie renouvelable
- L'énergie biomasse représente une solution intéressante, en remplacement des énergies fossiles, pétrole et charbon, dont les réserves diminuent. Utilisée depuis la préhistoire, cette matière première renouvelable est disponible aux 4 coins du globe. De plus, elle se régénère très rapidement : les forêts se reconstituent, les espèces vivantes émettent des déchets organiques en permanence... Cette énergie est donc inépuisable, à condition d'être employée de façon durable et raisonnable.
- Une réduction globale des gaz à effet de serre
- L'énergie biomasse apparaît comme la réponse aux enjeux climatiques. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) rejeté lors de la combustion est ensuite absorbé par les plantes et végétaux. C'est un cycle vertueux sans fin qui s'installe ! Chaque jour, de grandes quantités de débris solides sont générées par les ménages et les entreprises. En réutilisant une partie des déchets biodégradables, cette énergie verte contribue également à la baisse de la pollution.
- Des ressources peu coûteuses
- Pour les entreprises comme pour les particuliers, le recours à l'énergie biomasse est une solution à la fois écologique et économique. Bois, fumier, déchets organiques, les matières premières utilisées pour produire l'énergie sont peu coûteuses. [20]

### **I.3.2.6: Les inconvénients de l'énergie biomasse**

Malgré ses nombreux avantages, cette énergie verte présente aussi quelques inconvénients.

- Des risques de surexploitation
- Face à cet engouement pour la biomasse, de nouvelles filières ont vu le jour au cours des dernières décennies. L'un des risques est que l'usage des terres arables pour produire de l'énergie biomasse se fasse au détriment d'autres types de cultures. L'écueil de la surexploitation est d'autant plus important que le rendement de cette énergie verte est assez faible. On pourrait donc assister à une déforestation majeure, qui serait tout aussi dommageable pour l'environnement et la biodiversité.
- Des risques de pollution

- Mal employée, l'énergie biomasse peut être une source de pollution. Les produits issus de la biomasse sont non-toxiques, sauf si la matière organique a elle-même été polluée par des métaux lourds, des radionucléides... Pour réduire les émissions polluantes, il est donc primordial que les matières premières utilisées, bois ou pellets, par exemple, soient de bonne qualité.
- Des coûts annexes en augmentation
- Les ressources employées pour produire de l'énergie biomasse sont peu onéreuses, mais il faut également tenir compte des coûts annexes liés à sa production et à son transport. Les dépenses pour acheminer le bois et les ressources sont dépendantes du prix du carburant . [20]

### I.3.3: L'énergie solaire

#### I.3.3.1: Définition

L'énergie solaire est une source d'énergie basée sur le soleil, elle est classée dans la catégorie des énergies renouvelables car considérées comme inépuisables, grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité, elle est captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Ils convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité ou en chaleur [22]



Figure (I. 4) : L'énergie solaire [22]

#### I.3.3.2: Principe physique de l'énergie solaire

Le soleil libère principalement des rayonnements dans la partie "visible" du spectre, c'est-à-dire la lumière, avec des longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nanomètres. Plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie transportée par les photons est élevée. Cette énergie peut être transférée sous forme de chaleur, provoquant l'excitation des atomes constituant la matière, les faisant ainsi vibrer et s'échauffer.

Lorsque les capteurs sont exposés aux rayons du soleil, ils convertissent l'énergie des photons soit en énergie thermique, en excitant les atomes et générant de la chaleur, soit en énergie électrique. Cette conversion permet de tirer parti de l'énergie solaire de manière à alimenter des systèmes thermiques ou électriques pour diverses les applications. [23]

### **I.3.3.3: Les types d'exploitations de l'énergie solaire**

Il existe trois types d'énergie solaire sont :

- L'énergie photovoltaïque
- L'énergie thermique
- L'énergie solaire thermodynamique

#### **A- l'énergie photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque exploite le rayonnement solaire pour générer de l'électricité. Plus précisément, elle repose sur la transformation de l'énergie contenue dans les photons de la lumière en électricité. C'est pourquoi les panneaux photovoltaïques, chargés de capter cette énergie, sont souvent installés sur les toits, orientés de manière optimale.

La cellule photovoltaïque, fabriquée en silicium, joue un rôle crucial dans ce processus. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux.

Dans le contexte des panneaux photovoltaïques et de l'énergie solaire, les photons génèrent un courant électrique continu, qui est ensuite converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. L'électricité ainsi produite peut être utilisée instantanément pour alimenter des appareils ou éclairer un espace.

Toute installation solaire requiert donc trois composants essentiels pour assurer la capture des rayons solaires, leur conversion en électricité, et leur distribution :

- Des panneaux photovoltaïques ;
- Un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif ;
- Un compteur pour mesurer la quantité d'électricité produite et distribuée.

#### **B- Le solaire thermique :**

Le solaire thermique utilise des panneaux solaires thermiques équipés de fluides caloporteurs. Lorsqu'ils sont exposés au soleil, ces fluides absorbent la chaleur et la transmettent ensuite au ballon d'eau chaude.

L'énergie solaire thermique trouve des applications variées, notamment pour :

- Le chauffage solaire ;

- Le chauffe-eau solaire ;
- Les cuisinières solaires.

Contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque, le solaire thermique ne génère pas d'électricité, mais plutôt de la chaleur. Il peut être particulièrement utile dans divers contextes, y compris dans des applications industrielles, où il peut contribuer à remplacer une partie de l'énergie fossile utilisée.

### **C- L'énergie solaire thermodynamique :**

L'énergie solaire thermodynamique est générée par le biais de centrales solaires à concentration, qui consistent en un agencement de miroirs contenant des fluides caloporteurs, connectés à un générateur d'électricité solaire.

Similaire aux panneaux solaires thermiques, ce sont les miroirs qui convertissent l'énergie captée des rayons du soleil en chaleur. Cette chaleur atteint des températures très élevées, bien au-delà de celles enregistrées au moment de la collecte, variant de 250 à 800 degrés en fonction de la technique employée.

Par la suite, cette chaleur est convertie en électricité à l'aide d'une turbine et d'un alternateur, similaire au processus d'une centrale thermique.

En France, l'exploitation de cette forme d'énergie solaire thermodynamique est limitée, avec seulement une centrale thermodynamique connue, celle de Llo. Cela s'explique en partie par le climat tempéré de la France, qui ne répond pas totalement aux besoins élevés en chaleur de cette technologie. En revanche, des pays comme l'Espagne ont adopté davantage cette solution en raison de conditions climatiques plus favorables. [22]

#### **I.3.3.4: Les avantages de l'énergie solaire**

L'énergie solaire présente plusieurs avantages qui en font une source d'énergie prometteuse pour l'avenir :

- Propreté environnementale : L'énergie solaire est propre et ne produit aucun gaz à effet de serre, faisant d'elle une option respectueuse de l'environnement. Elle est considérée comme une énergie verte, destinée à remplacer progressivement les énergies fossiles.
- Ressource inépuisable : Contrairement aux énergies fossiles qui ont un potentiel d'épuisement, l'énergie solaire est une ressource renouvelable inépuisable. Elle ne subit pas les contraintes liées à un éventuel épuisement des gisements.
- Gratuité de l'exploitation : L'exploitation de l'énergie solaire est gratuite, contrairement aux énergies fossiles qui nécessitent d'importants investissements et ont un impact négatif sur le paysage, notamment par le forage et la fracturation hydraulique.

- Disponibilité mondiale : L'énergie solaire est accessible partout dans le monde, même si l'exposition solaire peut varier d'une région à l'autre. Cela la rend équitable, ne dépendant pas de gisements concentrés sur des zones spécifiques du globe.
- Polyvalence d'utilisation : Elle peut répondre à divers besoins domestiques et servir comme source d'énergie complémentaire. [24]

### **I.3.3.5: Les inconvénients de l'énergie solaire**

Malgré les perspectives optimistes entourant la généralisation progressive de l'utilisation de l'énergie solaire pour les besoins courants d'une habitation tels que le chauffage, l'électricité et la production d'eau chaude sanitaire, certains obstacles entravent encore une adoption massive et généralisée :

- Dépendance au rayonnement solaire : L'énergie solaire est intrinsèquement liée au rayonnement solaire, qui varie considérablement d'une région à l'autre. Ainsi, elle ne peut actuellement satisfaire pleinement les besoins des logements situés dans des zones à faible ensoleillement, où la production solaire pourrait être trop intermittente.
- Coûts d'installation élevés : L'utilisation du rayonnement solaire entraîne des coûts initiaux substantiels, généralement compris entre 10 000 et 20 000 €, en fonction de la puissance et de l'étendue de l'équipement installé. Des frais supplémentaires sont également à prévoir pour l'achat de batteries destinées à stocker l'énergie accumulée. Néanmoins, ces coûts peuvent être considérablement réduits grâce aux subventions gouvernementales et amortis rapidement grâce aux économies d'énergie réalisées chaque année, ainsi qu'à la possibilité de revendre l'excédent d'électricité aux fournisseurs d'énergie.
- Diminution du rendement avec le temps : Enfin, le rendement de l'installation solaire décroît au fil des années en raison de l'usure de l'équipement, surtout après 20 ans. De plus, l'onduleur doit être remplacé tous les 10 ans, ce qui peut représenter un coût supplémentaire. [24]

## **I.3.4: L'énergie hydraulique**

### **I.3.4.1: Définition**

L'énergie hydraulique (aussi appelée hydroélectricité) [25], elle est une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marins etc. [26]. Dus à une différence de hauteur dans le chemin qu'elle parcourt.

Ensuite, cette force de l'eau est exploitée pour produire de l'énergie [25], Cette énergie est actuellement principalement convertie en énergie électrique. [26]



Figure (I. 5) : L'énergie hydraulique [26]

### . I.3.4.2: Les types des centrales hydrauliques

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de la chute d'eau et par voie de conséquence, selon le débit, on trouve :

a) **Les centrales électriques de haute chute ( $h$  supérieures à 300m):**

Les centrales de haute chute se distinguent par des hauteurs de chute dépassant les 300 mètres. Elles sont équipées de turbines Pelton, et leur emplacement privilégié se situe principalement dans les Alpes et d'autres régions montagneuses. Ces installations se caractérisent par une capacité de réservoir relativement limitée, mettant en œuvre la technologie Pelton pour exploiter efficacement l'énergie cinétique de l'eau à haute altitude.

b) **Les centrales électriques de moyenne chute ( $30 < h < 300m$ ):**

Les centrales de moyenne chute se positionnent avec des hauteurs de chute comprises entre 30 mètres et 300 mètres. Elles utilisent des turbines Francis et sont alimentées par l'eau retenue derrière des barrages construits dans le lit de rivières situées dans des régions montagneuses. Ces centrales disposent généralement de réservoirs de grande capacité. Un exemple concret est la centrale Manic 5, caractérisée par une hauteur de chute de 155 mètres et une puissance de 1528 MW.

c) **Les centrales électriques de basse chute ( $h < 30m$ ):**

Les centrales de basse chute, également connues sous le nom de centrales au fil de l'eau, présentent des hauteurs de chute inférieures à 30 mètres. Elles font usage de turbines Kaplan ou Francis et sont établies le long de fleuves ou de rivières à fort débit. Un exemple notable est la centrale Beauharnois, située sur le fleuve Saint-Laurent, avec une hauteur de chute de 25 mètres et une puissance de 1575 MW. Ces centrales exploitent la faible hauteur de chute en maximisant le débit d'eau pour générer de l'électricité de manière efficace. [27]

**I.3.4.3: Les avantages de l'énergie hydraulique**

- Source Verte : L'hydroélectricité provient d'une source d'énergie renouvelable.
- Zéro Émission de Gaz à Effet de Serre : Cette forme d'énergie n'émet aucun gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la préservation de la planète contre le réchauffement climatique.
- Production sans Déchets Toxiques : Contrairement à l'énergie nucléaire, l'énergie hydraulique ne génère pas de déchets, en particulier ceux ayant un fort potentiel toxique.
- Régulation des Pics de Consommation : Les centrales hydroélectriques, avec leurs réservoirs de stockage, permettent de réguler les pics de consommation d'électricité, offrant une solution pour éviter des coupures de réseau imprévues, notamment en période hivernale.
- Coût Abordable à Long Terme : L'énergie verte issue de l'hydraulique est accessible à un coût abordable sur le moyen et long terme.
- Stimulus Économique et Touristique : Les centrales hydroélectriques contribuent au développement économique et touristique des zones où elles sont implantées.[28]

**I.3.4.4: Les inconvénients de l'énergie hydraulique**

- La construction des infrastructures hydrauliques prend de la place et est souvent à l'origine de déplacements de populations.
- La production hydroélectrique demande de lourds investissements de capitaux
- L'énergie hydraulique est soumise aux aléas climatiques et peut représenter une source de production d'énergie électrique instable.[28]

**I.3.5: L'énergie géothermique****I.3.5.1: Définition**

La géothermie, un terme dérivé du grec "géo" signifiant "la Terre" et "thermos" signifiant " la chaleur ", englobe à la fois la discipline scientifique étudiant les phénomènes thermiques internes de la planète et la technique visant à exploiter ces phénomènes. De manière plus générale, le terme "géothermie" fait référence à l'énergie géothermique provenant de la chaleur interne de la Terre, pouvant être convertie en forme d'énergie utilisable.

Pour capturer cette énergie géothermique, on a recours à la circulation d'un fluide dans les profondeurs du sol. Ce fluide peut être issu d'une nappe d'eau chaude naturelle capturée, ou bien de l'eau injectée sous pression afin de fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide s'échauffe au contact de la chaleur terrestre et remonte chargé d'énergie thermique. Cette énergie peut être directement utilisée ou partiellement convertie en électricité.

L'exploitation de l'énergie géothermique à des fins de chauffage ou de production d'eau chaude est une pratique locale qui remonte à des millénaires, avec des exemples notables tels que la Chine, la Rome antique, et le bassin méditerranéen. [29]



**Figure (I. 6):** L'énergie géothermique

### **I.3.5.2: Principe de fonctionnement**

Le fonctionnement de l'énergie géothermique repose sur des stations thermiques agissant comme une source de production d'électricité à travers les étapes suivantes :

**a) Captation de chaleur de la terre à l'eau :**

La première étape consiste à transférer la chaleur provenant de la terre vers de l'eau, provoquant ainsi sa transformation en vapeur.

**b) Conversion de la vapeur en énergie mécanique par une turbine :**

La vapeur ainsi générée est dirigée vers une turbine, où une partie de celle-ci est convertie en énergie mécanique. La turbine est ainsi mise en rotation par la force de la vapeur.

**c) Production d'électricité par un générateur associé à la turbine :**

La turbine, à son tour, entraîne un alternateur ou générateur. Cet alternateur convertit l'énergie mécanique de la turbine en électricité, générant ainsi un courant électrique exploitable.

Le fluide géothermique contenu dans des réservoirs profonds est utilisé pour actionner une turbine, qui, à son tour, alimente un alternateur produisant de l'électricité. Cette approche exploite efficacement la chaleur interne de la terre pour générer de l'énergie électrique de manière durable. [30]

### I.3.5.3: Les types des centrales géothermiques

Les centrales géothermiques se divisent en plusieurs types, dont voici une brève description :

a) **Centrales à vapeur sèche :**

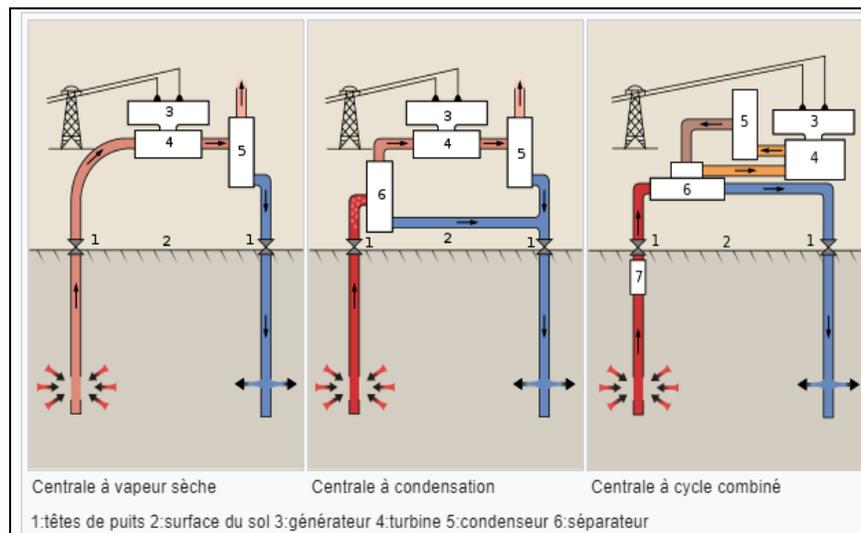
Ce modèle, le plus simple et ancien, utilise directement la vapeur géothermique à des températures de 150 °C ou plus pour actionner les turbines.

b) **Centrales à condensation :**

Ces centrales injectent de l'eau chaude à haute pression, provenant des profondeurs géothermiques, dans des cuves à basse pression. La vapeur résultante est utilisée pour actionner les turbines. Ce type est le plus courant parmi les centrales géothermiques actuellement en exploitation, nécessitant des températures de fluide d'au moins 180 °C.

c) **Centrales à cycle combiné :**

Ce modèle, plus récent, peut accepter des températures de fluide aussi basses que 57 °C. L'eau géothermique, modérément chaude, transfère sa chaleur à un fluide secondaire avec un point d'ébullition bien plus bas. Cela déclenche la vaporisation du fluide secondaire, qui à son tour actionne les turbines. Ce type est actuellement le plus répandu parmi les nouvelles centrales géothermiques en construction. Le Cycle de Rankine organique et le Cycle de Kalina sont deux technologies utilisées. L'efficacité énergétique de ce type de centrale est généralement d'environ 10-13 % .



Figure(I. 7) :Principe de fonctionnement [31]

#### I.3.5.4: Les avantages de l'énergie géothermique

Les avantages de l'énergie géothermique comprennent :

- **Ressource Renouvelable** : L'énergie géothermique est considérée comme une ressource renouvelable, à condition que son taux d'extraction reste inférieur à son taux naturel de recharge.
- **Énergie Propre** : Elle est classée parmi les énergies "propres", car son utilisation réduit la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles et d'autres ressources non renouvelables.
- **Production Minimale de Déchets** : La production d'énergie géothermique ne génère très peu, voire aucun déchet, ce qui contribue significativement à réduire son impact sur l'environnement.
- **Émissions Faibles de CO<sub>2</sub>** : Les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) liées à l'énergie géothermique sont nettement inférieures à celles produites par la combustion de combustibles fossiles pour obtenir une quantité similaire d'énergie, ce qui limite sa contribution au réchauffement climatique.
- **Coûts de Production Faibles** : L'énergie géothermique offre des coûts de production d'électricité relativement bas, ce qui peut entraîner des économies financières par rapport à d'autres sources d'énergie.
- **Abondance des Ressources** : On estime que l'énergie géothermique a le potentiel de fournir une quantité d'énergie supérieure à celle combinée de tous les combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium.[32]

#### I.3.5.5: Les inconvénients de l'énergie géothermique 22

Les inconvénients de l'énergie géothermique incluent :

- **Faible Développement** : L'énergie géothermique est encore peu développée, se trouvant à ses débuts en termes d'utilisation.
- **Risques de Fuites** : Des fuites peuvent se produire, entraînant la libération de substances dangereuses telles que le sulfure d'hydrogène, l'arsenic, l'ammoniac, susceptibles de contaminer le sol et les eaux environnantes.
- **Localisation Spécifique**: Les centrales géothermiques doivent être installées dans des endroits où la chaleur du sous-sol est élevée, limitant ainsi leur emplacement.
- **Non-Transportable** : Contrairement à d'autres sources d'énergie, l'énergie géothermique n'est pas transportable et doit être utilisée sur place, ce qui nécessite un approvisionnement local.
- **Impact sur le Paysage** : La construction d'installations pour extraire la chaleur des roches souterraines et du magma entraîne des modifications du terrain, affectant ainsi le paysage.

- **Tremblements de Terre :** Des petits tremblements de terre peuvent survenir dans les zones proches des centrales géothermiques en raison du refroidissement et de la rupture soudaine des roches de la croûte terrestre.
- **Pollution Thermique :** L'énergie géothermique peut engendrer une pollution thermique, influençant les conditions environnementales locales. [32]

#### **I.4: L'énergie renouvelable dans le monde**

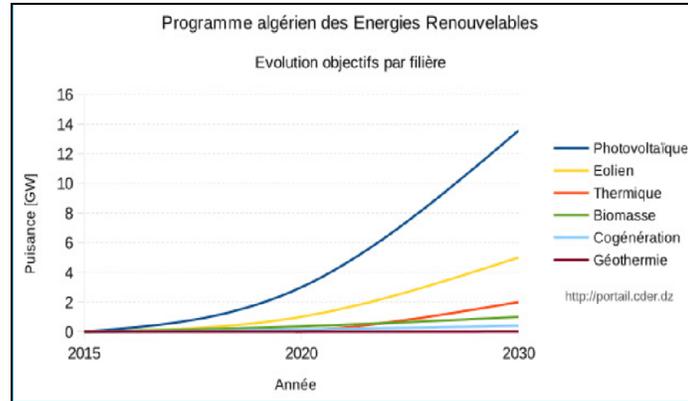
En 2018, les énergies renouvelables ont représenté 11% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde, contre 85% pour les énergies fossiles ! Les énergies fossiles ont encore plusieurs dizaines d'années de réserve devant elles : elles ne vont pas s'épuiser subitement, il y aura un étalement dans le temps. Mais peu à peu, leur prix vagrimer, ce qui sera une nouvelle incitation à développer les énergies renouvelables.

La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire thermique), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire photovoltaïque, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 %.[21]

Si elles sont encore peu utilisées dans les transports ou l'industrie, les renouvelables occupent une part de plus en plus importante dans la production d'électricité. Cette part, de 26% aujourd'hui, pourrait atteindre 40% en 2040. [7]

#### **I.5: L'énergie renouvelable dans l'Algérie**

L'Algérie représente l'un des principaux candidats pour permettre aux experts en énergie de jouer un rôle central dans le secteur des énergies renouvelables en raison des vastes ressources naturelles présentes dans notre pays. Selon la figure , d'ici à 2030, la production d'électricité dépendra largement de l'énergie solaire et éolienne, avec environ 40% de la production totale d'électricité destinée à la consommation nationale provenant de sources renouvelables. Cependant, pour concrétiser cet objectif, des efforts considérables doivent être déployés, accompagnés de projets innovants. Malgré le caractère coûteux de ces investissements, ils contribueront progressivement au développement du pays.[33]



**Figure (I. 8):** Programme algérien des Energies Renouvelables [33]

## I.6: Conclusion

A travers notre étude de ce chapitre, nous concluons que les énergies renouvelables revêtent une importance cruciale. Chaque type d' (EnR) présente des caractéristiques distinctives et un mode de fonctionnement qui le distingue des autres. Cette diversité a conduit la plupart des pays développés à compter sur ces sources d'énergie pour la production d'électricité et la satisfaction de leurs besoins, en fonction de leurs capacités disponibles.

# ***Chapitre II***

## ***Généralités sur Le système photovoltaïque***

## Chapitre II : Généralités sur le système photovoltaïque

### II.1: Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.[34]

Le photovoltaïque découvert par Alexandre Ermont Becquerel en 1839. Selon les estimations l'énergie rayonnée par le soleil représenterait chaque année 40 000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles. Malgré cela, l'énergie solaire reste un domaine assez peu exploitée. Mais aujourd'hui le solaire photovoltaïque est en plein développement, on obtient un cumul de 1791 MWc en 2005 pour l'Europe (contre 1147 MWc en 2004). Le leader européen est l'Allemagne avec 1537 MWc. [35]

Ce présent chapitre comporte deux parties principales précédées par un prélude sur l'énergie photovoltaïque.

Dans la première partie, nous avons parlé sur le système photovoltaïque

Dans deuxième partie, nous avons parlé sur la commande MPPT et notre méthode et les types de l'hacheur.

### II.2: L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques. Il permet la production d'électricité à partir du rayonnement solaire et est mis en œuvre en particulier dans les cellules photovoltaïques. Ce phénomène physique a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel.

Lorsqu'un photon d'énergie suffisante frappe la zone de transition d'une cellule photovoltaïque composée de matériau semi-conducteur, typiquement de deux couches de silicium dopées différemment (N et P), il arrache un électron à l'atome de silicium en y laissant un trou. Cet électron, sous l'effet du champ électrique, se déplace du côté N tandis que le trou migre du côté P (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction). Ainsi, grâce aux photons qui transmettent leur énergie aux électrons, un mouvement de charges électriques se produit et un courant se manifeste à l'intérieur de la matière cristalline.

Outre les cellules photovoltaïques (ou photopiles), qui peuvent être constituées en panneaux solaires photovoltaïques, plusieurs types de composants utilisent ce principe : photodiodes, phototransistors [36].

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel, père d'Henri (qui a découvert la radioactivité), et présenté à l'Académie des sciences en 1839 [37].

Edmond Becquerel a plongé des électrodes de platine couvertes de chlorure d'argent ou de cuivre oxydé dans un électrolyte, les électrodes étant reliées à un galvanomètre dans une cellule électrochimique [36].

Il a montré que, sous l'effet de la lumière, une circulation de courant apparaissait dans le galvanomètre [38].

Il en a étudié la variabilité sous l'effet de la longueur d'onde utilisée, préfigurant l'étude de l'effet photoélectrique et des propriétés des semi-conducteurs [38]. ensuite l'idée d'étudier la variabilité du courant sous l'effet de la longueur d'onde utilisée, préfigurant ainsi l'étude de l'effet photoélectrique et des propriétés des semi-conducteurs. Aujourd'hui, cette expérience peut être reproduite en oxydant une petite pièce de cuivre (les pièces de quelques centimes d'euros) plongée dans une solution saline ; on observe alors un courant de l'ordre de quelques  $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , créé par la lumière, proportionnel à son intensité et circulant entre le contact pris sur la pièce oxydée et un autre contact plongé dans l'électrolyte. Ces cellules solaires élémentaires ont des rendements 100 000 fois plus faibles que ceux des cellules solaires actuelles, mais elles constituent une démonstration simple de l'effet photovoltaïque, tel que Becquerel a pu l'observer.

La conversion photovoltaïque et son rendement dans les matériaux, les niveaux d'énergie accessibles aux électrons sont regroupés en bandes.

L'absorption de photons par certains de ces matériaux, permet à des électrons de passer des niveaux peuplés moins énergétiques (bande de valence, VB) vers des niveaux non peuplés plus énergétiques (bande conduction, CB). Cela crée un potentiel électrochimique (Figure 1). Si l'on sait extraire les électrons des niveaux fortement énergétiques et les ramener dans les niveaux à plus basse énergie après les avoir fait passer dans le circuit électrique extérieur à la cellule, on peut récupérer l'énergie électrique produite.

Pour cela, il faut associer au matériau absorbant des contacts sélectifs qui vont permettre aux électrons d'être extraits des niveaux de haute énergie vers l'un des contacts (la borne négative n, du côté de la bande de conduction), et revenir par l'autre contact, pour fermer le circuit en revenant dans le matériau à un niveau de plus basse énergie (dans la bande de valence, contact positif p), et ainsi être prêt pour un nouveau cycle avec l'absorption d'un nouveau photon. Ces contacts sélectifs de part et d'autre peuvent être conçus grâce à une habile ingénierie des niveaux d'énergie à l'interface (Figure 1). Les rendements de la conversion sont alors de l'ordre de 30 % au mieux (voir encadré ci-dessous). En effet, une partie importante des photons ne pourra pas être absorbée car ils auront une énergie insuffisante pour exciter les électrons :

Ils traversent le matériau sans être absorbés. En revanche, les photons qui ont une énergie plus grande que nécessaire ( $E_{\text{photon}} > E_{\text{gap}}$ ) vont créer des électrons qui vont rapidement perdre leur excédent d'énergie avant d'être collectés dans le contact.

Approximativement, dans le meilleur des cas, un tiers de l'énergie des photons passe à travers le matériau, un tiers est dissipé en chaleur et un tiers seulement fournira in fine de l'électricité.

Le rendement  $\eta$  d'une cellule photovoltaïque est donné par la relation :

$$\eta = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{lumi}}} = \frac{P_{\text{elec}}}{\varepsilon S}$$

**(II.1)**

$P_{\text{elec}}$ : puissance électrique en watts (W).

$P_{\text{lumi}}$ : puissance lumineuse reçue en watts (W).

$\varepsilon$  : éclairement en watts par mètre carré ( $\text{W}\cdot\text{m}^2$ ).

$S$  : surface de la cellule en mètre carré ( $\text{m}^2$ ).

Avec :

L'énergie d'un photon :

$$E_{\text{phot}} \eta = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{lumi}}} = \frac{P_{\text{elec}}}{\varepsilon S}$$

**(II.2)**

$E$  : énergie du photon en joules (J)

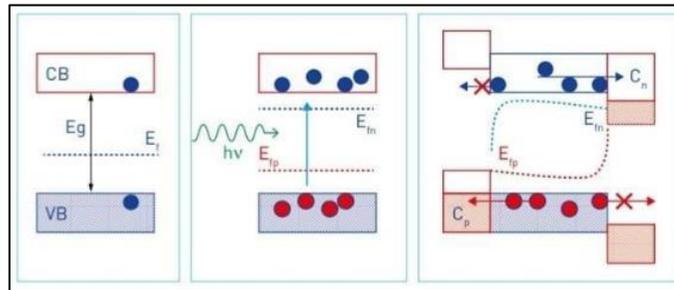
$h$  : constante de Planck en joules secondes (J·S):

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ (J}\cdot\text{S)}$$

$C$  : célérité de la lumière dans le vide en mètres par seconde ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ):

$$c = 3,00.108 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$l$  : longueur d'onde du photon en mètres (m). [39]



**Figure (II.1)** : Principe du transfert des électrons via l'apport

Energétique d'un photon et récupération de l'énergie.

- A) Situation d'équilibre : à l'obscurité, le potentiel électrochimique  $E_F$  est le même pour tous les électrons du matériau.
- B) Sous l'effet de la lumière :

La bande de conduction (CB) est enrichie en électrons et son potentiel électrochimique augmente ( $E_{fn}$ ), le contraire se produit pour les électrons de la bande de valence (VB). C) Avec des contacts électriques dont les niveaux d'énergie sont correctement conçus, on peut récupérer les électrons énergétiques seulement dans le contact de droite et les renvoyer sélectivement dans la bande de valence par le contact de gauche.

EGP, différence entre le niveau de la VB le plus haut et celui de la CB le plus bas, est l'énergie de seuil d'absorption, ou de « gap ».

## II.3: Les panneaux photovoltaïques

### II.3.1: Les panneaux photovoltaïques dans l'histoire

L'histoire de la photovoltaïque remonte à plus d'un siècle et le développement des panneaux solaires photovoltaïques résulte d'une série de découvertes dans le domaine de la science des matériaux et de la conversion de l'énergie solaire en électricité.

1839 : l'effet photovoltaïque est découvert pour la première fois par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel. Il constate que certaines substances, comme le sélénium, produisent une petite quantité d'électricité lorsqu'elles sont exposées à la lumière solaire.

Fin du 19e siècle : les premières cellules solaires basées sur le sélénium sont développées. Encore peu efficaces, elles sont utilisées essentiellement pour la recherche.

Années 1950 : les premières cellules solaires au silicium, base des panneaux photovoltaïques modernes, apparaissent. Le silicium s'est avéré plus efficace pour la conversion de la lumière

solaire en électricité que le sélénium. Dans la foulée de cette avancée, les premiers panneaux solaires sont créés pour alimenter les satellites et les missions spatiales.

Années 1970 : cette décennie marque les débuts de la commercialisation des panneaux solaires pour des applications terrestres, notamment l'alimentation en électricité des bâtiments et des équipements éloignés. Les coûts diminuent progressivement, ce qui contribue à l'adoption croissante de l'énergie solaire.

Depuis les années 1970 : la technologie photovoltaïque n'a cessé de s'améliorer en termes d'efficacité, de durabilité et de coût. Aujourd'hui, les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans le monde entier pour produire de l'électricité renouvelable, contribuant ainsi à la transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement. Ils sont utilisés dans des installations résidentielles, commerciales, industrielles... [40]

### **II.3.2: Définition du panneau photovoltaïque**

Le panneau photovoltaïque recouvre actuellement de nombreux toits en France. À la différence des panneaux solaires qui peuvent aussi produire de l'énergie thermique, il génère uniquement de l'électricité. L'énergie qu'il fournit permet ensuite d'alimenter différents appareils électriques.[41]

### **II.3.3: Les avantages du panneau solaire photovoltaïque**

Les installations photovoltaïques vous font bénéficier d'une grande autonomie. Vous accédez à un confort optimal même si votre maison n'est pas desservie par les réseaux publics.

Aussi, vous pouvez réaliser une économie considérable avec les panneaux photovoltaïques. Si vous optez pour l'autoconsommation, vous réduisez le montant de votre facture. En revendant le surplus ou l'intégralité de l'électricité produite, vous vous constituez un complément de revenus.

Lorsque vous vous tournez vers l'énergie solaire, vous vous engagez dans une démarche éco-responsable. En effet, l'impact de vos activités et de votre consommation sur l'environnement est très réduit.[41]

### **II.3.4: Fonctionnement des panneaux photovoltaïques**

Les panneaux photovoltaïques transforment l'énergie solaire en électricité. Pour ce faire, ses cellules captent les photons délivrés par le soleil. Cela permet de générer du courant continu dans les installations. L'onduleur des panneaux transforme ensuite le courant continu en courant alternatif. C'est celui-ci qui sera utilisé pour alimenter vos appareils électriques.[41]

Un panneau solaire, c'est cet appareil placé au sol, sur les toits ou sur les combrières de parking par exemple qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'énergie électrique ou de

la chaleur (énergie thermique qui a pour but de réchauffer l'intérieur des bâtiments ou de fournir de l'eau chaude).[40]

### **II.3.5: Les deux grandes familles de panneaux solaires**

- A- Les panneaux solaires thermiques** (capteurs solaires thermiques) qui convertissent la lumière en chaleur transformée en eau chaude
- B- Les panneaux solaires photovoltaïques** (installations photovoltaïques) qui convertissent directement la lumière en électricité solaire.

Les panneaux solaires sont conçus pour capturer l'énergie lumineuse du soleil et la convertir en électricité utilisable. Ils sont constitués de plusieurs cellules photovoltaïques en silicium. Ces cellules photovoltaïques sont généralement montées sur un support rigide et recouvertes d'un matériau protecteur transparent, tel que le verre, pour les protéger des intempéries.

Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules photovoltaïques, les électrons contenus dans les cellules sont excités, créant ainsi un flux d'électricité. Ce courant électrique peut ensuite être utilisé pour alimenter des appareils électriques, charger des batteries, ou être injecté dans le réseau électrique, contribuant ainsi à la production d'une électricité d'origine renouvelable.

Les panneaux solaires sont utilisés pour produire de l'électricité dans diverses applications, allant des installations solaires résidentielles et commerciales aux centrales solaires de grande envergure. Ils jouent un rôle clé dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre.[40]

### **II.4: La Cellule Photovoltaïque**

La cellule photovoltaïque est l'élément central d'un module photovoltaïque. Il s'agit d'une surface composée d'un matériau semi-conducteur, en général le silicium, qui absorbe la lumière et la transforme en électricité. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.[42]

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe:

1. Absorption de la lumière incidente

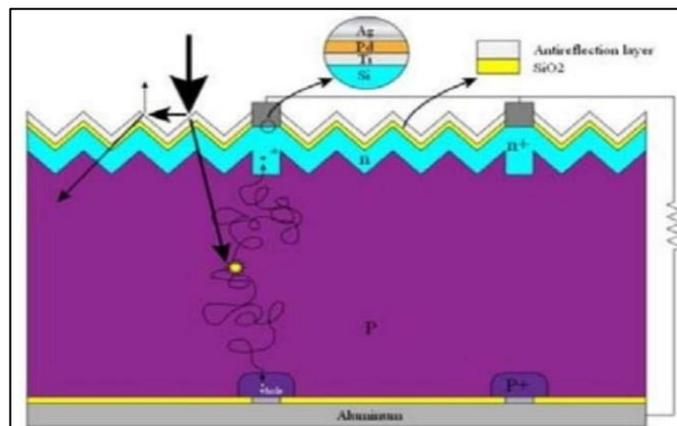
2. Collection des électrons en surface

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont au silicium cristallin, un semi-conducteur. Une des faces de la cellule est dopée n (par exemple du phosphore). L'autre est dopée p (par exemple du bore). Des

électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique.

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion.

Les faces supérieure et inférieure sont équipées d'électrodes pour récolter les électrons. Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication.[43]



Figure(II.2) : Coupe schématique d'une cellule photovoltaïque au silicium.

### II.4.1: Différents type de technologies de cellules photovoltaïques

#### a- 1ère génération: Silicium cristallin (mono et poly)

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999% de Silicium.

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens). Les procédés de purification Cz et Siemens ont des structures d'approvisionnement différentes et sont généralement réalisées par des industries différentes.

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme.

Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

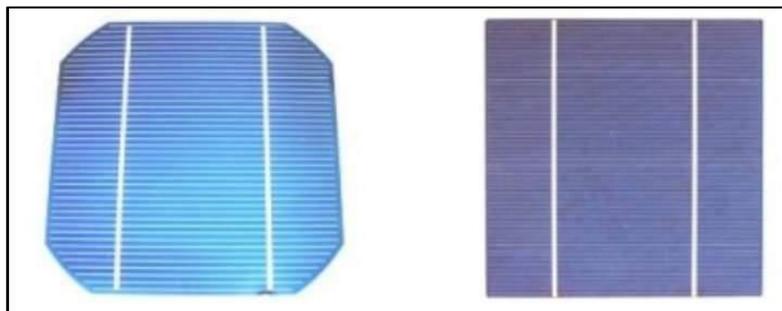
Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés.



**Figure(II.3) :** Etape de fabrication des cellules

(1) minerai de Silicium – (2) raffinage (pour augmenter la pureté) –

(3) Silicium en fusion donnant des lingot (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingot –(6) traitement de surface par procédés physico chimiques et (7) cellule finie avec électrodes



**Figure (II.4) :** cellule mono cristalline et poly cristalline

**b- 2ème génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin**

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapeur Déposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération.

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue :

CdTe : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

CIS / CIGS : Copper Indium Gallium Selenide

**c- Silicium en couche mince : silicium amorphe  $\alpha^*Si$  et microcristallin**

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% ( $\alpha^*Si$ ) à 5 à 11% (CdTe) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules).

A noter que le tellure de cadmium est un alliage de métal lourd, très toxique, et peut - tout comme le plomb ou le mercure- se concentrer dans la chaîne alimentaire.

L'UE en a interdit l'usage pour les appareils électriques... exception faite pour les cellules PV...[43]



**Figure(II.5):** modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%

**II.4.2: Les trois principales filières technologiques**

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques:

**A- le silicium cristallin****1- Le silicium**

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinguant d'une part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Le silicium a deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.

**2- Le silicium monocristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.

Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme (figure II.6), intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin.



**Figure(II.6):** Cellule monocristallin

**a- Avantage**

-Très bon rendement (12 à 20%).

**b- Inconvénients**

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

**3- Le silicium multi cristallin (Poly cristallin)**

Le silicium multi cristallin (Poly cristallin) est devenu aujourd’hui la technologie la plus utilisée (figure II.7). À elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène.

Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



**Figure(II.7):** Cellule multi cristallin

**a- Avantage**

- Bon rendement (11 à 15%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin. -Moins cher que le monocristallin.

**b- Inconvénient**

- Les mêmes que le monocristallin.

**B - Les couches minces**

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples.

Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau.

Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement.

La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations du rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères. D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques .

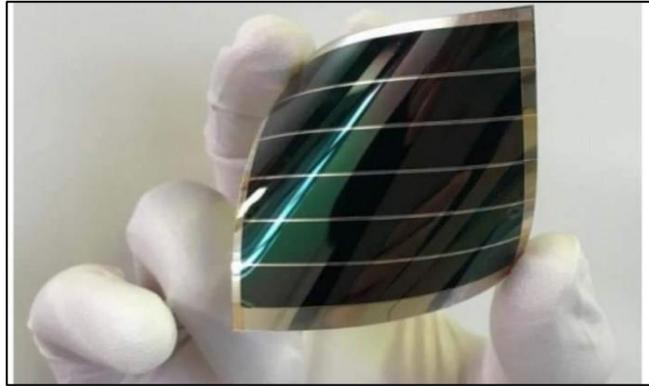
Type de cellule	Rendement en Laboratoire	Rendement de Production
Silicium amorphe (a-si)	13%	5 – 6%
Silicium monocristallin (m-si)	24.7%	13 – 17%
Silicium poly cristallin (p- si)	19.8%	11 – 15%

**Tableau (II.1) :** Tableau représentant le rendement de chaque type de cellule.

### **C- Cellules organiques et plastiques**

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, 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 « plastiques ».

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 leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).



**Figure(II.8)** : cellule solaire tout organique sur substrat souple.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées sur de grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes.[44]

### **II.4.3: Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque**

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité.

Cette opération repose sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce mécanisme a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921.

De façon très schématique ;

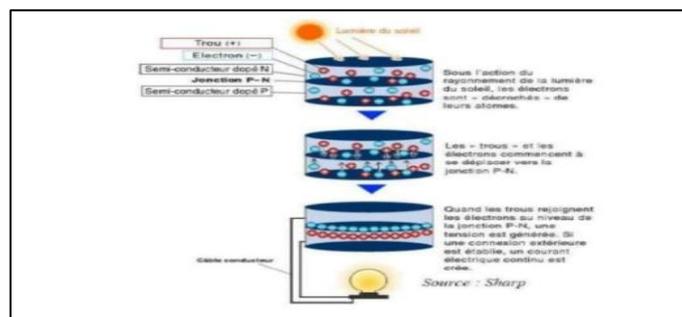
L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).



Figure(II.9): Installation photovoltaïque.

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire.[45]



Figure(II.10) : principe de fonctionnement photovoltaïque.

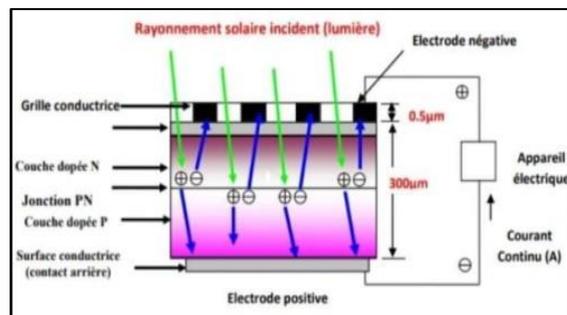
#### II.4.4: Principe de fonctionnement d'un régulateur

L'indicateur utilisé dans la régulation électronique des systèmes photovoltaïques est la tension aux bornes de la batterie, en effet cette grandeur est facile à mesurer et capable de donner une estimation de l'état de charge, le régulateur doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils, un seuil haut et un seuil bas à ne pas dépasser, donc la régulation est obtenue par limitation en tension de la batterie afin d'éviter :

- Une surcharge entraînant une perte en eau .
- Un vieillissement prématuré des accumulateurs.

La protection contre la décharge profonde est réalisée par un disjoncteur automatique dont le but est d'éviter la sulfatation des plaques. [45]

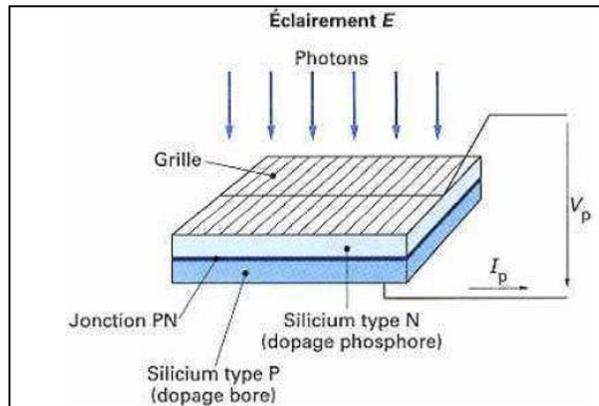
Lorsqu'une cellule photovoltaïque est soumise à une source de lumière, les photons vont bombarder les électrons de la zone N et cela pour libérer les électrons de leurs orbites, il y aura donc création des paires électron-trou. Cette opération va permettre à la zone N d'avoir une charge négative tandis que la zone P va se charger positivement donc il y'aura création d'une différence de potentielle. Lorsqu'on branche une charge à la cellule, les électrons vont se diffuser de la zone N vers P en traversent ainsi la charge. L'effet de champ électrique interne de la zone de charge d'espace va permettre aux électrons de passer de la zone P vers N et cela pour maintenir la différence de potentielle de la cellule solaire (circulation d'électron dans la charge). [46]



Figure(II.11): Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

### II.4.5: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance R.



Figure(II.12) : Production d'électricité par la séparation électron-trou.

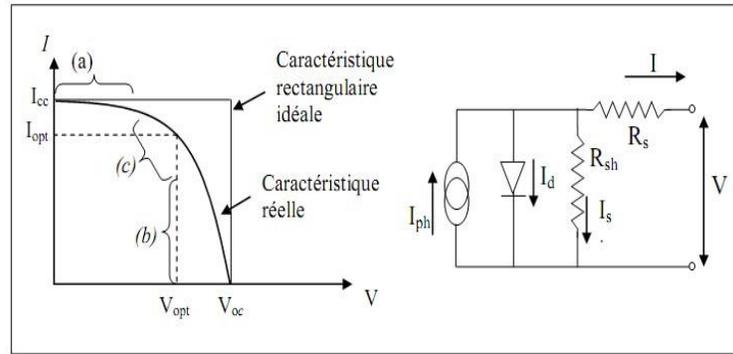
Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée. Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant. [47]

## II.5: Paramètres de cellules photovoltaïques

Les principaux paramètres des cellules photovoltaïques sont :

### II.5.1 : La caractéristique I-V

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure suivante :



**Figure(II.13) :**Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{oc}$ ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

### II.5.2: Tension à circuit ouvert, $V_{oc}$

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'irradiation.[48]

La tension en circuit ouvert est obtenue lorsque le courant circulant dans la cellule est nul. Cela dépend de la barrière de puissance et de la résistance du shunt, car elle diminue avec la température et varie légèrement avec l'intensité lumineuse.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) [47]$$

**II.3**

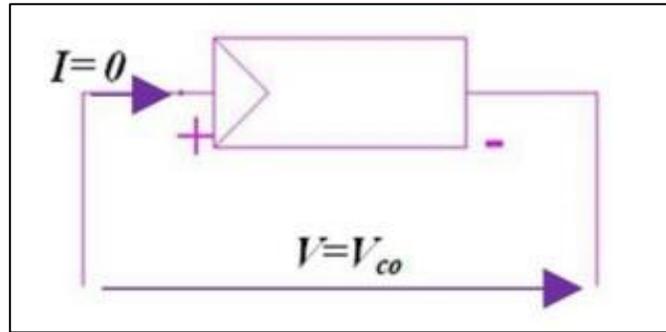
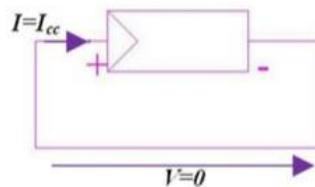


Figure (II.14) : Courant de court-circuit,  $I_{cc}$ .

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule



Figure(II.15) : Courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule.

et dépend de la cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [47]

Le courant de court-circuit correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant [48]

- Point de fonctionnement optimum, ( $V_m, I_m$ )

Lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil »

$$P_m = V_m \times I_m \quad [47]$$

(II.4)

### II.5.3: Rendement de conversion

Le rendement  $\eta$ , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (II.5)$$

$P_{in}$  : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup> La densité de la puissance incidente égale à  $P_{in}/A$ .

A : Section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant-circuit et la tension à circuit ouvert. [47]

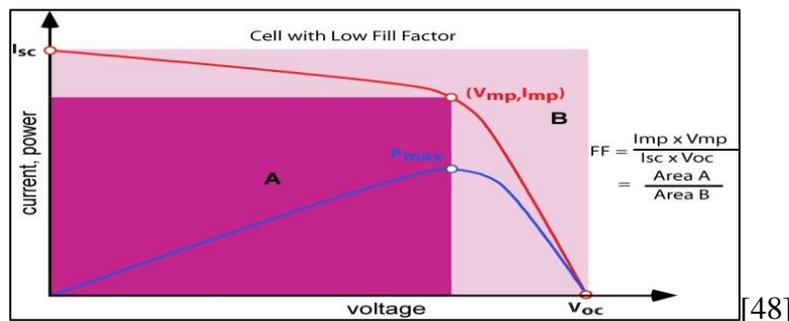
### II.5.4: Facteur de forme, FF

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et puissance maximale que peut avoir la cellule ; il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad [47] \quad (II.6)$$

Il représente également le rapport entre la puissance maximale que ladite cellule peut fournir

$P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \times V_{co}$  comme le montre la figure suivant :



Figure(II.16) :Représente le rapport entre la puissance maximale que ladite cellule peut fournis.

### II.5.5: Puissance maximale

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $V_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25° et un éclairement de 1000 w/m<sup>2</sup>, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.[49]

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ( $P=V \times I$ ) en fonction de la tension  $V$ , qu'on appelle aussi caractéristique.[50]

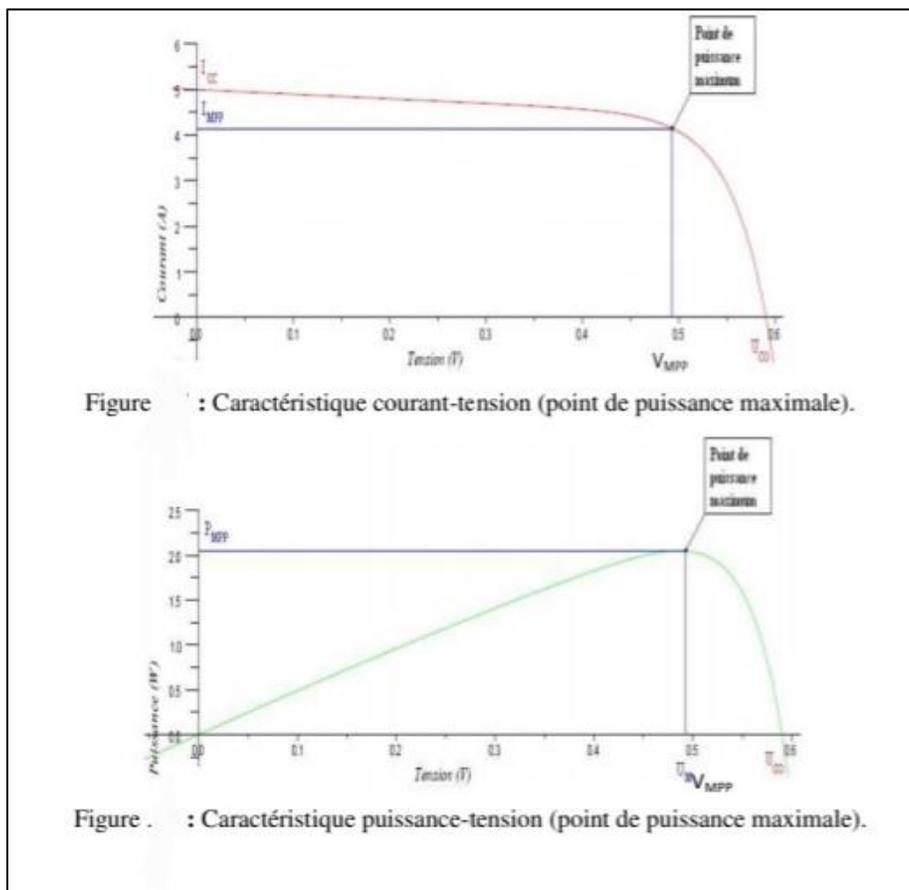


Figure : Caractéristique courant-tension (point de puissance maximale).

Figure : Caractéristique puissance-tension (point de puissance maximale).

Figure(II.17) : La puissance électrique maximale.

### II.6 :Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules.

**II.6.1 :Les cellules monocristallines**

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Première génération de photo piles.
- Un taux de rendement excellent de 15% et jusqu'à 24% en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

**II.6.2:Cellules poly-cristallines**

Les cellules poly-cristallines sont composées de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- \_ Coût de production moins élevé.
- \_ Procédé moins gourmand en énergie.
- \_ Rendement de 13% et jusqu'à 20 % en labo.

**II.6.3:Cellules amorphes**

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) □ Coût de production bien plus bas.

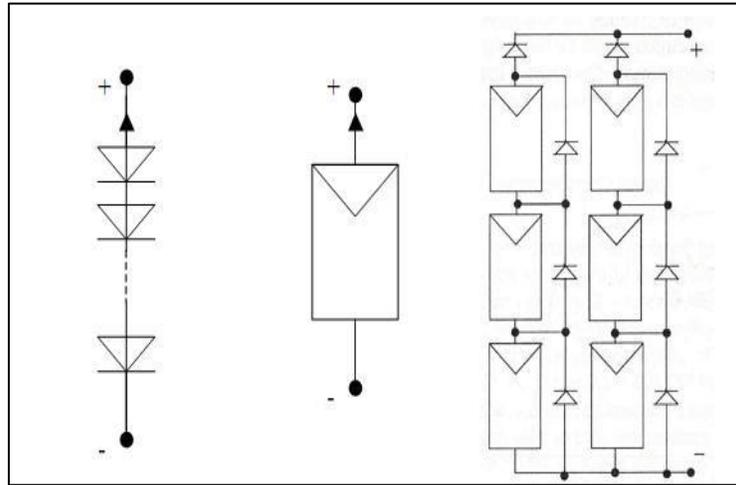
- \_ Rendement 6 % seulement par module et de 14 % en labo.
- \_ Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie de nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium(GaAs) ainsi que le di séléniure de cuivre(CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38% au laboratoire.

**a- Association des cellules photovoltaïques**

Dans les conditions d'ensoleillement standard (1000 W/m<sup>2</sup> ; 25°C ; AM 1,5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm<sup>2</sup> est d'environ 2,3 WC sous une tension de 0,5 V. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur photovoltaïque de

faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plus part des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et /ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

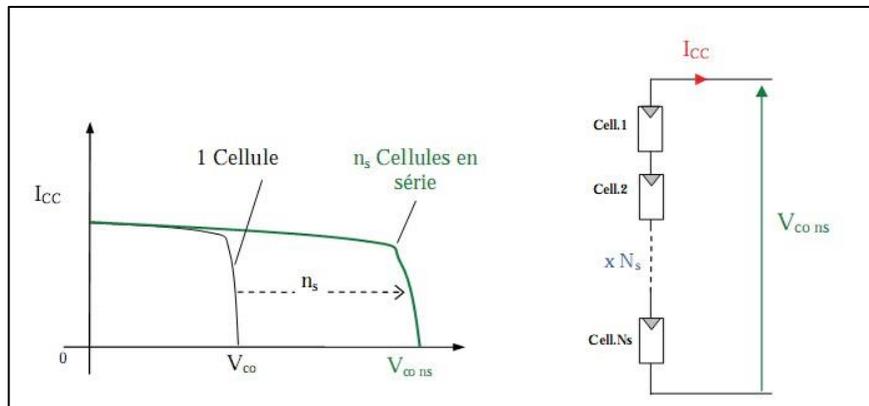


**Figure. II.18:** Cellule, module et panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass).

### b- Association en série

Une association de  $n_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure suivant L'équation suivant résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules.

$$V_{ocns} = n_s \cdot V_{ocetIcc} = I_{ccn_s}. \text{(II.7)}$$



Figure(II.19): Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.

Les expressions de la tension ( $V_{mod}$ ) et du courant ( $I_{mod}$ ) du module sont :

$$V_{mod} = \sum V_{cel} \text{ (II.8)}$$

$$I_{mod} = \sum I_{cel} \text{ (II.9)}$$

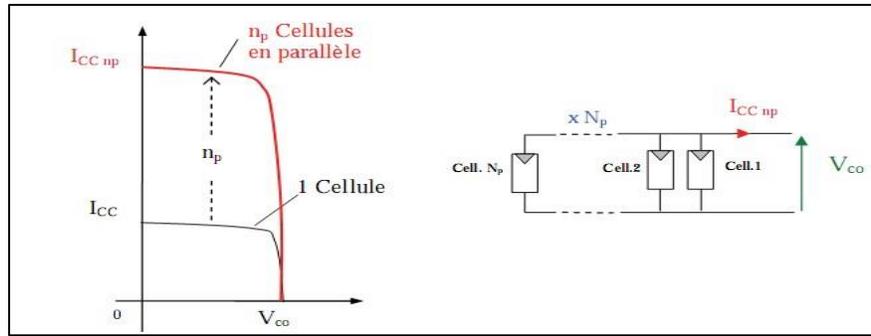
Où :  $V_{cel}$  et  $I_{cel}$  sont respectivement la tension et le courant d'une cellule PV.

### c- Association en parallèle

Une association parallèle de  $n_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé.

Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, figure suivant L'équation suivant résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules.

$$\text{Avec : } I_{sc_{n_p}} = n_p * I_{sc} \text{ et } V_{oc_{n_p}} = V_{oc} \text{ (II.10)}$$



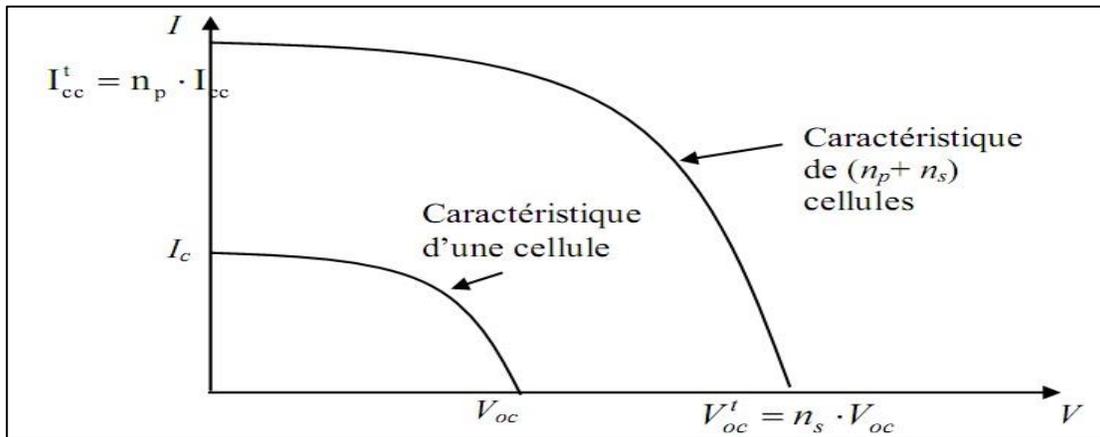
Figure(II.20): Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle np cellules identiques.

**d- Association hybride (série-parallèle)**

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont donnés par les relations suivantes :

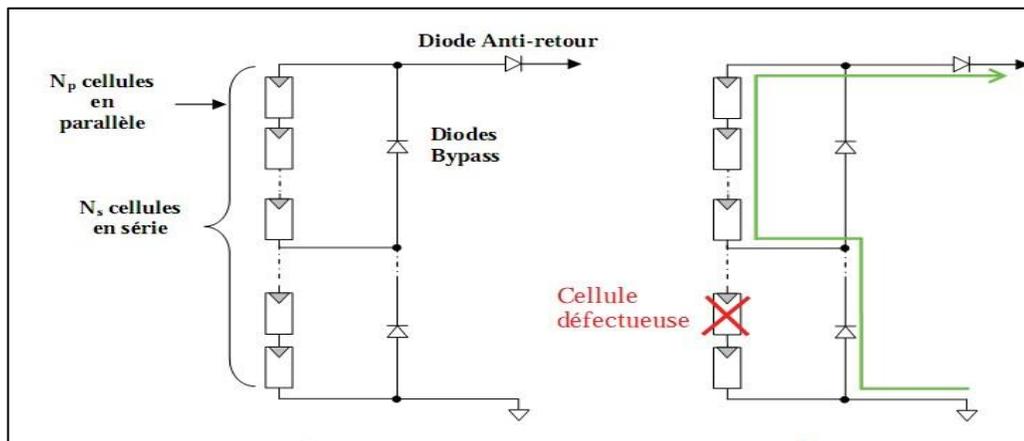
$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \quad V_{oc}^t = n_s \times V \quad (\text{II.11})$$

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, en une série pour éviter les courants inverses et en parallèle, dit diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de protection associée.

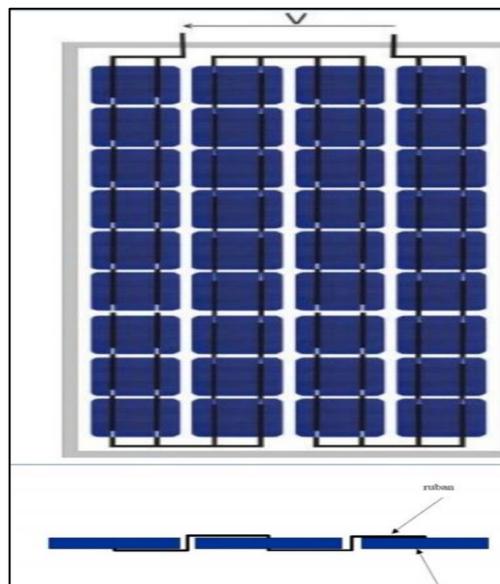


Figure(II.21): Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.

La diode by-pass, lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indique la figure (b), évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection.



**Figure(II.22)** :a)- Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection. b)- Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation IPV. [47]

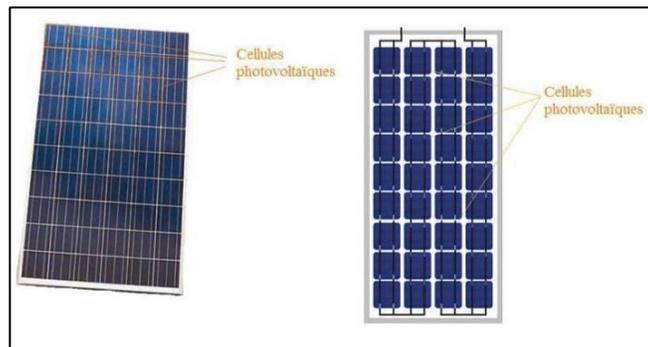


**Figure(II.23)** : Cellule photovoltaïque.

## II.7: Module photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt (0,6 V). Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module ou panneau.

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant. La mise en parallèle des cellules accroît le courant en conservant la tension. Les cellules sont connectées entre elles par des fins rubans métalliques, des contacts en face avant (-) au contact en face arrière (+)



**Figure(II.24) :** La cellule individuelle .Unité de base de système photovoltaïque.

- En général: de 36 à 72 cellules en série dans un module, mais ce nombre varie d'un fabricant à l'autre.

Le fait de connecter des cellules en série permet leur utilisation à des tensions suffisamment élevées compatibles avec les charges électriques usuelles.[51]

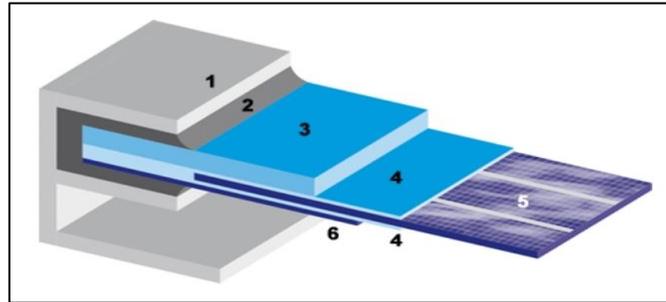
Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un string. Un module est composé de plusieurs strings.

L'association des cellules en modules permet :

D'obtenir une tension suffisante ;

de protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité,...) , de protéger mécaniquement les cellules (chocs,...) .

Les modules les plus courants (communément appelés panneaux) sont généralement constitués :



**Figure(II.25) :** Des modèles les plus courants.

D'un cadre de support et un joint d'étanchéité (1 et 2).

D'une plaque de verre extra claire (favorisant la transmission lumineuse) (3).

De deux couches d'Ethylène-Acétate de Vynile (EVA) qui enrobent les cellules assurant leur protection contre les intempéries et l'humidité. (4)

Des différents strings de cellules (5).

D'une feuille de tedlar (ou éventuellement du verre) comme face arrière du module. Ce polymère à haute résistance aux UV et à la haute température assure au module sa résistance mécanique face aux chocs externes (vent, transport,...) (6).

Le type de module le plus courant, rencontré entre autres pour le montage en toiture est le module verre tedlar.

Il existe cependant d'autre type de module comme :

Les modules "verre-verre", utilisés pour leur propriété "translucide" : verrières, façade,...



**Figure(II.26) :** Les modèles verre verre.

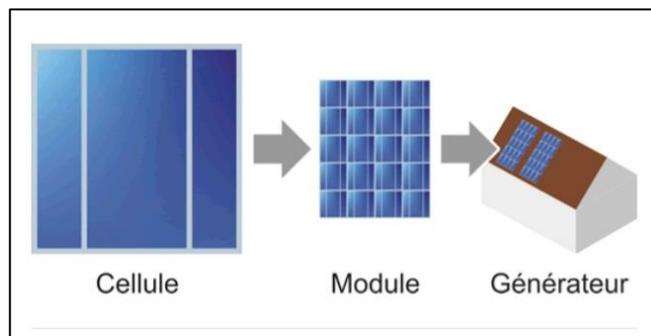
Des modules tuiles/ardoises solaires où les cellules sont directement intégrées dans des modules de formes traditionnelles de toiture. Celles-ci sont cependant plus exigeantes en termes de main d'œuvre (chaque tuile doit être raccordée manuellement !)

D'autres modules de types "thin film" ont aussi récemment fait leur apparition sur la marché. Ils sont en général disposés sur un support souple (téflon,...).



Figure(II.27) : Des modèles tuiles / ardoise solaires.

Les modules sont connectés entre eux (en série ou parallèle) par des fils électriques. Ils forment alors un champ de capteurs (appelés aussi générateur). [52]



Figure(II.28) : Les modèles sont connectés entre eux.

## II.8: Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïque. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée.

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs.

### II.8.1: Principe photovoltaïque

#### • Jonction P-N

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneur d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trou). L'interface entre ces deux régions s'appelle jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homo-jonction, i.e. : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Une jonction métal semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul.

Dans une homo jonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel ( $V_D$ ) (tension de diffusion).

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$V_D$ :: Tension de diffusion sur une jonction [V].

$N_D$ :: Concentration des donneurs [ $\text{cm}^{-3}$ ]

$N_A$ :: Concentration des trous [ $\text{cm}^{-3}$ ]

k :  $1.380662 \cdot 10^{-23}$  C. constante de Boltzmann.

$q$  : 1,602. 10<sup>-19</sup>C. charge élémentaire.

$T$  : température absolue du cristal [K].

$n_i$  : Concentration intrinsèque.

$$V_T = \frac{kT}{q} = 26mV \quad (\text{II.13})$$

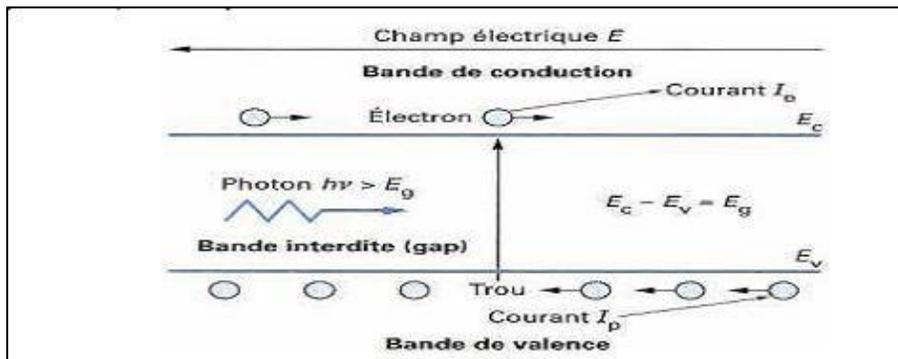
à la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

### II.8.2: Production d'électricité

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultante de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale.

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.[47]



Figure(II.29) : Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie.[47]

### II.9: Modélisation de cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (ou cellules solaires) sont des dispositifs qui convertissent l'énergie lumineuse en courant électrique. La première cellule solaire a été développée en 1954 par des chercheurs des Laboratoires Bell aux États-Unis.

Malgré l'intérêt intense des scientifiques ces dernières années, les cellules n'ont quitté le laboratoire qu'après la course à l'espace. En fait, les cellules solaires constituent une solution idéale pour répondre aux besoins en énergie des satellites et de tout endroit isolé. Actuellement, l'objectif fondamental est de produire de l'électricité sans pollution pour alimenter les réseaux de distribution.[53]

La modélisation des cellules photovoltaïques est une tâche importante pour analyser, évaluer, et optimiser en vue de la conception des systèmes photovoltaïques (54)

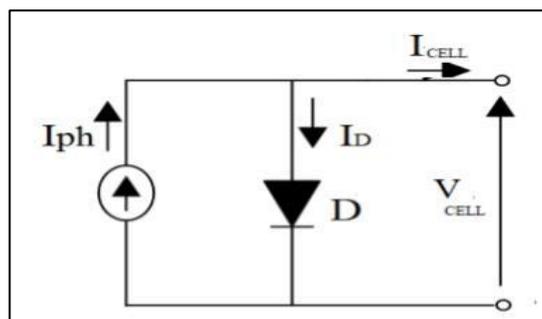
Où La performance des systèmes photovoltaïques dépend fortement des conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir une énergie continue tout au long de l'année, les systèmes photovoltaïques doivent être correctement dimensionnés.

Toutefois, les informations fournies par les fabricants d'équipements photovoltaïques ne permettent que de donner leurs dimensions approximatives. Les modules photovoltaïques sont généralement représentés par des circuits équivalents et leurs paramètres sont calculés expérimentalement à l'aide des caractéristiques courant-tension. Ils diffèrent principalement par le nombre de diodes, la résistance de shunt finie ou infinie, les facteurs d'idéalité constants ou non constants et les méthodes numériques utilisées pour déterminer divers paramètres inconnus.[55]

### II.9.1 : Circuit équivalent d'une cellule solaire

#### a- Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la jonction PN d'une cellule soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode, délivrant un courant représenté sur la **Figure(II.30)** , du circuit équivalent d'une cellule solaire idéale. [54]



**Figure(II.30)** : Schéma équivalent d'une cellule idéale .

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{Cell} = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.14})$$

Où  $I_{Cell}$  est le courant de la cellule Photovoltaïque.

$I_{ph}$  est le photo-courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident); et  $I_D$  représente le courant circulant dans la diode.

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant ICC avec  $V_{Cell} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge .

$$ICC = I_{ph} = I_{ph\ ref} \times \frac{E}{E_{ref}} \quad (\text{II.15})$$

E: L'éclairement absorbé par la cellule;

E ref : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>);

Le courant de la diode est déterminé à partir de l'équation suivante:

$$I_D = I_S * (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (\text{II.16})$$

$I_S$ : le Courant de saturation inverse de la diode;

$V_t$  : Tension thermique;

$V_d$ : Tension de cellule PV

$$V_t = \frac{A \cdot K \cdot T}{q} \quad (\text{II.17})$$

A: Facteur d'idéalité de la cellule ; pour une cellule au silicium la valeur de A est situé entre 1 et 2

K: Constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup> J/K);

q: Charge de l'électron (1,6.10<sup>-19</sup> C).

T: la Température de la cellule photovoltaïque en Kelvin (K);

Donc :

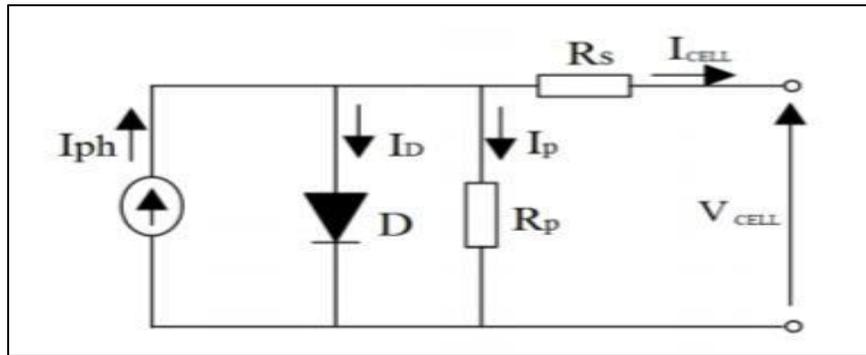
Le courant généré par une cellule photovoltaïque est:

$$I_{cell} = I_{cc} - I_S * (e^{\frac{V_{cell}}{V_t}} - 1) \quad (\text{II.18})$$

**b- Cas d'une cellule réelle**

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle prenant en compte les effets de résistance parasites produits lors du processus de fabrication est présenté sur la **Figure(II.31)**.

Le schéma équivalent est composée de la diode (D) représentant la jonction, de la source de courant (I) représentant le photo-courant, de la résistance série (R<sub>s</sub>) représentant les pertes Joule et de la résistance parallèle (R<sub>p</sub>) représentant le courant de fuite entre les couches supérieures. Le maillage et le contact postérieur sont généralement beaucoup plus grands que (R<sub>p</sub>) .



**Figure(II.31) :** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïques réelle.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (\text{II.19})$$

Le courant circulant dans la diode est:

$$I_D = I_S * (e^{\frac{V_D}{V_t}} - 1) = I_S * (e^{\frac{V_{cell} + R_s * I_{cell}}{V_t}} - 1) \quad (\text{II.20})$$

$I_p$ : le courant parallèle ou shunt c'est les pertes de courant par effet de joule dans les différents contacts, il peut être calculé à partir de l'équation suivante :

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V_{cell} + R_s * I_{cell}}{R_p} \quad (\text{II.21})$$

$R_s$ : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi que les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

$R_p$ : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction P-N dues aux impuretés et sur les coins de la cellule.

$I_s$ : Le courant de saturation de la cellule photovoltaïque devient :

$$I_s = I_{rs} * \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 * e^{\left[\frac{E_g}{A.K} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (II.22)$$

$I_s$  : est le courant de saturation inverse dans les conditions de tests standards.

$E_g$ : Énergie de gap (ev).

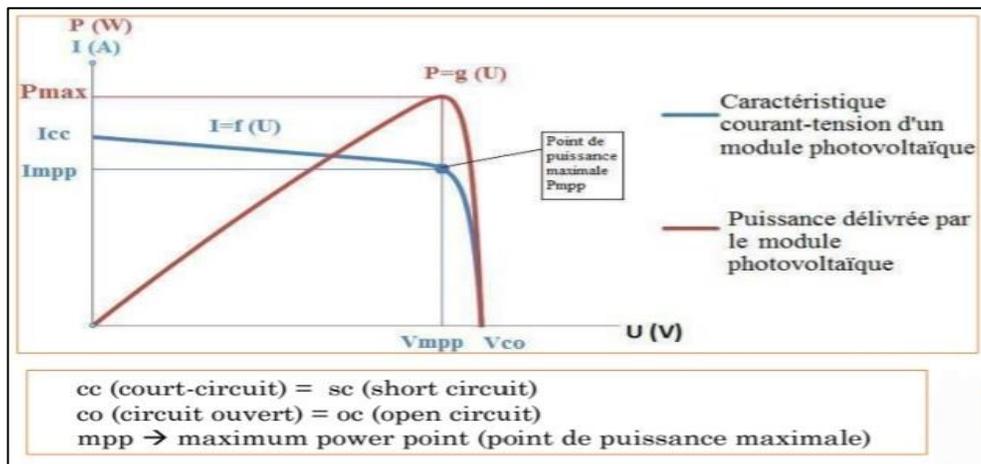
En substituant les équations (II.20) ;(II.21) dans l'équation (II.19) le courant  $I_l$  devient:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s * I_{cell}}{v_t}} - 1\right) - \frac{V_{cell} + R_s * I_{cell}}{R_p} \quad (II.23)$$

[54]

### II.9.2 : Caractéristiques courant - tension d'un module

Le profil de la caractéristique courant-tension d'un module est le même que celui d'une cellule photovoltaïque.[56]



Figure(II.32) : Le profil de la caractéristique courant- tension d'un module.

Le profil de la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque est le même que celui d'une cellule photovoltaïque. Les cellules étant connectées en série, les tensions de chacune des cellules s'ajoutent. Ainsi, la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque voit la valeur de la tension augmentée.

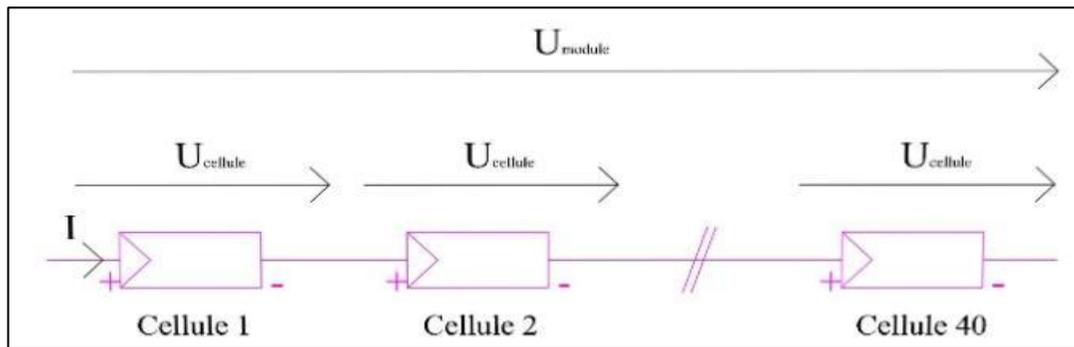
Sur l'exemple ci-dessous, un module est composé de 40 cellules connectées en série. Chacune des cellules présentent les propriétés électriques suivantes dans les Conditions Standards de Test :

Courant de court-circuit  $I_{cc} = 5 \text{ A}$

Tension à vide  $U_{co} = 0.6 \text{ V}$

Courant de puissance maximale  $I_{MPP} = 4.45 \text{ A}$

Tension de puissance maximale  $U_{MPP} = 0.49 \text{ V}$



**Figure(II.33)** : un exemple d'un module composé de 40 cellules connectées.

Ainsi, le module composé de 40 cellules en série présente les propriétés électriques (dans les conditions STC) suivantes :

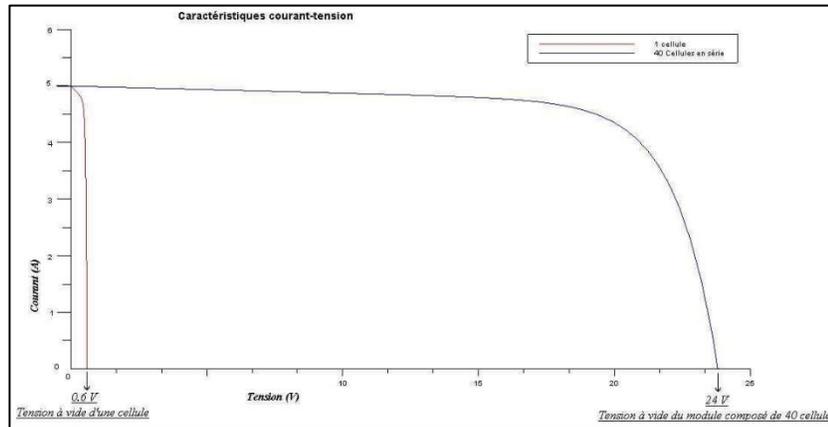
Courant de court-circuit  $I_{cc} = 5 \text{ A}$

Tension à vide  $U_{co} = 0.6 \times 40 = 24 \text{ V}$

Courant de puissance maximale  $I_{MPP} = 4.45 \text{ A}$

Tension de puissance maximale  $U_{MPP} = 0.49 \times 40 = 19.6 \text{ V}$

La caractéristique courant-tension de ce module est donnée ci-dessous :



**Figure(II.34)** : les effets de l'éclairement et la température sur le module.

Les effets de l'éclairement et de la température sur le module sont les mêmes sur le module que ceux énoncés sur les cellules à savoir :

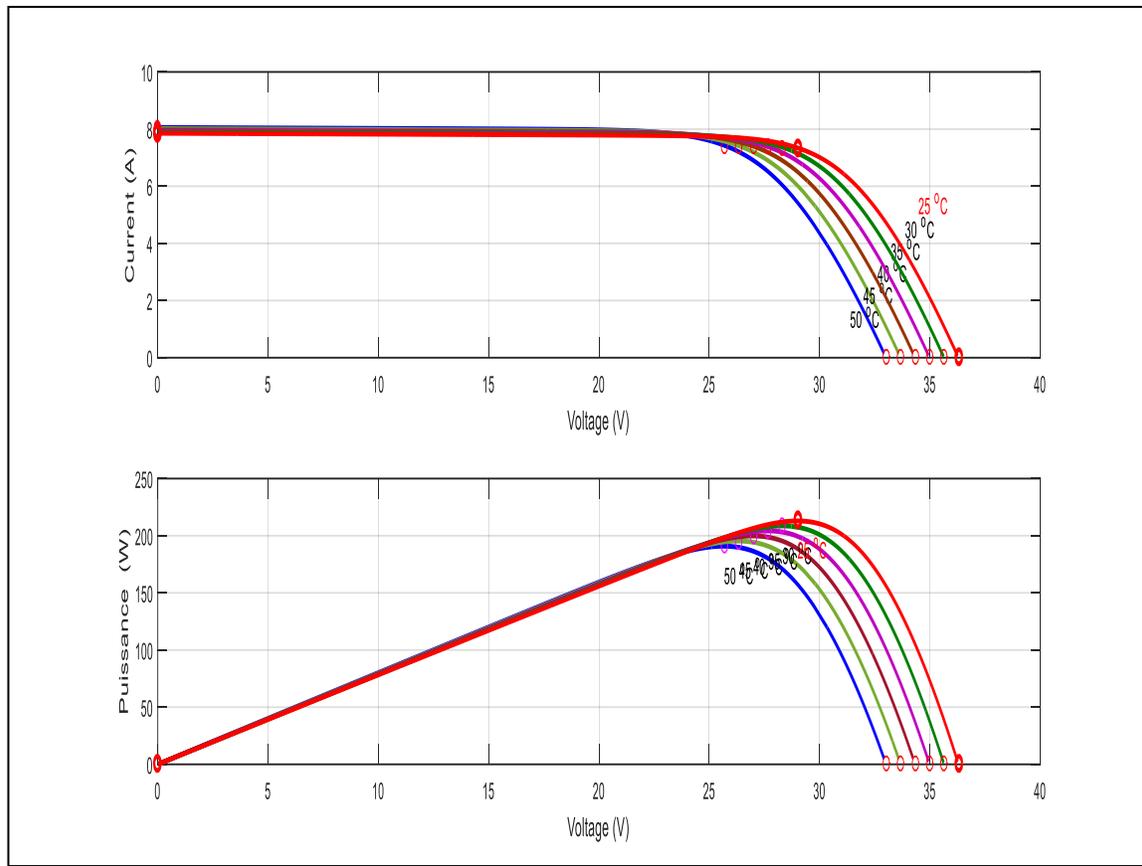
Le courant baisse lorsque le niveau d'éclairement baisse (lorsque l'éclairement est multiplié par 2, le courant généré par le module est aussi multiplié par 2). La tension baisse aussi lorsque le niveau d'éclairement baisse, mais de façon moins notable (la tension est une fonction logarithmique du niveau d'éclairement).

La température des cellules constituant le module influe notablement la valeur de la tension. En moyenne (cela dépend du fabricant), la tension diminue de 0.3%/°C, le courant augmente de 0.04 %/°C et la puissance diminue de 0.4%/°C.[56]

### II.9.3: Influence de la Température

En changeant la température de 25°C à 50°C, les propriétés PV et IV du module PV en fonction de la température sont déterminées par les figures (II.35).

On constate que la température a peu d'effet sur la valeur du courant de court-circuit. En revanche, la tension en circuit ouvert chute fortement lorsque la température augmente, et donc la puissance extractible diminue.

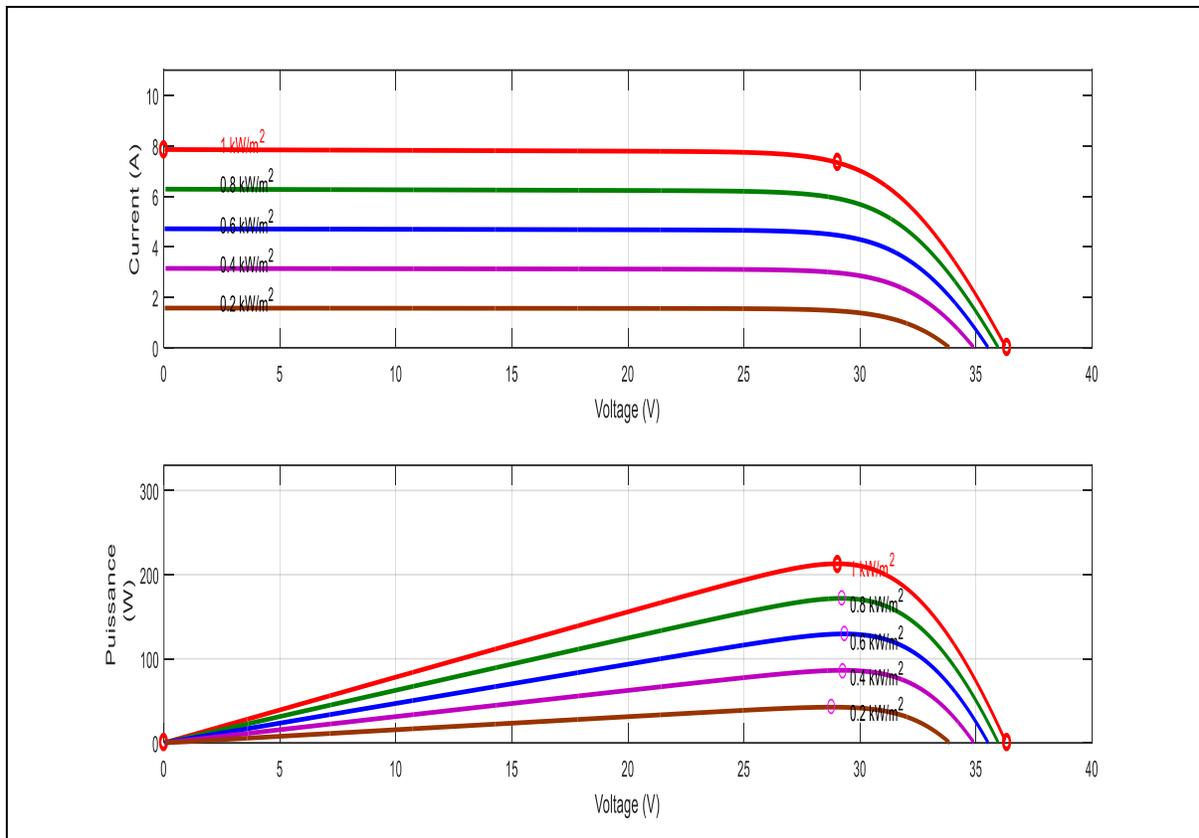


**Figure(II.35) :** La Caractéristique P-V et I-V du module PV selon la température.

#### II.9.4: Influence de l'Éclairement

En changeant l'éclairement entre  $200 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  avec un pas de 200, les caractéristiques PV et IV du module PV en fonction de l'éclairement sont illustrées dans la figure (II.36). A noter que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

En revanche, la tension en circuit ouvert n'évolue pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même en faible luminosité.

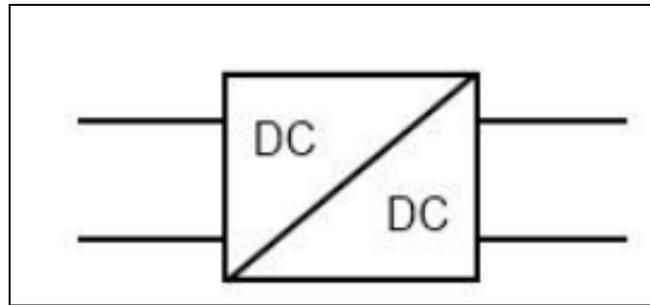


Figure(II.36) : LaCaractéristique P-V et I-V du module PV selon l'éclairement.

### II.10: Les hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation est essentielle pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Le hacheur est constitué de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. [57]



**Figure(II.37):** Symbole d'un convertisseur DC-DC.

### II.10.1: Type des hacheurs

On distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs). [57]

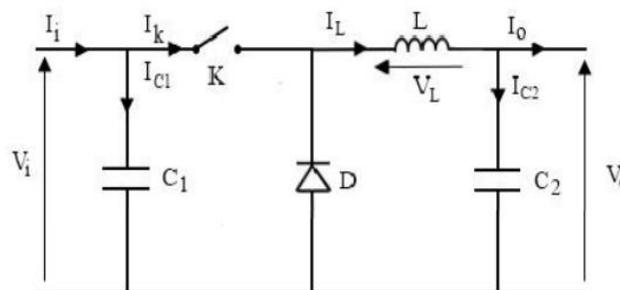
Hacheur abaisseur (ou Buck)

Hacheur élévateur (ou Boost)

#### a- Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC .On retrouve fréquemment dans la littérature le convertisseur Buck dévolteur appelé hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant .

L'interrupteur K **Figure(II.38)** peut être changé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).[57]



**Figure(II.38):** Schéma électrique d'un hacheur Buck.

#### - Principe de Fonctionnement

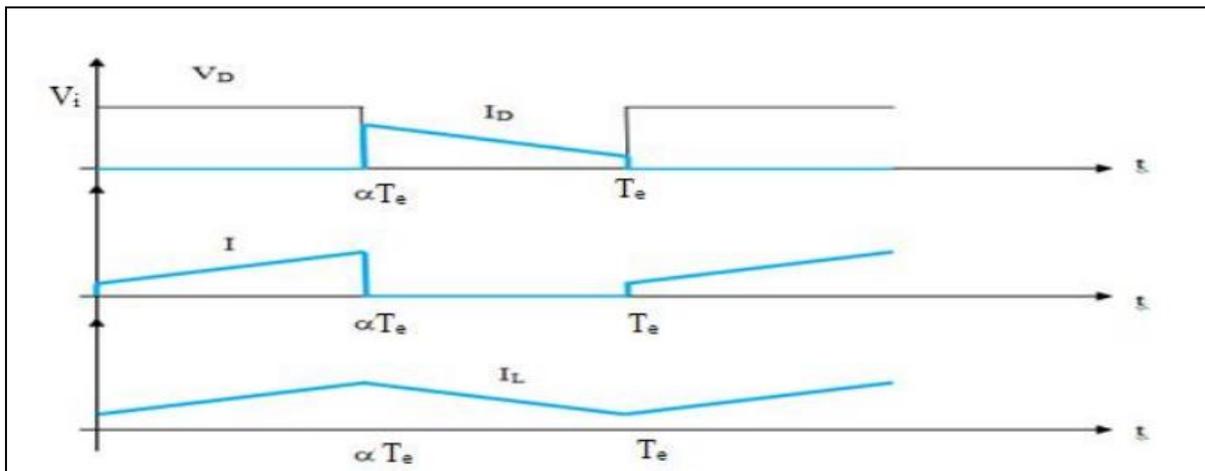
On note  $\alpha$ : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

$T_e$  : étant la période des impulsions

Lorsque l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage  $f_e = \frac{1}{T_e}$ . La source  $V_i$  fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Durant la période  $t \in [\alpha T_e, T_e]$  l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre  $D$ . La tension à ses limites est donc nulle.

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la **Figure(II.39)** sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. [57]

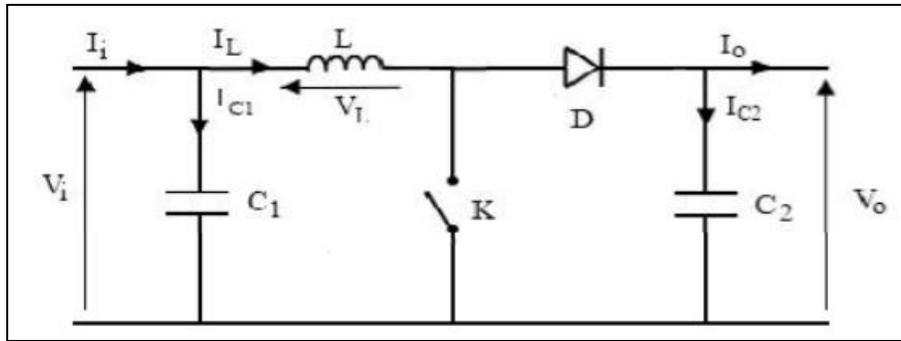
$$V_o = \alpha V_i$$



**Figure(II.39)** : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.

### b- Hacheur Boost :

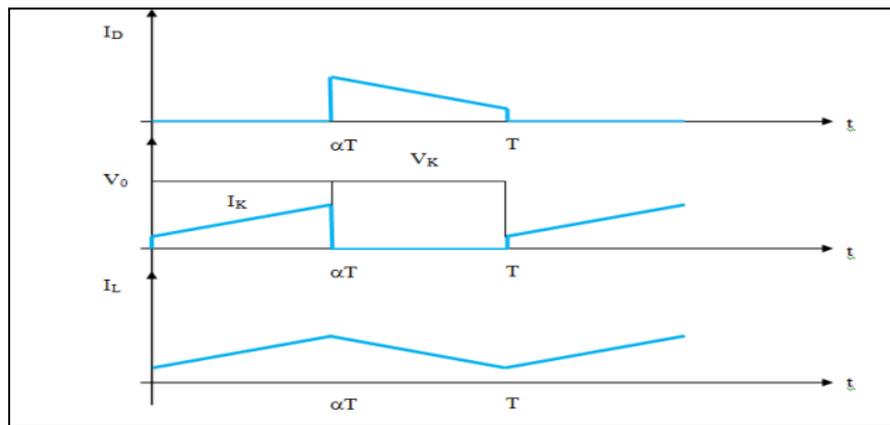
Le hacheur boost, connu aussi sous le nom de hacheur parallèle C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur  $K$  peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Son schéma de principe de base est celui de la **Figure(II.40)**. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. [57]



Figure(II.40) : Schéma électrique d'un hacheur boost.

**- Principe de Fonctionnement :**

Lorsque l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à  $V_o (1 - \alpha) = V_i$  .[57]



Figure(II.41) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

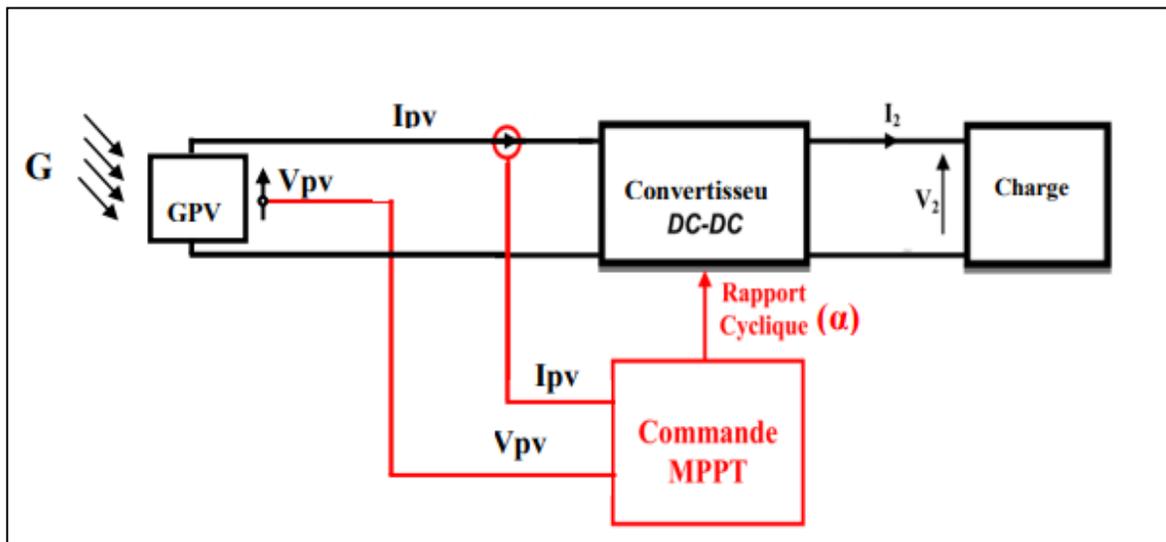
**II.11: La commande Mppt**

**II.11.1:Définition**

En termes de définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de mettre en marche un GPV de manière à générer constamment le maximum de sa puissance. Peu importe les circonstances météorologiques (éclairage et température), la commande du convertisseur met le système au maximum de fonctionnement (**V<sub>pm</sub>** et **I<sub>pm</sub>**). On améliorera l'efficacité de la chaîne de conversion photovoltaïque en utilisant un convertisseur statique commandé par une MPPT. [58]

### II.11.2: Le principe de la commande MPPT

Le principe de la commande MPPT repose sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. Ainsi, quelle que soit la météo, la commande du convertisseur ajuste le système au point de fonctionnement maximal (MPP) défini par les tensions  $V_{pm}$  et les courants  $I_{pm}$ . [58]



**Figure(II.42) :** Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC. [59]

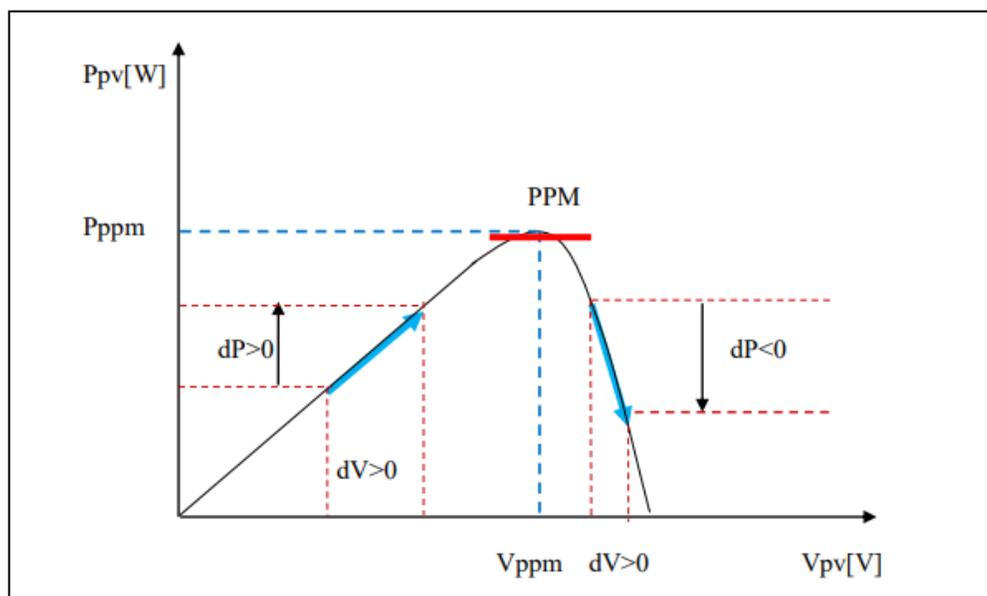
Différentes méthodes peuvent être employées pour optimiser le fonctionnement des générateurs photovoltaïques. L'une des méthodes les plus couramment utilisées est appelée « Perturb and Observe » (P&O). Cette méthode est de type extrémale, ce qui signifie qu'elle permet de suivre l'évolution d'un paramètre ou d'une variable physique en perturbant le paramètre d'entrée, surtout lorsque d'autres méthodes ne sont pas applicables pour les prévisions.

Le point de puissance maximale (PPM) est généralement contrôlé à l'aide de deux variables de commande : la tension et la puissance mesurées en temps réel. Ces mesures sont réutilisées dans une boucle pour déterminer si le système fonctionne au point de puissance maximale. La complexité de l'algorithme de recherche du PPM (MPPT) peut varier en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Néanmoins, tous les algorithmes efficaces doivent intervenir sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

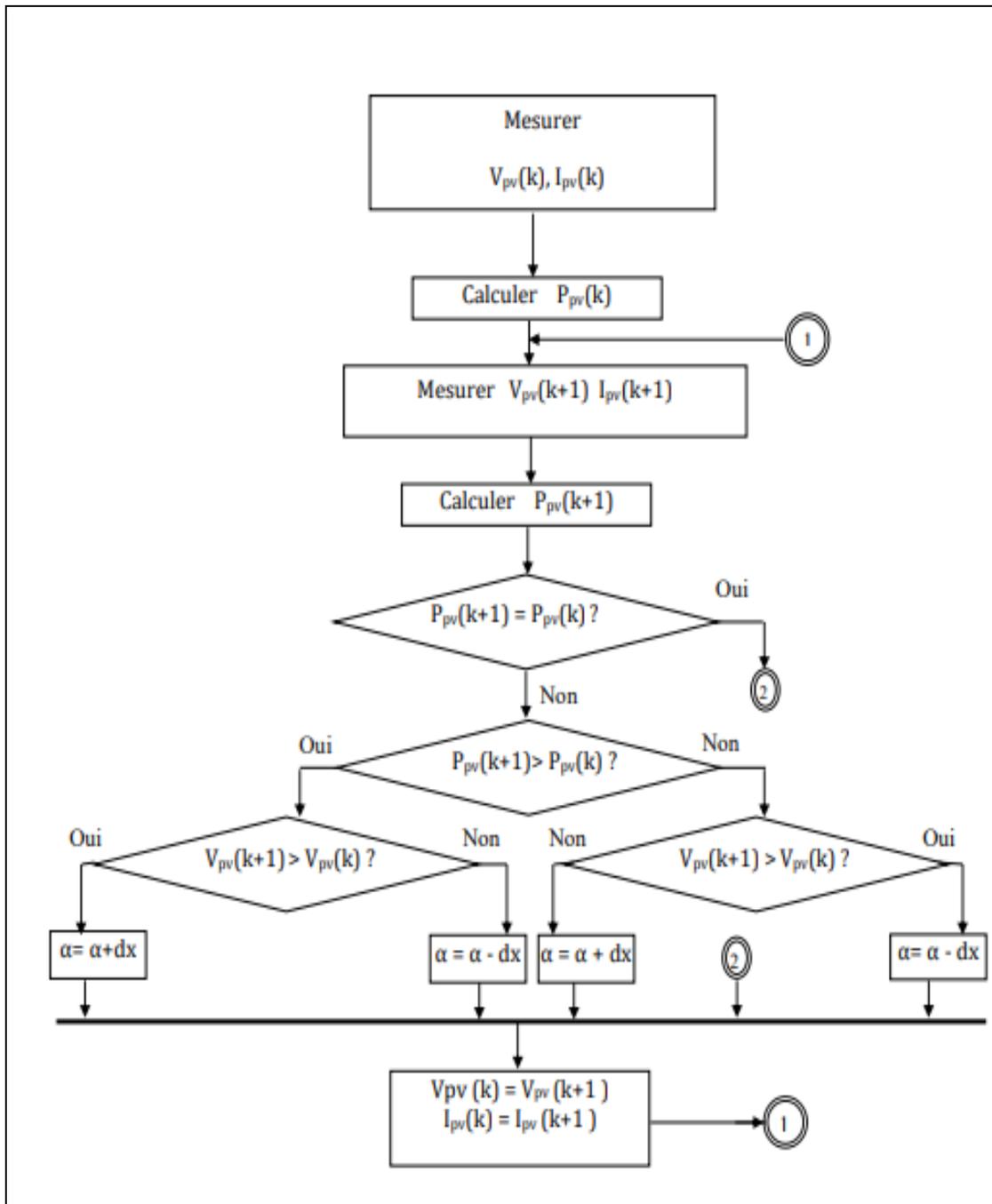
De nombreuses recherches sur les commandes MPPT ont été menées pour développer un système optimal capable de rechercher le PPM en fonction de l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Ces techniques visent à améliorer le rendement des générateurs PV. [59]

### II.11.3: Méthode perturbation et observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est largement utilisée dans le secteur industriel en raison de la simplicité de son algorithme. Cette méthode fonctionne en perturbant le système, c'est-à-dire en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module, et en observant son effet sur la puissance de sortie de la chaîne. Le principe de la méthode P&O consiste à perturber la tension ( $V_{PV}$ ) du générateur photovoltaïque (GPV) en ajoutant un signal de faible amplitude, positif ou négatif, puis à analyser la variation de puissance (notée  $dP$ ) résultant de cette perturbation. Cela permet de déterminer la position du point de puissance maximale (PPM) par rapport au point de fonctionnement actuel. Par exemple, si la perturbation entraîne une augmentation de la tension ( $V_{PV}$ ) et que la puissance augmente également, cela signifie que le PPM se situe à droite du point de fonctionnement actuel. Cette information est utilisée pour ajuster le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le PPM, en contrôlant le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement oscille autour de celui-ci, comme illustré à la **Figure(II.43)**.



**Figure(II.43)** : Principe de fonctionnement de la MPPT P&O.



Figure(II.44) :Organigramme de l’algorithme de la méthode P & O

La **Figure** (II.44) illustre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O' tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. Selon cette figure, la tension (V) et le courant (I) sont mesurés pour calculer la puissance de sortie actuelle P(k) à partir de la dernière mesure. Cette valeur P(k) est comparée à la valeur P(k-1) de la mesure précédente. Si la

puissance de sortie a augmenté, la perturbation se poursuivra dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera inversée par rapport à la direction du cycle précédent. Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Une fois que le point de puissance maximale (MPP) est atteint,  $V$  oscille autour de la tension idéale de fonctionnement, entraînant une perte de puissance proportionnelle à l'ampleur de la perturbation.

Si l'ampleur de la perturbation est grande, l'algorithme MPPT réagira rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront plus importantes dans des conditions stables ou légèrement changeantes.

Si l'ampleur de la perturbation est très petite, les pertes seront réduites dans des conditions stables ou légèrement changeantes, mais le système ne pourra pas suivre efficacement les changements rapides de température ou d'ensoleillement.[59]

## **II.12 : Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le système photovoltaïque, l'effet photovoltaïque et l'histoire de photovoltaïque .Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec le modélisation de cellule photovoltaïque et à la fin la commande Mppt et les types de les hacheurs.

# ***Chapitre III***

## ***Généralités sur le réseau électrique***

## **Chapitre III : Généralités sur le réseau électrique**

### **. III.1: Introduction**

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures dont le but est d'acheminer l'énergie électrique à partir de centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Le réseau électrique se compose de milliers de kilomètres de ligne, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Des systèmes de contrôle hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence [60].

Le réseau est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques, qui permettent de répartir l'électricité et de faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production transport-consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. [61]

### **III.2: Structure du réseau électrique et son rôle**

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. [62]

#### **III.2.1: Le réseau de transport et de répartition**

La première de ces divisions est le réseau de transport (400kV, 225kV) ou réseau de haute tension de niveau B (HTB). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale. Sur ce réseau sont connectées les centrales de production classique comme les centrales nucléaires.

Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles ou inter connectées, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc.

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition (63kV, 90kV), celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci. La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de transport et de répartition est effectuée de manière centralisée. [62]

### III.2.2: Le réseau de distribution

La troisième et dernière subdivision est le réseau de distribution (20kV, 400V). Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD). Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée, une structure radiale est une structure arborescente. Ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HTB/HTA ou HTA/BT vers le point de consommation considérée. [62]

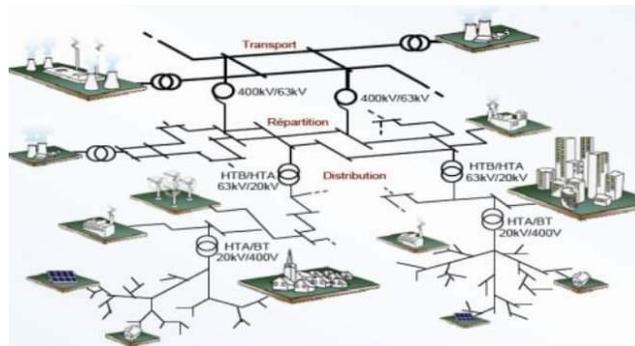


Figure (III.1) : structure de réseau électrique.

La nouvelle norme UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit :

- \* HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV.
- \* HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.
- \* BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.
- \* BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.
- \* TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V. [62]

### III.3: Architecture de Réseaux Electrique

#### III.3.1: Critères de choix

L'ensemble des constituants d'un réseau électrique peut être agencé selon différentes structures, dont la complexité détermine la disponibilité de l'énergie électrique et coût d'investissement.

Le choix de l'architecture sera donc fait pour chaque application sur le critère de l'optimum technico-économique.

### III.3.2: Type d'architecture

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants :

#### III.3.2.1: Simple antenne

##### ➤ Architecture

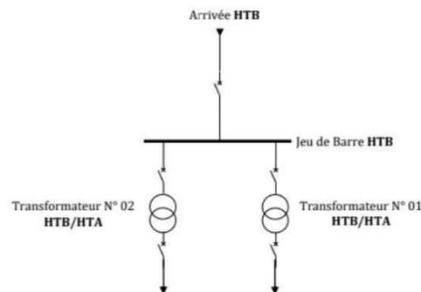


Figure (III.2) : Architecture simple antenne.

##### ➤ Mode d'exploitation

#### a) Normal

Les transformateurs HTB/HTA sont alimentés par un seul jeu de barre HTB.

#### b) Perturbé

En cas de perte d'une source d'alimentation, les transformateurs HTB/HTA sont mis hors service.

##### ➤ Avantages et Inconvénient

#### a) Avantage

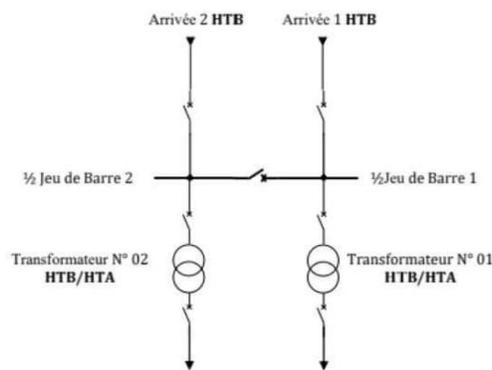
- Structure la plus simple.
- Facile à protéger.
- Coût minimal.

**b) Inconvénient**

- Faible disponibilité d'alimentation.
- Temps de coupure sur défaut éventuellement long.
- Un seul défaut entraîne la coupure de l'alimentation d'antenne.

**III.3.2.2: Double antenne**

➤ **Architecture**



**Figure (III.3) :** Architecture double antenne.

➤ **Mode d'exploitation**

**a- Normal**

Les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage. Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément.

**b- Perturbé**

En cas de perte d'une source (Arrivée 1), l'autre source (Arrivée 2) assure la totalité de l'alimentation.

➤ **Avantages et Inconvénient**

**a- Avantage**

- Bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau.
- Maintenance possible du jeu de barres, avec un fonctionnement partiel de celui-ci.

**b- Inconvénient**

- Solution plus coûteuse que l'alimentation simple antenne,
- Ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance de celui-ci.

### III.3.2.3: Double antenne avec double jeu de barres

#### ➤ Architecture

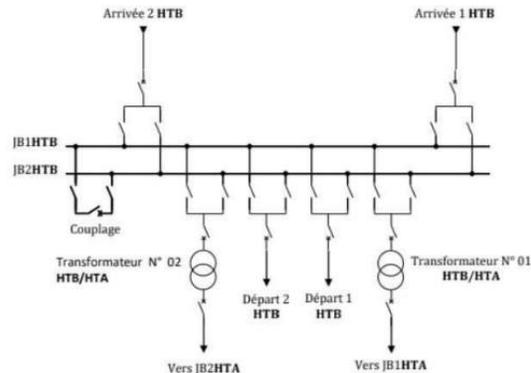


Figure (III.4) : Architecture double antenne avec double jeu de barres.

#### ➤ Mode d'exploitation

##### a) Normal

- L'Arrivée 1 est aiguillée sur le Jeu de Barre JB1 avec le Départ 1 et le TR. N° 01.
- L'Arrivée 2 est aiguillée sur le Jeu de Barre JB2 avec le Départ 2 et le TR. N° 02.
- Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.

##### b) Perturbé

- En cas de perte d'une source (Arrivée 1), l'autre source (Arrivée 2) assure la totalité de l'alimentation.
- En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

#### ➤ Avantages et Inconvénient

**a) Avantage**

- Bonne disponibilité d'alimentation,
- Très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres,
- Possibilité de transfert de jeux de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manœuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé).

**b) Inconvénient**

- Surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres,
- Nécessité de fonctions d'automatisme [63]
- 

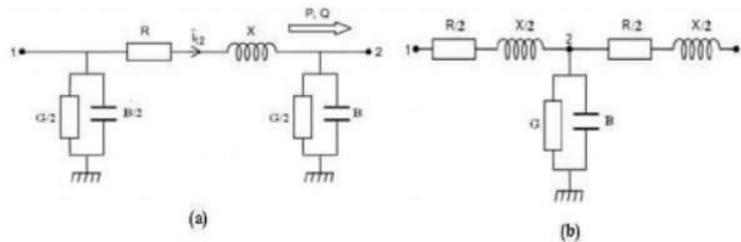
**III.4: Modélisation des éléments du réseau électrique**

**III.4.1: Modélisation d'une ligne de transport**

Les réseaux de transport assurent la liaison entre les centres de production et les zones de consommation. Ils permettent aussi d'échanger de la puissance à travers les lignes d'interconnexion, entre pays ou grandes zones relevant de gestionnaires de réseaux différents

Le modèle d'une ligne de transport est donné par des quadripôles symétriques

Représentés par la **Figure (III.5)** ;(a,b)



**Figure (III.5) :** Schéma équivalent d'un transformateur.

Où  $R$  : résistance de la ligne

$X$  : réactance de la ligne;

$G$  : conductance de la ligne;

B : réactance capacitive de la ligne.[64]

### III.4.2: Modélisation d'une charge

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une impédance Z [64]

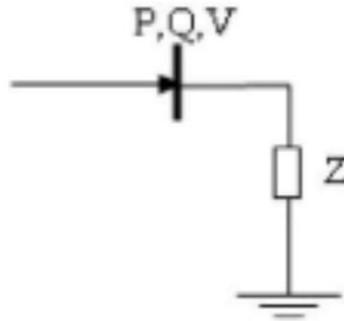


Figure (III.6) : Schéma équivalent d'une charge.

### III.4.3: Modélisation de générateur

La production d'énergie électrique est généralement assurée par des machines synchrones triphasées dont leur principe consiste à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique à tension et fréquence désirées **Figure (III.7)**.

$E_0$ : La *f.é.m.* à vide.

$E_a$ : La *f.é.m.* en charge.

$V$  : tension de sortie.  $\bar{E}_0$

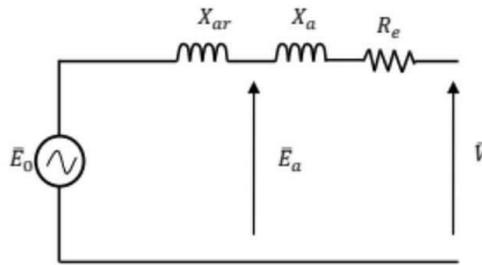
$X_{ar}$  : Réactance de réaction d'induit

$X_{ar}$ .  $X_a$  : Réactance de fuite.

$X_S = X_{ar} + X_a$  : Réactance synchrone.

$R_e$  : Résistance d'enroulement.

Dans le calcul d'écoulement de puissance, un générateur est représenté par une source de tension.



**Figure (III.7) :** Schéma équivalent d'un générateur.

Avec,

$|V_i|$ : Module de la tension (à l'accès i).

$\delta_i$ : Déphasage de la tension (à l'accès i).

La puissance apparente délivrée par le générateur est :

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i \quad (\text{III -1})$$

La tension est exprimée en pu, sous la forme :

$$\bar{V}_i = |V_i|e^{j\delta_i} \quad (\text{III -2})$$

Généralement, un générateur de tension est équipé d'un régulateur qui assure la régulation de la tension à ses bornes de telle sorte qu'elle soit constante. [65]

### III.4.4: Modélisation des lignes aériennes

Les lignes aériennes sont conçues pour véhiculer l'énergie électrique produite par les centrales de production jusqu'aux consommateurs les plus éloignés.

Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal (figure 9).

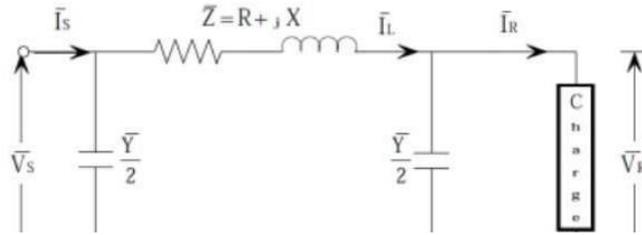


Figure (III.8) : Modèle en  $\pi$  d'une ligne aérienne.

Appliquant la loi de Kirchhoff pour déterminer la tension  $\bar{V}_s$  et le courant  $\bar{I}_s$  à la source, on aura le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \bar{V}_S = A. \bar{V}_R + B. \bar{I}_R \\ \bar{I}_S = C. \bar{V}_R + D. \bar{I}_R \end{cases} \quad \text{(III -3)}$$

Sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad \text{(III -4)}$$

Avec,

A, B, C et D : sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission, qu'on déterminera par la suite.

$\bar{V}_s, \bar{I}_s$ : Tension et courant à la source respectivement.

$\bar{V}_R, \bar{I}_R$ : Tension et courant à la réception respectivement.

$\bar{Z}$ : Impédance de la ligne.

R, X : Résistance et réactance de la ligne respectivement.

$\bar{Y}$ : Admittance shunt de la ligne.

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit : De la figure I.7 on a :

$$\bar{I}_L = \bar{I}_R + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_R \quad \text{(III -5)}$$

La tension à la source est :

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_L \quad (\text{III -6})$$

On remplaçant (I-5) dans (I-6) on aura :

$$\bar{V}_S = \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_R \quad (\text{III -7})$$

Le courant à la source est:

$$\bar{I}_S = \bar{I}_L + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_S \quad (\text{III -8})$$

Remplaçant (I-5) et (I-7) dans (I-8) on obtient :

$$\bar{I}_S = \bar{Y} \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right) \bar{V}_R + \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{I}_R \quad (\text{III -9})$$

Les équations (I.7) et (I.8) peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) & \bar{Z} \\ \bar{Y} \cdot \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right) & \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{III -10})$$

Par identification des équations (I-4) et (I-10) on aura :

$$A= D = \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) ; B=\bar{Z} ; C= \bar{Y} \cdot \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right) \quad [65] \quad (\text{III -11})$$

### III.4.5: Modélisation Du Transformateur

Le transformateur permet d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'unité de production pour l'amener aux niveaux requis pour le transport. A l'autre extrémité de la chaîne, côté consommateurs, les transformateurs sont utilisés pour abaisser la tension et la ramener aux valeurs utilisées dans les réseaux de distribution BT. Chaque transformateur peut être modélisé par une résistance en série avec une réactance comme elle.

Donc le transformateur peut être considéré comme une ligne

$$Z=R_{Tik} + jT_{ik}$$

$$Z = 1/ R_{Tik} + jT_{ik}$$

ZTik : L'impédance du transformateur.

$Y_{Tik}$  : L'admittance du transformateur.[64]

### III.4.6: Modélisation des nœuds du réseau électrique

Chaque nœud d'un réseau électrique est décrit par quatre variables :  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $V_i$  et  $\theta_i$ . En connaissant deux de ces variables, il est possible de déterminer les deux autres en utilisant les équations fondamentales de l'écoulement de puissance. Cependant, dans la pratique, cette approche est différente. Il est nécessaire de classer les nœuds du système comme suit :

#### a. Nœud générateur ( $P$ , $V$ ) ou barre de régulation

Il s'agit d'un nœud relié directement à un générateur ou à une source d'énergie réactive. La puissance active et le module de la tension sont spécifiés, et il reste à déterminer la puissance réactive  $Q$  et l'angle de phase  $\theta$ . La production d'énergie réactive est limitée par des valeurs minimales et maximales,  $Q_{min}$  et  $Q_{max}$  respectivement. Si l'une de ces limites est atteinte, la valeur se stabilise à cette limite et la tension se régule. Le nœud devient alors un nœud de charge ( $P$ ,  $Q$ ).

#### b. Nœud consommateur ( $P$ , $Q$ ) ou barre de charge

Il s'agit d'un nœud connecté directement à une charge et sans source d'énergie propre. Les puissances active et réactive sont spécifiées, et il reste à déterminer l'amplitude de la tension ( $V$ ) et l'angle de phase ( $\theta$ ), qui varient en fonction de la demande en électricité.

#### c. Nœud bilan ( $V$ , $\theta$ ) ou barre d'équilibre

Ce nœud est connecté à un générateur relativement puissant et est utilisé pour compenser les pertes actives et équilibrer la demande et la génération de puissance active. Dans un nœud bilan, l'amplitude de la tension et l'angle de phase sont spécifiés, et il reste à déterminer les valeurs de  $P$  et  $Q$ . Les angles de phase sont mesurés par rapport à une référence, souvent l'accès bilan, dont l'angle de phase est défini comme étant zéro. [66]

### III.5: Construction de la matrice d'admittance d'un réseau électrique

Soit un réseau électrique à  $(n)$  accès indépendants, montré sur la figure 1.11. On considère un accès  $(i)$  parmi les  $(n)$  accès différent de celui de référence.

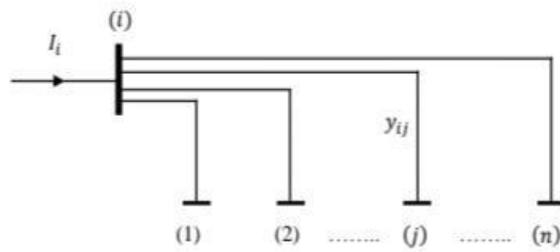


Figure (III.9) : Schéma d'un réseau électrique à (n) accès.

En appliquant la loi des nœuds sur l'accès (i) on aura :

$$I_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \tag{III -12}$$

Avec :

\$I\_i\$ : Courant injecté à l'accès (i).

\$I\_{ij}\$ : Courant circulant entre l'accès (i) et l'accès (j) à travers la branche (i - j)

On peut écrire :

$$I_{ij} = (V_i - V_j) \cdot Y_{ij} \tag{III -13}$$

Telle que :

\$V\_i\$ et \$V\_j\$ : Tensions aux accès (i) et (j) respectivement.

\$Y\_{ij}\$ : Admittance propre de la branche (i - j).

Remplaçant l'équation (III -13) dans (III -12) et en considérant l'accès de référence, on aura :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot (V_i - V_j) = Y_{i0} \cdot (V_i - V_0) + Y_{i1} \cdot (V_i - V_1) + Y_{i2} \cdot (V_i - V_2) + \dots + Y_{in} \cdot (V_i - V_n) \tag{III -14}$$

Telle que : \$V\_0=0\$ et \$i=1, n\$

\$Y\_{i0}\$ : La somme des admittances transversales des lignes reliées à l'accès (i).

Alors,

$$I_i = V_i \cdot [Y_{i0} + \sum_{j=1}^n Y_{ij}] - Y_{i1} \cdot V_1 - Y_{i2} \cdot V_2 - Y_{i3} \cdot V_3 - \dots - Y_{in} \cdot V_n \dots \text{Pouri } i=1, n \tag{III -15}$$

Sous forme matricielle pour les n accès on aura :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{III-16}$$

D'où:  $[I] = [Y_{bus}].[V]$  (III -17)

Avec :  $\begin{cases} Y_{ij} = Y_{i0} + \sum_j^n = 1Y_{ij} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases}$

$[ Y_{bus} ]$  : Matrice nodale des admittances d'ordre (n×n).

Pour déterminer les éléments diagonaux (  $Y_{ij}$  ) de la matrice admittance nodale  $[ Y_{bus} ]$  à l'accès (i) , on doit faire la somme de toutes les admittances des branches reliées à cet accès Y compris les admittances de la connexion à l'accès de référence si elles existent.

Pour calculer les éléments hors diagonale de la matrice admittance  $[ Y_{bus} ]$  , on prend directement l'admittance propre de l'élément qui relie les accès (i) et(j) et on inverse son signe. [66]

### III.6: L'écoulement de puissance

#### III.6.1 : Equations générales de la puissance

La puissance complexe  $S_i = P_i + j Q_i$  injecté au nœud i, en fonction des tensions aux nœuds et les éléments de la matrice admittance nodale  $Y_{bus}$ , en tenant compte de l'expression du courant injecté au nœud i, est donnée par la relation suivante:  $* j j i * i ij *$

$$\bar{S}_i = \bar{P}_i + j\bar{Q}_i = \bar{V}_i . I_i^* = \bar{V}_i . \sum_{j \neq i} \bar{Y}_{ij}^* . \bar{V}_j \tag{III-18}$$

L'expression de la puissance complexe conjuguée s'écrit

$$\begin{aligned}\bar{S}_i^* &= \bar{P}_i - j\bar{Q}_i = \bar{V}_i^* \left( \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{V}_i + \sum_{j \neq i} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right) \\ S_I^* &= \bar{Y}_{ii} \cdot \bar{V}_i^* \cdot \bar{V}_i + \bar{V}_i^* \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j\end{aligned}\tag{III-19}$$

En exprimant la tension sous sa forme polaire en module  $|V_i|$  et argument  $\theta$ , l'expression de la puissance complexe devient

$$\bar{S}_i^* = \bar{Y}_{ii} \cdot |\bar{V}_i|^2 + |\bar{V}_i| \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right| e^{j(\theta_j - \theta_i)}\tag{III-20}$$

$$P_i = \text{Réel}(\bar{S}_i^*) = \text{Réel} \left\{ \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right\}\tag{III-21}$$

$$Q_i = -\text{Imag}(\bar{S}_i^*) = -\text{Imag} \left\{ \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right\}\tag{III-22}$$

2 Puissances écoulées dans les lignes :

Pour calculer la puissance qui s'écoule dans la branche reliant les accès i et j, le courant qui circule entre les accès i et j a pour expression :

$$I_{ij} = \bar{Y}_{ij} \cdot (\bar{V}_i - \bar{V}_j) + \bar{Y}_{i0} \bar{V}_i\tag{III -23}$$

Et la puissance apparente :

$$\begin{aligned}\bar{S}_{ij} &= \bar{V}_i \bar{I}_{ij}^* \\ \bar{S}_{ij} &= \bar{V}_i \cdot [\bar{Y}_{ij} \cdot (\bar{V}_i - \bar{V}_j) + \bar{Y}_{i0} \bar{V}_i]^* \\ \bar{S}_{ij} &= |\bar{V}_i|^2 \cdot \bar{Y}_{ij}^* - \bar{V}_i \cdot \bar{V}_j^* \cdot \bar{Y}_{ij}^* + |\bar{V}_i|^2 \cdot \bar{Y}_{i0}^*\end{aligned}\tag{III -24}$$

De même la puissance apparente qui s'écoule de l'accès j vers l'accès i vaut :

$$\bar{S}_{ji} = |\bar{V}_j|^2 \cdot \bar{Y}_{ij}^* - \bar{V}_j \cdot \bar{V}_i^* \cdot \bar{Y}_{ij}^* + |\bar{V}_j|^2 \cdot \bar{Y}_{j0}^*\tag{III -25}$$

3 Puissance écoulee dans les transformateurs régulateurs Considérant un transformateur régulateur dont sa matrice admittance est :

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{Y_{ij}}{a^2} & -\frac{Y_{ij}}{a} \\ -\frac{Y_{ij}}{a} & Y_{ij} \end{bmatrix} \tag{III -26}$$

Le courant qui circule entre les accès i et j est donné comme suit :

$$\bar{I}_{ij} = \frac{\bar{Y}_{ij}}{a^2} \cdot \bar{V}_i - \frac{\bar{Y}_{ij}}{a} \cdot \bar{V}_j = \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij} \left( \frac{1}{a} \bar{V}_i - \bar{V}_j \right)$$

Et la puissance \* i S a pour valeur :

$$\begin{aligned} \bar{S}_{ij} &= \bar{V}_i \bar{I}_{ij}^* = \bar{V}_i \left[ \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij} \left( \frac{1}{a} \bar{V}_i - \bar{V}_j \right) \right]^* \\ \bar{S}_{ij} &= \frac{1}{a^2} (\bar{V}_i)^2 \bar{Y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j \bar{V}_i \end{aligned} \tag{III -27}$$

D'autre part le courant qui circule de l'accès j vers l'accès i :

$$\bar{I}_{ji} = \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij} \left( \bar{V}_j - \frac{1}{a} \bar{V}_i \right) \tag{III -28}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_{ji} &= \bar{V}_j \bar{I}_{ji}^* = \bar{V}_j \left[ \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij} \left( \bar{V}_j - \frac{1}{a} \bar{V}_i \right) \right]^* \\ \bar{S}_{ji} &= \frac{1}{a^2} (\bar{V}_j)^2 \bar{Y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j \bar{V}_i \end{aligned} \tag{III-29}$$

[67]

### III.6.2: Méthodes de calcul

#### III.6.2.1: Méthode de Newton Raphson

##### a- Principe de la méthode de Newton Raphson

Soit le système d'équation non linéaire suivant :

$$\begin{cases} Y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ Y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \vdots \\ Y_n = f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{cases} \tag{III -30}$$

Si on suppose que les solutions initiales du système sont :

$$(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0)$$

Les erreurs :

$$(\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \Delta x_3^0, \dots, \Delta x_n^0)$$

Donc :

$$(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, x_3^0 + \Delta x_3^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0), i=1, n$$

En appliquant le développement en série de Taylor d'ordre (1) aux points  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

On aura :

$$Y_i = f_i(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0) + \Delta x_1^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_1} + \Delta x_2^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_2} + \Delta x_3^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_3} + \dots + \Delta x_n^0 \frac{\partial f_i}{\partial x_n} + C_i \tag{III -31}$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur posant :  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ , on aura le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_1^0 \\ \Delta Y_2^0 \\ \vdots \\ \Delta Y_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 - f_1^0 \\ Y_2 - f_2^0 \\ \vdots \\ Y_n - f_n^0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta Y_1^0 \\ \Delta Y_2^0 \\ \vdots \\ \Delta Y_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \frac{\partial f_n}{\partial x_3} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} \tag{III-32}$$

Ou sous forme matricielle :

$$[\Delta Y] = [J] \cdot [\Delta X] \tag{III -33}$$

Avec :

$[ J ]$  : Matrice Jacobien

La méthode de Newton-Raphson consiste à calculer les éléments du vecteur X, à la  $K^{ieme}+1$  itération par :

$$X_i^{K+1} = X_i^K + \Delta x_i^k \tag{III -34}$$

Ce vecteur servira pour le nouveau jacobien J afin de déterminer les nouvelles valeurs de xi en résolvant le système d'équations par la méthode adéquate de résolution de système linéaires. Ce processus de calcul est répété jusqu'à l'obtention de la précision désirée, et on arrête le processus

D'itération une fois que  $|x_i^{k+1} - x_i^k| \leq \varepsilon$  pour  $i=1,2,\dots,n$ . [67] (III -35)

### b- Application de la méthode de Newton-Raphson pour l'écoulement de puissance

Reprenons l'équation permettant de calculer la puissance apparente Si

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \cdot \left( \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_j \right)^* \quad (\text{III -36})$$

$$P_i = \text{Real}\{S_i\} ; Q_i = \text{Imag}\{S_i\} ; \quad (\text{III -37})$$

La méthode de N.R a plusieurs variantes selon que l'on exprime les éléments de la matrice admittance nodale et tensions aux accès en coordonnées cartésiennes, polaires ou hybrides. [67]

## III.7: Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a défini et présenté les différentes structures et architectures des réseaux électriques en modélisant les éléments le constituant. Une deuxième partie a été consacrée pour calculer la matrice admittance du réseau électrique et en prenant le cas d'un réseau à (n) accès indépendants.

Le but de la dernière partie est l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson , qui nous permettra par son application, d'avoir des informations sur l'état du réseau à étudier pour des paramètres précis.

# ***Chapitre IV***

## ***Simulation et interprétation des résultats***

## Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

### IV.1: Introduction

Afin de tirer le meilleur parti de l'énergie solaire tout en maintenant la stabilité du réseau, une étude du lieu et de la puissance optimales d'une centrale photovoltaïque dans un réseau électrique a été faite.

En premier lieu, une étude d'un réseau électrique à huit nœud, sera fait placé la centrale PV en nœud 2, puis le nœud 5 et enfin 7 sans tenir compte du temps et de l'éclairement.

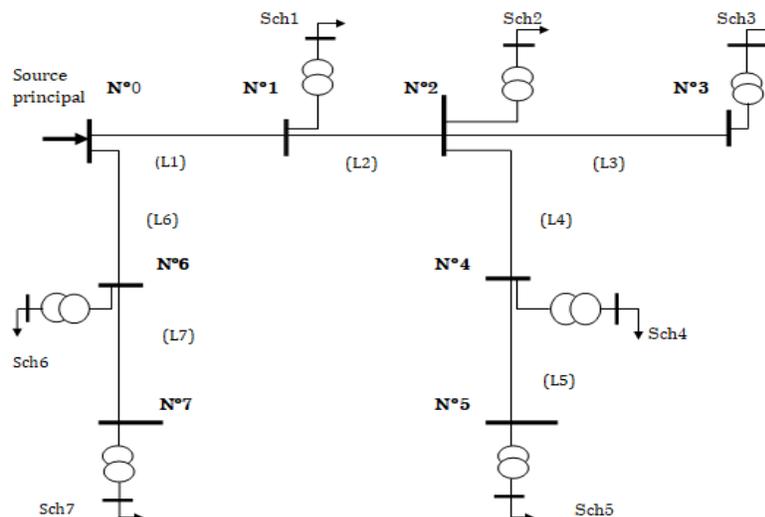
Ensuite, une étude d'un réseau électrique sera fait placé la centrale PV en nœud 2, puis nœud 5, et enfin nœud 7 avec tentant compte du temps et de l'éclairement.

Enfin, la solution proposée est un algorithme innovant qui permet d'assurer une coordination entre la ou les sources conventionnelles avec la centrale PV pour une optimisation en temps réel.

### IV.2: Topologie du réseau étudié

Le réseau de la **figure IV.1** est constituée de :

- Huit (8) nœuds numérotés de N° 0 à N°7 dont le nœud N°0 représente la source principale
- Sept (7) lignes numérotées de (L1) à (L7)
- Sept (7) Puissances apparentes de Charges numérotés de Sch1 à Sch7



**Figure (IV.1):** Topologie du réseau électrique étudié.

### IV.3: Données du réseau étudié

Les données des lignes et des nœuds du réseau sont regroupées dans le tableau IV.1. et tableau IV.2 avec une Tension nominales,  $U_n=60\text{KV}$ .

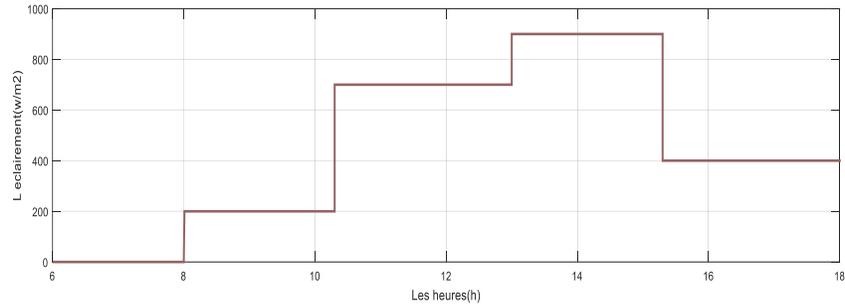
N° de la ligne	Ligne	R0 ( $\Omega/\text{km}$ )	X0 ( $\Omega/\text{km}$ )	Longueur (km)
(L1)	0-1	0.27	0.391	60
(L2)	1-2	0.27	0.391	40
(L3)	2-3	0.27	0.391	60
(L4)	2-4	0.27	0.391	50
(L5)	4-5	0.27	0.391	30
(L6)	0-6	0.27	0.391	50
(L7)	6-7	0.27	0.391	40

**Tableau (IV.1) :** Données des lignes.

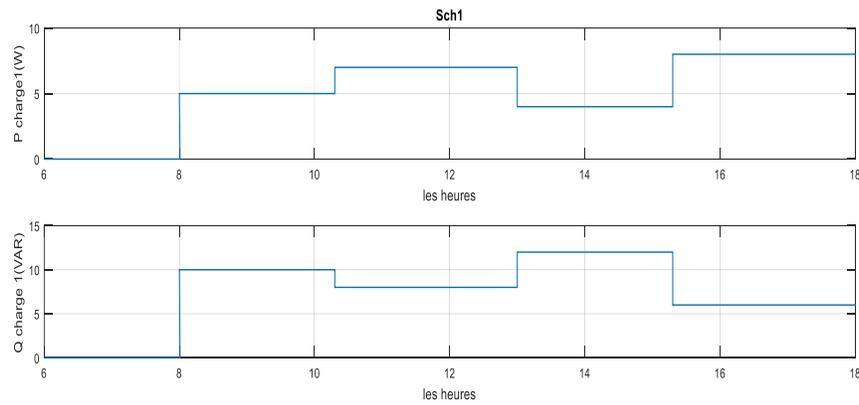
N° de Nœud	S.charges(Puissance apparente de charge) (MVA)
N°0	0
N°1	$5+j10$
N°2	$8+j6$
N°3	$7+j5$
N°4	$6+j4$
N°5	$10+j5$
N°6	$4+j8$
N°7	$7+j4$

**Tableau (IV.2) :** Données des nœuds .

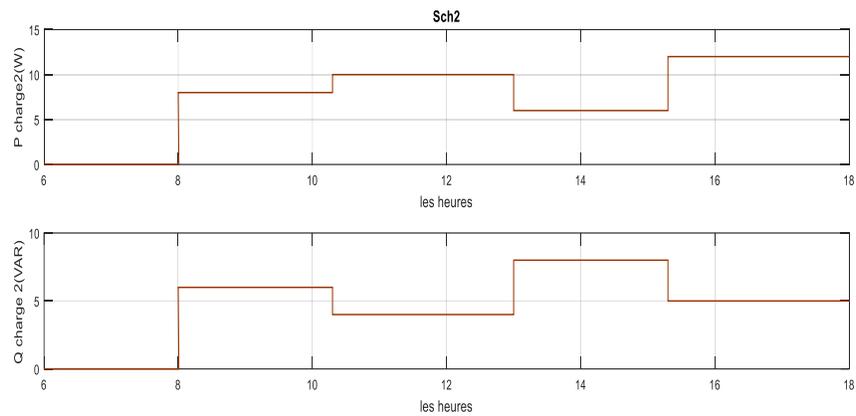
En après les profils d'éclaircissement et es puissances apparentes qui correspondent à une variation durent la journée.



**Figure (IV.2) :** l'éclairage durent de la journée.



**Figure (IV.3) :** Un profil La puissance apparente 1 qui correspondent à une variation durent la journée.



**Figure (IV.4):** Un profil La puissance apparente 2 qui correspondent à une variation durent la journée.

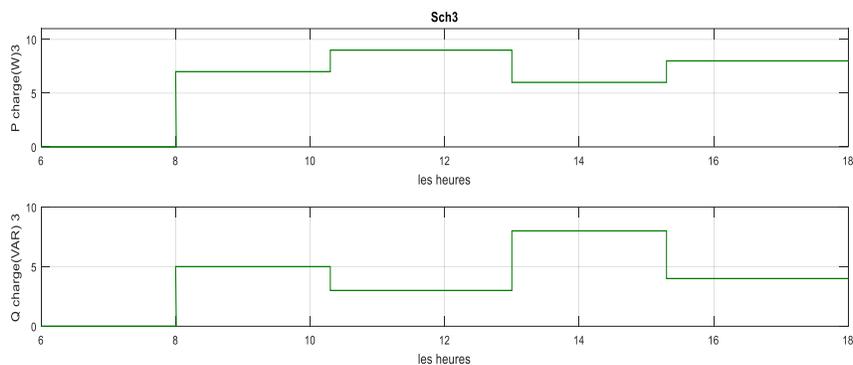


Figure (IV.5): Un profil La puissance apparente 3 qui correspondent à une variation durent la journée.

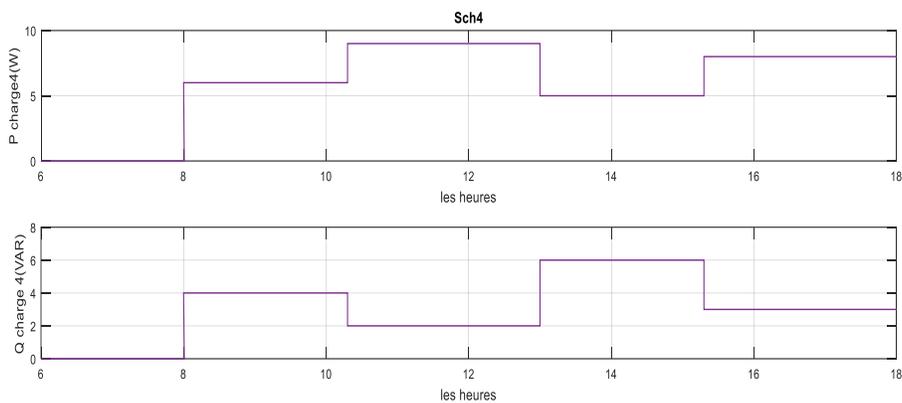


Figure (IV.6.): Un profil La puissance apparente 4 qui correspondent à une variation durent la journée.

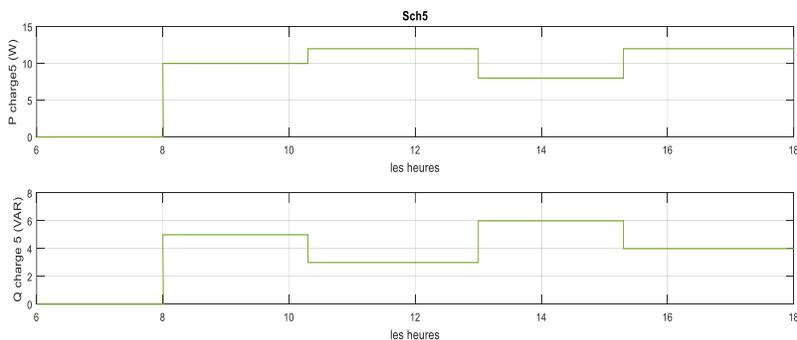
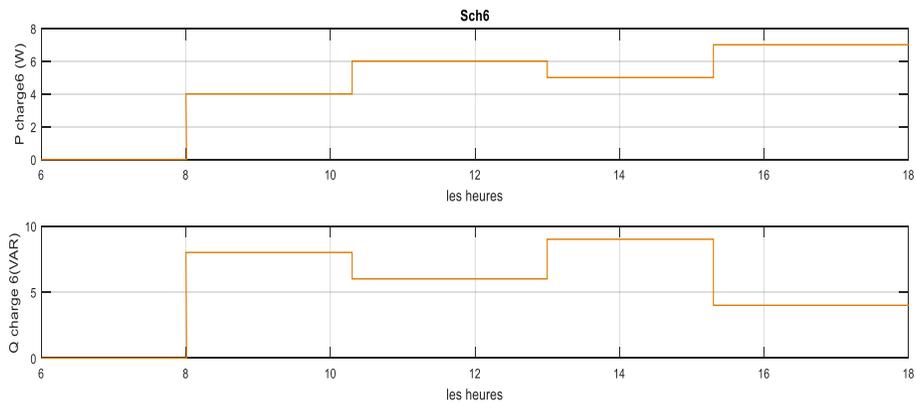
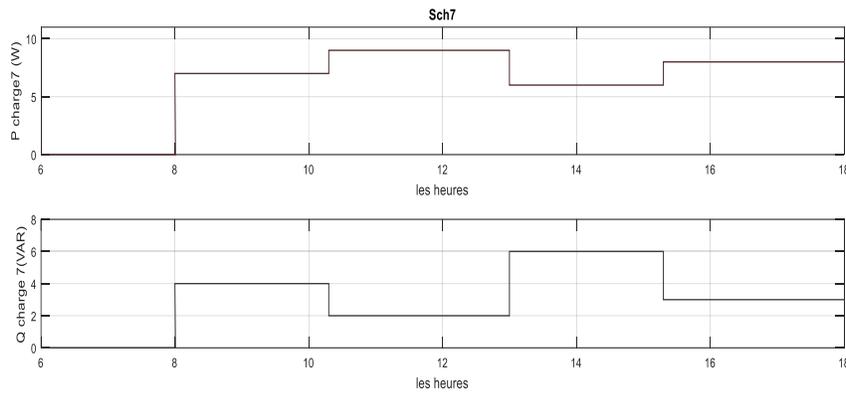


Figure (IV.7) : Un profil La puissance apparente 5 qui correspondent à une variation durent la journée.

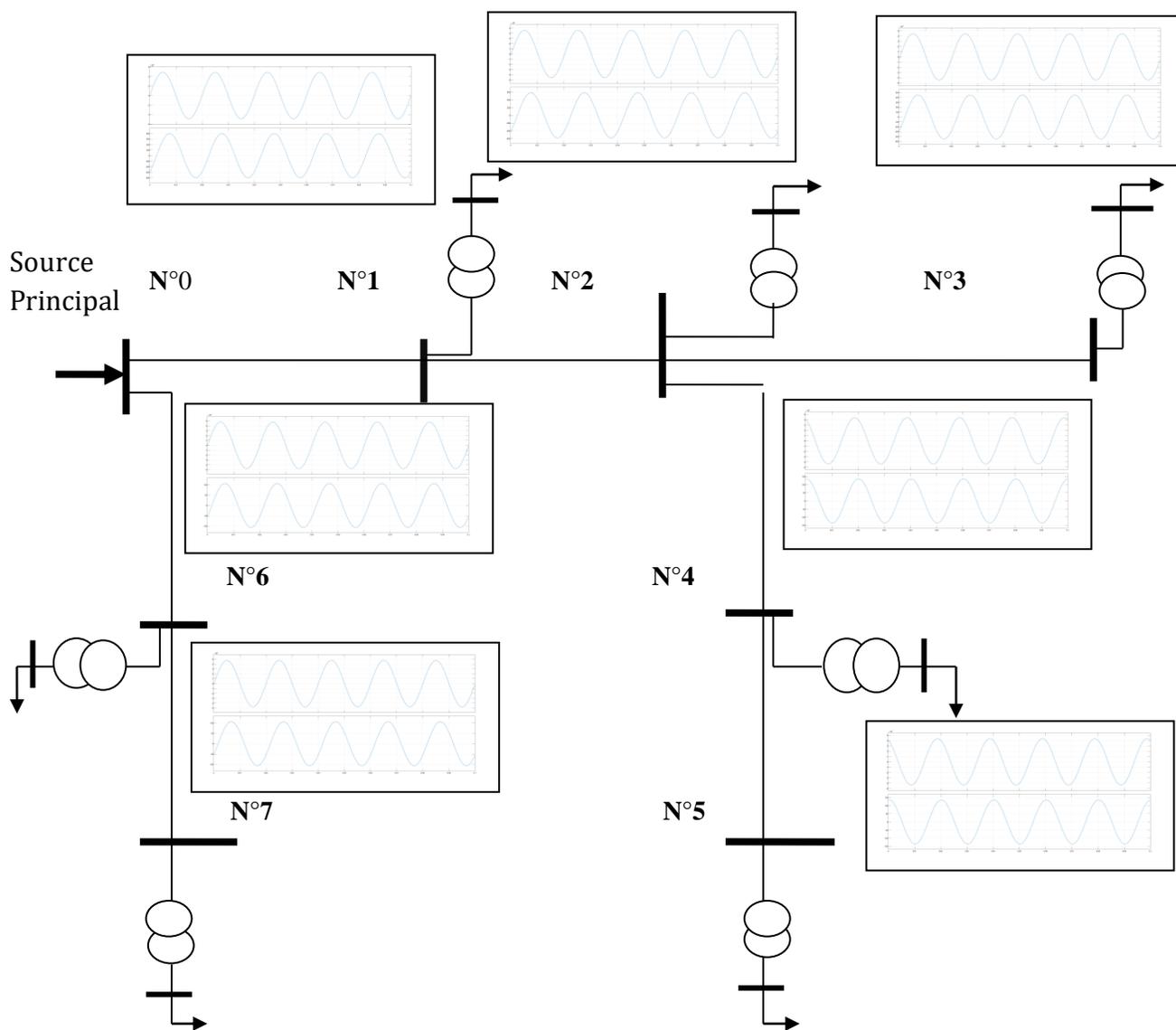


**Figure (IV.8).** : Un profil La puissance apparente 6 qui correspondent à une variation durent la journée.



**Figure (IV.9)** : Un profil La puissance apparente 7 qui correspondent à une variation durent la journée.

- Les courbes de tensions et courants de nœud :



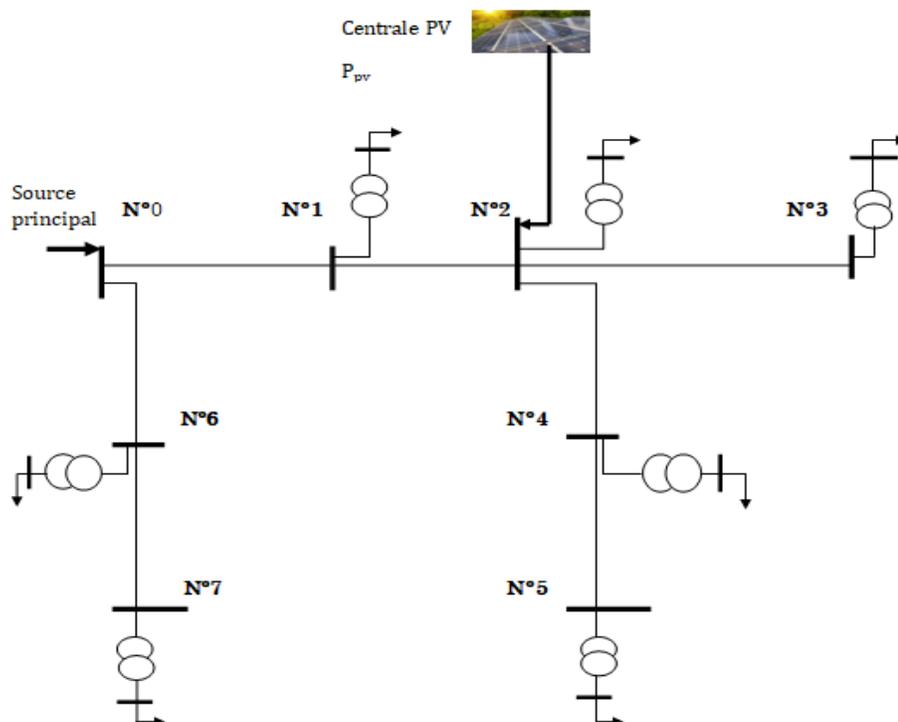
**Figure (IV.10) :** Les courbes de tensions et courants du réseau étudiée.

## IV.4: Résultats de simulation

### IV.4.1: Réseau avec Centrale PV sans l'éclairage et le temps

#### a- Centrale PV dans nœud 2

D'abord, nous mettons une centrale PV dans le nœud 2, la figure IV.11 C'est ce présent ca :



**Figure (IV.11)** : le schéma de réseau électrique avec la centrale PV en nœud 2.

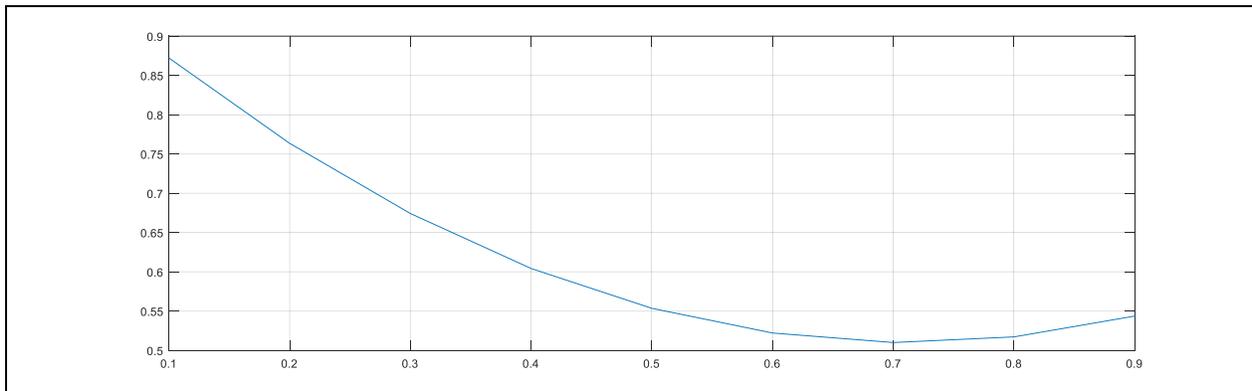
Le calcul de les pertes globales du réseau test avec centrale PV en nœud 2 a donné les résultats représentés dans le Tableau IV.3

Ppv	dpt de Noeud2
0,1*Pv	0.8721
0,2*Pv	0.7635
0,3*Pv	0.6742
0,4*Pv	0.6042
0,5*Pv	0.5535
0,6*Pv	0.5221
0,7*Pv	0.5100
0,8*Pv	0.5172
0,9*Pv	0.5437

**Tableau(IV.3) :** les pertes globales totales de nœud 2 avec centrale PV.

Pour plus précision la courbe ci-après présente l'état du réseau test avec PV dans le nœud 2 :

- La figure (IV.12): présente les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 2



**Figure (IV.12):** Les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 2.

### **b-Centrale PV dans nœud 5**

Ensuite, nous mettons une centrale PV dans le nœud 2, la figure IV.13 C'est ce présent ca :

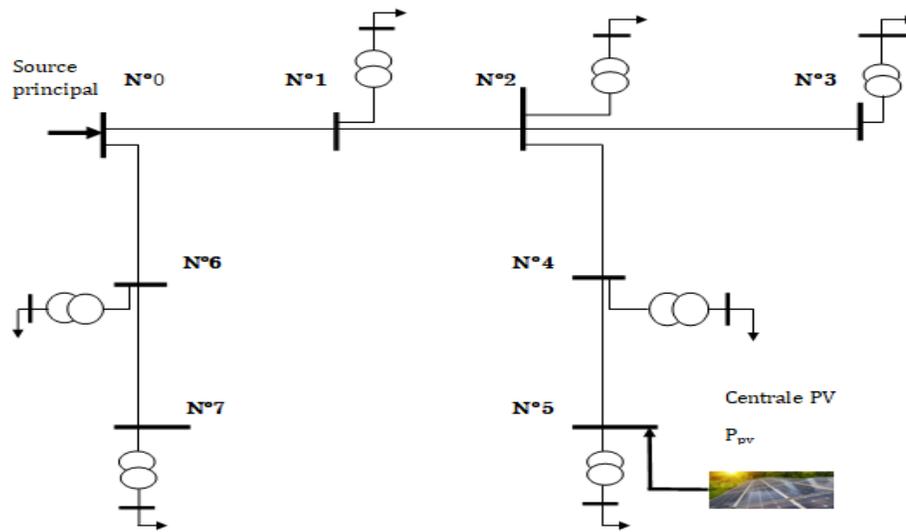


Figure (IV.13) : Le schéma de réseau électrique avec la centrale PV en nœud 5.

Ppv	dpt de noeud5
0,1*Pv	0.8326
0,2*Pv	0.7038
0,3*Pv	0.5917
0,4*Pv	0.5328
0,5*Pv	0.5125
0,6*Pv	0.5307
0,7*Pv	0.5876
0,8*Pv	0.6831
0,9*Pv	0.8171

Tableau (IV.4) : les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV.

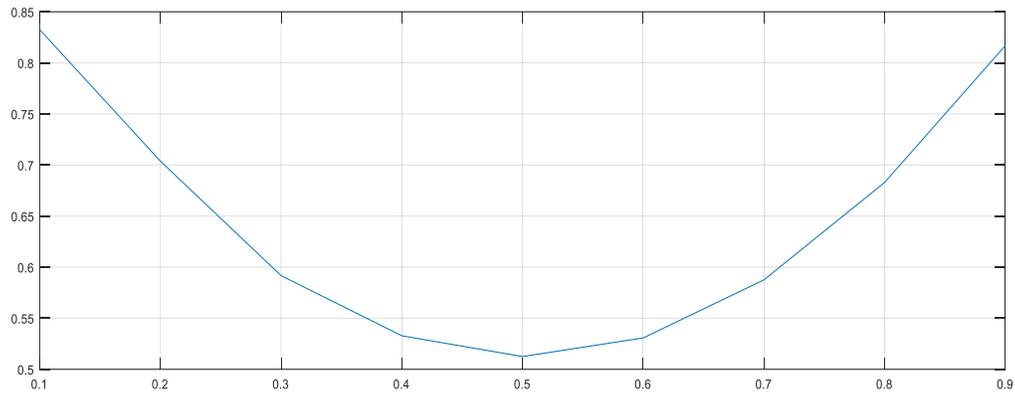
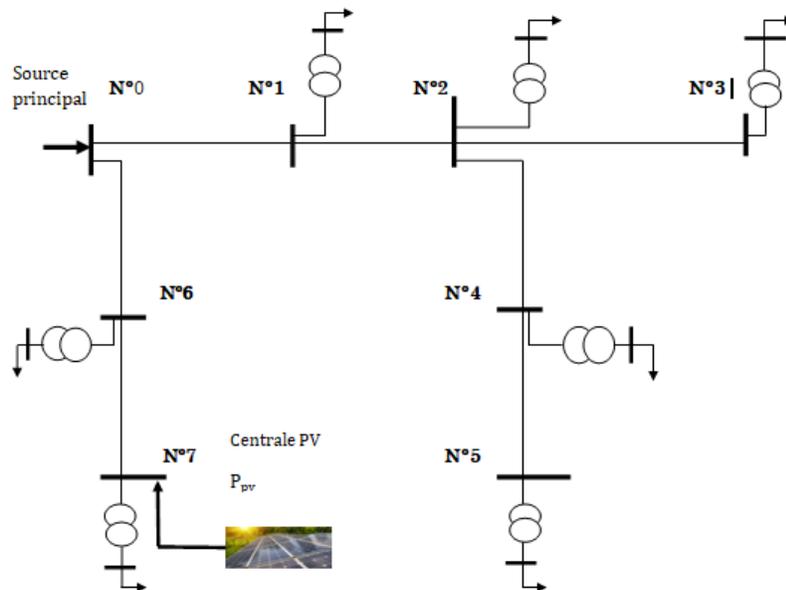


Figure (IV.14) : Les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 5.

**b- Centrale PV dans nœud 7**

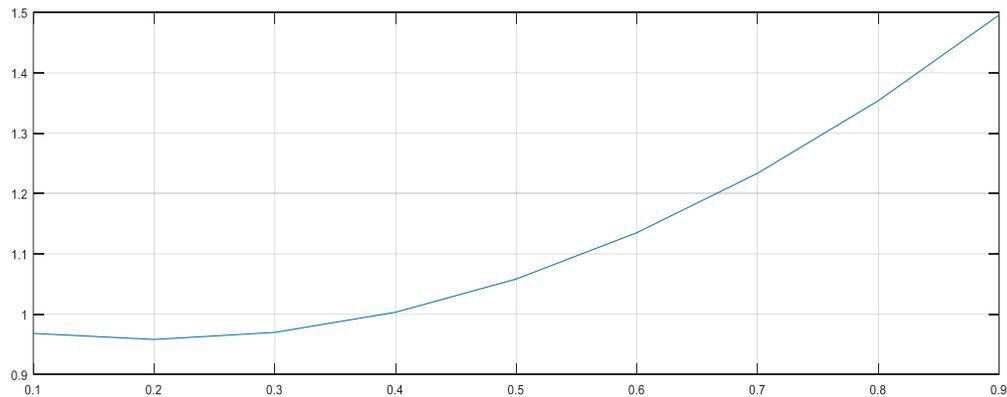
Enfin, nous mettons une centrale PV dans le nœud 7, la figure IV.15 C'est ce présent ca :



Figure( IV.15) : Le schéma de réseau électrique avec la centrale PV en nœud 7.

Ppv	dpt de noeud7
0,1*Pv	0.9682
0,2*pv	0.9582
0,3*Pv	0.9699
0,4*Pv	1.0033
0,5*Pv	1.0584
0,6*Pv	1.1352
0,7*Pv	1.2337
0,8*Pv	1.3539
0,9*Pv	1.4958

**Tableau (IV.5) :** les pertes globales totales de nœud 7 avec centrale PV.



**Figure (IV.16):** Les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 7.

## Interprétation

On observe à travers le tableau IV.3 et la figure IV.12, que l'optimisation la puissance Ppv injecté un flu sur les pertes globales du réseau dans notre cas les pertes globales minimales correspondent à 0.7\*Ppv la valeur est  $\Delta p_{min}=0.5100$

A travers le tableau IV.4 et la figure IV.14, la même observation remarqué l'orsque les panneaux sont installé sur le nœud 5, la déférence consiste à la quantité de puissance injecté 0.5\*Ppv correspondent à  $\Delta p_{min} =0.5125$

Par contre à travers le tableau IV.5 et la figure IV.16, le nœud 7 L'optimisation est à tend pour Ppv 0.2\*Ppv correspond  $\Delta p_{min}=0.9582$

### IV.4.2: Réseau avec Centrale PV avec l'éclairement et le temps

#### a- Centrale PV dans nœud 2

Nous faisons la même chose dans la première méthode (nœud 2) mais en tenant compte du temps et l'éclairement, le tableau IV.6 et la figure IV.16 représente ça :

Ppv	0,1*Pv	0,2*Pv	0,3*Pv	0,4*Pv	0,5*Pv	0,6*Pv	0,7*Pv	0,8*Pv	0,9*Pv
8-10,30	1,33245	1,29243	1,25372	1,21631	1,18021	1,14542	1,11195	1,07977	1,04892
10,30-13,00	1,50666	1,33989	1,18916	1,05447	0,93581	0,83318	0,74659	0,67604	0,62152
13,00-15,30	1,35221	1,23969	1,15367	1,09417	1,06119	1,04569	1,07471	1,12125	1,19429
15,30-18,00	1,65056	1,54812	1,45091	1,35894	1,27222	1,19073	1,11446	1,04344	0,97765

Tableau (IV.6) : Les pertes globales totales de nœud 2 avec centrale PV, l'éclairement et le temps.

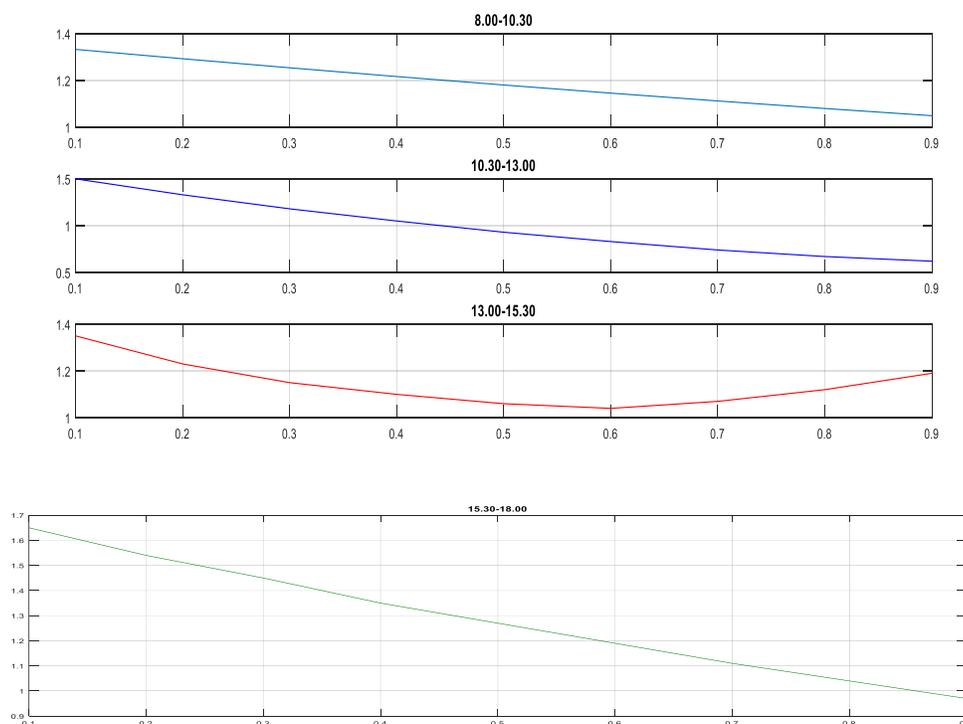


Figure (IV.17): Les pertes globales totales de nœud 2 avec centrale PV, l'éclairement et le temps.

b- Centrale PV dans nœud 5

Nous faisons la même chose dans la premier méthode (nœud 5) mais en tentant compte du temps et l'éclairement, le tableau IV.7 et la figure IV.17 représente ca :

les heures/Ppv	0,1*Pv	0,2*Pv	0,3*Pv	0,4*Pv	0,5*Pv	0,6*Pv	0,7*Pv	0,8*Pv	0,9*Pv
8,00-10,30	1,31587	1,26058	1,20791	1,15785	1,11041	1,06558	1,02339	0,98379	0,94684
10,30-13,00	1,43736	1,21732	1,02938	0,87349	0,74967	0,65793	0,59825	0,57065	0,57513
13,00-15,30	1,30271	1,16721	1,08471	1,05525	1,07881	1,15536	1,28493	1,46855	1,70315
15,30-18,00	1,61056	1,47336	1,34663	1,23037	1,1246	1,02929	0,94445	0,87008	0,80619

Tableau (IV.7) : Les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV, l'éclairement et le temps.

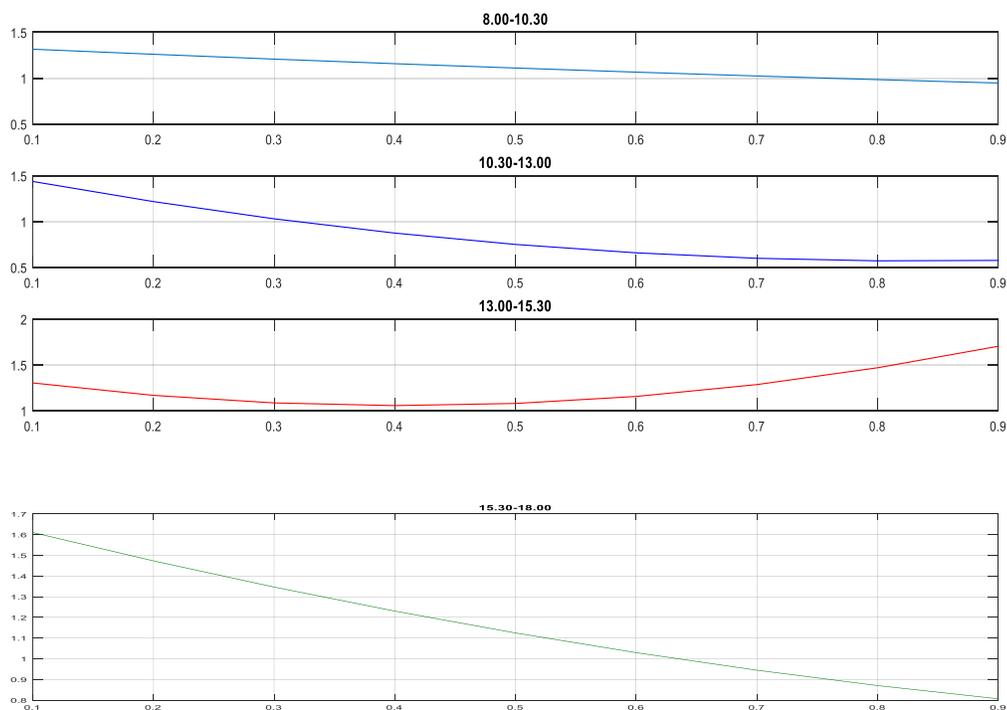


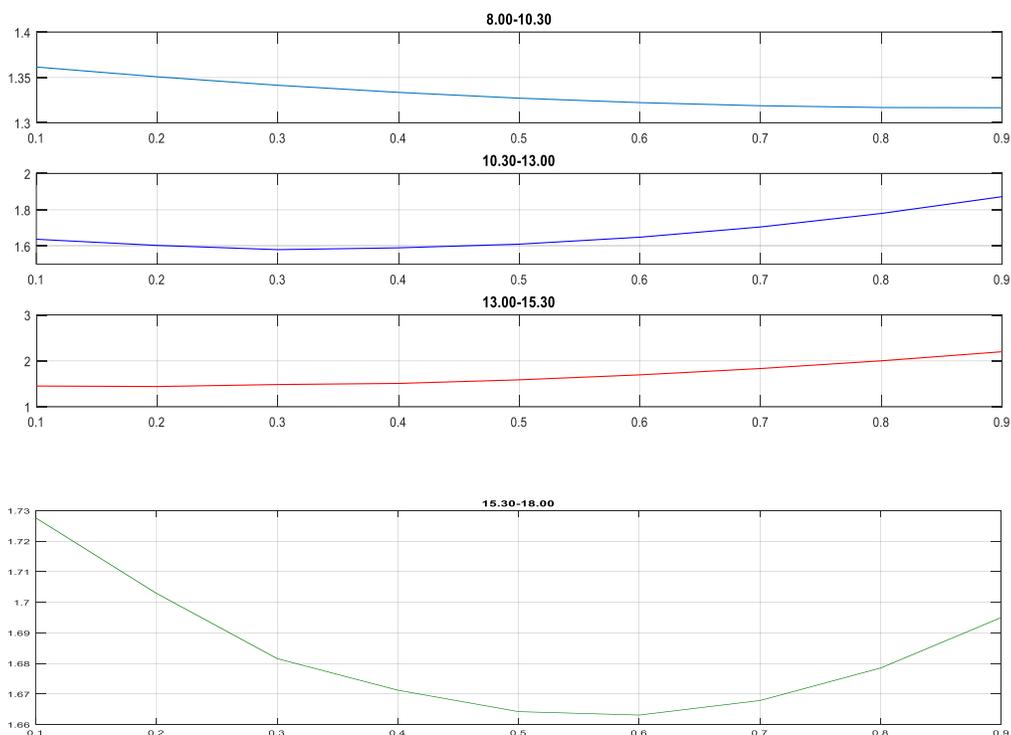
Figure (IV.18): Les pertes globales totales de nœud 5 avec centrale PV, l'éclairement et le temps.

**c- Centrale PV dans nœud 7**

Nous faisons la même chose dans la premier méthode (nœud 7) mais en tentant compte du temps et l'éclairement, le tableau IV.8 et la figure IV.18 représente ca :

Ppv	0,1*47	0,2*47	0,3*47	0,4*47	0,5*47	0,6*47	0,7*47	0,8*47	0,9*47
8,00-10,30	1,36151	1,35072	1,3414	1,33354	1,32717	1,32226	1,31883	1,31687	1,316639
10,30-13,00	1,63761	1,60381	1,5804	1,59031	1,61063	1,64899	1,70539	1,77982	1,87229
13,00-15,30	1,45045	1,43948	1,4834	1,50702	1,58553	1,69385	1,83199	1,99996	2,19775
15,30-18,00	1,72765	1,70296	1,6416	1,67125	1,66423	1,66311	1,66787	1,67852	1,69506

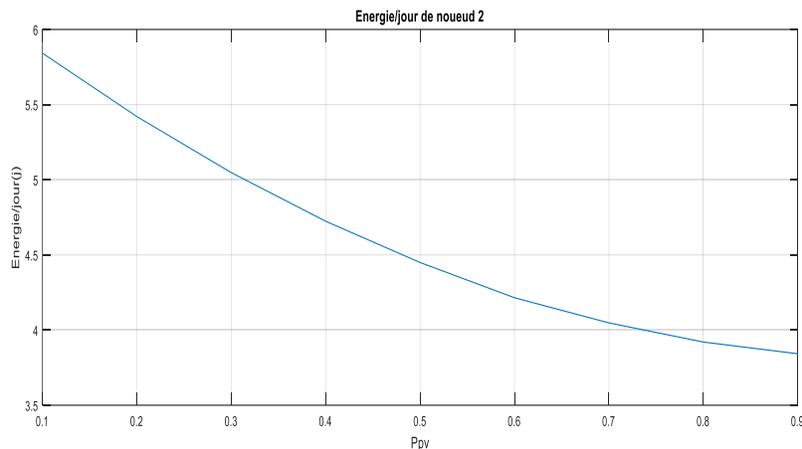
**Tableau (IV.8) :** Les pertes globales totales de nœud 7 avec centrale PV.

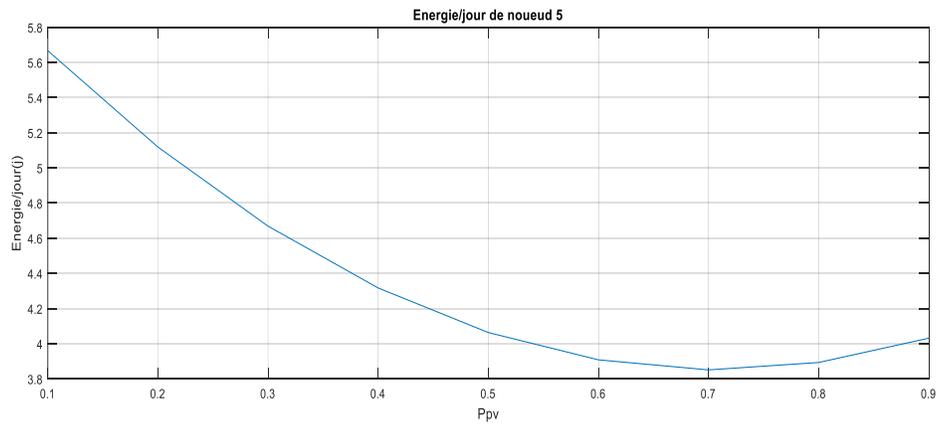


**Figure (IV.19) :** Les pertes globales en fonction de Ppv de nœud 5.

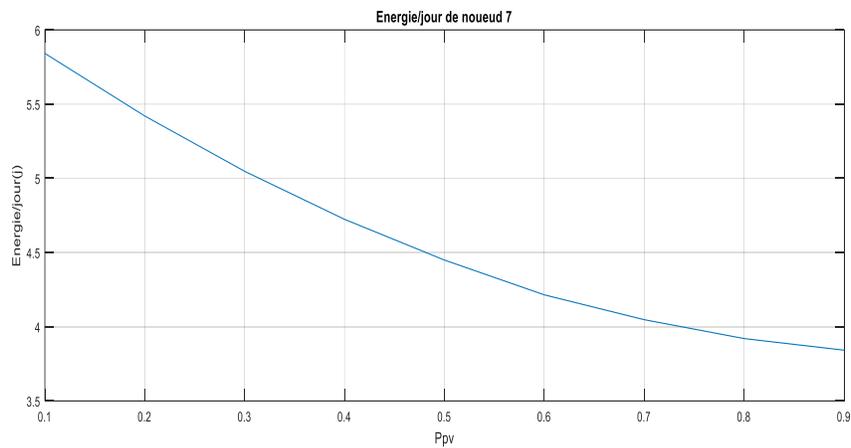
**Interprétation :**

- Pour le nœud 2 l'optimisation parure variée suivant le lieu d'installation De la centrale PV
- Pour le nœud 2 l'optimisation est à atteindre pour une injection totale de la puissance PV
- Par contre le nœud 5 un algorithme peu être est absorbe pour une optimisation de la puissance injecté en temps réel à titre d'exemple
- Pour la première tranche horaire la totalité de la puissance PV est recommandée, la deuxième tranche  $0.8 * P_v$   $\Delta p_{min}=0.57065$
- 3ém  $0.6 * P_v$ ,  $\Delta p_{min}=1,15536$  et 4ème  $0.9 * P_v$  ,  $\Delta p_{min}=0.80619$
- Pour nœud 7 : l'effet de la centrale PV est relativement constant durent la premier tranche  $0.7 * P_{pv}$   $\Delta p_{min}= 1,31883$  , pour deuxième tranche  $0.3 * P_{pv}$   $\Delta p_{min}= 1,5804$ , troisième tranche  $0.2 * P_{pv}$ ,  $\Delta p_{min}= 1,43948$  et quatrième tranche , il a diminué puis augmenté  $0.4 * P_{pv}$ ,  $\Delta p_{min}= 1,66311$

**L'énergie globale :****Figure (IV.20) :** L'énergie globale en fonction de Ppv de nœud 2



**Figure (IV.21) :** L'énergie globale en fonction de  $P_{pv}$  de nœud 5



**Figure (IV.22) :** L'énergie globale en fonction de  $P_{pv}$  de nœud 7

### Interprétation :

Grace à l'algorithme d'optimisation le réseau peu atteindre les pertes d'énergies minimales important :

- Pour nœud 5 l'énergie globale est entre 2.5j et 4j
- Pour nœud 5 l'énergie globale est entre 2.5j et 4j
- Pour nœud 7 l'énergie globale est entre 2.5j et 4j

IV.5: Schéma de l'algorithme

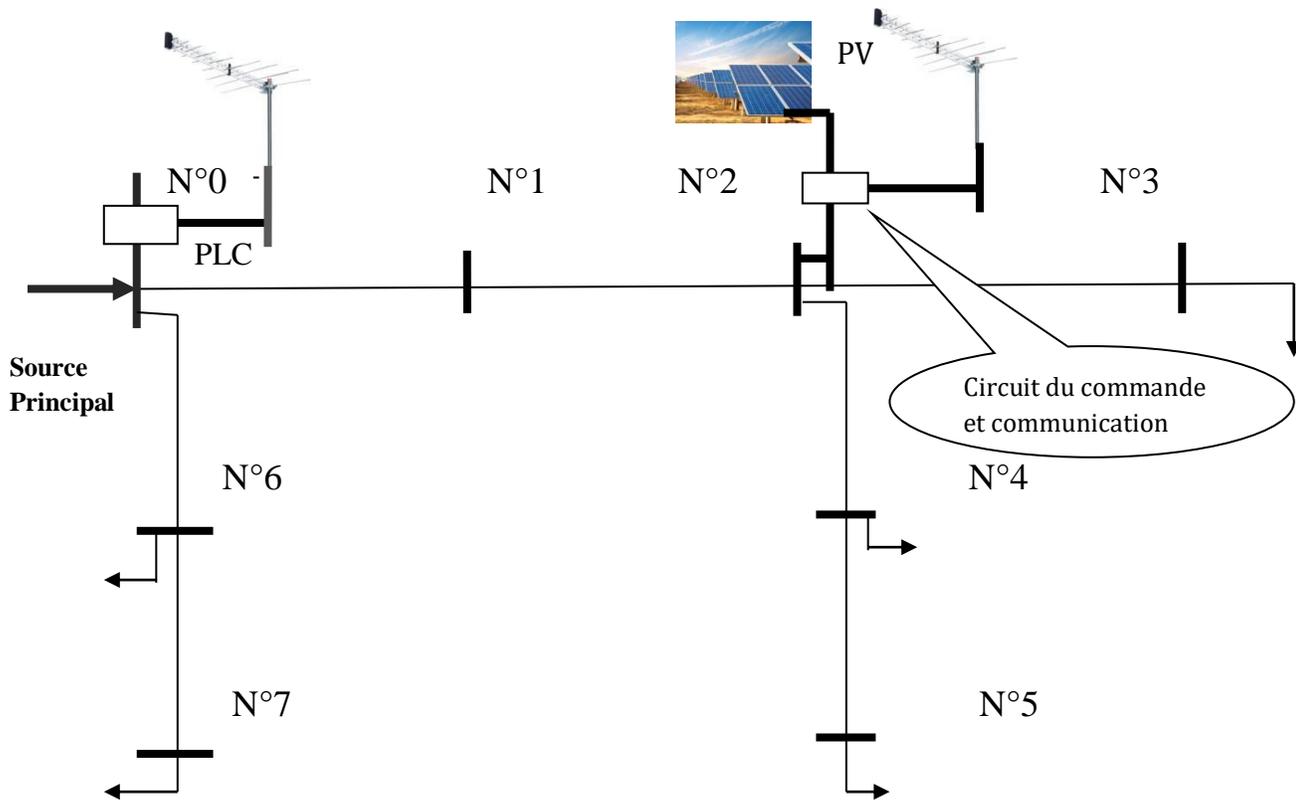


Figure (IV.23) : Schéma de communication et contrôle.

IV.6: L'algorithme

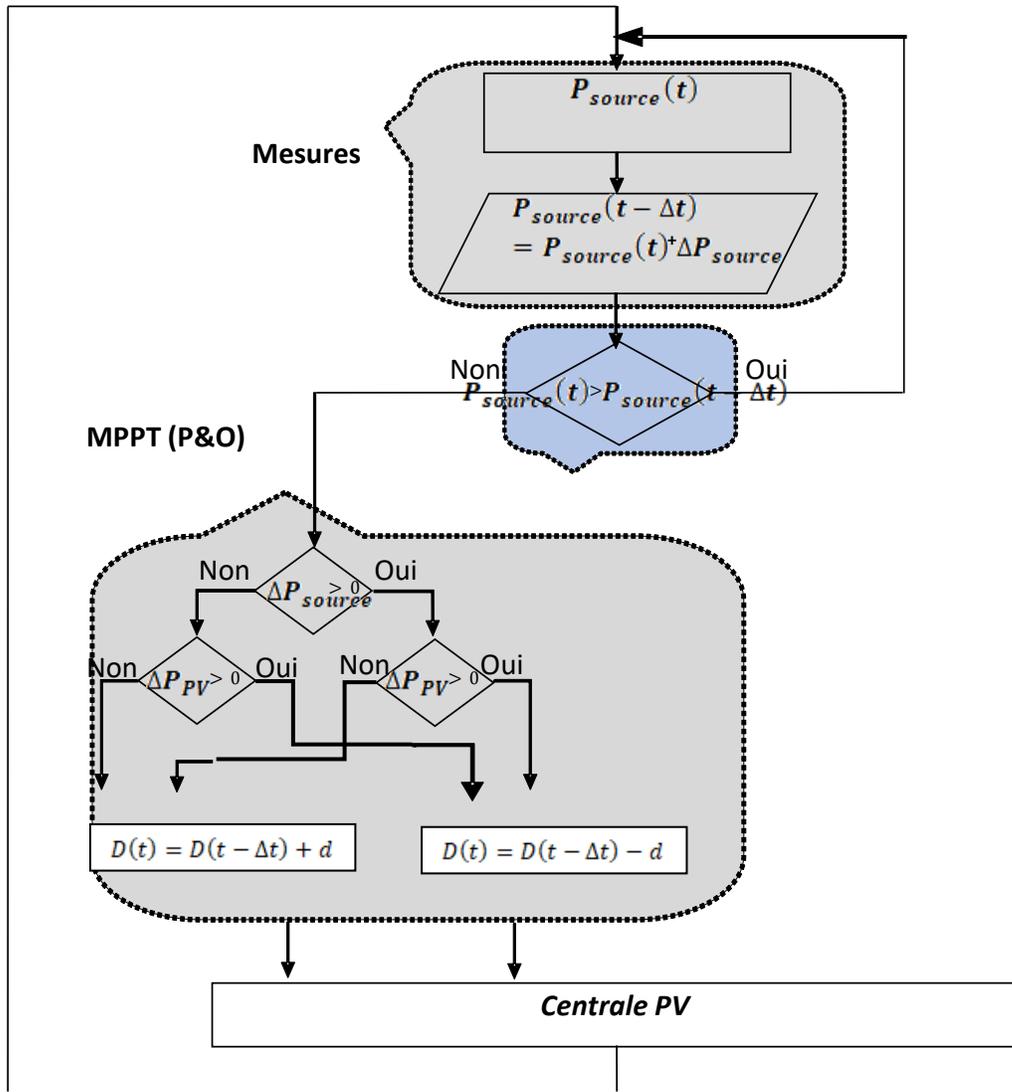


Figure (IV.24) : l'algorithme p&O.

Les explications pour l'algorithme :

L'algorithme que nous avons développé peut gérer d'une manière automatique et optimale car il tient en compte le réseau électrique dans sa globalité.

L'optimisation est basée sur la causalité entre les différents éléments du réseau. On a opté pour une optimisation basée sur la technique P&O pour sa simplicité et son efficacité dans notre application.

### **IV.7: Conclusion**

L'installation de centrales photovoltaïques dans les réseaux électrique offre des avantages significatifs en termes de réduction des pertes de puissances actives globales et de soutien à la régulation de la tension .En revanche, elle engendre également des défis liés à la variabilité de la production la nuit ou bien la baisse de l'éclairement durant la journée, le passage des nuages etc....

Pour maximiser les bénéfices et minimiser les impacts négatifs, il est essentiel de mettre en place des technologies de gestion avancée, comme le système de stockages d'énergie, les onduleurs intelligents, les réseaux électriques intelligents.

Une planification et une coordination rigoureuses avec les opérateurs de réseau sont également cruciales pour assurer la stabilité et la fiabilité de l'alimentation électrique.

Dans notre travail on a proposé un algorithme qui permet d'assurer une coordination entre la ou les sources conventionnelles avec la centrales PV pour une optimisation en temps réel.

# *Conclusion Générale*

### **Conclusion générale :**

La conclusion générale de l'étude sur l'emplacement et la puissance optimaux d'une centrale photovoltaïque dans un réseau électrique met en lumière l'importance cruciale de plusieurs facteurs clés.

Premièrement, la sélection du site idéal pour l'installation de la centrale est essentielle pour maximiser la production d'énergie solaire. Les conditions climatiques, telles que l'ensoleillement annuel, les températures moyennes et les conditions météorologiques, sont déterminantes dans cette décision. Les régions avec un fort ensoleillement et des conditions stables sont particulièrement adaptées.

Ensuite, l'intégration optimale de la centrale dans le réseau électrique nécessite une évaluation minutieuse de la demande locale en électricité, de la capacité d'absorption du réseau existant et de la proximité des infrastructures de distribution. Une analyse détaillée de ces éléments permet d'optimiser la production énergétique, de minimiser les pertes et d'assurer une distribution efficace de l'énergie.

La détermination de la puissance optimale de la centrale est également cruciale pour équilibrer production et consommation d'énergie. Une surproduction pourrait engendrer des coûts supplémentaires et des défis de stockage, tandis qu'une sous-production risquerait de ne pas satisfaire les besoins énergétiques. Ainsi, une analyse coût-bénéfice prenant en compte les incitations financières, les subventions, ainsi que les coûts d'installation et de maintenance, est essentielle pour définir la taille idéale de l'installation.

L'installation de centrales photovoltaïques dans les réseaux électriques offre des avantages significatifs en termes de réduction des pertes de puissances actives globale et de soutien à la régulation de la tension. C'est une planification et une coordination rigoureuses avec les opérateurs de réseau sont également cruciales pour assurer la stabilité et la fiabilité de l'alimentation électrique. Dans notre travail on a proposé un algorithme qui permet d'assurer une coordination entre la ou les sources conventionnelles avec la centrale PV pour une optimisation en temps réel

## *Conclusion Générale*

---

En résumé, l'étude de l'emplacement et de la puissance optimaux d'une centrale photovoltaïque nécessite une approche multidisciplinaire intégrant des analyses climatiques, techniques et économiques. Cette approche permet de maximiser l'efficacité énergétique, de réduire les coûts et de favoriser la transition vers des sources d'énergie renouvelables et durables.

### Références bibliographiques

- [1] Laboratoires de Systèmes Energétiques, [www.fifel.ch/includes/asp](http://www.fifel.ch/includes/asp), (2001).
- [2] A. PAGES, L'utilisation des énergies renouvelables pour l'électrification rurale décentralisée des pays en développement, Octobre(2000).
- [3] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/8/introduction-generale.pdf>
- [4] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/A9nergie%20renouvelable%202.pdf>
- Généralités sur les énergies renouvelables chapitre 1 page 4 .
- [5] <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>
- [6] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition>
- [7] [https://www.missionenergie.goodplanet.org/uploads/2019/09/8-decouverte\\_energies-renouvelables\\_college.pdf](https://www.missionenergie.goodplanet.org/uploads/2019/09/8-decouverte_energies-renouvelables_college.pdf)
- [8] **B. Nada Hibat Errahman** "énergie éolienne" Mémoire de fin étude de Licence ,page 9
- [9] [http://doctechno.free.fr/IMG/pdf/Dossier\\_eolienne.pdf](http://doctechno.free.fr/IMG/pdf/Dossier_eolienne.pdf).
- [10] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite>.
- [11] <https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-production-d'energie/energie-eolienne>
- [12] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/avantages-inconvenients-eolienne>
- [13] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- [14] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-utiliser-biomasse-produire-energie->
- [15] **N. Benamrouche , L . Hassaine** " Etude un système photovoltaïque connecte au réseau " Mémoire de fin etude , Page :7 et 8
- [16] [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biomasse](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse).
- [17] [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biomasse](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse).
- [18] <https://www.ecologie.gouv.fr/biomasse-energie>

## *Références Bibliographiques*

---

- [19]<https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-avantages-et-les-inconvenients-de-l-energie-biomasse>
- [20]<https://www.butagaz.fr/espace-energies/environnement/energie-renouvelable/les-avantages-et-les-inconvenients-de-lenergie>
- [21][https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable)
- [22] <https://opera-energie.com/energie-solaire>
- [23] **G. Nesrine** ‘‘Les ressources en énergies renouvelables’’Mémoire de Master , Algérie ,2020\2021, page 14
- [24]<https://fecamp-services.com/blog/quels-sont-les-avantages-et-les-inconvenients-de-lenergiesolaire>
- [25][https://fr.eni.com/en-lumiere/c-16\\_differents-types-et-usages-energie-hydraulique](https://fr.eni.com/en-lumiere/c-16_differents-types-et-usages-energie-hydraulique)
- [26][https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_hydraulique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydraulique)
- [27]**Mekki .Mounira**’’Récupération des déperditions d’énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable’’ thèse de doctorat, Algérie, 2014, page 15.
- [28] <https://selectra.info/energie/guides/environnement/hydraulique>
- [29] :<https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie>
- [30] **Gasmi .Nesrine** ‘‘ Les ressources en énergies renouvelables ‘’ Mémoire de Master , Algérie ,2020\2021,Page 11
- [31] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_g\\_éothermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_g_éothermique)
- [32]<https://www.projetecolo.com/energie-geothermique-definition-avantages-et-inconvenients-150.html>
- [ 33]**Gasmi .Nesrine** ‘‘ Les ressources en énergies renouvelables ‘’Mémoire de Master , Algérie ,2020\2021, Page 20 .
- [ 34]Mémoire de Etude technico économique d’une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla de BERREGUI ABDELFETTAH ABSA AMJED dans la page 1 et 3
- [ 35][https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/UNFCCC\\_docs/ref10x10\\_3.pdf](https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/UNFCCC_docs/ref10x10_3.pdf)
- [ 36]. (en) « SolarCells [archive] », ChemistryExplained, 2017 (consulté le 1er janvier 2017).de Wikipedia

## *Références Bibliographiques*

---

[ 37] . Edmond Becquerel, Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires, Académie des sciences, 29 juillet 1839 (lire en ligne [archive]), sur Gallica. deWikipedia

[ 38]. Revenir plus haut en :a b et c Guillemoles 2021, p. 198, col. 1. de Wikipedia

CHIMIE ET EFFET PHOTOVOLTAÏQUE D'EDMOND BECQUEREL À NOS JOURS

[ 39][https://www.mediachimie.org/sites/default/files/LYC-17\\_EffetPhotovoltaïque.pdf](https://www.mediachimie.org/sites/default/files/LYC-17_EffetPhotovoltaïque.pdf)

[ 40]<https://www.edfenr.com/lexique/panneaux-solaires/>

[ 41]<https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaïque/>

[ 42]. **Ketfi Mohammed el Amin** ,Mèmoire de ‘‘Etude et adaptation des cellules biologiques photosensibles à des microsystèmes optoélectroniques’’

[ 43] . Pdf de Bruxelles environnement .IBGE . Institut bruxlois pour la gestion de l'environnement

[ 44] **ZENATA TAHER ,AZZOUZ ABDALLAH ANES** ,Mèmoire de’’ Etude et Simulation D’un Système Photovoltaïque ‘

[ 45] **Melle HENNOUS Chahrazet, Melle AIT-ALLALA Kahina** MÈMOIRE DE ‘‘DIMENSIONNEMENT ET INSTALLATION D’UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE’’(APPLICATION A LA F.G.E.I.) Promotion 2008/2009

[ 46]. **ZENATA TAHER ,AZZOUZ ABDALLAH ANES** ,Mèmoire de’’ Etude et Simulation D’un Système Photovoltaïque

[ 47] **MISSOUM MOHAMMED**, Mémoire de Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie ,page 46 au 56

[48] **Arbouche Riadh et Aichi Mohieddine** ,Mémoire de ‘‘Identification des paramètres d'un module photovoltaïque ‘’ pages Du 26 au 30

[49] **Bendali Braham Mounir et Khelif Mahdi**, Mémoire de’’ Etude et simulation d'une chaîne de production photovoltaïque’’ ,page 27

[50] **Hadjadj Dounia et belkhiri Omnia**, Mémoire’’ Etude des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque et evaluation de ses performances Sous différentes conditions climatiques’’ dans la page 5 et 6

[51][https://energypedia.info/images/d/dd/Module\\_2\\_Formation\\_BE\\_VF.pdf](https://energypedia.info/images/d/dd/Module_2_Formation_BE_VF.pdf)

[52]<https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaïque3/modules-photovoltaïques/>

## ***Références Bibliographiques***

---

- [ 53]:Guenifnour al islam ,Cherfihoussemeddinemourad “étude et simulation d’un système photovoltaïque “mémoire license page 25,30,31
- [ 54] ;lamribillel “Analyse énergétique de la sureté de fonctionnement dans un système, photovoltaïque connecté au réseau électrique “diplôme de doctorat , page 61,62,63,64
- [ 55] ;Aziziamina “Modélisation optimisation d’un système de production d’énergie photovoltaïque avec un système de stockage bybride “diplôme doctorat page 26
- [ 56][https://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations\\_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/caracteristique-courant-tension-module.php](https://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/caracteristique-courant-tension-module.php)
- [ 57]] **HANANOU FATIHA, ROUABAH AICHA** , “Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque”Mémoire MASTER ACADEMIQUE , page 24 ;25
- [58] Derbali mesaouda et Cheknar Nour El houda ,”Etude et simulation des commandes MPPT d’un système photovoltaïque soue variation d’éclairement solaire”mémoire de master , page 26
- [59] **MEHIDI EL kaissa ,HAMZA Farid** “ Commande directe par la méthode “Perturb and Observe” (P&O) d’un système photovoltaïque” Mémoire MASTER ACADEMIQUE , page 28 ;29 ;30 ;31
- [60 ] **DJEBAIRIA Sabra ,HOUAMRIA Radja** , Mèmoire de Amélioration de la qualité de l’énergie électrique Par
- [61] **DJEBAIRIA Sabra, HOUAMRIA Radja** :Mèmoire de” Restructuration du réseau électrique MT de larégion de Fréha pour alimentation du pôled’excellence de Tamda “
- [62] **Mr Menad MOUZAIA , Mr Sofiane** Mèmoire sur” Etude de la variation de tension pour le raccordement d’une production décentralisée dans un réseau de distribution “
- [63] Mèmoire de université blida chapitre de gènèralité sur les réseaux èlectrique page 10 ,11,12 et 13
- [64] **Chouabbi Moussa et Djebabla Mebarek**, Mèmoire de “Etude de la stabilité transitoire du réseau Est algérien avec L’extension du poste Berrahal 400 KV “
- [65]. **Mr Menad MOUZAIA ,Mr Sofiane IDIRI**, Mèmoire de “ Etude de la variation de tension pour le raccordement d’une production décentralisée dans un réseau de distribution”
- [66] **Mr MenadMOUZAIA , Mr Sofiane IDIRI** ,” Etude de la variation de tension pour le raccordement d’une production décentralisée dans un réseau de distribution” Mémoire de Fin d’étude, page 14,15,16
- [67]: **Mr. AthmaneBOUZIDI** ,cour “ Modélisation et simulation des réseaux électriques”