

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Électrotechnique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

### ÉTUDE DU POMPAGE SOLAIRE DESTINÉ À L'AGRICULTURE

Présenté par : *Bougoffa Chaima*

*Berial Safaa*

Encadrant : Hocine LABAR

Prof

Université d'Annaba

### Jury de Soutenance :

Nadia BENALIA	MCB	Université d'Annaba	Président
Hocine LABAR	Prof	Université d'Annaba	Encadrant
Abdelhamid KSENTINI	MCA	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## ***REMERCIEMENTS***

Nous remercions ALLAH tout puissant, maitre de cieux et de terre, qui nous a donné le courage et la volonté et de nous avoir bénie pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre directeur M. Hocine LABAR professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, qui nous a guidé et orienté tout au long de ce mémoire et pour l'ensemble du savoir pratique et théorique qu'il nous a transmis. Sa patience, sa disponibilité, sa gentillesse inestimable, ses qualités humaines, sa confiance et la qualité de son encadrement scientifique ont permis que ce mémoire se passe dans de bonnes conditions.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à Mme Nadia BENALIA Maître de conférences (B) à l'Université Badji Mokhtar Annaba, qui a honoré ce travail en acceptant de présider le jury et M Abdelhamid KSENTINI Maître de conférences (A) à l'Université Badji Mokhtar Annaba pour avoir accepté de faire partie du jury et examiner ce travail.

Ces remerciements vont inévitablement aussi à nos enseignants et nos collègues.



## *Dédicace*

*A ceux qui ont sacrifié leur vie pour moi, à ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir, à ceux qui leur amour ma donnée la volonté pour aller plus toujours en avant, mes très chers parents, que Dieu les protège.*

*A mes frères et ma sœur, qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont encouragé pendant toute ma vie.*

*A mes chers grands parents, qui je souhaite une bonne santé.*

*A la mémoire de mon grand-père, ma grande mère et ma tante qui n'ont pas pu partager avec moi cet instant de bonheur et de joie, que Dieu les bénissent.*

*A mes chères tantes, mes oncles et mes cousins pour leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mon binôme pour son entente et sa sympathie.*

*A mes chères amies pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Chaima*



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail a ma source de bonheur ma fierté et ma lumière, les seule et l'unique, cher parent qui n'ont jamais cessé de me soutenir pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes frères et sœurs pour leurs soutiens morale et conseils précieux tous au long de mes études.*

*A mon marie que j'aime du fond de mon cœur.*

*A ma chère fille ma princesse ma raison de vivre et d'espérer.*

*A mon très cher binôme chaima pour son entente et sa sympathie.*

*A notre encadreur qui nous a guidés et orientés tout au long de ce mémoire.*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aime merci.*

*Safaa*

## Résumé

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications du pompage photovoltaïque. Beaucoup de populations dans les zones rurales affrontent de grands problèmes hydrauliques. Ces problèmes sont spécialement accentués dans zones désertiques et semi-désertiques.

Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau où le réseau électrique traditionnel est absent. Nous présentons dans ce travail la modélisation, et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque.

**Les mots clés :** Système de pompage photovoltaïque, l'énergie photovoltaïque, panneaux solaires, forage, analyse économique, dimensionnement.

## Summary

The geographical location of Algeria promotes the development and growth of the use of solar energy. Indeed, given the importance of the intensity of the radiation received as well as the duration of the sunshine which exceeds ten hours a day for several months, our country can cover some of its solar energy needs; these advantages could be profitable in the most remote regions, especially in photovoltaic pumping applications. Many populations in rural areas face major water problems. These problems are especially accentuated in desert and semi-desert areas.

Water deficit in arid and semi-arid areas is a vital issue for populations. The improvement of living conditions in these areas is linked to the search for adequate solutions to this problem. Photovoltaic solar pumping represents the ideal solution for water supply where the traditional electricity grid is absent. We present in this work the modeling and simulation of a photovoltaic pumping system.

**Key words :** photovoltaic pumping system, photovoltaic energy, solar panels, drilling, economic analysis, sizing.

## ملخص

الموقع الجغرافي يسمح بالاستغلال الجيد للطاقة الشمسية و ذلك نظرا لكثافة الشعاع و مدة سطوع الشمس التي تتجاوز عشر ساعات يوميا لعدة اشهر و لذا يمكن تغطية احتياجاتنا منها فتكون هذه المزايا مفيدة للمناطق النائية. يواجه العديد من السكان في المناطق الريفية مشاكل مائية كبيرة. تتفاقم هذه المشاكل بشكل خاص في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية حيث تكون شبكة الكهرباء التقليدية غائبة، يرتبط تحسين الظروف المعيشية في هذه المناطق بالبحث عن حلول مناسبة لهذه المشاكل ويمثل نظام ضخ المياه بالطاقة الشمسية الكهروضوئية الحل المثل لهذه المشاكل المائية.

نقدم في هذا العمل نمذجة ومحاكاة نظام ضخ المياه بالطاقة الشمسية الكهروضوئية.

**الكلمات المفتاحية :** نظام ضخ المياه بالطاقة الشمسية الكهروضوئية، الطاقة الكهروضوئية، اللواح الشمسية، الحفر، التحليل الاقتصادي، التحجيم.

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.1.Introduction.....	4
I.2. les énergies renouvelables.....	4
I.3. Les différents types des énergies renouvelables .....	5
I.3.1.La biomasse.....	6
I.3.2. La géothermie.....	6
I.3.3. L'hydraulique.....	8
I.3.4. L'éolienne.....	9
I.3.5. Le solaire.....	10
I.3.5.1 Énergie solaire thermique.....	11
I.3.5.2 Énergie solaire photovoltaïque.....	12
I.3.5.3 Énergie thermodynamique.....	13
I.3.5.4 Énergie passive .....	14
I.4 Potentiel solaire en Algérie.....	14
I.5 Le rayonnement solaire.....	15
I.5.1 Le spectre solaire .....	15
I.6 Conclusion.....	16
<b>CHAPITRE II: LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
II.1. Introduction.....	18
II.2. La conversion photovoltaïque .....	18
II.2.1. Détention .....	18
II.2.2. Effet photovoltaïque .....	18

# SOMMAIRE

---

II.2.3. Principe de la conversion photovoltaïque .....	18
II.3. Structure d'une cellule photovoltaïque .....	19
II. 3.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	20
II. 3.2 Cellule solaire .....	21
II. 3.2.1 Différents types des cellules solaires .....	21
II.4. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) .....	24
II.4.1. Caractéristique électrique du panneau solaire GPV .....	26
II.4.2. Etude de l'effet de l'éclairement et de la température .....	27
II.5. Association des cellules photovoltaïques .....	28
II.5.1. Association en série .....	29
II.5.2. Association en parallèle .....	29
II.5.3 Association hybride (en série et en parallèle) .....	30
II.6. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT) .....	30
II.6.1 Définition .....	30
II.6.2 La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O .....	31
II.6.3 Principe du contrôle MPPT .....	33
II.7. Les Hacheurs .....	34
II.7.1. Type des hacheurs .....	35
II.7.2. Hacheur boost .....	35
II.8. Les convertisseurs DC/AC (les onduleurs) .....	37
II.8.1. Définition .....	37
II.8.2 Technologies des onduleurs .....	38
II.8.3 Structure des onduleurs .....	39
II.8.4 Commande de l'onduleur .....	40
II.9. Conclusion .....	40

# SOMMAIRE

---

## CHAPITRE III: LES POMPES UTILISEES DANS L'IRRIGATION AGRICOLE

III. Introduction .....	42
III.1. les pompes .....	42
III.2. Différents types des pompes .....	42
III.3. Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique .....	46
III. 4. Moteur.....	47
III.5. Dimensionnement et choix de la pompe.....	49
III.5.1. Détermination du débit horaire de la pompe $Q_b$ en $m^3 /j$ .....	50
III.5.2. Calcul du rabattement.....	51
III.5.3. Calcul du niveau dynamique.....	52
III.5.4. Conduite de refoulement.....	52
III.5.5. Calcul de la hauteur d'élévation requise pour la motopompe.....	53
III.6. Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour.....	53
III.7. Energie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque.....	54
III.7.1 Energie solaire disponible.....	54
III.7.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	54
III.7.2.1. Calcul de la puissance crête $P_{cr}$ .....	54
III.7.2.2 Tension du système.....	54
III.7.2.3 Calcul de nombre de panneaux solaire.....	55
III.8. Critères de Choix de type de pompes.....	55
III.9. Dimensionnement des batteries.....	57
III.9.1.Capacité totale de batteries.....	57
III.9.2. Nombre total de batteries.....	57
III.9.3.Nombre de batteries en série et en parallèle.....	57
III.10. Section du câble.....	57
III.11. Conclusion.....	58

# SOMMAIRE

---

## CHAPITRE IV : ETUDE D'UN CAS REEL D'IRRIGATION AGRICOLE

IV.1. Présentation de la localité d'étude.....	60
IV.2. Equipement et matériels solaires .....	61
IV.3. Etude technique et réalisation .....	61
IV.4. Installation .....	61
IV.5. Les étapes de dimensionnement de l'installation. ....	61
IV. 6. Estimation des besoins en eau et rayonnement solaire .....	61
IV. 7. Dimensionnement et choix de la pompe .....	63
IV.7.1 Dimensionnement de la pompe immergée .....	63
IV.7.1.1 Débit horaire .....	63
IV.7.1.2 Calcul de la Hauteur manométrique totale HMT .....	64
a) Calcul du rabattement .....	64
b) Calcul du niveau dynamique.....	65
c) Conduite de refoulement.....	65
e) Calcul de la somme des pertes de charges PT.....	66
IV. 7.1.3 Choix de la pompe .....	68
IV.7.2 Dimensionnement de la motopompe : .....	70
IV.7.2.1 Détermination du débit horaire de la pompe .....	70
IV.7.2.2 Calcul de la Hauteur manométrique totale HMT .....	70
IV.7.2.3 Choix de la motopompe .....	70
IV.7.3 Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour .....	72
IV. 7.4 Estimation de l'ensoleillement .....	72
IV.8 Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	73
IV.9 Calcul de section du câble : .....	77
IV.10 Equipements de protection .....	77

# SOMMAIRE

---

IV.11 Analyse économique ..... 79

IV.12. Conclusion ..... 80

**CONCLUSION GENERALE** ..... 81

**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Liste des figures

---

### Liste des figures

<b>Fig. I.1</b> : Structure de la production d'électricité mondiale en 2005.....	5
<b>Fig. I.2</b> : Les différents types des énergies renouvelables .....	5
<b>Fig. I.3</b> : Énergie Biomasse.....	6
<b>Fig. I.4</b> : Une source d'énergie géothermique.....	7
<b>Fig. I.5</b> : Énergie hydraulique.....	8
<b>Fig. I.6</b> : l'énergie éolienne .....	10
<b>Fig. I.7</b> : Énergie solaire thermique .....	11
<b>Fig. I.8</b> : Fonctionnement du système solaire photovoltaïque.....	12
<b>Fig. I.9</b> : Le fonctionnement de la solaire thermodynamique .....	13
<b>Fig. I.10</b> : La carte d'éclairement solaire de l'Algérie.....	14
<b>Fig. I.11</b> : Les différents types de rayonnement .....	16
<b>Fig.II.1</b> : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.....	19
<b>Fig.II.2</b> :Structure d'une cellule photovoltaïque .....	20
<b>Fig.II.3</b> : Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque .....	20
<b>Fig.II.4</b> : fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	21
<b>Fig.II.5</b> : Différentes types de la cellule photovoltaïque .....	22
<b>Fig.II.6</b> :Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire .....	24
<b>Fig.II.7</b> :Caractéristique I-V d'un GPV .....	26
<b>Fig.II.8</b> : Caractéristique P-V d'un GPV .....	26
<b>Fig.II.9</b> : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I(V).....	27
<b>Fig.II.10</b> : Effet de l'éclairement sur la caractéristique P(V).....	27
<b>Fig.II.11</b> : Effet de la température sur la caractéristique I(V).....	28
<b>Fig.II.12</b> : Effet de la température sur la caractéristique P(V).....	28
<b>Fig.II.13</b> :Caractéristique résultante d'un groupement en série .....	29
<b>Fig.II.14</b> : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle .....	29
<b>Fig.II.15</b> :Caractéristique résultante d'un groupement hybride .....	30
<b>Fig II.16</b> : Puissance disponible en fonction de la tension .....	31
<b>Fig II.17</b> : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation".....	32
<b>Fig II.18</b> : Chaîne élémentaire contrôlée par une MPPT .....	34

## Liste des figures

<b>Fig.II.19</b> : Symbole d'un convertisseur DC-DC .....	34
<b>Fig.II.20</b> : Schéma électrique d'un hacheur boost .....	35
<b>Fig.II.21</b> : Chronogrammes du courant et de la tension d'un hacheur boost .....	36
<b>Fig.II.22</b> : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé .....	36
<b>Fig.II.23</b> : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert .....	37
<b>Fig.II.24</b> : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative .....	38
<b>Fig.II.25</b> : Classification des onduleurs PV connectés au réseau .....	38
<b>Fig.II.26</b> : schémas de structure d'un Onduleur triphasé .....	39
<b>Fig.II.27</b> : schéma électrique équivalent d'un onduleur de tension .....	40
<b>Fig III.1</b> : Pompe centrifuge .....	43
<b>Fig III.2</b> : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge .....	44
<b>Fig III.3</b> : Pompe volumétrique .....	45
<b>Fig III.4</b> : Caractéristiques d'une pompe volumétrique .....	45
<b>Fig III.5</b> : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC .....	47
<b>Fig III.6</b> : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC.....	48
<b>Fig III.7</b> : Système de pompage d'eau avec stockage .....	50
<b>Fig. III.8</b> : critère de choix de pompe selon besoin journalier et HMT .....	56
<b>Fig.IV.1</b> : Localisation de la commune dans la wilaya d'El Tarf .....	60
<b>Fig.IV.2</b> : hectare de Tomate .....	61
<b>Fig.IV.3</b> : Les valeurs globales de l'irradiation journalière.....	62
<b>Fig .IV.4</b> : Système de pompage avec stockage .....	63
<b>Fig .IV.5</b> : Caractéristiques physiques de Contrôleur.....	69
<b>Fig.IV.6</b> : Caractéristiques physiques de la pompe.....	69
<b>Fig.IV.7</b> : Schéma du réseau d'adduction avec une motopompe.....	70
<b>Fig .IV.8</b> : Motopompe haute pression DIESEL .....	71
<b>Fig.IV.9</b> : Rayonnement solaire .....	73
<b>Fig.IV.10</b> : le panneau solaire Poly cristallin 250Wc.....	74
<b>Fig. IV.11</b> . Caractéristiques physiques du panneau solaire Poly-cristallin 250Wc .....	74
<b>Fig. IV.1</b> .Schéma de la configuration des panneaux PV.....	76

Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique.....	7
<b>Tableau I.2:</b> Avantages et Inconvénients de l'énergie hydraulique.....	9
<b>Tableau I.3:</b> Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
<b>Tableau I.4:</b> Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire thermique.....	12
<b>Tableau I.5:</b> Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	13
<b>Tableau II.1:</b> Comparaison des trois différents types de la cellule photovoltaïque.....	23
<b>Tableau III.1:</b> Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	46
<b>Tableau III.2:</b> Avantages et inconvénients pour les deux moteurs, MCC et MAS.....	49
<b>Tableau III.3:</b> Désignation des paramètres du système de pompage. ....	50
<b>Tableau III.4:</b> Coefficient de perte de charge.....	53
<b>Tableau III.5:</b> Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête.....	55
<b>Tableau III.6:</b> Section nominale des câbles.....	58
<b>Tableau IV.1:</b> Localisation de la wilaya d'El Tarf .....	60
<b>Tableau IV.2:</b> Besoins journaliers moyens mensuels en eau .....	62
<b>Tableau IV.3:</b> Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle .....	62
<b>Tableau IV.4:</b> caractéristique du forage .....	64
<b>Tableau IV.5:</b> Le coefficient $\lambda$ .....	67
<b>Tableau IV.6:</b> le coefficient de perte de pression singulière de l'élément considéré .....	67
<b>Tableau IV.7:</b> Les caractéristiques techniques de la pompe immergée .....	68
<b>Tableau IV.8:</b> Caractéristiques physiques de Contrôleur .....	69
<b>Tableau IV.9:</b> Caractéristiques physiques de la pompe .....	69
<b>Tableau IV.10:</b> Les caractéristiques techniques de la motopompe .....	71
<b>Tableau IV.11:</b> Caractéristiques électriques du panneau solaire .....	73
<b>Tableau IV.12:</b> Caractéristiques physiques du panneau solaire .....	74
<b>Tableau IV.13:</b> Les caractéristiques électriques du générateur PV .....	76

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau.IV.14:</b> Compatibilité du contrôleur avec le générateur PV .....	76
<b>Tableau.IV.15:</b> les couts d'investissement du système de pompage photovoltaïque. ....	79
<b>Tableau.IV.16:</b> les couts d'investissement du système de pompage qui utilise la motopompe thermique .....	80

## Introduction générale

Actuellement, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole, qui représente 81% de la production énergétique dans le monde en 2009 ce qui entraînera dans les quelques prochaines décennies un risque d'épuisement de ces ressources. En plus, la croissance de la demande d'énergie se traduit généralement par une fluctuation du prix du pétrole dans le marché mondial.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles ; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée dans diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes solaires de pompage de l'eau pour fournir des approvisionnements domestiques, bétail et irrigation en eau dans des régions éloignées, ont gagné énormément d'acceptation, fiabilité et performance et de nos jours ils appartiennent à la plupart des applications significatives d'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique.

Dans ce projet, nous présenterons l'étude d'un système de pompage photovoltaïque. Le mémoire est structuré comme suit :

- Dans le premier chapitre, on a présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables et l'énergie solaire en particulier. On a rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire.
- Le deuxième chapitre présente les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, caractéristique I (V) et caractéristique P (V), et Le principe des techniques MPPT, et ce chapitre présente aussi l'influence de l'association des cellules en série et

l'association des cellules en parallèle et le changement de température ou l'éclairement.

- Le troisième chapitre présente les différents types des pompes, les types du moteur électrique (électropompe) et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.
- Le quatrième chapitre a été entièrement consacré à une étude pratique de ce type de pompage d'eau sur la ville d'El Besbes de la wilaya de Tarf. Nous avons dimensionné un système de pompage PV fonctionnant par la méthode dite « au fil de soleil » afin d'irriguer une surface d'un hectare de Tomate.
- On termine notre travail par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

# **GÉNÉRALITÉS SUR LES**

# **ÉNERGIES RENOUVELABLES**

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

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future, C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Il est évident que la dynamique énergétique du 21ème siècle rassemblera de nouveaux acteurs issus du secteur des énergies renouvelables assurant ainsi un développement durable. Parmi les systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, on mentionne les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire et les systèmes éoliens fonctionnant avec l'énergie du vent. Plusieurs technologies des systèmes solaires et éoliens sont envisageables, mais les plus intéressants ce sont ceux solaires photovoltaïque et éoliens à axe horizontal. Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables, et précisément sur les systèmes solaires photovoltaïques.[1]

## **I. 2. les énergies renouvelables :**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. La figure I.1 présente la production mondiale d'électricité en 2005 [2]

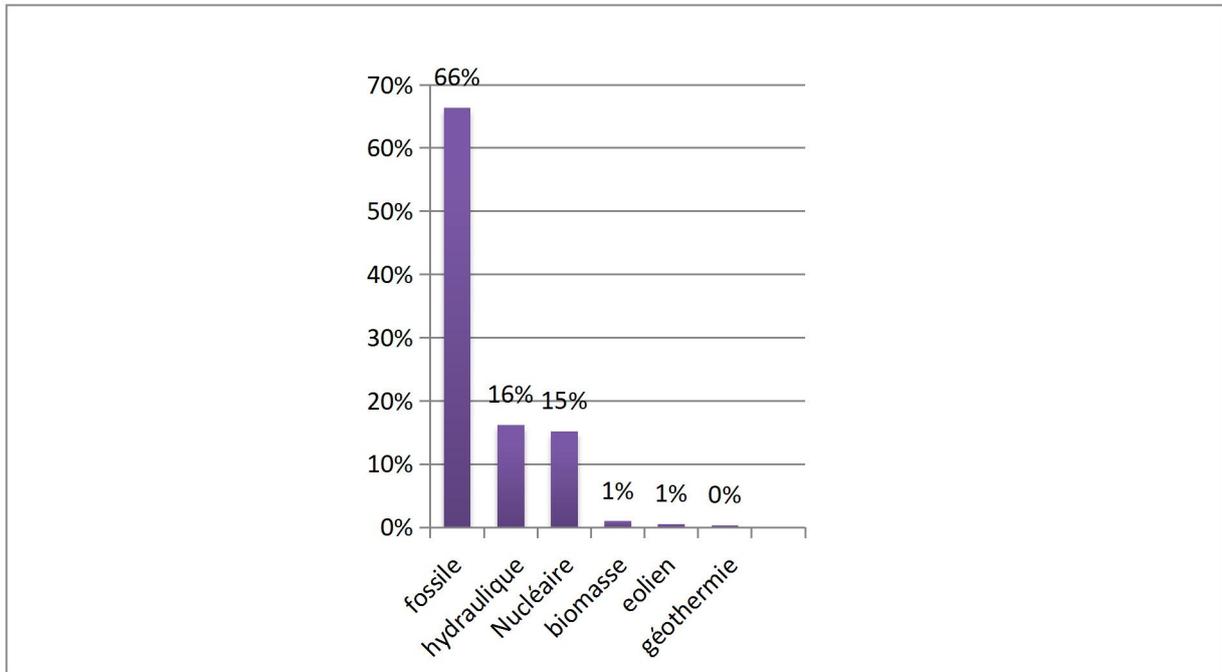


Fig. I.1 : Structure de la production d'électricité mondiale en 2005

I. 3. Les différents types des énergies renouvelables

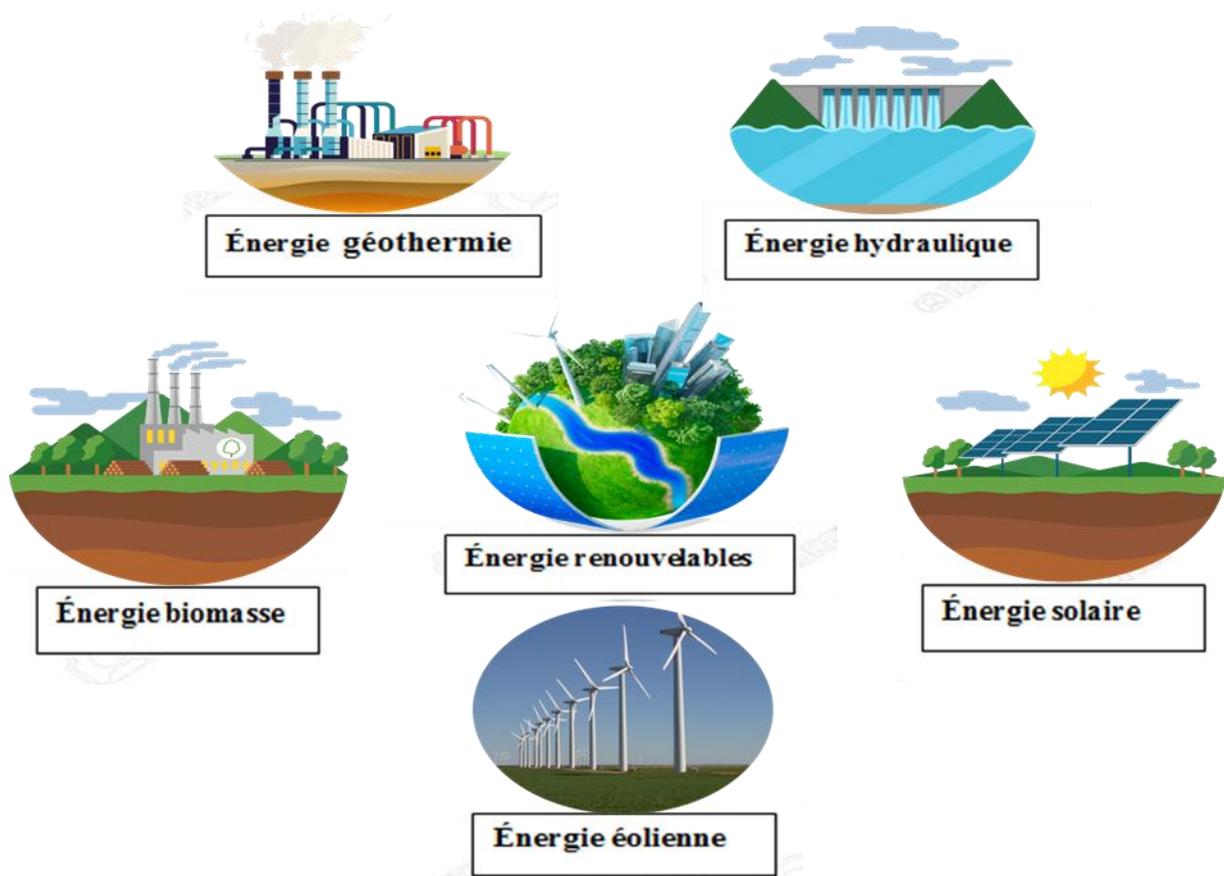


Fig. I.2 : Les différents types des énergies renouvelables

### I. 3.1. Énergie biomasse :

Le terme biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante. Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques.

La biomasse désigne donc l'ensemble des végétaux capables par le biais de diverses transformations, de restituer l'énergie solaire qu'ils ont stockés, cette énergie solaire est convertie en différentes sources énergétiques tel que :

- Chaleur et électricité.
- Biocarburant. [3]

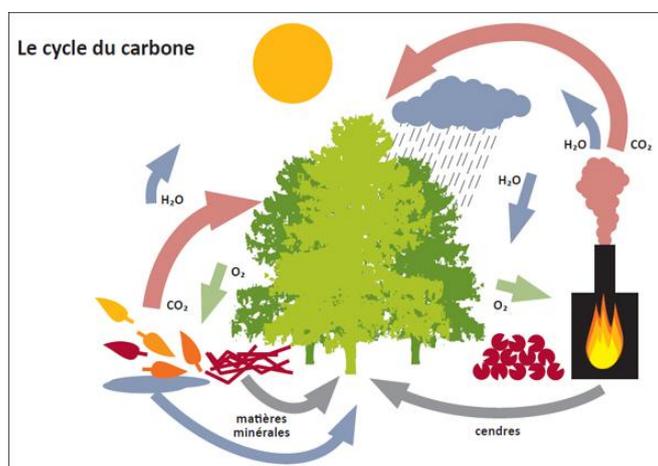


Fig. I.3 : Énergie Biomasse

### I. 3.2. Énergie géothermie

Dans le contexte des sciences pour l'ingénieur, le terme de « géothermie » regroupe des moyens de capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et de l'utiliser comme source de chaleur ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques. Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. [4]

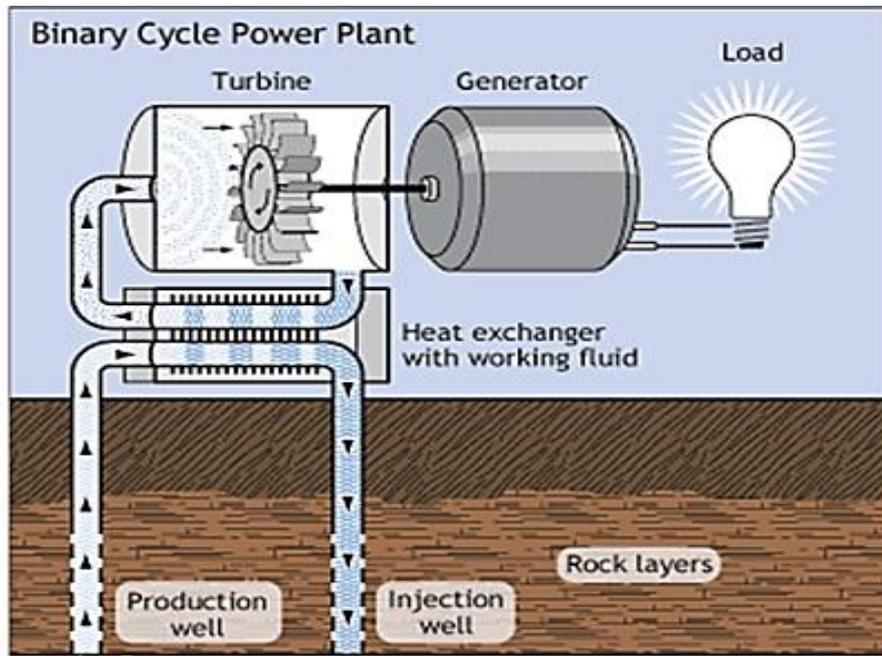


Fig. I.4. Génération d’électricité par une source d’énergie géothermique

**I. 3.2.1 Types de l’énergie géothermie :**

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie.[5]

**I. 3.2.2 Avantages et inconvénients de l’énergie géothermique :**

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l’énergie géothermique. [6]

Avantages	inconvénients
<p><b>Pour les géothermies sur nappe aquifère :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilisation de la chaleur dégagée par le sous-sol dans certaines zones à forts potentiels (Islande, région parisienne...).</li> <li>▪ Les nappes aquifères géothermales sont généralement de l'eau de mer et donc impropre à la consommation (il n'y a pas de gâchis d'eau potable).</li> </ul>	<p><b>Pour les géothermies sur nappe aquifère :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Au bout de 20/30 ans, le captage n'est plus possible car l'eau réinjectée a trop refroidi la nappe aquifère.</li> </ul>
<p><b>Pour les pompes à chaleur sur sol :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Retour sur investissement rapide (4 à</li> </ul>	<p><b>Pour les pompes à chaleur sur sol :</b></p>

<p>5ans) pour une maison individuelle. En effet, pour 1KW d'électricité consommée, on capte dans le sol 3 à 4 KW (rendement de 400%) alors qu'il n'est que de 75% au mieux pour une chaudière fioul.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Le plancher chauffant basse température de la maison peut être utilisé avec une autre énergie (bois, solaire, gaz, fioul...)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Il subsiste un doute sur la longévité des matériaux.</li><li>▪ Il semble aberrant d'utiliser de l'électricité (énergie noble qui permet de nombreux usages) pour produire de la chaleur (forme d'énergie qui ne sert qu'à chauffer).</li></ul>
---	--

### I. 3.3. Énergie hydraulique:

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients. [7]



**Fig. I.5 :** Énergie hydraulique

### I. 3.3.1 Avantages et Inconvénients de l'énergie hydraulique:

**Tableau I.2 :** Avantages et Inconvénients de l'énergie hydraulique.[6]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.</li> <li>▪ Démarrage et arrêt des centrales très rapides.</li> <li>▪ Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.</li> <li>▪ Production d'électricité décentralisée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modification du débit et du niveau de l'eau.</li> <li>▪ Perturbation de la faune et de la flore.</li> <li>▪ Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.</li> <li>▪ Risque pour les personnes en aval lié au barrage.</li> </ul>

### I. 3.4 Énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement. [5]



Fig. I.6 : l'énergie éolienne

I. 3.4.2 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne :

Tableau I.3 : Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne. [6]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie renouvelable et gratuite.</li> <li>▪ Grande fiabilité et frais de fonctionnement limités.</li> <li>▪ Les grandes éoliennes peuvent concurrencer à moindre coût l'énergie produite par le nucléaire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'énergie éolienne est plus chère que notre électricité. Une petite éolienne n'est pas rentable dans les pays développés.</li> <li>▪ Les éoliennes sont encore un investissement important.</li> <li>▪ Les démarches administratives sont très lourdes pour l'installation des grandes éoliennes.</li> </ul>

I. 3.5 Énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW c/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. [8]

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- ✚ L'énergie solaire thermique
- ✚ L'énergie solaire photovoltaïque
- ✚ l'énergie thermodynamique
- ✚ L'énergie passive

### I. 3.5.1 Énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique produit de la chaleur à partir des rayons du soleil. Elle peut être utilisée pour l'eau chaude sanitaire seule (chauffe-eau solaire) ou de manière combinée avec le chauffage (système solaire combiné). Le rendement de l'installation dépend de l'orientation (il est meilleur si les panneaux sont orientés plein Sud) et de l'inclinaison des panneaux (aux alentours de 50°)

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air. L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :

- La production d'eau chaude.
- Le chauffage des maisons.
- Le chauffage de l'eau des piscines.
- Le séchage des récoltes.
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments.
- La production de très haute température. [3]



Fig. I.7 : Énergie solaire thermique

### I. 3.5.1.1 Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire thermique:

Tableau I.4 :Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire thermique.[6]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie propre, silencieuse et gratuite.</li> <li>▪ Disponible en milieu rural ou urbain.</li> <li>▪ Ressource inépuisable.</li> <li>▪ Pas de déchets.</li> <li>▪ Production d'énergie décentralisée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modifications esthétiques d'un milieu ou des bâtiments.</li> <li>▪ Energie devant être souvent complétée.</li> <li>▪ A la belle saison, le surplus ne peut être stocké pour les capteurs solaires plans (chauffage).</li> </ul>

### I. 3.5.2 Énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons.

La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. La technique photovoltaïque est en très forte croissance, en 2001 on comptait en Europe environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté à 560 MW. [3]



Fig. 1.8 : Fonctionnement du système solaire photovoltaïque

I. 3.5.2.1 Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

Tableau I.5 : Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.[6]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie propre et silencieuse.</li> <li>▪ Energie gratuite.</li> <li>▪ Energie disponible toujours et partout.</li> <li>▪ Grande longévité des modules photovoltaïques (30 ans).</li> <li>▪ Peu d'entretien de l'installation.</li> <li>▪ Energie rentable pour les sites isolés.</li> <li>▪ Possibilité de revendre l'électricité produite.</li> <li>▪ Autonomie possible avec des batteries.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Installation à prévoir au plus près de la maison.</li> <li>▪ Energie disponible surtout l'été et devant être complétée.</li> <li>▪ Recyclage des batteries</li> <li>▪ Limites de charge et de décharge pour des batteries : de 30% à 80% pour une durée de vie de 7 à 10 ans.</li> <li>▪ Intégration des panneaux solaires dans le paysage.</li> </ul>

I. 3.5.3 l'énergie thermodynamique :

La solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété de systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix des fluides caloporteur et thermodynamique ou du mode de stockage. [3]

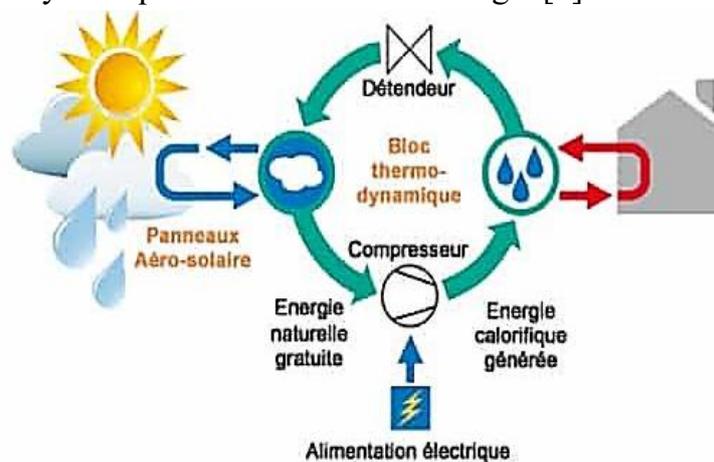


Fig. I.9 : Le fonctionnement de la solaire thermodynamique

### I. 3.5.4 L'énergie passive

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planchées, est rejetée sous forme de chaleur.[9]

### I. 4. Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. La figure I.12 montre la carte de l'irradiation solaire en Algérie.[5]

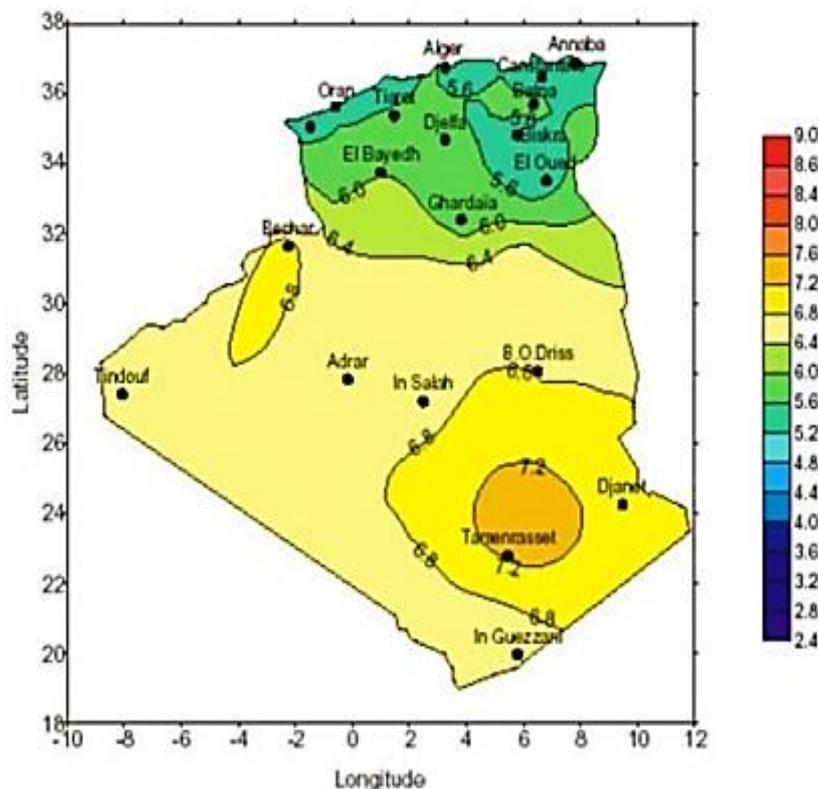


Fig. I.10 : La carte d'éclairage solaire de l'Algérie

## **I. 5.Le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est composé d'ondes électromagnétiques allant de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par la lumière visible. Il est également composé de rayons cosmiques. La distribution des ondes obtenues correspond à celui d'un corps noir de 5800K°. [10]

## **I. 6.Le spectre solaire**

En traversant l'atmosphère, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol, afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature : [11]

### **I. 6.1. Le rayonnement direct**

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Le pyrhéliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Le pyrhéliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil. [11]

### **I. 6.2. Le rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus est aussi appelé rayonnement indirect. C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols. Autre définition, le rayonnement diffus représente la partie du rayonnement solaire qui a touché au moins une particule de gaz atmosphérique en modifiant l'angle d'incidence et qui, cependant, atteint le sol car il est dirigé vers elle. Une partie du rayonnement diffus est de retour vers l'espace. [11]

### **I. 6.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. L'albédo est le coefficient de réflexion « c », ses valeurs comprises généralement entre 0 et 1 ou sont exprimées en pourcentage. Il est donné par la relation entre l'énergie rayonnante réfléchie par une surface par rapport à l'énergie incidente. La Terre a une valeur moyenne de

40% ( $c = 0,4$ ). Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...). [11]

#### I. 6.4. Le rayonnement global :

La figure I.12 représente le rayonnement global qui est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléti par le sol.

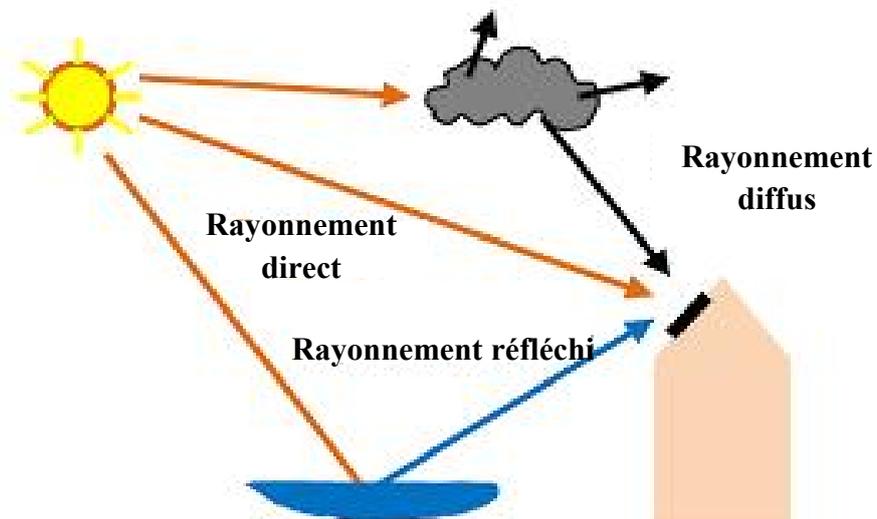


Fig. I.11 : Les différents types de rayonnement.[12]

#### I. 7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables et l'énergie solaire en particulier. On a rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire.

# **CHAPITRE II**

# **LA CONVERSION**

# **PHOTOVOLTAÏQUE**

## II. 1. Introduction

Ce chapitre présente La conversion photovoltaïque, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, l'élément de base d'un générateur PV dans différentes conditions d'illumination et de température, et présente l'influence d'association des cellules photovoltaïques série et parallèle .et on parle alors d'adaptation de point à puissance maximale MPPT aux variations climatiques (éclairage et la température).

## II. 2. La conversion photovoltaïque :

### II. 2.1. Détention :

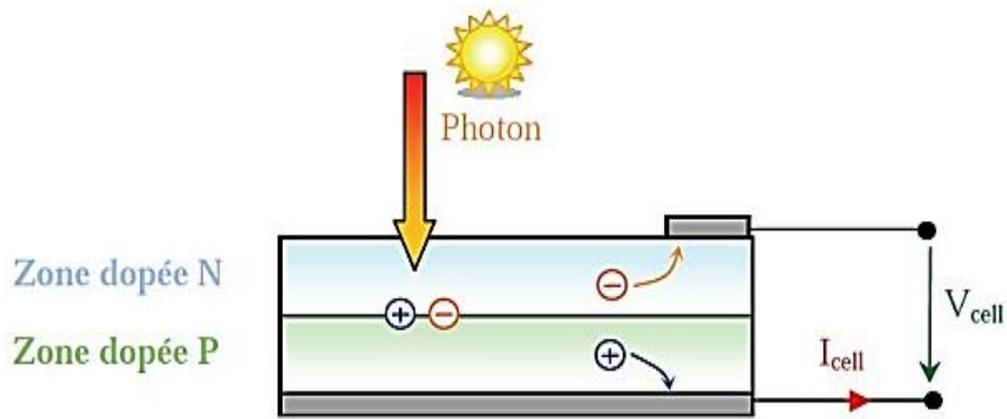
La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique de type continu. L'élément de base dans cette conversion est la cellule solaire. [13]

### II. 2.2. Effet photovoltaïque :

Lorsque la cellule solaire exposé à la lumière, une partie de l'énergie de la lumière est convertie directement en électricité. Cet effet est appelée l'effet photovoltaïque L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs". 90% des panneaux solaires produise par le silicium cristallin dans le monde.[14]

### II. 2.3. Principe de la conversion photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque utilise les rayonnements solaires et transformé la en électricité, L'énergie des photons arrivant à la surface de la terre. La lumière solaire (photons)transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque), cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible, l'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839, le mot «photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière » et du mot « volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).[15]



**Fig.II.1** : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.[16]

## II. 3. Structure d'une cellule photovoltaïque :

les cellules photovoltaïques permettent la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique, La cellule photovoltaïque est capable de créer une différence de potentiel à partir d'orienter les électrons, En présence de lumière, La cellule photovoltaïque ce qui est les photons, la couche supérieure de la cellule est composée de silicium, elle contient une quantité importante d'électrons libres, qui donnant une charge négative, même la couche inférieure composée de silicium et contient une quantité d'électrons libres, qui donnant une charge positive, la cellule génère un champ électrique, lorsque les deux couches entrent en contact.

Cet effet photovoltaïque doit être à cause de la forme de deux couches, une couche conductrice p avec un excédent de porteurs de charge positifs et une couche conductrice n avec un excédent de porteurs de charge négatifs, à cause de ce déséquilibre et en présence de la lumière un champ électrique interne se provoque.[17]

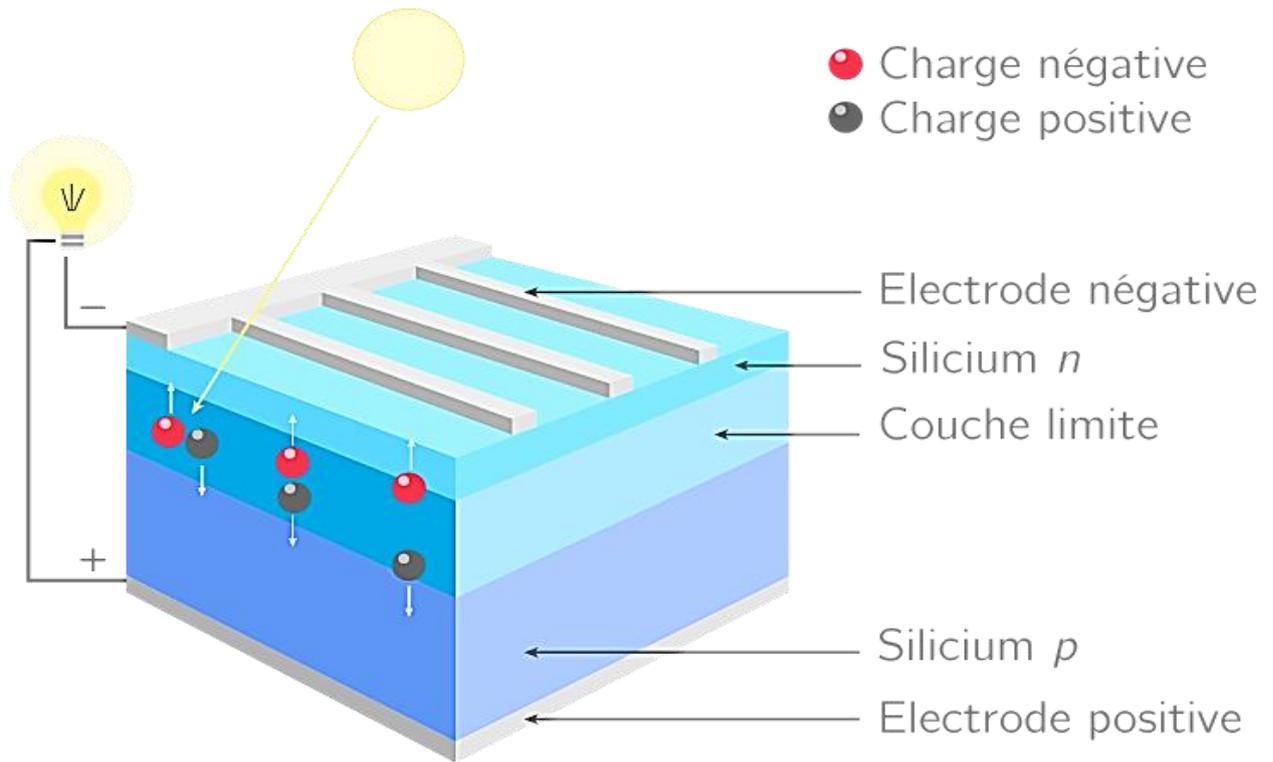


Fig.II.2:Structure d'une cellule photovoltaïque.[18]

Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque [16]

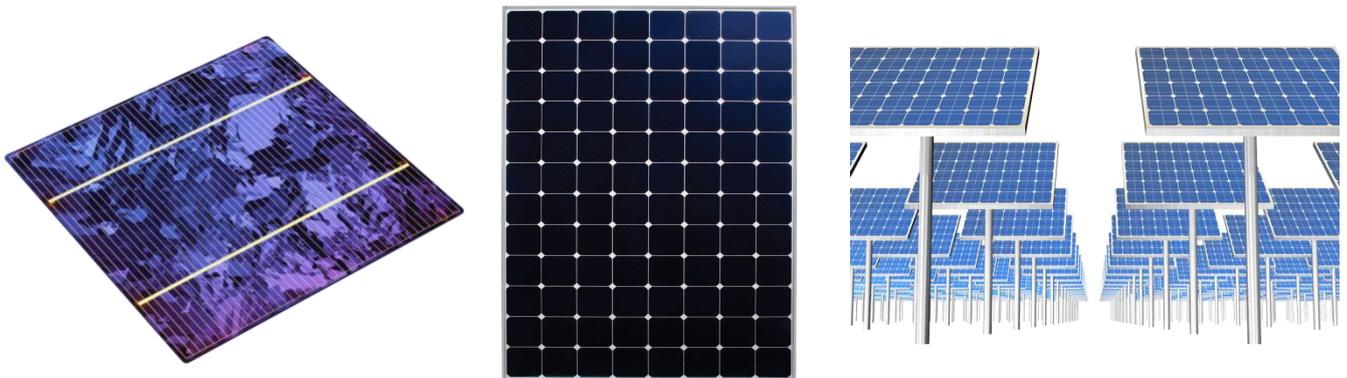
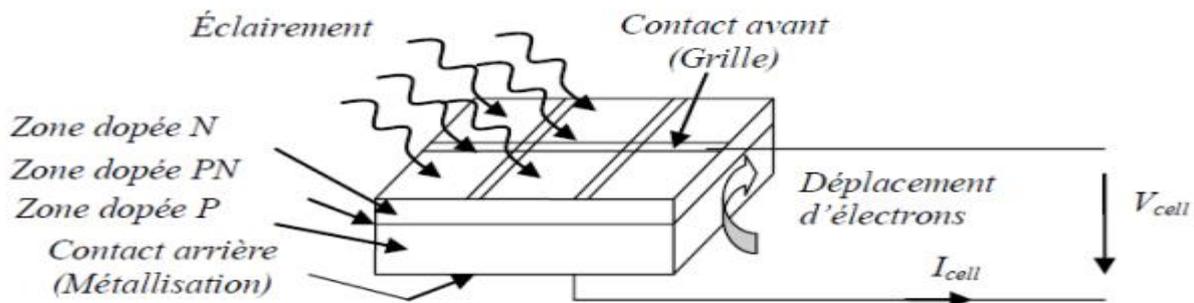


Fig.II.3 : Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque.[19]

**II. 3.1Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :**

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

vieillessement de la cellule. La figure (II.4) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.[20]



**Fig.II.4** : fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## II. 3.2 Cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice ( $F_{em}$ ) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque. [21]

### II. 3.2.1 Différents types des cellules solaires :

Il existe trois types principaux de cellules solaires :

- Cellule mono- cristalline
- Cellule poly-cristalline
- Cellule amorphe

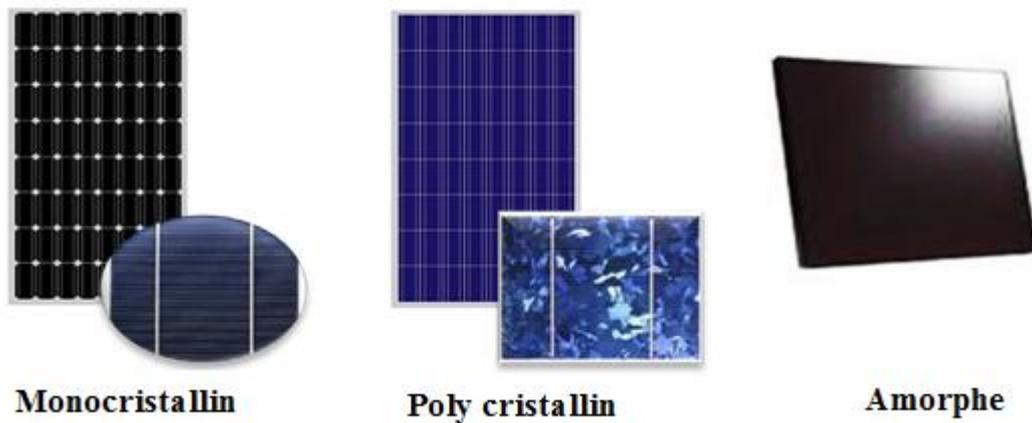


Fig.II.5 : Différentes types de la cellule photovoltaïque

#### a. Cellule mono- cristalline

Il est constitué d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Il présente un rendement légèrement supérieur au silicium poly cristallin (environ 14-20 %). Les fabricants de ce type de cellule offrent des garanties dépassant les 20 ans pour une production de 80% de la puissance nominale.[22]

#### b. Cellule poly-cristalline

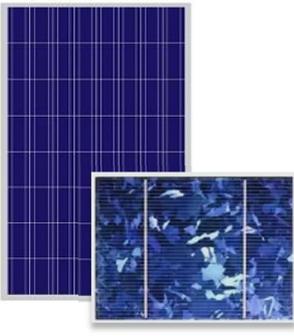
Il est constitué de multiples petits cristaux de tailles et de formes variées, Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial vu son bon rendement (environ 15 %) et de sa garantie (jusqu'à 20 ans), Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix.[22]

#### c. Cellule amorphe

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs. son rendement est (de 5 à 9 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. La plupart des garanties du produit sont de 10 ans. [22]

d. Comparaison des trois différents types de la cellule photovoltaïque :

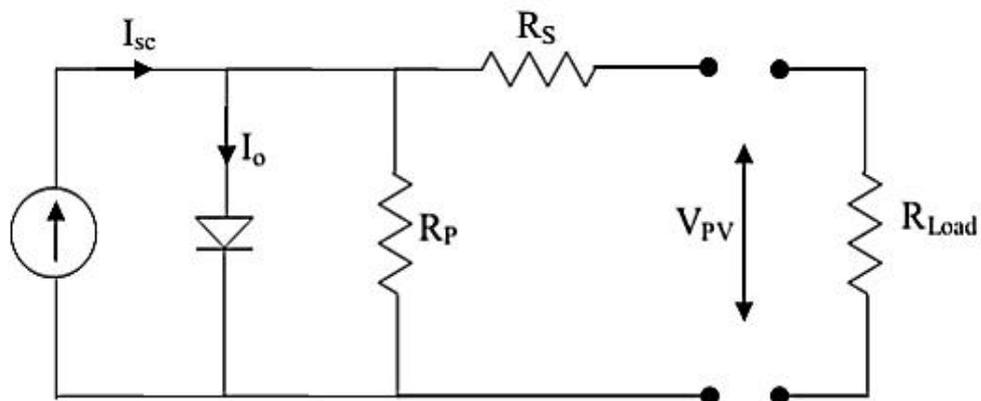
Tableau II.1 : Comparaison des trois différents types de la cellule photovoltaïque.[23]

Technologie	monocristallin	poly cristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très bon rendement : 14 à 20%</li> <li>• Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : élevé.</li> <li>• Puissance : 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup> 7m<sup>2</sup>/kWc</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal.</li> <li>• Couleur bleue uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement : 11 à 15 %.</li> <li>• Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</li> <li>• Puissance : 100 Wc/m<sup>2</sup> 8m<sup>2</sup>/kWc</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>• Ces cellules sont bleues, mais non</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement faible : 5 à 9 %.</li> <li>• Durée de vie : assez importante (20 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies</li> <li>• Puissance : 50 Wc/m<sup>2</sup> 16 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>• Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</li> <li>• Peu sensible aux températures élevées</li> <li>• Utilisables en panneaux souples.</li> <li>• Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.</li> <li>• Rendement faible en plein soleil.</li> <li>• Performances diminuant avec le temps.</li> <li>• Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur</li> </ul>

		uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.	du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43%	47%	10%

**II. 4. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) :**

Le schéma équivalent d'une cellule solaire peut être représenté sous diverses variantes. La configuration suivante peut être considérée comme la plus usuelle. Elle comporte une source de courant variable, monté en parallèle avec une diode D caractérisant la jonction et une résistance  $R_p$  (résistance parallèle) simulant l'arrière de l'élément, et en série avec une autre résistance  $R_s$  (résistance série) représentant les pertes par effets joule.[20]



**Fig.II.6:**Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation non-linéaire suivante :

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \tag{1}$$

Avec :

$I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  : Le courant et la tension de la cellule PV.

$I_{sc}$ : Le courant de court-circuit de la cellule PV.

$I_0$ : Le courant de saturation inverse.

$R_s, R_p$ : Résistance série et parallèle.

$V_{th}$ : La tension thermique.

Si  $R_s=0$  et  $R_p$  devient très grande (théoriquement infini), le modèle de la cellule PV devient un modèle idéal qui est donné par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_0 = (I_{sc} - I_0) \exp \left[ - \left( \frac{V_{op} + R_s \cdot I_{op}}{V_{th}} \right) \right] \quad (3)$$

$$V_{th} = \frac{(V_{op} + R_s \cdot I_{op} - V_{oc})}{I_n \left( 1 - \frac{I_{op}}{V_{op}} \right)} \quad (4)$$

Pour un générateur photovoltaïque GPV, les grandeurs électriques du GPV sont données sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} I_{sc} &= N_p \cdot I_{scm} \\ I_{op} &= N_p \cdot I_{opm} \\ I_{oc} &= N_p \cdot I_{ocm} \\ V_{op} &= N_p \cdot V_{opm} \\ R_s &= \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sm} \end{aligned} \quad (5)$$

$N_s$  et  $N_p$  sont respectivement le nombre de cellules en série et le nombre de cellules parallèle. . Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance – tension (P-V) sont essentiellement affectées par la variation des deux paramètres principaux : l'éclairement et la température des panneaux. L'adaptation de l'équation de courant pour différents niveaux d'ensoleillement et de température peut être manipulée par les équations suivantes :

$$\Delta T = T - T_r \quad (6)$$

$$\Delta I = d \left( \frac{E}{E_r} \right) \Delta T + \left( \frac{E}{E_r} - 1 \right) I_{cc} \quad (7)$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \Delta I \quad (8)$$

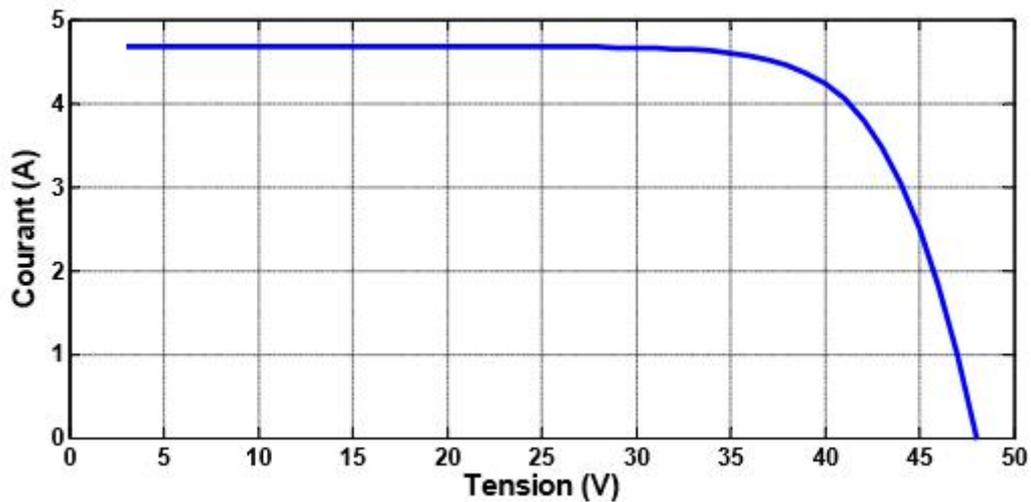
$$I = I + \Delta I \quad (9)$$

$$V = V + \Delta V \quad (10)$$

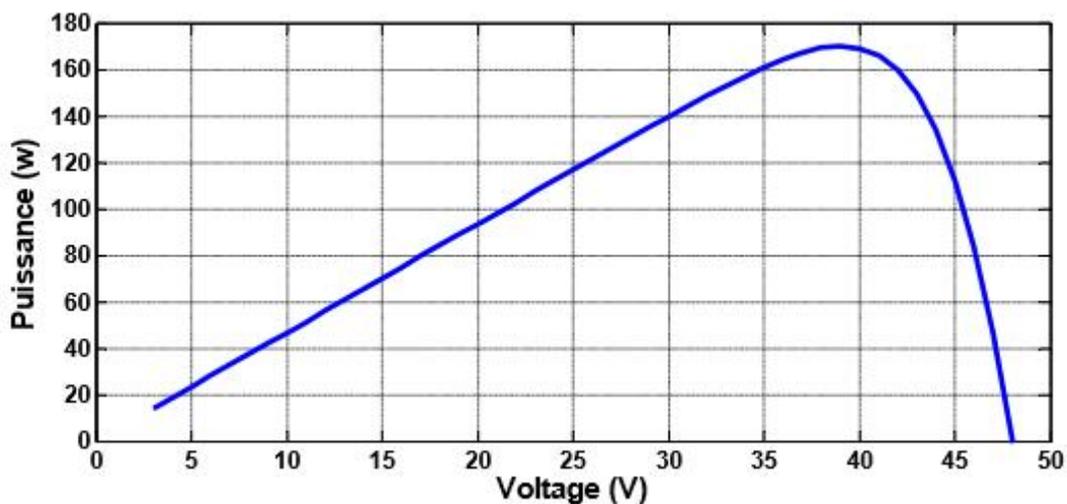
Le suffixe « r » fait référence à des conditions nominales (rated values) données par : Éclairement nominal  $E=1000\text{W/m}^2$  et température nominale  $T_r=25^\circ\text{C}$ . [20]

## II. 4.1. Caractéristique électrique du panneau solaire GPV

On peut ainsi retrouver l'allure des caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance - tension  $P(V)$  du GPV par les figures(7),(8) :



**Fig.II.7:**Caractéristique I-V d'un GPV.[21]



**Fig.II.8 :** Caractéristique P-V d'un GPV.[21]

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un générateur photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le générateur photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_{\max}$  où la puissance se trouve maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est

important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{max}$ . [20]

## II. 4.2. Etude de l'effet de l'éclairement et de la température

### II. 4.2.1. Influence de l'Éclairement

Les figures (9) et (10) présentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) pour différents niveaux d'ensoleillement d'un GPV. On pourra voir que le courant de court-circuit varie en proportion du niveau d'ensoleillement, tandis que la tension en circuit ouvert est à peu près constante. [21]

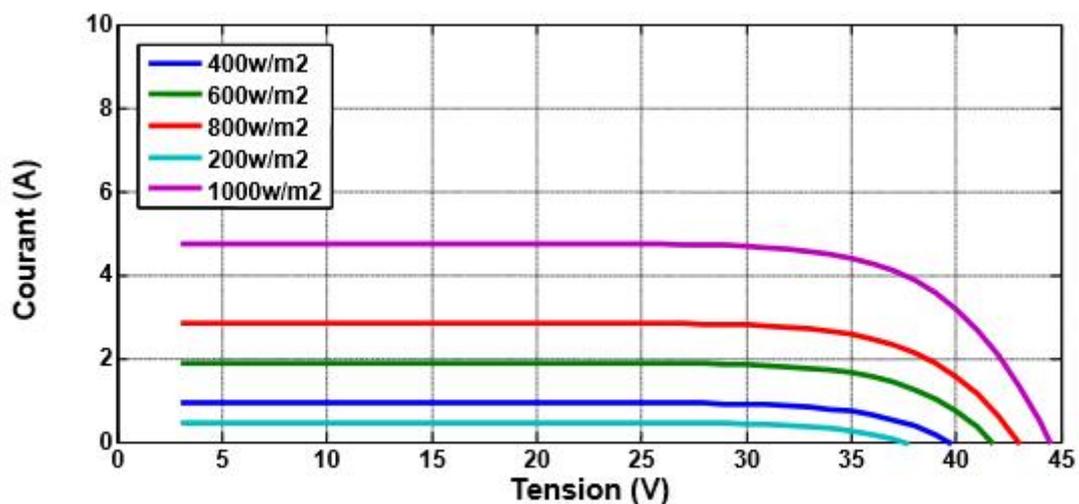


Fig.II.9 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I(V).

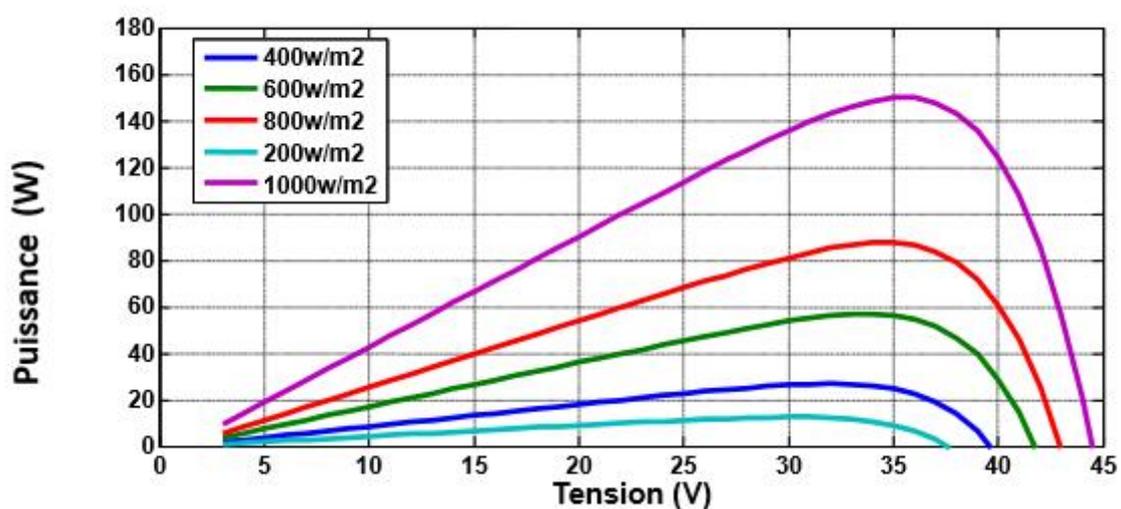


Fig.II.10 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

## II. 4.2.2. Influence de la température :

Pour la température de fonctionnement d'un GPV, il est essentiel de comprendre l'effet de variation de celle-ci à la fois sur la tension en circuit ouvert et de court-circuit. Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, ce qui est dû à l'absorption accrue de la lumière. Toutefois, comme la température augmente la tension en circuit ouvert tend à diminuer comme le montre les figures (11),(12). [21]

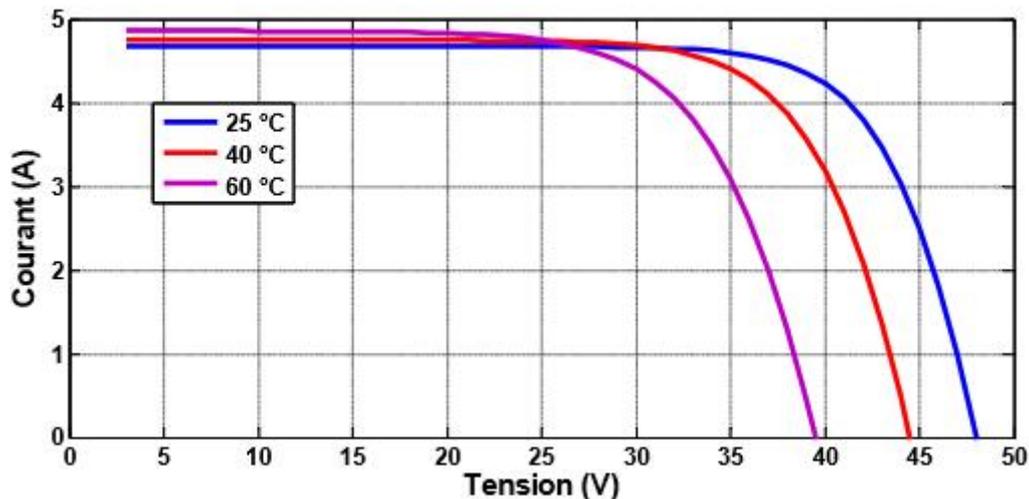


Fig.II.11 :Effet de la température sur la caractéristique I(V).

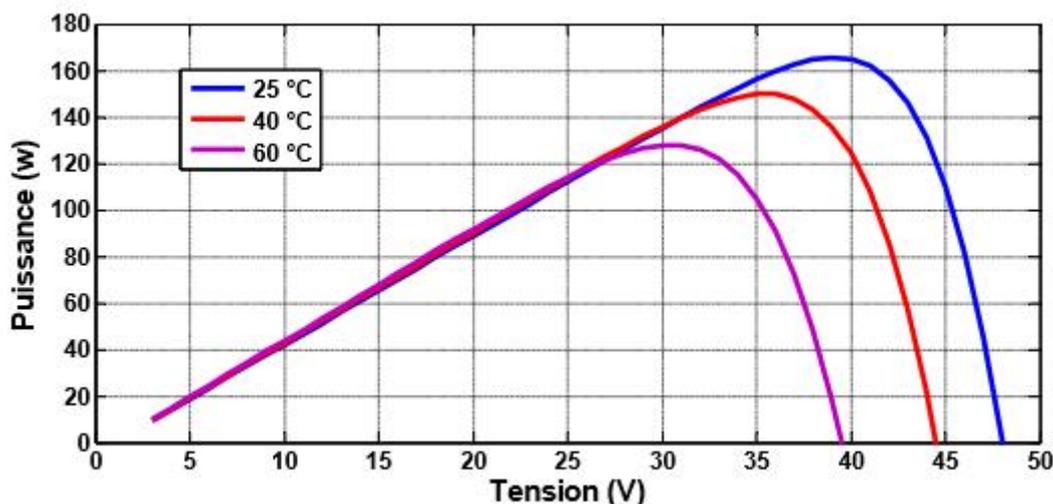
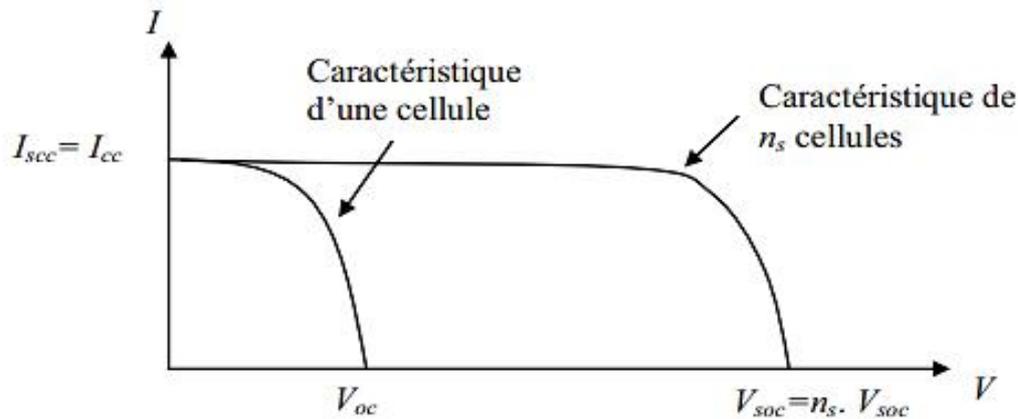


Fig.II.12 : Effet de la température sur la caractéristique P(V)

## II. 5. Association des cellules photovoltaïques

### II. 5.1. Association en série

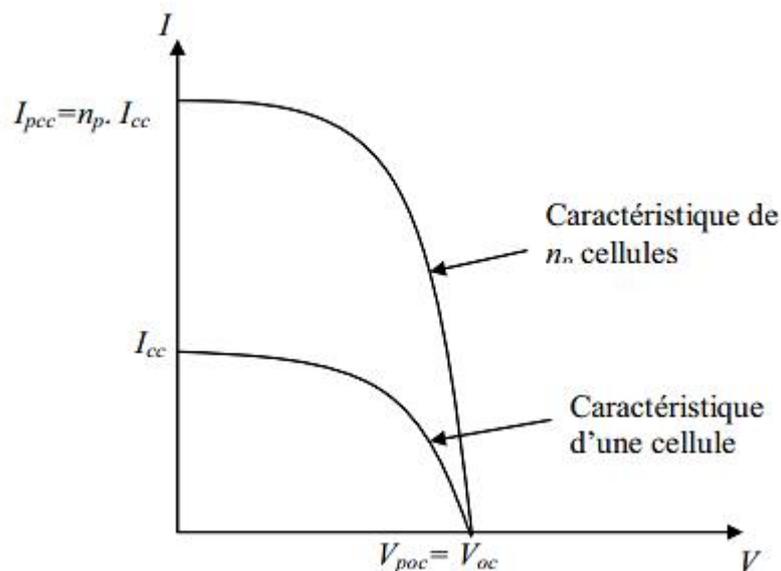
Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (II.13) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques [24]



**Fig.II.13** : Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques

## II. 5.2. Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La figure II.14 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles  $n_p$  cellules identiques. [24]



**Fig.II.14** : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $n_p$  cellules identiques

## II. 5.3 Association hybride (en série et en 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 données par les relations :

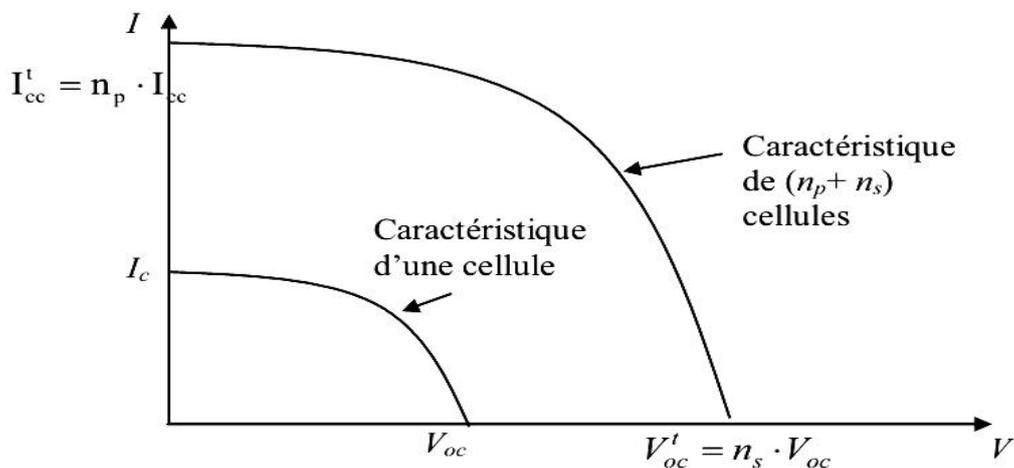
$$I_{cc}^t = n_p \cdot I_{cc}$$

$$V_{oc}^t = n_s \cdot V_{oc}$$

Avec :

$n_p$ : nombre des cellule en parallèle.

$n_s$ : nombre des cellule en série.



**Fig.II.15:**Caractéristique résultante d'un groupement hybride de  $(n_p + n_s)$  cellule identiques

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  sont plus ou moins importantes (figureII.15). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). [24]

## II. 6. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

### II. 6.1 Définition

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracker, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs

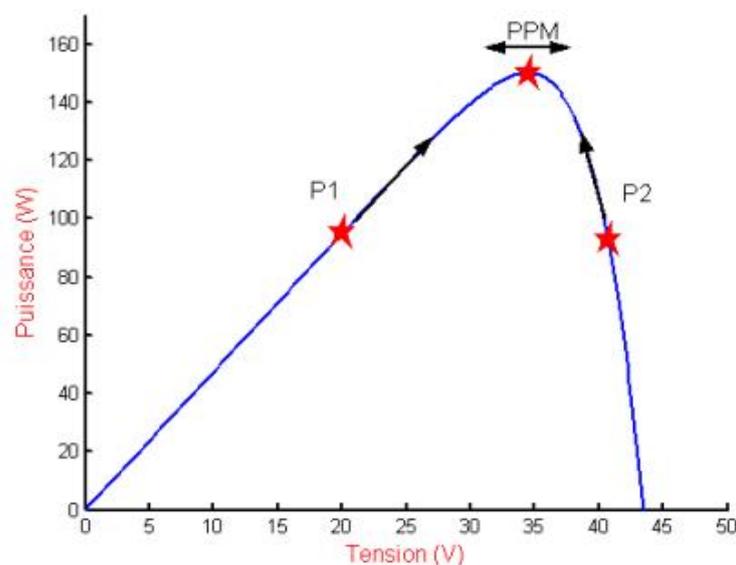
éoliens. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique  $I = f(U)$  est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. [25]

## II. 6.2 La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance PPM. En effet, dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit concrètement d'un algorithme qui :

- Pour une tension  $U(k)$  fixée va mesurer la puissance correspondante  $P(k)$  délivrée par le générateur
- Après un certain temps, l'algorithme impose une tension  $U(k+1) = U(k) + \Delta U$  et mesure également la puissance correspondante  $P(k+1)$ ,
- Si  $P(k+1)$  est supérieure à  $P(k)$  : l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande  $U(k+2) = U(k+1) + \Delta U$ . Sinon l'algorithme cherchera au contraire à abaisser la tension  $U(k+2) = U(k+1) - \Delta U$

La trajectoire de la variation de ces points est représentée sur la figure II.16. [25]



**Fig II.16:** Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire

De cette manière, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, mais sans jamais l'atteindre précisément. D'autres algorithmes différents existent aussi et des solutions entièrement analogiques parfois assez simples à mettre en œuvre.

Les étapes de la recherche (du point optimal) sont illustrées dans le diagramme de la figure II.17 .[25]

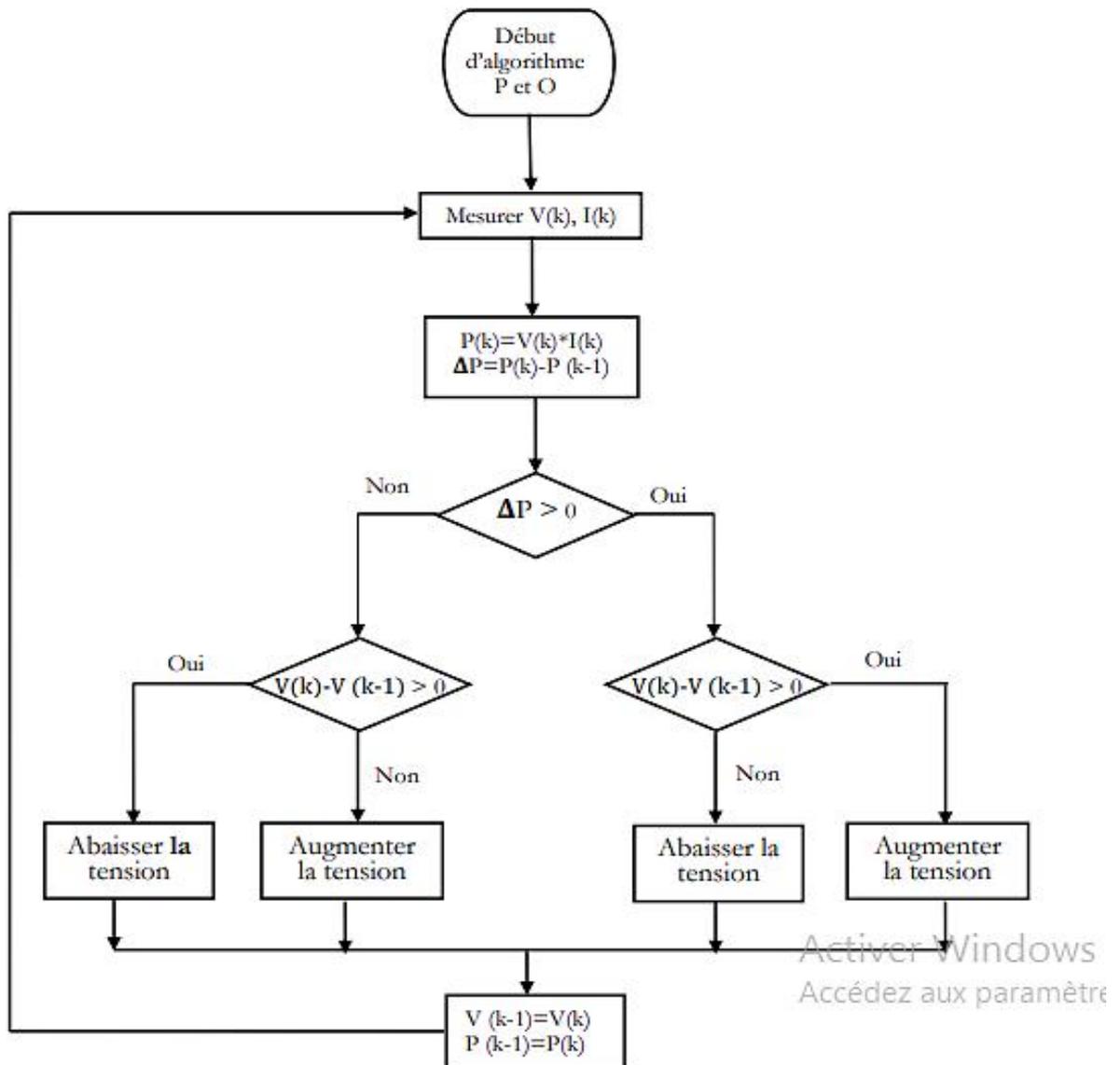


Fig II.17 : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation"[26]

Légende :

V(k) : tension en sortie du panneau à l'itération k

I (k) : intensité en sortie du panneau à l'itération k

P(k) : puissance en sortie du panneau à l'itération k

## II. 6.3 Principe du contrôle MPPT

Le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé. Pour utiliser le concept du transformateur DC avec rapport de transformation variable pour l'adaptation d'un générateur PV à une charge DC, il suffit de faire varier le rapport de transformation  $n(D)$  pour trouver le point d'adaptation optimal entre le générateur PV et la charge de manière à transférer commande délivrées par une commande de type MPPT. L'action de contrôle provenant de la commande MPPT va induire la variation de rapport de transformation qui va indirectement correspondre à une variation de rapport cyclique du convertisseur statique DC-DC. le maximum de puissance du générateur. Etant donnée la caractéristique du générateur PV, cette variation doit suivre les ordres de

$$V_s = n(D) \times V_e$$

Si on prend l'exemple du convertisseur DC-DC (SEPIC), la tension d'entrée du convertisseur :

$$V_e = \frac{V_s(1 - D)}{D}$$

$V_e$  : La tension d'entrée.

$V_s$  : La tension de sortie.

$D$  : Le rapport cyclique du convertisseur

L'impédance vue par le générateur PV est  $R_e$

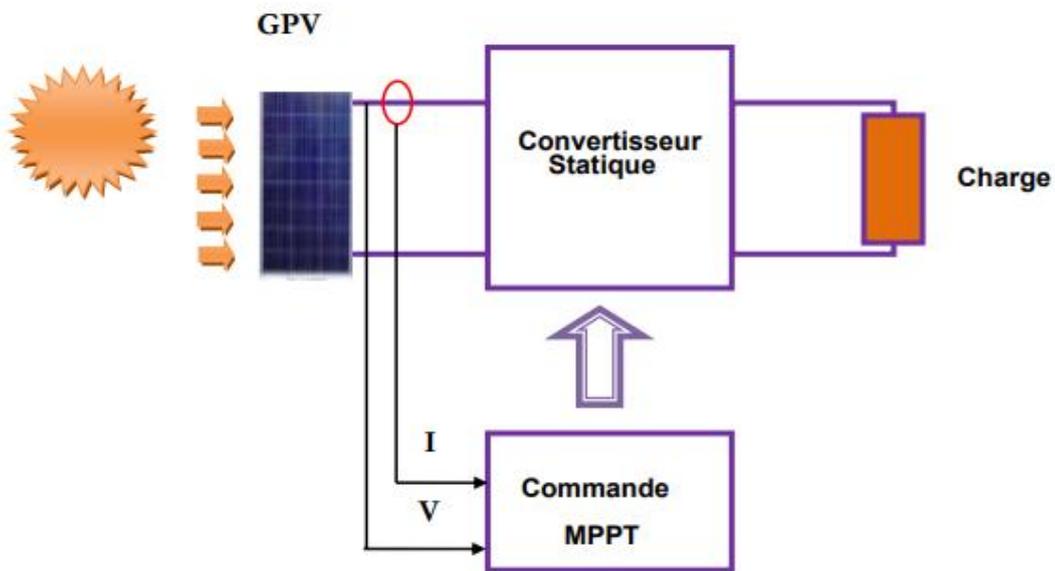
Ou :

$$R_e = \frac{R_{ch}(1 - D^2)}{D^2}$$

Si  $D$  augmente  $R_e$  diminue, la tension diminue aussi.

Si  $D$  diminue  $R_e$  augmente, la tension augmente aussi

Le contrôle MPPT (figure II.18) fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, qui influe sur le sens de la variation de tension de telle sorte que la puissance fournie par le générateur PV soit la puissance maximale disponible à ses bornes. [25]

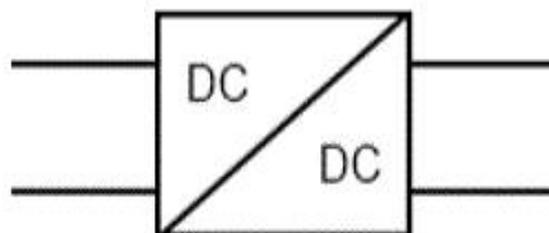


**Fig II.18 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT.

## II. 7. Les Hacheurs :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé (fig.19). Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle les hacheurs ont de bons rendements.

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs [5]



**Fig.II.19 :** Symbole d'un convertisseur DC-DC.

## II. 7.1. Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie les convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens.

Cela revient également à considérer :

- ✚ des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- ✚ des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension. Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).
- ✚ hacheur abaisseur (ou buck),
- ✚ hacheur élévateur (ou boost),
- ✚ hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).[5]

## II. 7.2. Hacheur boost :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. 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). [5]

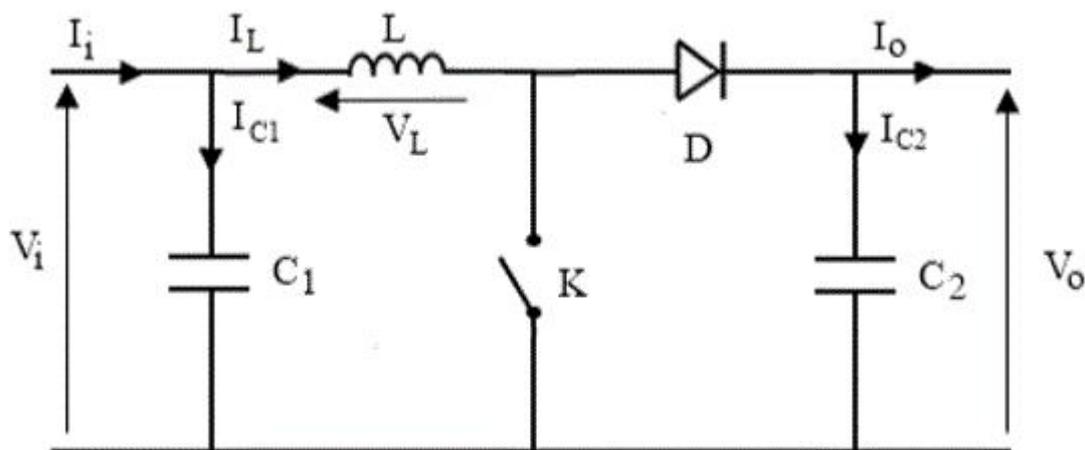


Fig.II.20 : Schéma électrique d'un hacheur boost.

### II. 7.2.1 Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement (fig. II.21). La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t = [\alpha T_e, T_e]$ ,

l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors  $V_k=V_0$ . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i$$

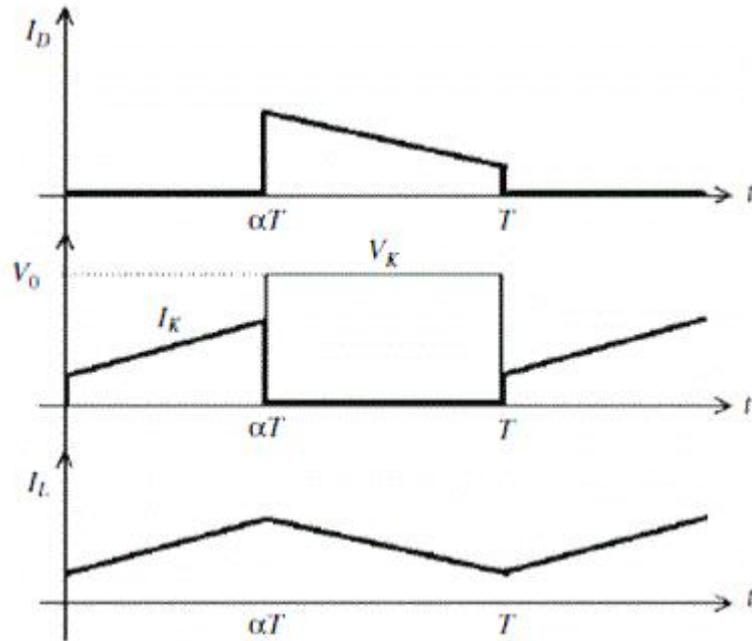


Fig.II.21 : Chronogrammes du courant et de la tension d'un hacheur boost.[5]

**II. 7.2.2Modèle mathématique équivalent :**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. Celui de la figureII.18, présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c'est-à- dire entre  $[0, \alpha T_e]$

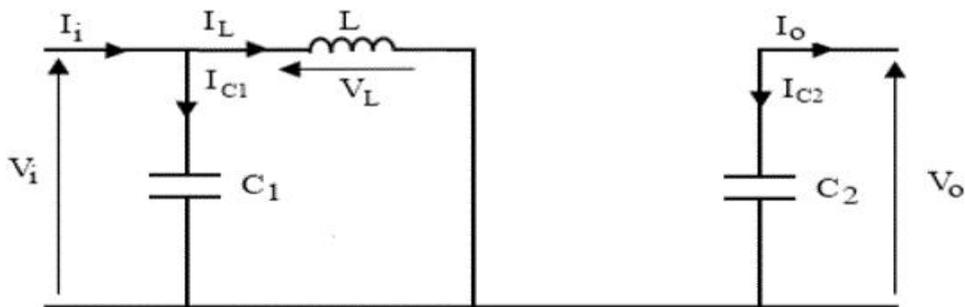


Fig.II.22 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

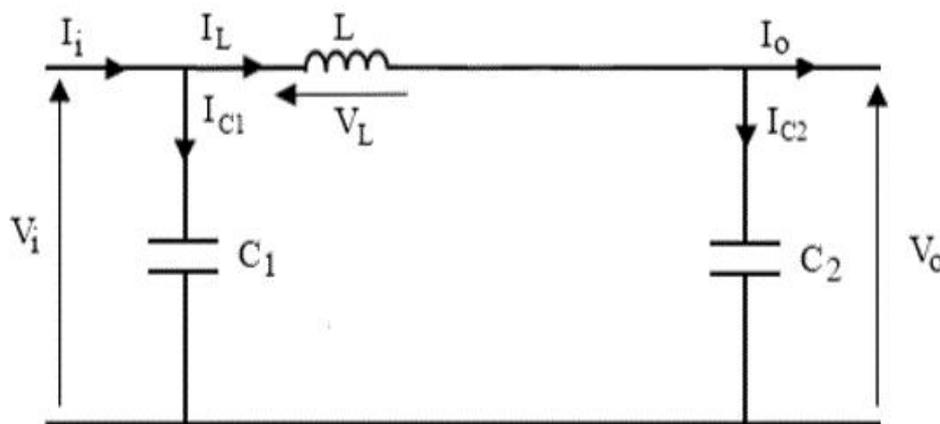
Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -I_0(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du boost est le suivant Fig.II.23 : [5]



**Fig.II.23** : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.[5]

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)$$

## II. 8. Les convertisseurs DC/AC (les onduleurs)

### II. 8.1. Définition

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir

une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication.) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,).[27]

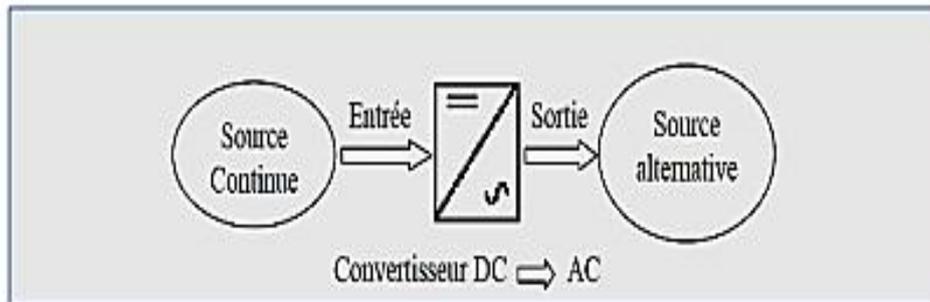


Fig.II.24 :Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

## II. 8.2 Technologies des onduleurs

Pour les onduleurs utilisés dans les applications PV on distingue différentes topologies, selon l'importance de l'installation, le rendement et la puissance. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau. Les différents types d'onduleur sont montrés sur la figure II.25.

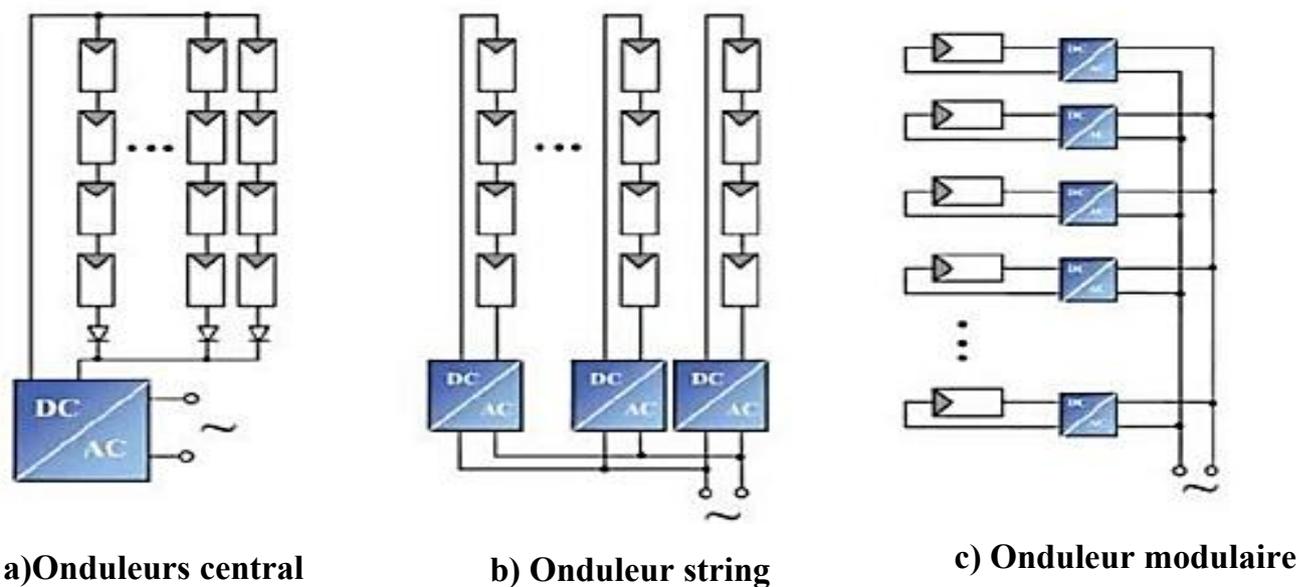


Fig.II.25 : Classification des onduleurs PV connectés au réseau

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau.[28]

## II. 8.3 Structure des onduleurs :

La Figure II.26 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $U_{dc}$ , ou à deux condensateurs avec un point milieu ( $C_{dc1}$ ,  $C_{dc2}$ ). Les deux interrupteurs qui sont sur la même cellule sont commandés d'une façon complémentaire. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre ( $L_r$ ,  $R_r$ ) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

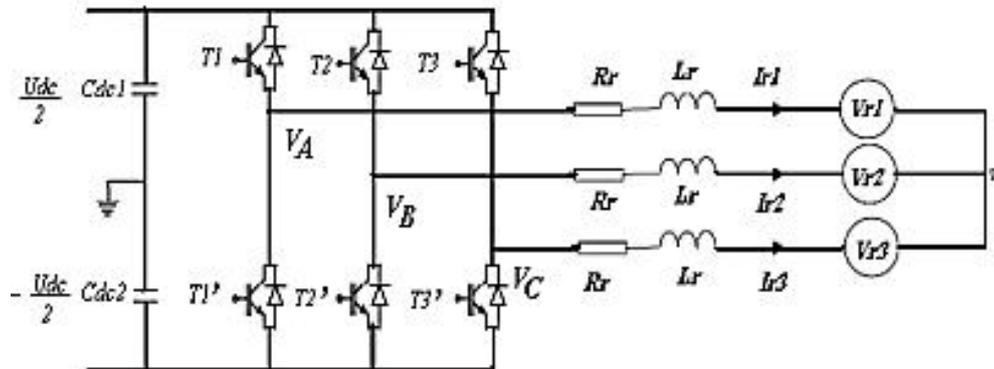


Fig.II.26 : schémas de structure d'un Onduleur triphasé

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

Pour des besoins de modélisation, nous présentons le schéma de la figure II.27 où les semi-conducteurs sont remplacés par des interrupteurs mécaniques.[29]

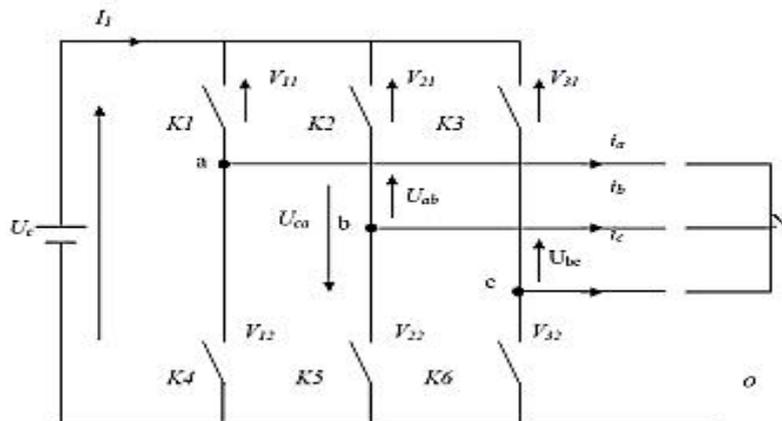


Fig.II.27 : schéma électrique équivalent d'un onduleur de tension

## II. 8.4 Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Plusieurs méthodes de commande peuvent être utilisées :

- Commande par hystérésis.
- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).
- La commande symétrique (Pleine onde).
- La commande décalée (à  $120^\circ$ ).[30]

## II. 9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, caractéristique  $I(V)$  et caractéristique  $P(V)$ , dont chaque panneau avait une caractéristique  $I(V)$  et une caractéristique  $P(V)$ , et Le principe des techniques MPPT, et ce chapitre présente aussi l'influence de l'association de la cellule en série et l'association de la cellule en parallèle et le changement de température ou l'éclairement.

**CHAPITRE III**  
**LES POMPES UTILISEES**  
**DANS L'IRRIGATION**  
**AGRICOLE**

### III. Introduction :

L'eau est une ressource essentielle et il faut pouvoir l'extraire quel que soit l'endroit de la planète. L'organe essentiel pour l'extraction de l'eau est la pompe. Selon la source d'énergie disponible et selon l'utilisation (zone urbaine, zone rurale) l'architecture de la chaîne d'énergie et le choix des pompes seront différents.

#### III. 1. Les pompes :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée ; la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètre (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.[31]

#### III. 2. Différents types des pompes

L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements :

- Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités..
- Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression...[32]

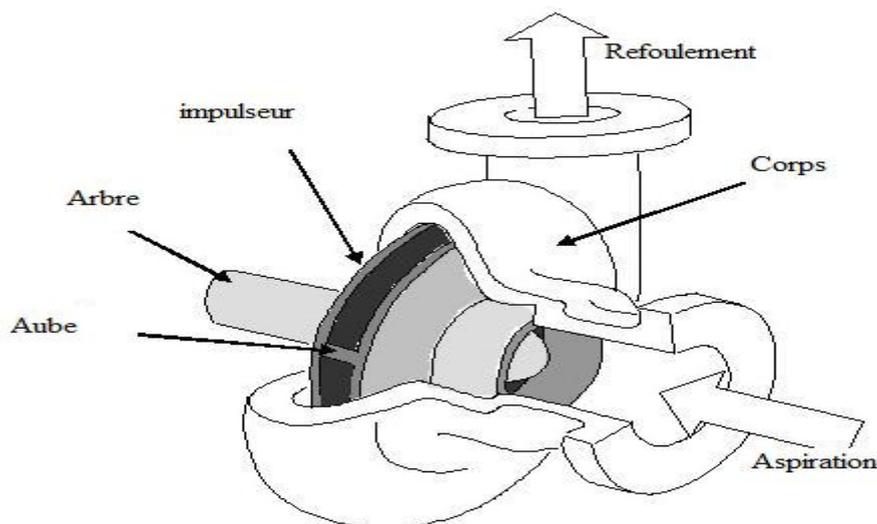
##### a) Classification selon la conception de la pompe :

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de pompes que l'on peut classer en deux grands groupes.[33]

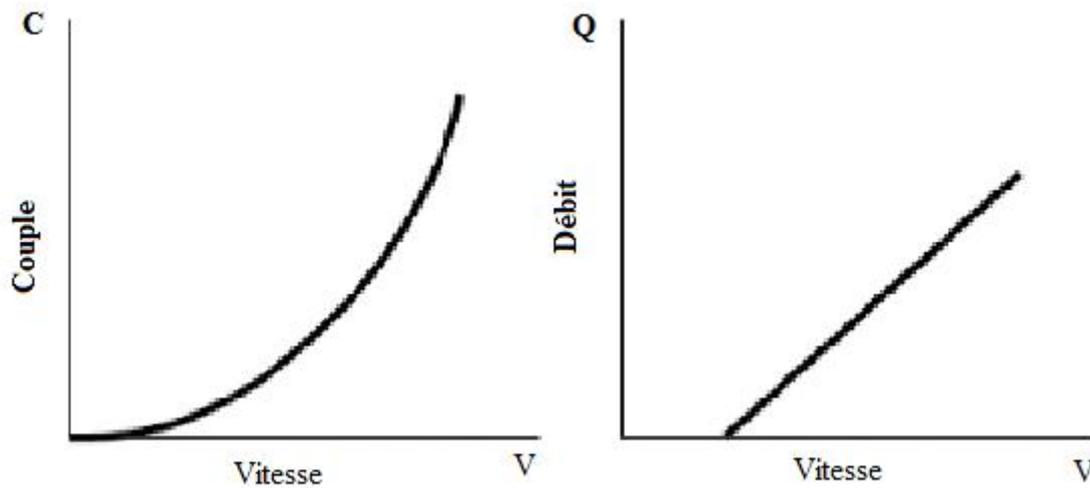
**a) 1. Pompe centrifuge :**

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- ✚ Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- ✚ la puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.[34]

**Fig III.1 : Pompe centrifuge**

- Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :



**Fig III.2** : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge

#### a) 2. Pompes volumétriques :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.)

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- ✚ Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup> /h) et aux grandes hauteurs.
- ✚ Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique  $I=f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.[34]

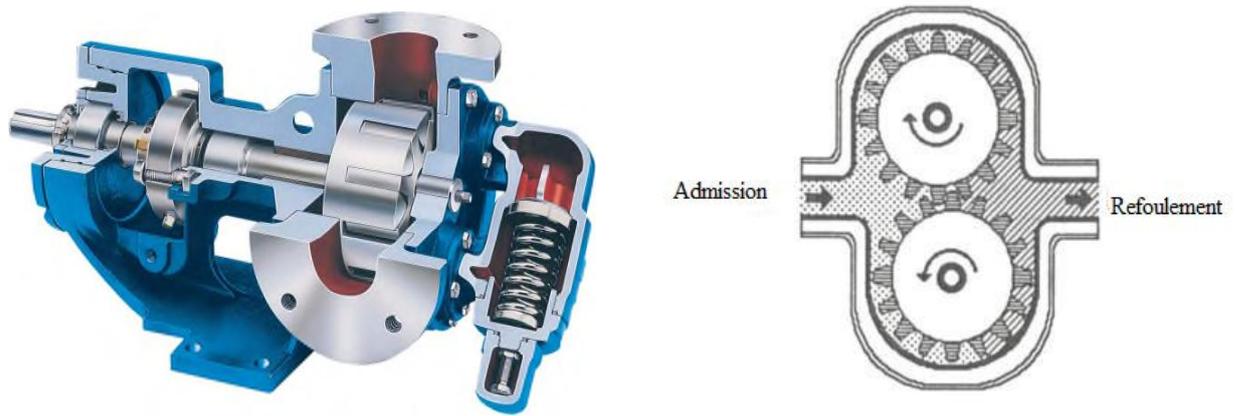


Fig III.3 :Pompe volumétrique.

- **Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse**

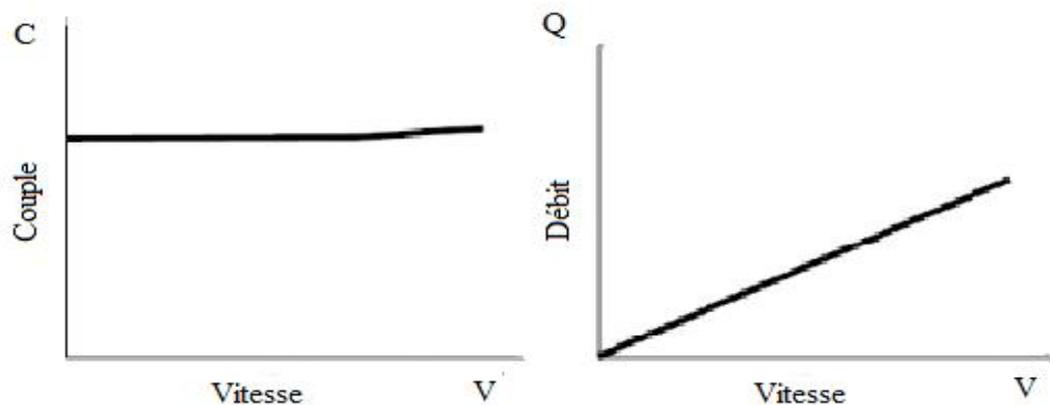


Fig III.4 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique

- L'utilisation d'un type de pompe ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide.[34]

#### b) Classification selon la position de pompe:

En fonction de l'emplacement physique de la pompe, nous distinguons : Les pompes de surface, et les pompes immergées.[33]

##### b) 1. Pompes de surface :

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface, car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer.[33]

##### b) 2. Pompes immergées :

Les pompes de refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur

immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.[33]

**III. 3. Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique :**

**Tableau III.1 :** Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

Comparaison de base –Pompes centrifuge et la pompe volumétrique		
	Pompes centrifuge	pompe volumétrique
Mécanique	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparait, entraînant un débit)	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression)
Performance	Le débit dépend de la pression variable.	Le débit est constant quelle que soit la pression.
Viscosité	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe.	Le rendement augmente avec la viscosité
Rendement	Rendement optimal en un point. A des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
Conditions d'entrée	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Auto-amorçage d'une pompe à sec possible.

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux types de pompage, elle a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché.

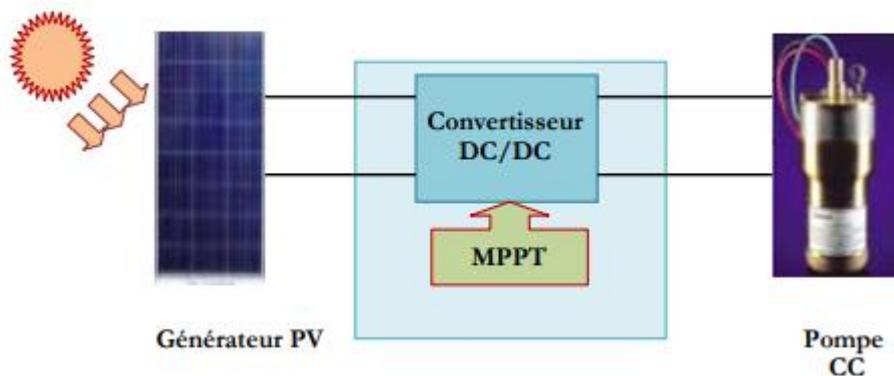
Elle s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides, et elle répond aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à choisir comme pompe pour notre système de pompage, la pompe centrifuge.[34]

### III. 4. Moteur

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur électrique (électropompe), qui peut être à courant continu ou alternatif, et d'autre cas par un moteur thermique (Motopompe) Diesel ou essence. [35]

#### a) Moteur à courant continu avec balais:

Les moteurs à courant continu utilisés pour des applications de pompage solaire sont les moteurs série, avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable. Le couplage est direct ou avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique (FigureIII.5). L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu qui demande un entretien régulier. Les balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. , il est utilisé particulièrement pour le pompage dans les puits ouverts. [36]



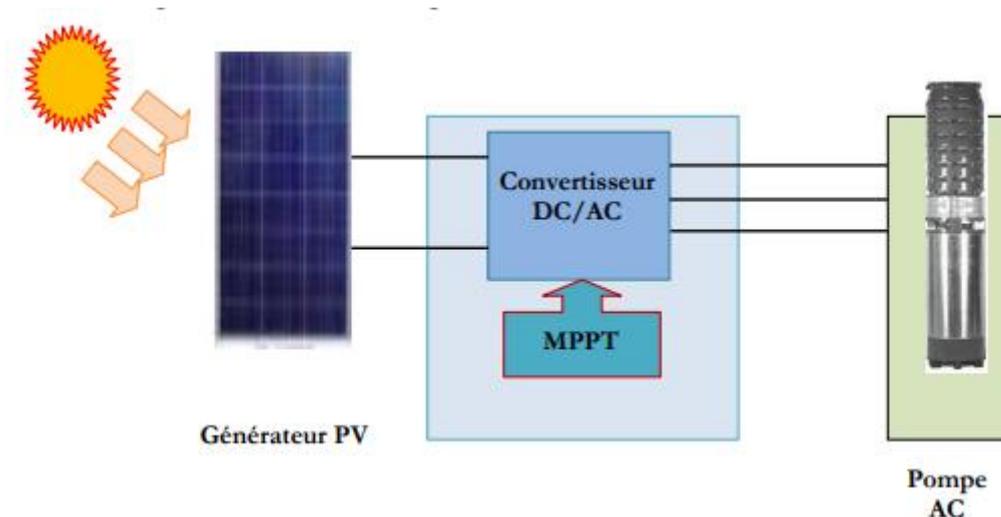
**Fig III.5 :** Diagramme du pompage PV par motopompe à CC

**b) Moteur à courant continu, sans balais (Brushless) :**

Ce type de moteur électrique comporte non seulement les avantages des moteurs à courant continu mais également ceux des moteurs à courant alternatif : fort couple au démarrage et durée de vie élevée (due à l'absence des paliers et des balais) mais leur utilisation reste limitée à des faibles puissances. [36]

**c) Moteur à courant alternatif :**

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (aussi faible besoin de maintenance) devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur PV voir figure 6 [36]



**Fig III.6 :** Diagramme du pompage PV par motopompe à AC

➤ **Avantages et inconvénients****Tableau III.2** : Avantages et inconvénients pour les deux moteurs, MCC et MAS.[33]

types de moteur	Avantages	Inconvénients
Moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilité de régulation (variation de vitesse, couple, ...)</li> <li>• Rendement de 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'entretien : le système balai/collecteur nécessite beaucoup d'entretiens</li> </ul>
Moteur asynchrone	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiabilité, nécessite peu d'entretien</li> <li>• Rendement de 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulté et coût de régulation (nécessite la réalisation de commandes vectorielles)</li> </ul>

**III. 5. Dimensionnement et choix de la pompe**

Données nécessaires pour dimensionner la pompe solaire et ses composants :

- **Débit horaire de la pompe  $Q_b$  en  $m^3/j$**

Quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné.

En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (l/h).

En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en  $m^3$  par jour.

- **Hauteur manométrique totale**

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

- **Capacité de stockage**

Le réservoir sert non seulement à stocker de l'eau mais il constitue aussi un régulateur de débit.

Ainsi, la capacité utile du réservoir sera déterminée pour qu'elle puisse permettre de stocker les excédents de pompage pendant les heures de faibles consommations et de compenser le déficit entre le pompage et la consommation.[33]

Schéma de principe

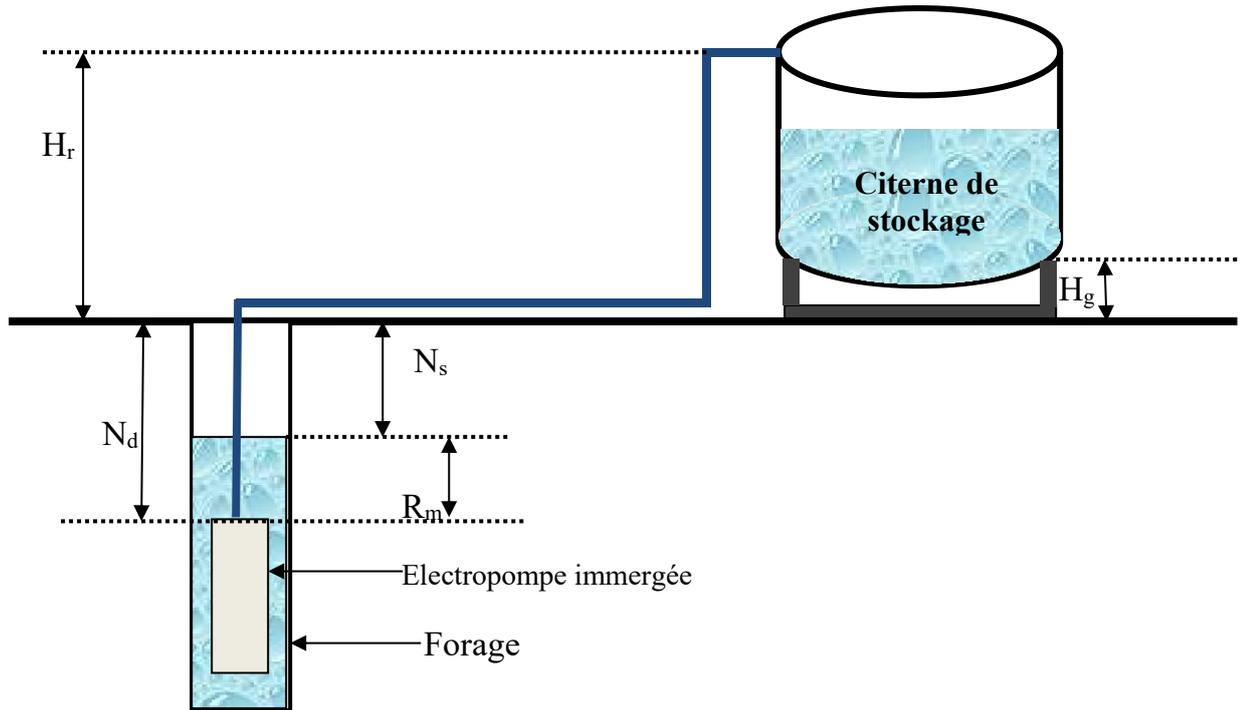


Fig III.7 : Système de pompage d'eau avec stockage

Tableau III.3 : Désignation des paramètres du système de pompage.[33]

Symbole	Désignation	Unité
$H_r$	Hauteur géométrique du sol au plan du haut du réservoir	m
$H_g$	Hauteur géométrique du sol au plan du bas du réservoir	m
$N_s$	Niveau de la nappe statique (au repos)	m
$N_d$	Niveau dynamique de la nappe (pour un débit moyen)	m
$R_m$	Rabattement maximal avant d'arrêter la pompe $N_d - N_s$	m

III. 5.1. Détermination du débit horaire de la pompe  $Q_b$  en  $m^3 / j$

Pour estimer le débit maximal de la pompe en  $/h$ , on prend approximativement la valeur de la demande journalière de pointe - qu'on divise par le nombre heures d'ensoleillement maximal. Le débit horaire de la pompe est calculé de la manière suivante :

$$Q_b = \frac{D_{ip}}{H_i}$$

$H_i$  : Nombre d'heures d'ensoleillement.[37]

### III. 5.2. Calcul du rabattement

Le rabattement est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

Pour déterminer le rabattement du forage à nappe libre, nous avons utilisé la formule de Jules Dupuit et la formule empirique de Sichardt

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$R = 3000(H - h)\sqrt{K}$$

Donc 
$$h = H - \frac{R}{3000\sqrt{K}}$$

En remplaçant l'équation 4 dans l'équation 1 on a :

$$Q \ln\left(\frac{R}{r}\right) = \frac{2\pi KHR}{3000\sqrt{K}} - \frac{\pi R^2}{3000^2}$$

H : Hauteur de la partie saturée en (m)

Q : Débit de pompage en( m<sup>3</sup>/s)

K : Perméabilité du sol en m/s (la couche de roche rencontrée au niveau de la crépine de forage est

l'argile qui a une perméabilité K= 10<sup>-11</sup>( cm /s.)

r : Rayon du forage.

R : Rayon d'action ou d'influence du cône de dépression en (m)

h : Hauteur d'eau dans le forage pendant le pompage en (m)

L'épaisseur de la partie saturée (H) est la différence entre la profondeur (H1) du forage et le niveau statique (NS).

$$H = H_1 - N_s$$

Avec

H1 : Profondeur totale du forage en (m).

Ns : Niveau statique en (m).[38]

**III. 5.3. Calcul du niveau dynamique**

$$N_d = N_s + S_0$$

Avec :

$$S_0 = H - h$$

**III. 5.4. Conduite de refoulement**

Le choix du diamètre de la conduite de refoulement est déterminé par la formule de Bresse .Qui s'écrit :

$$D = 1,5\sqrt{Q}$$

D : Diamètre de la conduite en mètre

Q : Débit horaire en m<sup>3</sup>/s. [39]

Perte de charge totale et la HMT

$$HTM = H_r + N_d + P_T$$

$$P_T = P_l + P_s$$

Où

P<sub>T</sub> : Pertes de charges totales.

P<sub>l</sub> : Pertes de charge linéaire.

P<sub>s</sub>: Pertes de charge singulières.

Calcul de perte de charge linéaire par la formule de Darcy-Weibach (1857) :

$$P_l = \lambda \frac{LV^2}{D2g}$$

Avec :

L : Longueur de la conduite de refoulement en (m).

$$L = H_r + N_d + 10$$

V : la vitesse de découlement en (m/s).

$$V = \frac{Q_h}{S \times 3600} = \frac{Q_h}{\frac{\pi \times D(m)^2}{4} \times 3600}$$

D : Diamètre de la conduite en (m).

g : Constante gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>).

λ : Coefficient de perte de charge dépend du nombre de Reynolds (R<sub>e</sub>).

Le coefficient λ dépend du nombre de Reynolds (R<sub>e</sub>). [33]

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

**Tableau III.4** : Coefficient de perte de charge.[40]

R <sub>e</sub> ≤ 1200	1200 < R <sub>e</sub> < 100000	R <sub>e</sub> ≥ 100000
Écoulement laminaire	Écoulement turbulent lisse	Écoulement turbulent rugueux
$\lambda = \frac{64}{R_e}$	$\lambda = 0.316 \times R_e^{-0.25}$ (expression de BLASIUS)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.71 \times D} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{\lambda}} \right)$  (expression de COLEBROOK) ε=hauteur moyenne des rugosités

Calcul des pertes de charge singulières P<sub>s</sub> .

$$P_s = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

Avec : ζ la somme des coefficients de singularité.[33]

### III. 5.5. Calcul de la hauteur d'élévation requise pour la motopompe

L'élévation est plus ou moins importante selon la configuration de l'installation ou l'application (épuisement, aspersion, irrigation, vidange, lavage). Son calcul est réalisé à partir de :

Hauteur d'élévation = hauteur d'aspiration + hauteur de refoulement + perte de charge.[41]

### III. 6. Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour

L'énergie électrique journalière nécessaire  $E_{elec}$  en (kWh/j) pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée par la formule suivante :

$$E_{elec} = \frac{C_h \times Q_p \times HMT}{\eta_G}$$

$\eta_G$  : Rendement du groupe de pompage

$$\eta_G = \eta_{moteur} \times \eta_{pomp}$$

$C_h$  : Constante hydraulique, cette constante hydraulique dépend de la gravité et de la densité de l'eau.

$Q_p$ : Débit horaire de la pompe en ( $m^3/h$ ) .

HMT : Hauteur manométrique totale de la pompe.[42]

### III. 7Energie solaire disponible et dimensionnement du champ photovoltaïque

#### III. 7.1Energie solaire disponible :

Pour la région d'EL Tarf où on va installer notre système, nous a donné un ensoleillement moyen de  $7.8KW/m^2/j$ .[43]

#### III. 7.2. Dimensionnement du champ photovoltaïque

##### III. 7.2.1.Calcul de la puissance crête $P_{cr}$

L'énergie fournie par les panneaux solaires en une journée doit être égale à l'énergie journalière consommée par la pompe

La puissance crête se calcule en fonction de trois facteurs :

- L'énergie électrique calculée selon les besoin de notre système  $E_{elec}$
- Le facteur de correction  $F_c = 0.6\alpha 0.8$
- L'ensoleillement moyen du site d'installation  $E_{ns}$ .[36]

$$P_{cr} = \frac{E_{elec}}{F_c \cdot E_{ns}}$$

##### III. 7.2.2 Tension du système

La tension de système photovoltaïque se détermine par un tableau des intervalles comme suit :

**Tableau III.5:** Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête. [33]

Puissance de champ	0-500w	500w-2kw	2kw-10kw	Plus de 10kw
Tension de système	12v	24v	48v	96v

### III. 7.2.3 Calcul de nombre de panneaux solaire :

$$N_{bp} = \frac{P_{cr}}{P_p}$$

Nombre de panneaux en série :

$$N_{bps} = \frac{V_{sys}}{V_{mp}}$$

Nombre de panneaux en parallèle :

$$N_{bps} = \frac{N_{bp}}{N_{bps}}$$

Avec :

$N_{bp}$ : Le nombre total des panneaux.

$P_{cr}$ : La puissance crête de système.

$P_p$  : La puissance du panneau.

$V_{sys}$ : Tension de système.

$V_{mp}$ : Tension nominal d'un panneau.[33]

### III. 8. Critères de Choix de type de pompes :

La pompe est choisie en fonction des caractéristiques du circuit de circulation et du débit de liquide dans ce circuit.

Pour traduire numériquement les caractéristiques d'un circuit, on calcule sa hauteur manométrique totale(HMT). [33]

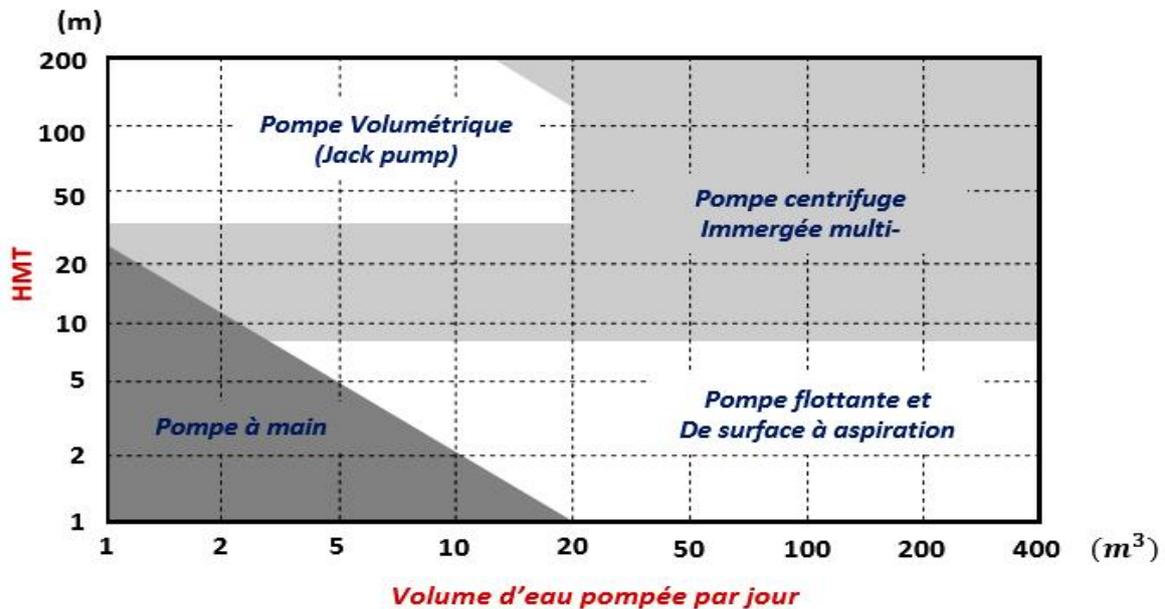


Fig. III.8 : critère de choix de pompe selon besoin journalier et HMT

Tous les liquides à pomper n'ont pas les mêmes caractéristiques, les pompes soient immergées soient des motopompes répondent à des applications multiples selon :

- ✚ **La qualité de l'eau** : eaux claires et peu chargées ou eaux chargées.
- ✚ **Le débit et la pression** : nécessaires en fonction des pertes de charge.

Pour les motopompes nous avons trois étapes essentielles pour bien choisir :

- ✚ **La hauteur d'aspiration** : C'est la hauteur entre le niveau d'eau pompée et l'axe de la pompe. Pour des raisons physiques, elle ne peut dépasser 8 mètres au-dessus du niveau de la mer.
- ✚ **La hauteur de refoulement** : C'est la hauteur entre l'axe de la pompe et le point le plus haut du réseau.
- ✚ **La perte de charge** : Il s'agit de la résistance rencontrée par l'eau dans les tuyaux. Elle se calcule en fonction de la longueur, du diamètre, de la qualité des tuyaux, de leur forme et du nombre d'accessoires (on prendra 20 % pour les cas généraux).[33]

**III. 9. Dimensionnement des batteries****III. 9.1 Capacité totale de batteries**

$$C_{T\text{Batt}} = \frac{E_{\text{elec}} \times N_A}{V_{\text{sys}} \times D_p}$$

$N_A$  : Nombre de jours d'autonomie

$D_p$  : La profondeur de décharge maximale acceptable pour la batterie.[33]

**III. 9.2 Nombre total de batteries**

$$N_{T\text{batt}} = \frac{P_{\text{cr}}}{C_{T\text{batt}}}$$

**III. 9.3 Nombre de batteries en série et en parallèle**

$$N_{\text{batts}} = \frac{V_{\text{sys}}}{V_{\text{batt}}}$$

$$N_{\text{batts}} \frac{N_{T\text{batt}}}{N_{\text{batts}}}$$

$N_{\text{batts}}$  : Nombre de batterie en série.

$N_{\text{battp}}$  : Nombre de batteries en parallèle.

$V_{\text{sys}}$  : Tension du système.

$V_{\text{batt}}$  : Tension de la batterie.[33]

**III. 10. Section du câble**

La section de câble de la partie continue, se calcule par la façon suivante :

La relation de la loi d'Ohm :

$$\Delta V(V) = R \times I$$

$$R = \frac{2 \times \rho \times L}{S}$$

Or  $\Delta V(V) \leq \Delta V_L(\%) \times U(V)$

$$\frac{2 \times \rho \times L}{S} \leq \Delta V_L(\%) \times U(V)$$

$$S \geq \frac{2 \times \rho \times L \times I}{\Delta V_L(\%) \times U(V)}$$

R : résistance totale du câble ( $\Omega$ )

L(m) : longueur du câble.

S : section ( $\text{mm}^2$ ) du conducteur

$\rho$ : Résistivité du cuivre.

$\Delta V$  (%) : Chute de tension limite.

U(V): Tension à puissance maximale du générateur PV obtenu dans les conditions (STC).

I (A): Courant à puissance maximale générateur PV obtenu dans les conditions (STC).

Le tableau suivant donne la section des conducteurs cuivre en fonction de l'intensité maximale que le conducteur peut supporter.[44]

**Tableau III.6 : Section nominale des câbles.**

<b>S(mm<sup>2</sup>)</b>	<b>1.5</b>	<b>2.5</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>95</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>185</b>	<b>240</b>
<b>I<sub>mp</sub>(A)</b>	<b>13</b>	<b>21</b>	<b>28</b>	<b>36</b>	<b>46</b>	<b>61</b>	<b>81</b>	<b>99</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>195</b>	<b>220</b>	<b>250</b>	<b>285</b>	<b>340</b>

### III. 11. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types des pompes, les types du moteur électrique (électropompe) et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

**CHAPITRE IV**  
**ETUDE D'UN CAS RÉEL**  
**D'IRRIGATION AGRICOLE**

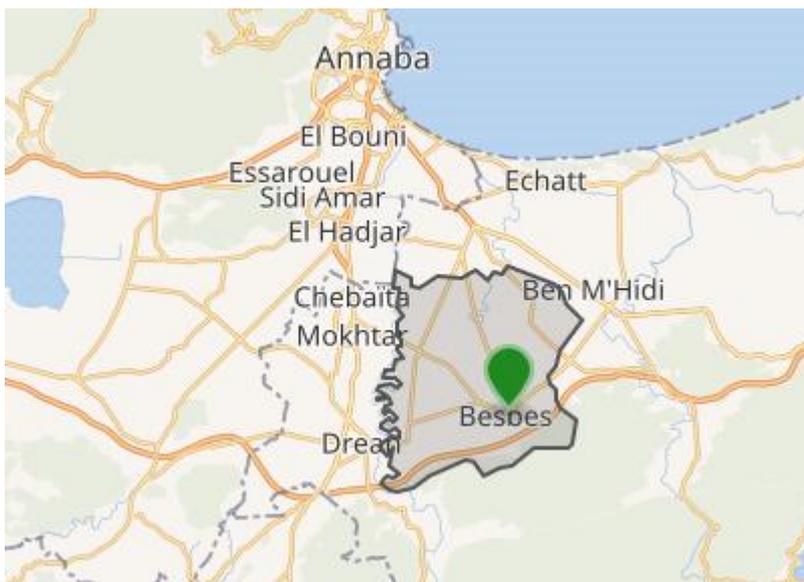
#### IV. 1 Présentation de la localité d'étude

Pour cette étude pratique, nous avons choisi la ville d'el besbes de la wilaya de Tarf. Elle est ressources importantes d'eau souterraine.

Besbes est située à l'ouest de la wilaya d'El Tarf, à 24 km au sud d'Annaba. La ville est entourée de terres agricoles (plaine d'Annaba), Elle appartient à la Wilaya d'Annaba, anciennement. Elle couvre une superficie de 121,55km<sup>2</sup> et dont les coordonnées géographiques sont 36° 42' 08" nord, 7° 50' 50" est l'altitude par rapport au niveau de la mer est de Min 10m Max 10 m.[45]

**Tableau.IV.1** : Localisation de la wilaya d'El Tarf.

Pays	Algérie
Wilaya	El Tarf
Daïra	Besbes
Coordonnées	36° 42' 08" nord, 7° 50' 50" est
Superficie	121,55 Km <sup>2</sup>
Densité	381 hab./km <sup>2</sup>
Population	46 341 hab. (2008)
Code postal	36240



**Fig.IV.1** : Localisation de la wilaya d'El Tarf.

✚ **Le but** : d'irriguer une surface d'un hectare de Tomate.



**Fig.IV.2** : hectare de Tomate

#### **IV. 2 Equipement et matériels solaires**

Ils sont les principaux composants du système photovoltaïque : c'est-à-dire les modules photovoltaïques, les onduleurs, la motopompe et les diverses accessoires utilisés dans l'installation (câbles, boîtiers, ...).[42]

#### **IV. 3 Etude technique et réalisation**

Pour tout projet de réalisation et d'installation d'un système de pompage photovoltaïque, il faudrait ajouter les frais dus à l'étude de prospection et visite du site.[42]

#### **IV. 4 Installation**

Dans le cadre de l'installation sur site, une équipe de techniciens (installateurs) spécialistes est directement mise en place. Le poste relatif au montage, à l'installation et à la mise en service du système photovoltaïque peut être évalué à 8 % du coût global de l'installation, il représente l'ensemble des frais occasionnés à la réalisation et l'installation de la centrale sur le site prévu. [46]

#### **IV. 5 Les étapes de dimensionnement de l'installation :**

#### **IV. 6 Estimation des besoins en eau et rayonnement solaire :**

##### **a) Estimation des besoins en eau**

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). Cependant, la pratique et

l'expérience locale restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte des besoins. Les besoins d'eau des raisins pour la région d'El Tarf sont donnés dans le tableau suivant : [37]

**Tableau.IV.2 : Besoins journaliers moyens mensuels en eau :**

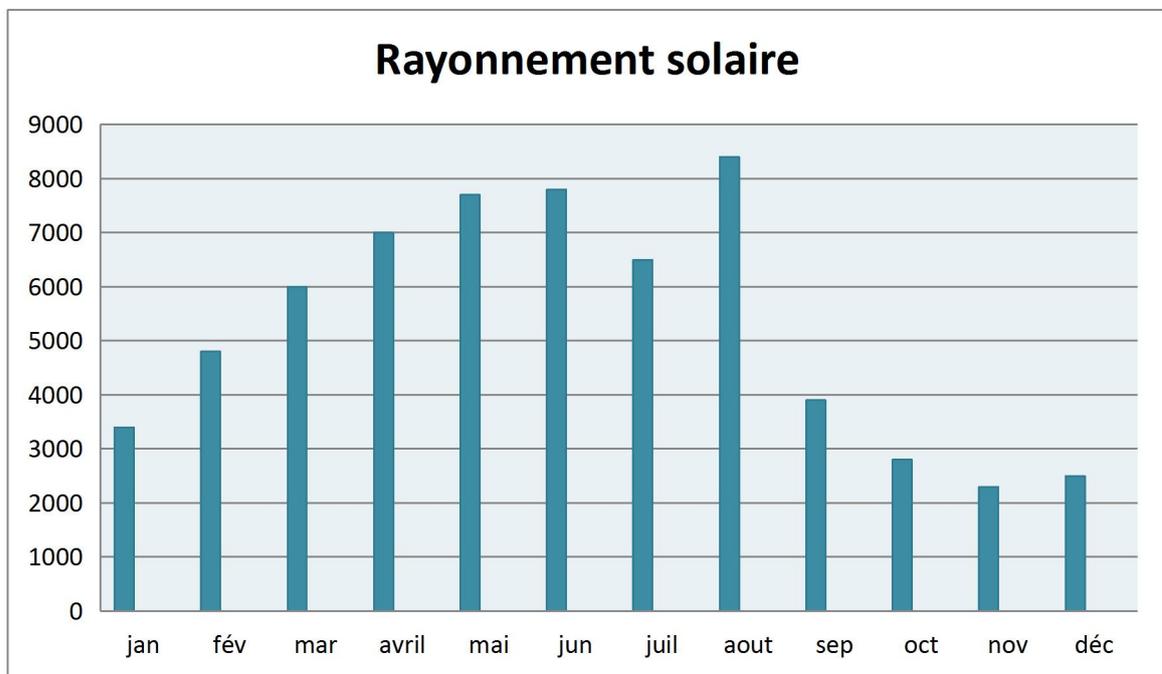
Période	L'Evert			Le printemps			L'été			L'automne		
Mois	Déc	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov
Eau (m <sup>3</sup> /j)							64	65				

**b) Rayonnement solaire:**

Le tableau ci-après donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier sur le site d'El Tarf.

**Tableau.IV.3:** Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale

Période	L'Evert			Le printemps			L'été			L'automne		
Mois	Déc	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov
$\overline{H_{TO}}$ [Wh/m <sup>2</sup> /j]	2500	3400	4800	6000	7000	7700	7800	6500	8400	3900	2800	2300

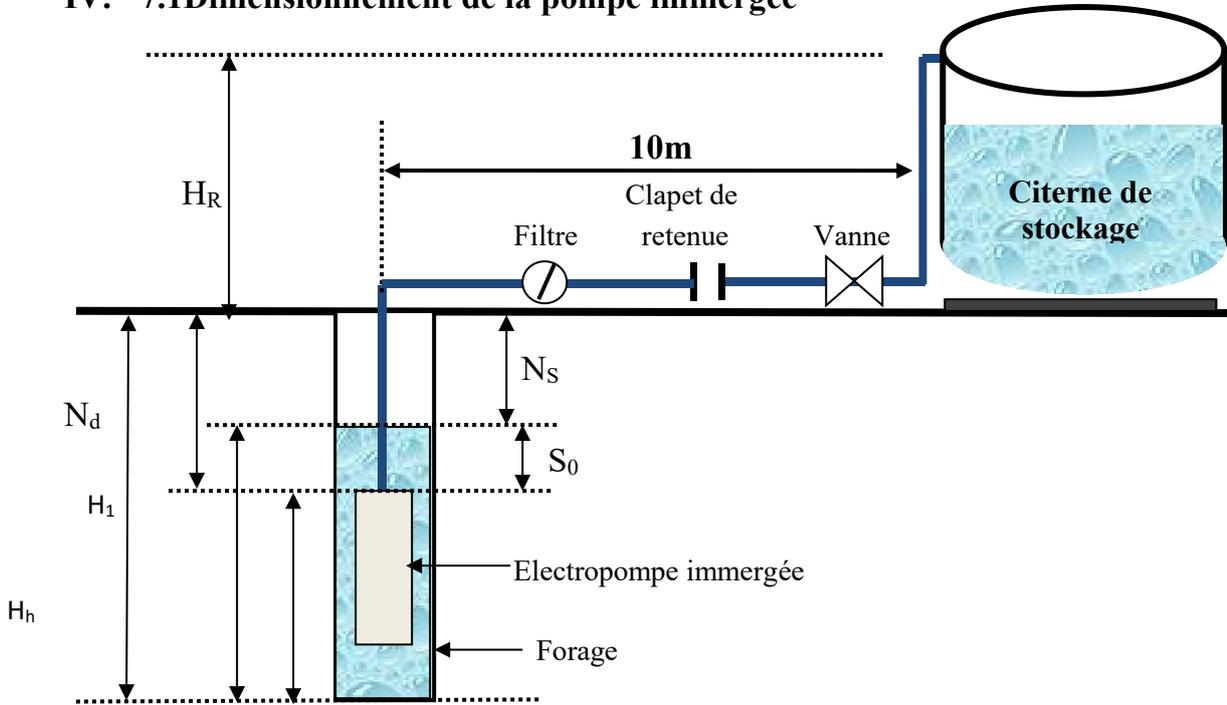


**Fig.IV.3:** Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale

**IV. 7. Dimensionnement et choix de la pompe**

Dans cette partie, nous allons dimensionner deux types de pompe, la pompe immergée et la motopompe.

**IV. 7.1 Dimensionnement de la pompe immergée**



**Fig.IV.4 : Système de pompage avec stockage**

• **Pour notre exemple :**

Choisir le mois où l'insolation maximale est le plus faible.

Choisir les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.

Le débit journalier maximal requis est de 65 m<sup>3</sup>/j pendant le mois de Juil.

L'énergie d'insolation la plus faible pour la saison d'été est égale à 6500wh/m<sup>3</sup>/j pendant le mois de Juil.

**IV. 7.1.1 Débit horaire :**

$$Q_h = \frac{Q(m^3/jour)}{h}$$

$$Q_h = \frac{65}{6.5}$$

$$Q_h = 10$$

**h** : le nombre d'heures d'insolation maximal; en Algérie

**Q** :Le débit journalier maximal requis.[37]

## IV. 7.1.2 Calcul de la Hauteur manométrique totale HMT

## a) Calcul du rabattement

Le rabattement est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique

Tableau.IV.4 : caractéristique du forage

Profondeur totale	Hauteur de la partie saturée	Diamètre du forage	Niveau statique	Perméabilité du sol	Niveau dynamique
$H_1$ (m)	H (m)	$D_F$ (m)	$N_S$ (m)	K	h(m)
50m	45m	77mm	5m	$10^{-11}$ (cm /s)	10m

Sous l'effet du pompage, le niveau de la nappe baisse

$$H = H_1 - N_S$$

$$H = 50 - 5 = 45$$

Le rayon d'action (R)

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (03)$$

$$R = 3000(H - h)\sqrt{K} \quad (04)$$

$$h = H - \frac{R}{3000\sqrt{K}} \quad (05)$$

**H** : Hauteur de la partie saturée en (m)

**Q**: Débit de pompage en ( $m^3/j$ )

**K** : Perméabilité du sol en m/s (  $K=10^{-11}$ cm/s)

**r** : Rayon du forage

**R** : Rayon d'action ou d'influence du cône de dépression en(m)

En remplaçant l'équation (05) dans l'équation (03) on a :

$$Q \ln\left(\frac{R}{r}\right) = \frac{2\pi KHR}{3000\sqrt{K}} - \frac{\pi R^2}{3000^2} \quad (06)$$

$$R = 0.33m$$

Calcul de la hauteur d'eau dans le forage pendant le pompage h(m)

$$h = H - \frac{R}{3000\sqrt{K}}$$

$$h = 10m$$

Calcul le rabattement ( $S_0$ ) : est la différence entre hauteur de la partie saturée ( $H$ ) et la hauteur ( $h$ ).[38]

$$S_0 = H - h$$

$$S_0 = 45 - 10 = 35$$

### b) Calcul du niveau dynamique

$$N_d = N_s + S_0$$

$$N_d = 5 + 35 = 40$$

### c) Conduite de refoulement

Le choix du diamètre de la conduite de refoulement est déterminé par la formule de Bresse qui s'écrit :

$$D = 1,5\sqrt{Q}$$

Avec :

D : Diamètre de la conduite en mètre

Q : Débit horaire en  $m^3/s$  ( $Q=10 m^3/h = 0.0027 m^3/s$ ). [39]

$$D = 1.5\sqrt{0.0027}$$

$$D = 0.077 m$$

Donc :

$$D = 77 mm$$

La conduite de refoulement a les caractéristiques suivantes :

Nature : Tuyaux en plastique

Diamètre (mm) : 80mm

Classe de pression (bar) :10

Perte de charge dans les tuyaux (en m de CE pour 100 mètres de tuyauterie) : $P_T=0.7$  .[47]

**d) Hauteur manométrique totale HMT**

Pour éviter que le réservoir d'eau soit trop surélevé, ce qui rendra plus coûteux le système de pompage solaire, on prendra la hauteur du réservoir ( $H_R$ ) par rapport au sol égal à 6 mètres.

$$HMT = N_d + H_R + P_T$$

$H_R=6m$  : Hauteur du réservoir

$N_d=40m$  : Niveau dynamique de la nappe.[33]

**e) Calcul de la somme des pertes de charges PT:**

$$P_T = P_l + P_s$$

$P_l$ : Pertes de charge linéaire.

$P_s$ : Pertes de charge singulières

Calcul de perte de charge linéaire par la formule de Darcy-Weibach (1857) :

$$P_l = \lambda \frac{LV^2}{D2g}$$

$D$  : Diamètre de la conduite en (m)  $D= 0.077m$  Et  $V=0.59$  m/s

La vitesse dans le tuyau :

$$V = \frac{Q_h}{S \times 3600} = \frac{Q_h}{\frac{\pi \times D(m)^2}{4} \times 3600} = \frac{10}{\frac{3.14 \times 0.077^2}{4} \times 3600} = 0.59m/s$$

Le coefficient  $\lambda$  dépend du nombre de Reynolds ( $R_e$ ).

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$R_e = \frac{1000 \times 0.59 \times 0.077}{10^{-3}} = 45430su$$

$\rho$ : Masse volumique de l'eau en ( $kg/m^3$ )  $\rho=1000(kg/m^3)$

$\mu$  : viscosité dynamique en ( $kg/m.s$ )  $\mu=10^{-3}(kg/m.s)$  .[33]

**Tableau.IV.5** : Le coefficient  $\lambda$  .

$Re \leq 1200$	$1200 < Re < 100000$	$Re \geq 100000$
Ecoulement laminaire	Ecoulement turbulent lisse	Ecoulement turbulent rugueux
$\lambda = \frac{64}{Re}$	$\lambda = 0.316 \times Re^{-0.25}$ (expression de BLASIUS)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.71 \times D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$ (expression de COLEBROOK) $\varepsilon$ =hauteur moyenne des rugosités

$1200 < Re < 100000$  Donc le coefficient  $\lambda$  est déterminé à l'aide de l'expression de BLASIUS:[40]

$$\lambda = 0.316 \times Re^{-0.25} = 0.0216 \approx 0.022$$

Calcul de la Longueur de la conduite de refoulement :

$$L = H_r + N_d + 20$$

$$L = 6 + 40 + 10 = 56 \text{ m}$$

$$P_l = 0.28 \text{ m}$$

Calcul des pertes de charge singulières  $P_s$  :

$$P_s = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

Avec  $\zeta$  le coefficient de perte de pression singulière de l'élément considéré

**Tableau .IV6** : le coefficient de perte de pression singulière de l'élément considéré.[33]

Description	Nombre	$\zeta$
Filtre	1	1
Clapet de retenue	1	2
Vanne - robinet	1	1
Coude 90°	3	0.75

Total	6.25
-------	------

$$P_s = 6.25 \frac{0.59^2}{2 \times 9.81}$$

$$P_s = 0.11 \text{ m}$$

$$P_T = P_l + P_s$$

$$P_T = 0.11 + 0.28 = 0.39$$

Hauteur manométrique totale :

$$HTM = H_R + N_d + P_T$$

$$HTM = 6 + 40 + 0.39$$

$$HTM = 46.39$$

#### IV. 7.1.3 Choix de la pompe :

Le débit nécessaire que doit fournir la pompe est de 10 m<sup>3</sup> /h. De ce fait, nous devons trouver une pompe capable de fournir un tel débit.

- **Gamme de systèmes :**

Chute : max 15m

Débit : max 12m<sup>3</sup> /h . [48]

#### IV. 2.1.4 Caractéristiques de la pompe immergée

##### a. Données techniques :

Les caractéristiques techniques se trouvent dans le tableau ci-après :

**Tableau .IV.7** : Les caractéristiques techniques de la pompe immergée.[48]

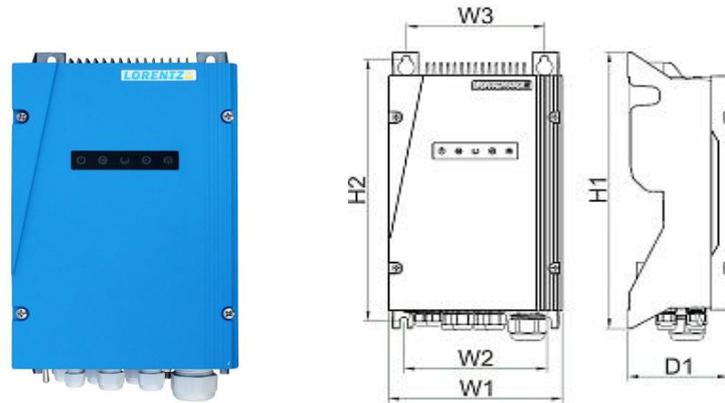
Marque LORENTZ	Moteur ECDRIVE 600-C	Contrôleur PS2-600
Type : Pompe immergée PS2-600C-SJ8-5	Puissance nominale : 0,70 kW	Type : PS2-600
Débit maxi : 12 m <sup>3</sup> /h	Efficacité max. : 92 %	Puissance max : 0,7 kW
Diamètre de forage Min 4,0 in	Immersion maxi : 250 m	Tension d'entrée maxi : 150 V
Prix (DA) : 300463,13	Vitesse du moteur : 900 – 3300 rpm	Intensité du moteur maxi : 13 A
		Efficacité maxi : 98 %
		Température ambiante :-40 à 50 °C

**a. Caractéristiques physiques :**

Dans la figure IV.6. Nous représentons une photo graphique d'une pompe immergée de la référence PS2-600C-SJ8-5 et de son contrôleur PS2-600, avec une coupe verticale.[48]

**Tableau.IV.8 :** Caractéristiques physiques de Contrôleur

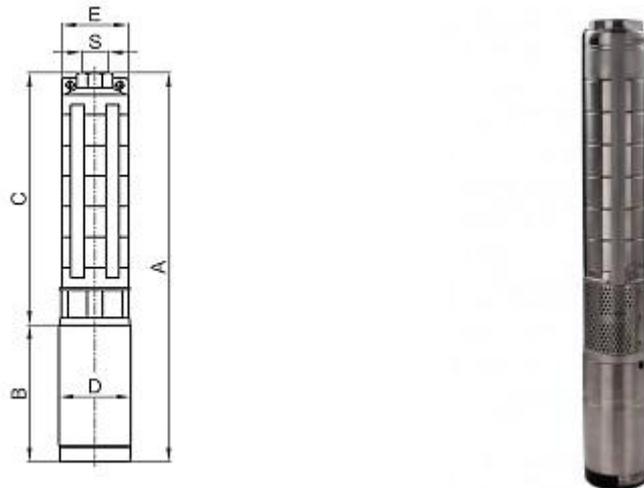
<b>Contrôleur</b>
<b>H<sub>1</sub>= 352 mm</b>
<b>H<sub>2</sub>=333 mm</b>
<b>W<sub>1</sub>=207 mm</b>
<b>W<sub>2</sub>=170 mm</b>
<b>W<sub>3</sub>=164 mm</b>
<b>D<sub>1</sub>=124 mm</b>
<b>Poids net : 5.6 Kg</b>



**Fig .IV.5:** Caractéristiques physiques de Contrôleur

**Tableau.IV.9 :** Caractéristiques physiques de la pompe

<b>Pompe</b>
<b>A=600 mm</b>
<b>B= 185 mm</b>
<b>C= 415 mm</b>
<b>D= 96 mm</b>
<b>E= 98 mm</b>
<b>S= 2 in</b>
<b>Poids net : 13 Kg</b>



**Fig.IV.6 :** Caractéristiques physiques de la pompe

#### IV. 7.2 Dimensionnement de la motopompe :

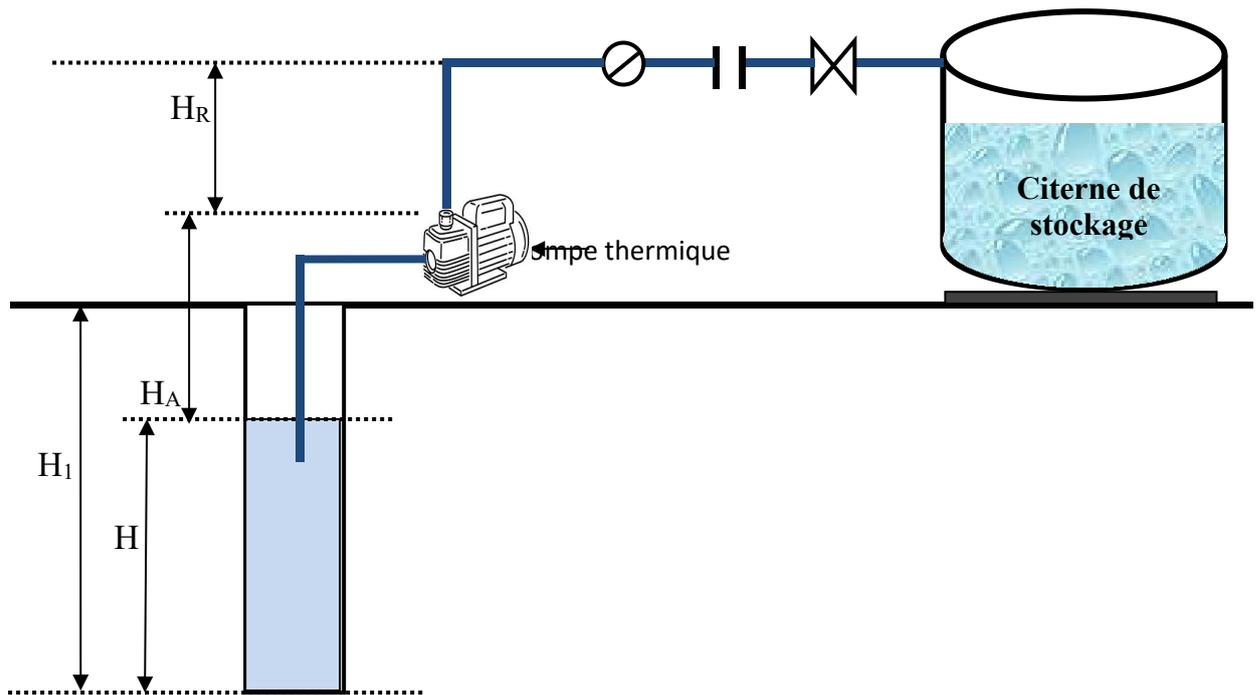


Fig.IV.7: Schéma du réseau d'adduction avec une motopompe

#### IV. 7.2.1 Détermination du débit horaire de la pompe $Q_h$ en ( $m^3/h$ ):

$$Q_h \leq Q_{ex}$$

$Q_{ex}$  : Débit exploitable ( $20 m^3/h$ ).[33]

#### IV. 7.2.2 Calcul de la Hauteur manométrique totale HMT :[41]

$$HMT = H_A + H_R$$

$$HMT = 5 + 6 = 11m$$

#### IV. 7.2.3 Choix de la motopompe :

Une motopompe est une pompe de surface couplée à un moteur essence ou diesel pour une totale autonomie. Débit, pression, hauteur de refoulement, HMT et passage granulaire sont ses principales caractéristiques. Utilisée pour pomper des eaux d'étang, d'inondation ou de piscine, elle s'utilise aussi pour l'arrosage.[49]



**Fig.IV.8:** Motopompe haute pression DIESEL JET 70 D WORMS-ROBIN-SUBARU débit 400 l/m [50]

#### IV. 7.2.4 Caractéristiques de la motopompe

Les caractéristiques techniques se trouvent dans le tableau ci-après : [50]

**Tableau.IV.10 :** Les caractéristiques techniques de la motopompe

<b>Pompe</b>	
Type de pompe	Auto-amorçant
Ø du raccord d'aspiration	40 mm
Ø du raccord de refoulement	40 mm
Débit maximum	400 litres/min (24 m <sup>3</sup> /h)
Pression	5 bars
Hauteur d'aspiration maximum	8 m
Hauteur manométrique Totale	50 m
<b>Moteur</b>	
Type de moteur	YANMAR L100 - 4 temps diesel
Carburant	GNR (Gasoil Non routier) ou Gasoil automobile
Capacité du réservoir	3,2 litres
Autonomie moyenne	4 h
Poids	52 kg

#### IV. 7.3 Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour :

Pour transférer à une certaine hauteur d'élévation (en m) une certaine quantité d'eau Q en (m<sup>3</sup>/jour) avec une pompe électrique de rendement  $\eta_G$  se calcule ainsi :

$$E_{elec} = \frac{C_h \times Q \times HMT}{\eta_G}$$

$C_h$  : Constante hydraulique  $C_h=2.725$ (Cette constante hydraulique dépend de la gravité et de la densité de l'eau)

$\eta_G$  : Rendement du groupe de pompage

$$\eta_G = \eta_{moteur} \times \eta_{pompe}$$

$\eta_{moteur}$  : Rendement moteur de 75% à 85% on prendra 80% .

$\eta_{pompe}$  : Rendement pompe de 45% à 65% on prendra 55% .[42]

$$\eta_G = 0.8 \times 0.55 = 0.44$$

$$E_{elec} = \frac{2.725 \times 65 \times 46.39}{0.44} = 18674Wh/j$$

$$E_{elec} = 18.6KWh$$

#### IV. 7.4 Estimation de l'ensoleillement

Selon les données des plusieurs sites officiels de carte d'ensoleillement de la région de El Tarf où on va installer notre système. Nous a donné un ensoleillement moyen de 7.8 KW /m<sup>2</sup>/j.[43]

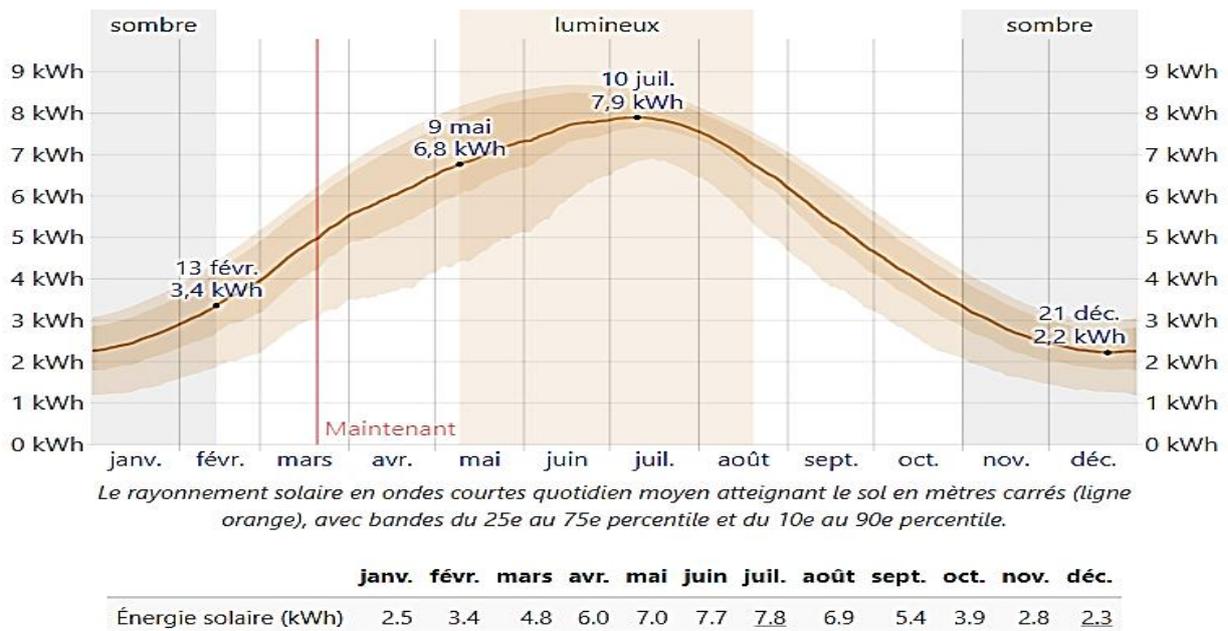


Fig.IV.9 : Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen à El Tarf.

#### IV. 8 Dimensionnement du champ photovoltaïque

Dans notre application, le panneau solaire choisi est de type Poly cristallin 250Wc.

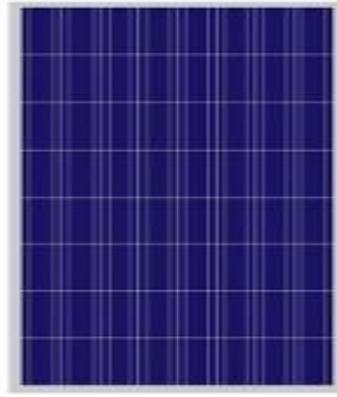
Ce panneau solaire photovoltaïque permet une large gamme d'applications pour transformer l'énergie du soleil en électricité pour les sites isolés ou pour la vente à EDF ou autre distributeur d'énergie.

Ce panneau solaire bénéficie d'une fabrication à la pointe de la technologie, qui lui confère un rendement élevé et une excellente durée de vie (Garantie 25 ans), (90% de la puissance nominale annoncée) et une garantie constructeur de 3 ans pièces et main d'œuvre.[51]

- **Caractéristiques du panneau**

Tableau.IV.11: Caractéristiques électriques du panneau solaire

Caractéristiques électriques
Puissance crête (WC) selon CTS* : 250 WC
Tolérance de la puissance : ±3 %
Courant à puissance max. ( $I_{max}$ ) : 8,20 A
Tension à puissance max. ( $V_{max}$ ) : 30,90 V
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) : 8,80A
Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) : 37,70 V
T°C d'utilisation : -40°C à +85°C



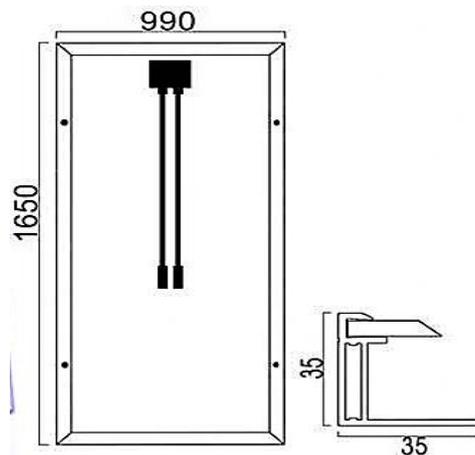
**Fig.IV.10** : le panneau solaire Poly cristallin 250Wc

Conditions Test Standard (CTS), définies comme suit :

- puissance du rayonnement de 1000 W/m<sup>2</sup> à une densité spectrale de 1.5 AM (ASTM E892).
- Température de cellule de 25 °C [51]

**Tableau.IV.12:** Caractéristiques physiques du panneau solaire

Caractéristiques physiques
Longueur : 1650 mm
Largeur : 992 mm
Épaisseur : 35 mm
Poids : 19 Kg



**Fig.IV.11** : Caractéristiques physiques du panneau solaire Poly cristallin 250Wc.

#### IV. 8.1 Calcul de la puissance crête du système photovoltaïque $P_{cr}$ .[36]

L'ensoleillement moyen de site d'installation :  $E_{ns} = 7.8KWh/j$

$$P_{cr} = \frac{E_{elec}}{F_c \times E_{ns}}$$

$$P_{cr} = \frac{18600}{0.6 \times 7.8}$$

$$P_{cr} = 3974.35 W_c$$

#### IV. 8.2 Tension du système :

D'après le tableau III.5 de tension de système photovoltaïque selon la puissance crête, la tension de système convenable est :  $U_{sys}=48$  [33]

#### IV. 8.3 Calcul de nombre de panneaux solaire :

$$N_{bp} = \frac{P_{cr}}{P_p}$$

$$N_{panneaux} = \frac{3974.35}{250}$$

$$N_{panneaux} = 15.89 \approx 16$$

#### IV. 8.4 Calcul de nombre de panneaux en série $N_{ps}$ :

$$N_{ps} = \frac{U_{sys}}{V_{mp}}$$

$$N_{ps} = \frac{48}{30.9}$$

$$N_{ps} = 1.55$$

Donc :  $N_{ps} = 2$

#### IV. 8.5 Calcul de nombre de panneaux en parallèle $N_{pp}$ :

$$N_{pp} = \frac{N_{panneaux}}{N_{ps}}$$

$$N_{pp} = \frac{16}{2}$$

$$N_{pp} = 8$$

IV. 8.6 Schéma de la configuration des panneaux PV :

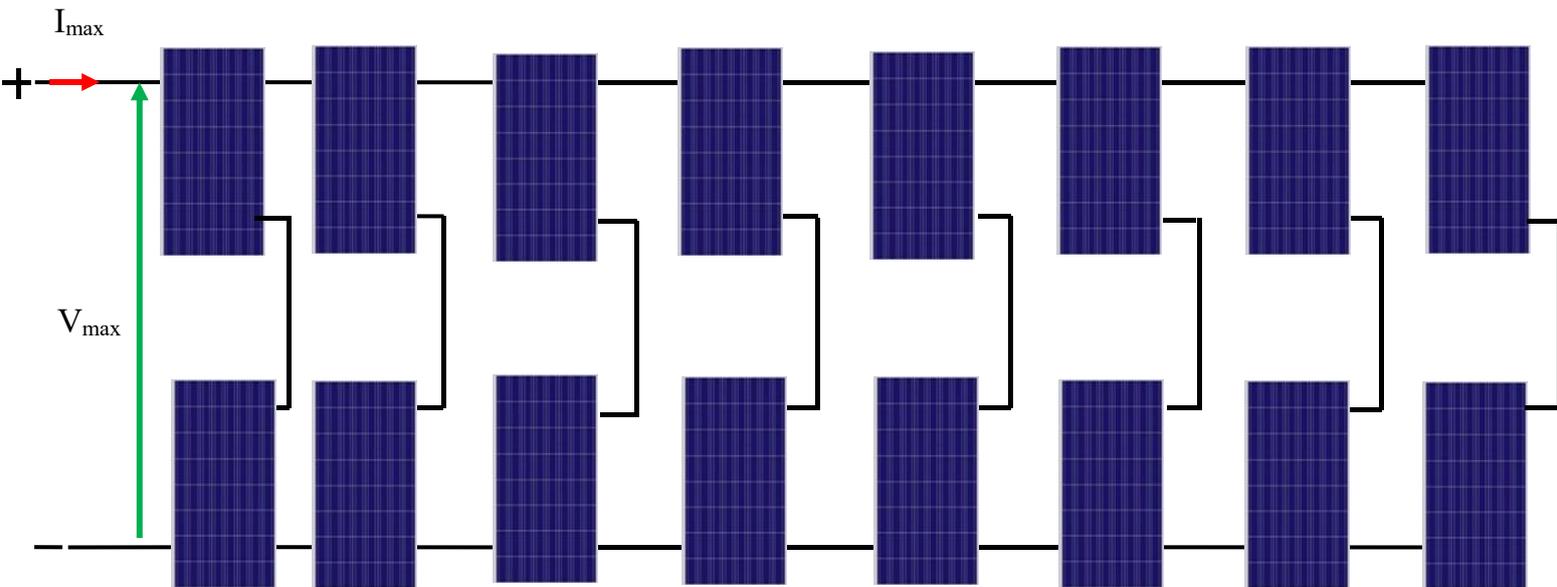


Fig. IV.12.Schéma de la configuration des panneaux PV

- Les caractéristiques électriques du générateur PV installées données dans le tableau ci-après :[33]

Tableau. IV. 13 : Les caractéristiques électriques du générateur PV

Nombre de panneaux	Configuration		Intensité de générateur	Tension de générateur
	$N_p$	$N_s$	$I_{Mppt}$ (A)	$V_{Mppt}$ (V)
16	8	2	65.6	61.8

- Compatibilité du contrôleur avec le générateur PV installée données dans le tableau ci-après :

Tableau .IV.14 : Compatibilité du contrôleur avec le générateur PV

	Valeur	Vérification
Tension circuit ouvert du générateur PV	$V_{co\ max} = 75.4\ V$	Ok

#### IV. 9 Calcul de section du câble :

$$\frac{2 \times \rho \times L \times I_{max}}{S} \leq \Delta V_L \times U(V)$$

Et de lui :

$$S \geq \frac{2 \times \rho \times L \times I_{max}}{\Delta V_L \times U(V)}$$

$\Delta V_L$  : Chute de tension limite, la chute de tension maximale admissible exigée par la norme UTE C15712 relative aux installations ne doit pas excéder 3% de la tension nominale dans la partie DC. On prendra 3 % pour faire le calcul.

$\rho$  : 0.017  $\Omega \cdot \text{Mm}^2 / \text{m}$

$L=7\text{m}$  : Afin de réduire les chutes de tension entre le générateur PV et le contrôleur

$I_{max}=49\text{A}$  : Courant max du générateur

$$S \geq \frac{2 \times 0.017 \times 7 \times 65.6}{0.03 \times 75.4}$$

$$S \geq 6.9$$

D'après ce tableau III.7 on retiendra une section normalisée en cuivre de 10 mm<sup>2</sup> et d'intensité maximale admissible 46 A.[44]

#### IV. 10 Equipements de protection :

Le coffret de protection est indispensable sur tous les sites de pompage dont la tension d'utilisation (au niveau de la pompe) est supérieure à 120 V. L'installation de ce coffret concerne donc presque tous les pompages, car cette tension est atteinte même sur les petites installations (4 panneaux de 250 Wc). Le coffret de protection sert à :

- Protéger les équipements des surcharges (fusibles).
- Protéger l'installation des impacts de foudre et des surtensions (parafoudre).
- Créer un point central de mise à la terre.[52]

#### Fusible pour protection des branches

La protection d'un champ photovoltaïque est réalisée à l'aide de fusible installé sur chaque branche. Il sera placé à la sortie de chaque branche parallèle et sera choisi en tenant compte de :

La tension de fonctionnement d'un fusible doit être de 1,15 fois la tension à vide dans les conditions STC des modules raccordés en série :  $1.15 \times V_{co} \times N_{ps}$

$$\text{Tension assignée du fusible} \geq 1.15 \times V_{co} \times N_{ps} = 86.7$$

Le calibre des fusibles doit être compris entre 1,5 et 2 fois le courant  $I_{sc}$  (STC) de chaque chaîne

$$1.5 \times I_{cc} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc}$$

$$1.5 \times 8.8 \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times 8.8$$

$$13.2 \leq \text{calibre fusible} \leq 17.6$$

Nous choisirons un fusible pour ce calibre. [44]

### Fusible pour protection générale

Tension assignée du fusible  $\geq 86.7$  V

$$1.5 \times I_{cc} \times N_{pp} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc} \times N_{pp}$$

$$1.5 \times 8.8 \times 8 \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times 8.8 \times 8$$

$$105.6 \leq \text{calibre fusible} \leq 140.8$$

### Interrupteur –sectionneur

Il sera placé juste à la sortie du générateur et servira entre autres d'isoler électriquement le champ PV afin de permettre des opérations de maintenance en sécurité. Il doit être dimensionné selon la règle suivante :

Tension assignée du fusible  $\geq 86.7$  V

$$\text{Intensité nominale} \geq 1.5 \times I_{cc} \times N_{pp}$$

$$\text{Intensité nominale} \geq 105.6$$

Nous choisirons un interrupteur sectionneur de type ; d'intensité nominale 80 A.[44]

### Parafoudre

Le parafoudre permet de protéger contre les risques de surtensions éventuelles dans l'installation. Pour prévenir les surtensions dues à la foudre, la protection contre les risques

de surtensions induites dans le circuit de la partie à tension alternative de l'installation est important ainsi que la partie à tension continue.[44]

### Mise à la terre

La mise à la terre est une protection contre tout accident électrique éventuel sur une personne en contact avec un appareil présentant un défaut électrique et aussi une protection pour le matériel mis en place dans le système. On relie donc tout l'équipement électrique et les parties métalliques à la terre à l'aide d'un conducteur de faible résistance (5 ohms), de sorte que le courant électrique en défaut soit évacué dans la terre. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la prise de terre et la barrette de mesure est de 16 mm<sup>2</sup> en cuivre isolé ou 25 mm<sup>2</sup> en cuivre nu. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la barrette de mesure et aux équipements est un câble en cuivre de couleur jaune-verte de 6 mm<sup>2</sup>. [44]

## IV. 11 Analyse économique

### IV. 11.1 Analyse économique du pompage photovoltaïque :

Nous représentons dans le tableau IV.11 les couts d'investissement du système de pompage photovoltaïque.

**Tableau .IV.15 :** les couts d'investissement du système de pompage photovoltaïque.

Désignation	Prix unitaire	Quantité	Montant (DA)
Réservoir	97 167,00	1	97 167,00
Filtre	800,00	1	800,00
Coude 90°	604,00	3	1812,00
Robinet d'arrêt	1 965,00	1	1 965,00
Pompe + contrôleur	4 868,00	1	4 868,00
Capteur de niveau	1 475,00	2	2950,00
Panneau	36 874,00	16	589 984,00
Câbles + accessoires	20000,00	1	20000,00
fusible	150,00	1	300,00
Interrupteur sectionneur	2 845,00	1	2 845,00
Parafoudre	2 900,00	1	2 900,00
Installation du système	150000,00	1	150000,00

Prix total	875591,00(DA)
------------	---------------

### IV.11.2 Analyse économique de la motopompe thermique

Dans le tableau IV.12 nous illustrons les couts d'investissement du système de pompage qui utilise la motopompe thermique.

**Tableau .IV.16 :** les couts d'investissement du système de pompage qui utilise la motopompe thermique

Désignation	Prix unitaire	Quantité	Montant (DA)
Réservoir	97 167,00	1	97 167,00
Filtre	800,00	1	800,00
Coude 90°	604,00	3	1812,00
Groupe thermique	120000,00	1	120000,00
Robinet d'arrêt	1 965,00	1	1 965,00
Pompe + contrôleur	4 868,00	1	4 868,00
Capteur de niveau	1 475,00	2	2950,00
Compteur d'eau	15000,00	1	15000,00
Câbles + accessoires	20000,00	1	20000,00
Installation du système	30000,00	1	30000,00

Prix total	294562,00 (DA)
------------	----------------

### IV.12. Conclusion

Le quatrième chapitre a été entièrement consacré à une étude pratique de ce type de pompage d'eau sur la ville d'El Besbes de la wilaya de Tarf. Nous avons dimensionné un système de pompage PV afin d'irriguer une surface d'un hectare de Tomate.

## Conclusion générale

Ce travail a été consacré à une étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans le site d'El Tarf. On peut rapidement comprendre et justifier l'intéressement à l'énergie solaire pour pomper l'eau.

D'abord, l'énergie solaire photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. D'autre part, la demande d'énergie électrique, essentiellement pour les besoins des zones rurales et les sites isolés, ne cessent d'augmenter, en particulier, les systèmes de pompage d'eau. Classiquement sur ce type de site, on utilise l'énergie conventionnelle par groupe électrogène.

Ce travail a été consacré à l'étude, par simulation, d'un système de pompage d'eau (au fil de soleil) couplé à un générateur photovoltaïque. Donc par le biais de ce mémoire, on a pu voir et constater à quel degré l'utilisation de l'énergie solaire dans différentes applications tel que le pompage d'eau est très importante. Dans un premier temps on a présenté les généralités sur l'énergie photovoltaïque ainsi que les types des systèmes photovoltaïques existants et leurs applications et leurs avantages et inconvénients.

Nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque. L'objectif était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension et puissance-tension.

Finalement, Les résultats de fonctionnement du système étudié ont été présentés dans le quatrième chapitre.

## Bibliographie

- [1] H.HAFIDHA et B.YAMINA « Simulation et Optimisation des performances d'un système hybride intégrant des Energies renouvelables pour la génération d'Electricité » Master en Génie Mécanique, Université de Bouira 2016
- [2] S. BELAKEHAL « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE 2010
- [3] D.Meriem « Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairage sur le rendement d'une cellule PV » MASTER EN PHYSIQUE DES MATERIAUX, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI 2019
- [4] H. KANCHEV: « Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain » Thèse de Doctorat, PRES Université Lille Nord-de-France 2014
- [5] Mme Azizi Amina « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride » Thèse de Doctorat, Université BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2019
- [6] enrj.renouvelables [en ligne]. [réf. du 24/03/2023]. disponible sur : « [http://enrj.renouvelables.free.fr/energie\\_solaire\\_photovoltaïque.html](http://enrj.renouvelables.free.fr/energie_solaire_photovoltaïque.html) »
- [7] C. DARRAS, « Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE », Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [8] « La cellule photovoltaïque ». Document technique, Centre de recherche de Développement De l'ECAM.
- [9] K.ZAKARIA « Etude d'une centrale solaire thermique » Master en Génie Mécanique, Université de ANNABA 2017
- [10] solarpedia [en ligne]. [réf. du 24/04/2023]. disponible sur : « [http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Rayonnement\\_solaire](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Rayonnement_solaire) »
- [11] S.KHECHAFI et S. BENLAACHI « Étude et analyse des performances d'un générateur photovoltaïque pour un système autonome » Master en Electrotechnique, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES -TLEMCEM-2019
- [12] energie28.blogspot [en ligne]. [réf. du 22/03/2023]. disponible sur : « <http://energie28.blogspot.com/2016/11/rayonnements-direct-diffus-et-reflechi.html> »

- [13] SALAHEDDINE BENSALAM, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Pour l'obtention du diplôme de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 06/01/2011.
- [14] Mlle Ayache Khedidja, « Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique », Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 30/09/2014.
- [15] HELALI KAMELIA, Mémoire de Magister en génie électrotechnique, Université MOULOUD MAMMERI De TIZI-OUZOU, 25/06/2012.
- [16] MOUHAMED MEZIANI Zahra, « MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES », Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2012.
- [17] AMARA KARIMA, Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, Mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI De TIZI-OUZOU, 2014/2015.
- [18] kartable[en ligne].[réf.du 23/03/2023].disponible sur : «<https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/methode/decrire-le-fonctionnement-dune-cellule-photovoltaique/22955> »
- [19] pngegg[en ligne].[réf.du 24/04/2023].disponible sur : «<https://www.pngegg.com/fr/search?q=panneau+solaire> »
- [20] SaidChikha, « Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques », thèse de Magister option Commande, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 2011/2012.
- [21] GARAH YAAKOUB « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique » Master de Réseaux Électriques, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi -2015
- [22] Hamel Abderraouf « Evaluation de performance d'un système photovoltaïque à injection réseau. » Master de Génie Électrique, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi –2017

- [23] acpoitiers[en ligne].[réf.du 25/03/2023].disponible sur : «[https://ww2.acpoitiers.fr/electrotechnique/sites/electrotechnique/IMG/pdf/energie\\_sol aire\\_photovoltaique.pdf](https://ww2.acpoitiers.fr/electrotechnique/sites/electrotechnique/IMG/pdf/energie_sol aire_photovoltaique.pdf) »
- [24] Bendjellouli Zakaria « contribution a la modélisation d'une cellule solaire. » Magistère En : Micro-électronique-photovoltaïque, université de Bechar, 28 / 06 / 2009
- [25] M.S. Aït Cheikh et al. « Maximum power point tracking using a fuzzylogic control scheme », Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie,2007.
- [26] T. ESRAM, Patrick L. « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques ».
- [27] AMEUR Khaled. Contribution to the Study of a Standalone Photovoltaic System with a New Tracking Control of the Global MPP. University Amar Telidji of Laghouat, "April 2018"
- [28] M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [29] M.A.E Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », These de Doctorat, Université Louis Paster, 2002.
- [30] J.P.Hautier, J.P.Caron, « Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande », Edition Technip, 1999.
- [31] A. BELHOCINE et S.ZAIDI« Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012
- [32] Amine BELAID, « Etude et conception d'une pompe Centrifuge », mémoire de Master 2017, Université de Biskra.
- [33] Bessoltane Ismail & HamitIssakaDoudoua . «Etude technico-économique de système de pompage photovoltaïque, en comparaison aux autres productions d'eau, cas de la région de Mostaganem »MASTER EN GENIE ELECTRIQUE,Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem2019
- [34] BENDJOUDI Faouzi et LAKHDARI Farid « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries » Master en Electrotechnique, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAÏA 2014
- [35] Jean-Loup PRENSIER – Christophe DAUX, « La chaîne d'énergie du pompage de l'eau », Edité le 17/05/2006

- [36] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla » MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR – BATNA 2008
- [37] DEGLA Mohammed larbi-BEN AHMED Bachir, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque », Mémoire de master 2017, UniversitékasdiMerbah Ouargla.
- [38] energieplus [en ligne].[réf.du 28/03/2023].disponible sur : «<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>. »
- [39] cu-elbayadh [en ligne].[réf.du 08/04/2023].disponible sur : « <https://www.cu-elbayadh.dz/ar/wp-content/uploads/2020/03/aep.pdf> »
- [40] unilim[en ligne].[réf.du 29/03/2023].disponible sur : « [https://www.unilim.fr/pages\\_perso/thierry.cortier/Hydraulique\\_cours/co/Hydraulique\\_-\\_De\\_la\\_mecanique\\_des\\_fluides\\_a\\_la\\_transmission\\_de\\_Puissance\\_65.html](https://www.unilim.fr/pages_perso/thierry.cortier/Hydraulique_cours/co/Hydraulique_-_De_la_mecanique_des_fluides_a_la_transmission_de_Puissance_65.html) »
- [41] univ-lyon2 [en ligne].[réf.du 30/03/2023].disponible sur : «[http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/intro\\_cpp\\_builder.pdf](http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/intro_cpp_builder.pdf) »
- [42] DEBBECHE Mohammed & TOUAHRI Abdelfattah & NECIBI Laid « ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE SUR UN SITE DE LA WILYA D'EL-OUED » MASTER en Génie Electrique ,UniversitéEchahidHamma Lakhdar d'El-Oued 2019
- [43] weatherspark [en ligne].[réf.du 4/04/2023].disponible sur : « <https://fr.weatherspark.com/y/58634/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-El-Tarf-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e> »
- [44] LAFIA SEIDOU Imorou, « Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de adjakpata »,Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2ie avec le grade de master, Promotion [2015/2016] Institut International d'Ingénierie. BURKINA.
- [45] wikipedia[en ligne].[réf.du 2/04/2023].disponible sur : « [https://fr.wikipedia.org/wiki/Besbes\\_\(El\\_Tarf\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Besbes_(El_Tarf)) »
- [46] cder.dz [en ligne].[réf.du 12/04/2023].disponible sur : « [https://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/icpwe\\_10.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/nspeciauxpdf/icpwe_10.pdf) »
- [47] pompe-moteur[en ligne].[réf.du 12/04/2023].disponible sur : « <https://www.pompe-moteur.fr/blog/comment-dimensionner-une-pompe-n8> »
- [48] myshop-solaire[en ligne].[réf.du 14/04/2023].disponible sur : « [https://cdn.myshop-solaire.com/myshop\\_images/divers/ps2\\_600\\_c-js8-5.pdf](https://cdn.myshop-solaire.com/myshop_images/divers/ps2_600_c-js8-5.pdf) »

- [49] motopompe-incendie[en ligne].[réf.du 15/04/2023].disponible sur : « <https://www.motopompe-incendie.com/pompes-incendie/comment-choisir-une-motopompe-incendie-thermique/> »
- [50] gt-outillage [en ligne].[réf.du 15/04/2023].disponible sur : « <https://www.gt-outillage.com/motopompe-haute-pression-diesel-jet-70-d-worms-robin-subaru-debit-400-litres-min.htm> »
- [51] solar-kit [en ligne].[réf.du 16/04/2023].disponible sur : « <http://www.solar-kit.com/Panneau-solaire-polycristallin-250Wc-24Vdc> »
- [52] mediatheque.agencemicroprojetskit [en ligne].[réf.du 20/04/2023].disponible sur : « [https://mediatheque.agencemicroprojets.org/wp-content/uploads/acf\\_pompage\\_solaire\\_conception\\_et\\_realisation\\_de\\_la\\_partie\\_electrique\\_du\\_pompage\\_guide\\_2020.pdf](https://mediatheque.agencemicroprojets.org/wp-content/uploads/acf_pompage_solaire_conception_et_realisation_de_la_partie_electrique_du_pompage_guide_2020.pdf) »