

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR - EL OUED  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : électrotechnique  
Spécialité :  
Commande électrique

## THÈME

**Implémentation d'un Système d'Irrigation  
Electrique Alimenté par l'Energie Photovoltaïque**

*Présenté par:*

***NINA.NACEREDDINE***

***MOUSTEFAOUL.SOUFIANE***

Soutenu publiquement le 03/06/ 2024

Devant le Jury composé de :

|                           |                  |                             |
|---------------------------|------------------|-----------------------------|
| <b>Dr. Kechida Ridha</b>  | <b>Président</b> | <b>Université d'El Oued</b> |
| <b>Dr. Mahni Tidjani</b>  | <b>Examineur</b> | <b>Université d'El Oued</b> |
| <b>Pr. Youcef Bekakra</b> | <b>Encadreur</b> | <b>Université d'El Oued</b> |

Mémoire préparé au sein du Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des  
Ressources Energétiques Sahariennes

Année universitaire : 2023 – 2024

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله الذي علم الإنسان ما لم يعلم والصلاة والسلام على  
سيدنا محمد الذي بعث معلما وعلى اله وصحبه الذين اتبعه  
بإحسان وبعد نقدم لكم اليوم هذه المذكرة ونحن نأمل ونطمع  
أن تنال إعجابكم جميعا ونتمنى من الله أن نكون وفقنا في

تقديمها وكتابتها

# *Remerciements*

*Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour cela*

*Faites ce travail.*

*Nous remercions nos mères et nos pères pour tout ce qu'ils ont fait pour nous*

*Pour nous, pour leurs efforts et leur soutien dans nos études.*

*Nous remercions notre superviseur, le professeur Youcef Bekakra, de nous avoir accueillis*

*Supervisé la préparation de notre projet d'étude final*

*Sans oublier de remercier tous les professeurs du département Génie Électrique de l'Université Hamma Lakhdar, Province d'El Oued*

*Leurs précieux conseils.*

*Un merci spécial à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à notre travail.*

# *Dédicaces*

*À ceux qui ont le mérite après Dieu d'avoir réalisé cet exploit : À mon cher père, dont le soutien illimité et le grand amour ont toujours été pour moi une source d'inspiration.*

*À ma chère mère, qui m'a appris la patience et la diligence grâce à ses efforts et à ses soins continus.*

*À mes frères et sœurs, qui ont toujours été mon soutien et mon soutien moral, et qui ont partagé ma joie et mon anxiété à chaque étape de ma vie.*

*À mes amis et collègues, qui m'ont apporté soutien et soutien, et qui n'ont pas lésiné sur moi par leurs précieux encouragements et conseils.*

*À tous ceux qui ont contribué à mon parcours scientifique, que ce soit par un mot gentil, des conseils utiles ou un soutien moral, je vous dédie cet ouvrage en guise d'expression de ma profonde gratitude. Puissiez-vous toujours être une aide et un soutien pour moi.*

**NACEREDDINE**

**SOUFIANE**

# Sommaire

---

*Remerciements*  
*Dédicaces*  
*Sommaire*  
*Liste des figures*  
*Résumé*

Introduction générale:.....1

## **Chapitre I: Généralités sur le système d'irrigation**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.1. Introduction.....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>I .2. Système d'irrigation .....</b>                                     | <b>2</b>  |
| <b>I .3. Composants du système .....</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>I .4. Types de système d'irrigation .....</b>                            | <b>4</b>  |
| <b>I .4.1. Irrigation goutte à goutte .....</b>                             | <b>4</b>  |
| <b>I.4.1.1 Avantages du système d'irrigation goutte à goutte.....</b>       | <b>4</b>  |
| <b>I.4.1.2. Inconvénients du système d'irrigation goutte à goutte .....</b> | <b>5</b>  |
| <b>I.4.2. Irrigation surface .....</b>                                      | <b>6</b>  |
| <b>I.4.2.1. Avantages du système d'irrigation de surface : .....</b>        | <b>7</b>  |
| <b>I.4.2.2. Inconvénients du système d'irrigation de surface.....</b>       | <b>7</b>  |
| <b>I.4.3. Irrigation avec asperseurs.....</b>                               | <b>8</b>  |
| <b>I.4.3.1. Avantages du système d'irrigation par aspersion .....</b>       | <b>8</b>  |
| <b>I.4.3.2. Inconvénients du système d'irrigation par aspersion .....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>I.5. Types des contrôleurs d'irrigation .....</b>                        | <b>9</b>  |
| <b>I.5.1. Boucle de régulation ouverte .....</b>                            | <b>10</b> |
| <b>I.5.2. Boucle de régulation fermée.....</b>                              | <b>10</b> |
| <b>I.6. Système d'irrigation intelligent .....</b>                          | <b>10</b> |
| <b>I.7. Les bénéfices du système d'irrigation intelligent .....</b>         | <b>11</b> |
| <b>I.8. Composants de l'irrigation électrique .....</b>                     | <b>12</b> |
| <b>I.9. Conclusion .....</b>  | <b>13</b> |

## **Chapitre II : Système Photovoltaïque**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.1. Introduction .....</b>                            | <b>14</b> |
| <b>II. 2 . Energie solaire .....</b>                       | <b>14</b> |
| <b>II.3. Energie solaire photovoltaïque.....</b>           | <b>15</b> |
| <b>II.4. Historique sur l'énergie photovoltaïque .....</b> | <b>15</b> |

# Sommaire

---

|  |    |
|--|----|
| II.5. La conversion de la lumière en électricité.....  | 16 |
| II.6. L'effet photovoltaïque .....   | 16 |
| II.7. Les différents types des cellules photovoltaïques.....   | 17 |
| II.7.1. La cellule au silicium Amorphe .....   | 17 |
| II.7.2. Les cellules poly-cristallines .....   | 18 |
| II.7.3. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin .....                                     | 18 |
| II.8. Principe de fonctionnement.....  | 19 |
| II.9. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV .....   | 20 |
| II.10. Les Paramètres des cellules photovoltaïques .....   | 21 |
| II.10.1. Courant de court-circuit, ( $I_{CC}$ ) .....  | 21 |
| II.10.2. Tension à circuit ouvert, ( $V_{CO}$ ).....   | 21 |
| II.10.3. Puissance maximale ( $P_{max}$ ) .....  | 22 |
| II.10.4. Facteur de qualité (FQ) .....   | 22 |
| II.10.5. Facteur de forme (FF).....  | 23 |
| II.10.6. Rendement d'une cellule solaire( $\eta_c$ ) .....   | 23 |
| II.11. Schéma électrique équivalent .....  | 23 |
| II.11.1. Cellule PV idéale .....   | 23 |
| II.11.2. Cellule PV réelle.....  | 24 |
| II.12. Regroupement des cellules.....  | 26 |
| II.12.1. Regroupement en série .....   | 26 |
| II.12.2. Regroupement en parallèle .....   | 27 |
| II.12.3. Regroupement Mixte (série & parallèle).....   | 28 |
| II.13. Constitution des champs PV.....   | 28 |
| II.14. Les matériaux de base de la cellule photovoltaïque .....  | 29 |
| II.14.1. Les semi-conducteurs.....   | 29 |
| II.14.2. Les semi-conducteurs intrinsèques.....  | 29 |
| II.15. Modélisation du Module (panneau) photovoltaïque.....  | 29 |
| II.15.1. Influence de l'éclairement .....  | 29 |
| II.15.2. Influence de la température sur la cellule PV .....   | 30 |
| II.15.3. Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur la cellule photovoltaïque..... | 30 |
| II.15.4. Influence de la résistance série .....  | 31 |

# Sommaire

---

|   |    |
|---|----|
| II.15.5. Influence de la résistance parallèle.....                          | 32 |
| II .16. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)..... | 32 |
| II.16.1. Stratégies de suivi du point de puissance maximale .....           | 32 |
| II .16.2. Optimisation du rendement énergétique du système PV .....         | 36 |
| II .17. Modélisation des convertisseurs Buck-Boost .....                    | 37 |
| II .17.1. Convertisseur Boost .....   | 37 |
| II .17.2. Convertisseur Buck.....   | 39 |
| II .17.3. Convertisseur Buck-Boost .....                                    | 40 |
| II .18. Conclusion.....   | 41 |

## Chapitre III: Réalisation d'un système d'irrigation

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction .....                                       | 42 |
| III.2. Présentation du cahier des charges.....                  | 42 |
| III.3. Les outils matériels.....                                | 42 |
| III.3.1. L'Arduino uno.....                                     | 42 |
| III.3.2. Capteur d'humidité de sol (Soil Moisture Sensor) ..... | 44 |
| III.3.3. La carte LM393 IC.....                                 | 45 |
| III.3.4. Afficheur OLED 1602A .....                             | 46 |
| III.3.5. Le relais (JQC-3FF-S-Z) .....                          | 46 |
| III.3.6. La pompe .....   | 47 |
| III.3.7. Batterie .....   | 48 |
| III.3.8. Panneau photovoltaïque (sosky) .....                   | 49 |
| III.4. La partie matérielle .....                               | 49 |
| III.4.1. Réalisation à base de logiciel FRITZING.....           | 50 |
| III.4.2. Logiciel et programmation.....                         | 51 |
| III.4.3. Explication de la configuration de l'expérience .....  | 53 |
| III.5. Conclusion .....   | 53 |
| Conclusion Générale.....  | 54 |

*Annexe*

*Bibliographies*

# Listes des Figures

---

## Chapitre I: Généralités sur le système d'irrigation

**Figure I.1:** Irrigation goutte à goutte.

**Figure I.2 :** Description d'un système d'irrigation par goutte à goutte.

**Figure I.3 :** Irrigation à bulles.

**Figure I.4 :** Irrigation avec asperseurs.

**Figure I.5 :** Système d'irrigation intelligent.

## Chapitre II : Système Photovoltaïque.

**Figure II. 1 :** Présentation schématique d'une cellule solaire .

**Figure II.2:** conversion de l'énergie solaire en électricité.

**Figure II.3:**Cellule Photovoltaïque amorphe .

**Figure II.4:**cellules poly-cristallines .

**Figure II.5:** cellule photovoltaïque en silicium monocristallin .

**Figure II.6:** fonctionnement de la cellule pv .

**Figure II.7 :**Schéma équivalent d'une photopile idéale .

**Figure II.8 :**Constitution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque .

**Figure II.9 :** Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .

**Figure II.10 :** Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque .

**Figure II.11:**Mise en série des panneaux solaires .

**Figure II.12:**Mise en parallèle des panneaux solaires .

**Figure II.13:** schémas association mixte des panneaux .

**Figure II.14:** Constitution d'un générateur PV .

**Figure II.15:** Caractéristique courant –tension et puissance –tension d'un module PV

**Figure II.16:** Caractéristique puissance –tension et courant –tension d'un module PV

**Figure II.17 :**Influence simultanée de  $G$  et  $T$  sur les caractéristiques de la cellule PV.

**Figure II.18:** Comportement du module selon la résistance en série .

**Figure II.19:** Comportement du module selon la résistance en parallèle.

**Figure II.20 :** Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  et fonctionnement de la méthode P &O.

**Figure II.21:** Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.

**Figure II.22 :** Caractéristique  $P_{pv} (V_{pv})$  et fonctionnement de la méthode Conductance Incrémentielle.

## *Listes des Figures*

---

**Figure II.23** : Organigramme de la méthode conductance incrémentielle.

**Figure II.24** : Circuit électrique du convertisseur Boost .

**Figure II.25** :Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé .

**Figure II.26** :Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert .

**Figure II.27** : Circuit électrique du convertisseur Buck.

**Figure II.28** : Circuit électrique du convertisseur Buck-Boost .

### **Chapitre III: Réalisation d'un système d'irrigation**

**Figure III.1** : carte Arduino Uno .

**Figure III.2** : composant de la carte Arduino Uno .

**Figure III.3** : Capteur d'humidité de sol.

**Figure III.4** : La carte LM393 IC .

**Figure III.5** : Afficheur OLED 1602A .

**Figure III.6** : le relais JQC-3FF-S-Z .

**Figure III.7** : La pompe d'eau R385 12V 3M .

**Figure III.8** : Batterie .

**Figure III.9** : Panneau photovoltaïque (sosky) .

**Figure III.10** : schéma câblage de la carte zone de captage.

**Figure III.11** : schéma électrique de la carte zone de captage.

**Figure III.12** : schéma câblage de la carte centrale de contrôle.

**Figure III.13** : schéma électrique de la carte centrale de contrôle.

**Figure III.14** : Logiciel et programmation.

**Figure III.15** : montage global de notre système réalisé.

### Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la mise en œuvre de l'énergie photovoltaïque dans un système d'irrigation, ce qui est très réalisable et abordable. Le projet de système d'irrigation complexe utilise un convertisseur DC/DC contrôlé par MPPT, l'algorithme (P&O) et une carte Arduino Uno connectée à la pompe et au capteur d'humidité. Cependant, le mémorandum recommande et encourage l'adoption de ce système à plus grande échelle et la réalisation de davantage de recherches et d'études pour le développer, car il s'agit de la solution la plus appropriée pour l'avenir de l'agriculture et pour renoncer aux anciennes méthodes traditionnelles.

**Mots clés : énergie photovoltaïque, système d'irrigation, capteur d'humidité du sol, techniques de contrôle ( MPPT) , Arduino Uno .**

### Abstract

The work presented in this thesis concerns the implementation of photovoltaic energy in an irrigation system, which is very feasible and affordable. The complex irrigation system project uses a DC/DC converter controlled by MPPT, the (P&O) algorithm, and an Arduino Uno card connected to the pump and humidity sensor. However, the memorandum recommends and encourages adopting this system on a larger scale and conducting more research and studies to develop it because it is the most appropriate solution for the future of agriculture and dispensing with old traditional methods.

**Keywords: photovoltaic energy, irrigation system, soil moisture sensor, (MPPT) control techniques, Arduino Uno .**

### الملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة يخص تجسيد الطاقة الكهروضوئية في نظام الري وهي مجدية جدا وميسورة التكلفة. ويستخدم مشروع نظام الري المركب من محول DC/DC المراقب بواسطة MPPT و خوارزمية ( P&O ) وبطاقة Arduino Uno المتصلة بالمضخة ومستشعر الرطوبة . إلا أن المذكرة توصي وتشجع باخذ هذا النظام على نطاق أوسع وإجراء المزيد من الأبحاث والدراسات لتطويره لأنه الحل الأنسب لمستقبل الزراعة والاستغناء عن الطرق التقليدية القديمة .

**الكلمات المفتاحية : الطاقة الكهروضوئية ، نظام الري ، حساس رطوبة التربة ، تقنيات التحكم (MPPT) ، Arduino Uno**

## **Introduction Générale**

Les énergies renouvelables sont des énergies aux ressources illimitées qui ont assuré le développement de l'humanité. L'eau et le soleil sont des éléments de notre vie quotidienne. Ils sont particulièrement importants dans les zones reculées ou désertiques ou les zones montagneuses comme le sud de l'Algérie. Ces zones représentent donc un problème de développement durable.

L'énergie solaire (thermique ou photovoltaïque) représente une excellente solution au problème, car l'utilisation de ce type d'énergie pour pomper l'eau, notamment dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec, car c'est précisément le moment. Quand nous pouvons atteindre la puissance solaire maximale (MPPT).

Le pompage de l'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des régions en développement. L'utilisation de systèmes de pompage photovoltaïque (PV) pour l'évacuation des eaux dans ces zones s'avère être une solution très fiable à condition de bien déterminer ses dimensions. Le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, en particulier des systèmes de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèles qui reflètent la réalité et doivent être précis.

Dans notre étude, nous nous intéressons à l'intégration de l'énergie solaire dans un système d'irrigation. C'est la solution idéale proposée pour l'avenir de la Wilaya d'El Oued. C'est pourquoi ce mémoire est divisée en trois chapitres dont le contenu est brièvement résumé ci-dessous :

**Le premier chapitre** donne une description générale du système d'irrigation automatique, et nous avons étudié la situation technique sur l'importance du type d'irrigation utilisé en fonction de la différence des cultures et du sol.

**Le deuxième chapitre** est dédié à la modélisation et à la simulation du système photovoltaïque. L'objectif ici est d'étudier l'effet de l'algorithme de contrôle (P&O) le plus couramment utilisé sur l'amélioration de la puissance produite par le générateur photovoltaïque via un convertisseur DC/DC.

**Le troisième chapitre:** Dans le chapitre pratique, nous avons discuté de la méthode de préparation de l'expérience et des éléments utilisés avec toutes leurs caractéristiques. Nous terminerons par une conclusion générale.

*Chapitre I:*  
*Généralités sur le*  
*système d'irrigation*

**I .1. Introduction :**

L'irrigation, pratique millénaire, est un élément essentiel de l'agriculture, visant à fournir de l'eau de manière contrôlée aux cultures pour favoriser leur croissance et leur développement. Dans les régions où les précipitations naturelles sont insuffisantes ou irrégulières, l'irrigation devient un pilier incontournable pour assurer la production agricole .

L'histoire de l'irrigation remonte à l'Antiquité, où les premières civilisations telles que les Égyptiens, les Mésopotamiens et les Indiens développaient des systèmes sophistiqués pour exploiter les ressources en eau disponibles, notamment les rivières et les systèmes d'irrigation par gravité. Ces méthodes primitives mais ingénieuses ont pavé la voie à une multitude de techniques et de systèmes d'irrigation plus avancés au fil du temps.

Avec l'avènement de la technologie moderne, l'irrigation a connu une révolution, passant des méthodes traditionnelles aux systèmes hautement automatisés et efficaces. Parmi les principaux types de systèmes d'irrigation utilisés aujourd'hui, on trouve l'irrigation par gravité, l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte-à-goutte.

L'irrigation par gravité, également connue sous le nom d'irrigation par inondation, repose sur le principe simple de la circulation de l'eau en utilisant la force de gravité pour la déplacer le long d'un terrain en pente. Cette méthode nécessite la construction de canaux et de systèmes de drainage pour diriger l'eau vers les zones à irriguer. Bien qu'elle soit relativement simple, l'irrigation par gravité peut être inefficace en raison des pertes d'eau par infiltration et d'évaporation .

**I .2. Système d'irrigation :**

L'irrigation est le procédé dans lequel l'eau douce est fournie aux plantes à intervalle réguliers pour leur culture. Que soit une irrigation de surface, une irrigation souterraine, ou par un système de goutte à goutte, tous ces systèmes contribuent à apporter de l'eau aux plantes. L'irrigation s'accompagne parfois d'un apport de nutriment mélangé à l'eau.

L'irrigation est encore exploitée en production agricole dans la protection des plantes contre le gel, la suppression des mauvaises herbes dans les champs de céréales, la prévention de l'érosion du sol par consolidation. En revanche, l'agriculture qui repose uniquement sur les précipitations directes est appelée agriculture pluviale. L'irrigation est souvent étudiée en même

temps que le drainage, lequel consiste en l'élimination naturelle ou artificielles de l'eau de surface et de l'eau de sous-sol à partir d'une zone donnée.

L'irrigation traditionnelle est construite sur un système de canaux à travers lesquels l'eau est distribuée en ruisselets dans des zones agricoles. Dans ses extrémités, les ruisselets atteignent des puits qui sont une porte pour la sortie du surplus d'eau. Cette ancienne méthode tombe en désuétude dans le monde développé et des terres irriguées, encourageant les gouvernements à passer à d'autres systèmes.

Actuellement, l'irrigation a surtout lieu par aspersion, ou au goutte à goutte, traitée avec des systèmes informatisés qui régulent la quantité, l'humidité et la fertilisation des sols. Le système goutte à goutte est très approprié pour les endroits où il y a un manque d'eau. Pour mettre en œuvre un système d'irrigation efficace, les relations eau-plante et eau-sol doivent être soigneusement examinées, y compris par des moyens faisant appel à la biophysique moléculaire.

### **I.3. Composants du système :**

Le système se compose de quatre parties principales:

- **Tout d'abord:** l'unité de mesure de la teneur en humidité : Il s'agit d'un capteur électronique de champ qui est placé dans le sol pour mesurer sa teneur en eau tous les 15 centimètres de la profondeur du sol. Les données sur l'humidité des couches de sol, en plus des quantités de pluie, sont collectées par l'intermédiaire de l'unité de jauge de pluie dédiée à la mesure de la quantité de pluie avec un émetteur à puce téléphonique à énergie solaire, puis les données circulent à travers les satellites.

- **Deuxièmement:** « L'avenir » Il reçoit des données de toutes les unités de mesure de l'humidité sur le terrain, qui sont à leur tour transmises à un programme informatique qui analyse et traduit en fonction des quantités d'eau et des périodes d'irrigation qui doivent être utilisées.

- **Troisièmement:** Programme opérationnel : C'est la partie principale du système pour recevoir des données sur tous les appareils. Grâce à des graphiques, les besoins en eau de diverses cultures agricoles sont estimés à l'aide de graphiques.

- **Quatrièmement:** Station météorologique : associée à un ordinateur pour nous fournir également la température, l'humidité, la direction du vent, la vitesse du vent et la quantité de pluie.

Le système d'irrigation intelligent est un système à faible coût, il dépend d'appareils à des prix raisonnables. Certaines estimations indiquent, en particulier en Égypte, que le coût par hectare du système d'irrigation intelligent est inférieur à 1000 dollars, et que l'agriculteur peut utiliser un Smartphone ou un ordinateur, pour voir les dernières informations sur le sol et la culture.

#### I .4. Types de système d'irrigation :

##### I .4.1. Irrigation goutte à goutte :

Cette méthode consiste à irriguer les plantes avec de l'eau sous forme de gouttes directement sous les plantes, où est conçu un réseau de tuyaux spécialisés.

Pour l'irrigation goutte à goutte, il est réparti entre les arbres, et au pied de chaque arbre se trouve un trou dans le tuyau d'où l'eau sort sous forme de gouttes.

Est caractérisé par la méthode d'irrigation goutte à goutte convient aux terres sablonneuses et désertiques, et elle permet d'économiser beaucoup d'eau, permettant aux arbres de répondre à leurs besoins en eau .

Sans gaspillage, l'un des inconvénients de cette méthode est que la mise en place de réseaux d'irrigation est coûteuse et que la préparation du réseau nécessite une main d'œuvre qualifiée.



Figure I.1: Irrigation goutte à goutte.

##### I .4.1.1. Avantages du système d'irrigation goutte à goutte :

- **Économie d'eau** : L'irrigation par goutte-à-goutte permet une utilisation efficace de l'eau en délivrant l'eau directement aux racines des plantes, réduisant ainsi les pertes par évaporation et le gaspillage d'eau [01].

- **Optimisation de l'irrigation** : Ce système offre un contrôle précis sur la quantité d'eau fournie aux cultures, ce qui permet d'adapter l'irrigation aux besoins spécifiques de chaque plante et de chaque zone, favorisant ainsi une croissance saine et des rendements accrus [02].
- **Réduction des maladies** : En évitant d'humidifier les feuilles et les tiges, l'irrigation par goutte-à-goutte réduit le risque de développement de maladies fongiques et bactériennes, améliorant ainsi la santé des cultures [03].
- **Économie de main-d'œuvre** : Une fois installé, le système nécessite peu d'intervention humaine, ce qui réduit les coûts de main-d'œuvre et permet aux agriculteurs de se concentrer sur d'autres aspects de la gestion agricole [04].

#### **I .4.1.2. Inconvénients du système d'irrigation goutte à goutte :**

- **Coût initial élevé** : L'installation et l'entretien initial d'un système d'irrigation par goutte-à-goutte peuvent être coûteux, notamment en raison du prix des équipements et des matériaux nécessaires.

Cela peut constituer une barrière financière pour certains agriculteurs [05].

- **Obstruction des émetteurs** : Les émetteurs utilisés dans ce système peuvent se boucher en raison de la présence de particules de sol ou d'autres contaminants, ce qui nécessite un entretien régulier pour assurer un fonctionnement optimal [06].
- **Dépendance à l'électricité** : Certains systèmes de goutte-à-goutte nécessitent une source d'électricité pour faire fonctionner les pompes et les systèmes de contrôle, ce qui peut poser des problèmes en cas de pannes de courant ou dans les zones où l'accès à l'électricité est limité [07].

Malgré ces inconvénients, l'irrigation par goutte-à-goutte demeure une méthode efficace et durable pour optimiser l'utilisation de l'eau et améliorer les rendements agricoles, en particulier dans les régions arides ou semi-arides où les ressources en eau sont limitées.

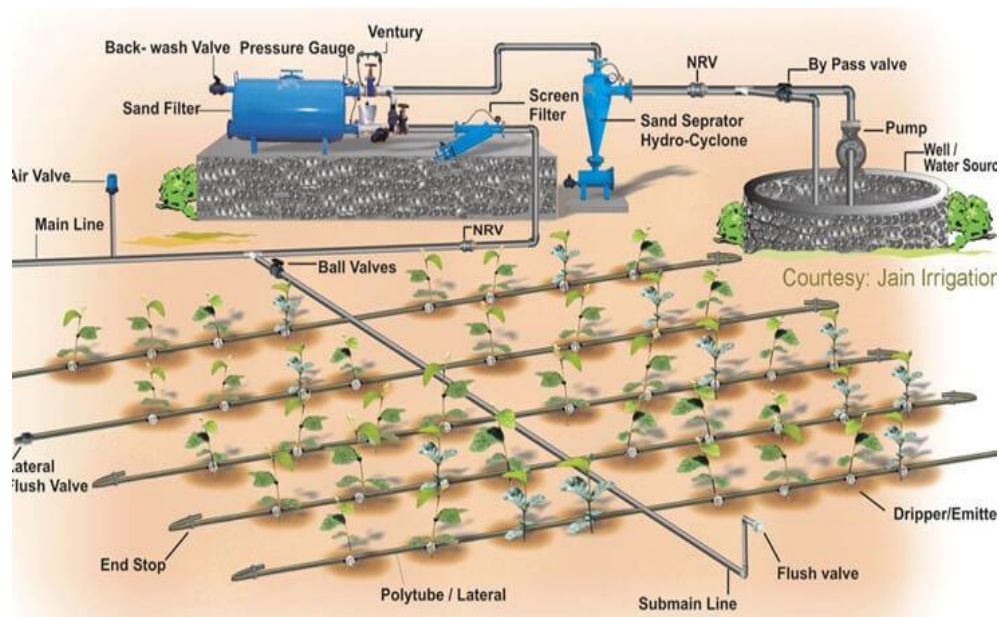


Figure I.2 : Description d'un système d'irrigation par goutte à goutte.

#### I .4.2. Irrigation surface:

L'irrigation surface peut être définie comme un système d'irrigation combinant l'irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion. Cette méthode repose sur l'injection d'air dans l'eau.

Conduites d'eau ou réservoirs, ce qui augmente le pourcentage d'oxygène dans l'eau d'environ 150 % et augmente ainsi son pourcentage dans le sol, ce qui aide Le sol est utilisé pour éliminer les bactéries nocives et améliorer le sol.

Ce système utilise un dispositif à bulles qui régule le débit d'air vers les conduites d'eau avant l'arrosage direct .



Figure I.3 : Irrigation à bulles.

### I .4.2.1. Avantages du système d'irrigation de surface :

- **Coût initial bas** : L'installation d'un système d'irrigation par surface est généralement moins coûteuse que d'autres méthodes d'irrigation, car elle nécessite moins d'équipement et de technologie.

Cela peut rendre cette méthode plus accessible aux petits agriculteurs et aux exploitations agricoles à faibles revenus [08].

- **Simplicité de gestion** : L'irrigation par surface est relativement simple à mettre en œuvre et à gérer, ce qui réduit les besoins en formation et en main-d'œuvre spécialisée.

Cela peut être un avantage pour les agriculteurs disposant de ressources limitées ou de compétences techniques limitées [09].

### I .4.2.2. Inconvénients du système d'irrigation de surface :

- **Gaspillage d'eau** : L'irrigation par surface peut entraîner des pertes d'eau importantes par évaporation, ruissellement et infiltration dans le sol.

Cela peut réduire l'efficacité de l'irrigation et entraîner un gaspillage des ressources en eau, en particulier dans les régions arides ou semi-arides [10].

- **Moindre uniformité de l'irrigation** : En raison de la nature même de la méthode, l'irrigation par surface peut entraîner une distribution inégale de l'eau sur le terrain, avec des zones sur-irriguées et d'autres sous-irriguées.

Cela peut entraîner des problèmes de rendement et de qualité des cultures [11].

- **Dépendance aux conditions météorologiques** : L'efficacité de l'irrigation par surface peut être fortement influencée par les conditions météorologiques, telles que le vent et la température, qui peuvent affecter la distribution et l'évaporation de l'eau.

Cela peut rendre cette méthode moins fiable dans des conditions météorologiques variables [12].

Malgré ses inconvénients, l'irrigation par surface reste une méthode largement utilisée dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les zones où les ressources en eau sont abondantes et où les coûts d'investissement et de gestion doivent être minimisés .

### I .4.3. Irrigation avec asperseurs:

L'utilisation de l'irrigation par aspersion a commencé à la fin du 20<sup>e</sup> siècle et sa propagation s'est accrue après la Seconde Guerre mondiale, grâce à l'augmentation de l'efficacité des pompes et des tuyaux.

Arroseurs légers. Dans cette méthode, l'eau est pulvérisée dans l'air à travers de petits trous dans les tuyaux jusqu'à ce qu'elle tombe sur une surface.

Sol et plantes sous forme de bruine due à la pluie. L'avantage de cette méthode d'irrigation par aspersion est qu'elle permet aux agriculteurs d'ajouter des engrais et des pesticides.

Avec de l'eau, il peut également être utilisé sur un sol irrégulier. Il ne nécessite pas de main d'œuvre, protège les plantes du gel et fonctionne.

En maintenant sa température, l'un des inconvénients de cette méthode est qu'elle entraîne l'apparition de sels à la surface du sol.



Figure I.4 : Irrigation avec asperseurs.

#### I .4.3.1. Avantages du système d'irrigation par aspersion :

- **Distribution uniforme de l'eau :** L'irrigation par aspersion permet une distribution uniforme de l'eau sur la surface des cultures, assurant ainsi une couverture homogène et une hydratation équilibrée des plantes. Cela favorise une croissance uniforme et des rendements agricoles optimisés [13].
- **Flexibilité :** Ce système d'irrigation est adaptable à une grande variété de cultures et de terrains, et il peut être utilisé dans des conditions météorologiques variées. De plus, il permet de

moduler facilement le débit et la portée des jets d'eau en fonction des besoins spécifiques des cultures et des variations saisonnières [14].

- **Réduction des pertes d'eau :** Bien que l'irrigation par aspersion puisse entraîner une certaine évaporation de l'eau pendant le processus d'aspersion, elle permet néanmoins de minimiser les pertes par ruissellement et infiltration par rapport à d'autres méthodes d'irrigation telles que l'irrigation par surface [15].

#### **I .4.3.2. Inconvénients du système d'irrigation par aspersion :**

- **Évaporation et dérive :** L'irrigation par aspersion peut entraîner des pertes d'eau par évaporation et dérive, en particulier par temps chaud et venteux. Cela peut réduire l'efficacité de l'irrigation et entraîner un gaspillage des ressources en eau [16].

- **Consommation d'énergie :** Ce système d'irrigation nécessite souvent des pompes et des systèmes de pressurisation pour fonctionner, ce qui entraîne une consommation d'énergie supplémentaire. Cela peut augmenter les coûts opérationnels pour les agriculteurs et avoir un impact sur la durabilité environnementale [17].

- **Potentiel d'érosion du sol :** L'impact direct des jets d'eau sur le sol peut parfois entraîner une érosion du sol, en particulier sur les sols en pente ou vulnérables. Cela peut compromettre la santé du sol et la stabilité des cultures [18].

Malgré ces inconvénients, l'irrigation par aspersion reste l'une des méthodes d'irrigation les plus couramment utilisées dans le monde en raison de sa polyvalence, de sa fiabilité et de sa capacité à fournir une hydratation uniforme des cultures.

#### **I .5. Types des contrôleurs d'irrigation :**

Deux types généraux de contrôleurs sont utilisés pour contrôler les systèmes d'irrigation: les systèmes de boucle de régulation ouverte et systèmes de boucle de régulation fermée. Systèmes de boucle de régulation ouverte appliquent une action prédéfinie, comme est fait avec des minuteries d'irrigation simples. Boucles de régulation fermées reçoivent une rétroaction de capteurs, prendre des décisions et d'appliquer les résultats de ces décisions sur le système d'irrigation [19] .

### **I .5.1. Boucle de régulation ouverte :**

Dans ce système l'opérateur prend la décision sur la quantité d'eau qui sera appliquée et quand l'événement d'irrigation se produira, Cette information est programmée dans le contrôleur et l'eau est appliquée selon le programme désiré. Ceci utilise soit la durée d'irrigation ou le volume spécifique appliqué pour le contrôle. L'arrêt de l'irrigation peut être basé sur un temps prééglé ou peut être basé sur un volume spécifique de l'eau passant par un compteur de débit. Ce système est généralement peu coûteux et facilement accessible à partir d'une variété de Fournisseurs, mais son inconvénient est incapacité à répondre automatiquement à l'évolution des conditions dans l'environnement [19].

### **I .5.2. Boucle de régulation fermée :**

Dans ce système l'opérateur développe une stratégie générale de contrôle. Une fois que la stratégie générale est définie, le système de contrôle assure et prend des décisions détaillées sur le moment où appliquer l'eau et combien d'eau à appliquer. Ce type de système des décisions d'irrigation sont prises et les actions sont effectuées sur la base de données de capteurs. Contrôleurs en boucle fermée nécessitent l'acquisition de données de paramètres environnementaux (tels que l'humidité du sol, la température, le rayonnement, la vitesse du vent, etc.) ainsi que les paramètres du système (pression, débit, etc.) et ils basent généralement leurs décisions d'irrigation sur les capteurs qui mesurent l'humidité du sol, la température, et d'autres données climatiques pour estimer les besoins en eau d'une culture [19] .

### **I .6. Système d'irrigation intelligent :**

L'irrigation dans les systèmes de culture agricoles étant le secteur le plus important en termes de gestion et d'utilisation de l'eau, la maîtrise des dépenses en eau demeure un enjeu majeur des industriels et des producteurs indépendants. Plusieurs chercheurs ont conçu des systèmes d'arrosages automatiques à énergie solaire dit "intelligent" [20] .

Ces systèmes peuvent réduire la consommation de l'eau dans un champ à 50%. Et aussi minimiser les dépenses en énergie électrique le fait d'utiliser un ensemble de panneaux solaires et de batteries rechargeables, la plate-forme est possédée de divers capteurs d'humidités enfoui dans le sol qui permet de calculer les besoins réels des sols en eau et réguler le débit en conséquence grâce à d'une petite unité électronique. Ce système permet de contrôler de façon constante et en temps réel des différents paramètres atmosphériques et du sol, et les besoins des plantes [20] .



Figure I.5 : Système d'irrigation intelligent .

### I .7. Les bénéfices du système d'irrigation intelligent :

Les bénéfices du système d'irrigation intelligent sont nombreux et variés, et ils contribuent à une utilisation plus efficace de l'eau et à des rendements agricoles améliorés. Voici quelques-uns de ces avantages:

- **Économie d'eau** : Le système d'irrigation intelligent utilise des capteurs et des technologies avancées pour mesurer les besoins en eau des plantes en temps réel, ce qui permet une irrigation précise et ajustée. Cela réduit les pertes d'eau par évaporation et par ruissellement, et optimise l'utilisation de la ressource hydrique disponible.
- **Optimisation des ressources** : En surveillant de près les conditions météorologiques, le sol et les besoins en eau des cultures, le système d'irrigation intelligent ajuste automatiquement le calendrier et la quantité d'eau nécessaire pour chaque zone, ce qui maximise l'efficacité de l'irrigation tout en minimisant le gaspillage.
- **Amélioration des rendements agricoles** : En fournissant aux plantes la quantité d'eau nécessaire au moment opportun, le système d'irrigation intelligent favorise une croissance optimale et des rendements plus élevés pour les cultures. Cela se traduit par une augmentation de la production agricole et des revenus pour les agriculteurs.
- **Réduction des coûts** : En évitant les gaspillages d'eau et en optimisant l'utilisation des ressources, le système d'irrigation intelligent permet aux agriculteurs de réaliser des économies

significatives sur leurs factures d'eau et leurs coûts opérationnels, ce qui renforce leur rentabilité et leur durabilité économique.

- **Gestion à distance** : Grâce à des systèmes de contrôle à distance et à des applications mobiles, les agriculteurs peuvent surveiller et gérer leur système d'irrigation à tout moment et depuis n'importe où, ce qui leur permet de réagir rapidement aux changements de conditions et d'optimiser les performances de leur exploitation .

### **I .8. Composants de l'irrigation électrique:**

- **Pompes à eau** : Ces dispositifs sont utilisés pour pomper l'eau depuis une source telle qu'un puits ou un réservoir vers les zones à irriguer. Les pompes peuvent être de différents types, y compris les pompes centrifuges et les pompes submersibles.

- **Conduites** : Les conduites transportent l'eau depuis la pompe vers les zones d'irrigation. Elles sont généralement fabriquées en PVC ou en polyéthylène et sont disponibles dans une variété de tailles pour répondre aux besoins spécifiques du système d'irrigation.

- **Vannes de contrôle** : Ces vannes sont utilisées pour réguler le débit d'eau et le diriger vers les différentes zones d'irrigation en ouvrant ou en fermant les passages dans les conduites.

- **Systèmes de contrôle automatique** : Ces systèmes utilisent des dispositifs tels que des capteurs d'humidité du sol, des minuteries et des contrôleurs programmables pour automatiser le processus d'irrigation. Cela permet un arrosage précis et efficace en fonction des besoins en eau des cultures.

- **Connexions électriques** : Elles comprennent les câbles, les prises et les connecteurs nécessaires pour alimenter les pompes, les vannes et les systèmes de contrôle automatique.

- **Panneaux de contrôle** : Ces panneaux abritent les composants électriques et électroniques du système d'irrigation, tels que les interrupteurs, les relais et les variateurs de fréquence.

- **Transformateurs de puissance** : Ils sont utilisés pour modifier la tension électrique afin de s'adapter aux besoins spécifiques des équipements d'irrigation, comme les moteurs de pompes .

**I .9. Conclusion:**

Le système d'irrigation offre de nombreux avantages qui contribuent à la prospérité de l'agriculture et à la sécurité alimentaire mondiale. Tout d'abord, il permet de contrôler précisément la distribution de l'eau, garantissant ainsi un approvisionnement régulier et suffisant pour les cultures, même dans les régions arides ou soumises à des conditions météorologiques imprévisibles.

De plus, l'irrigation améliore considérablement le rendement des cultures en fournissant aux plantes la quantité d'eau nécessaire pour une croissance optimale, ce qui se traduit par une augmentation de la production agricole et des revenus pour les agriculteurs .

*Chapitre II:*  
*Systeme*  
*Photovoltaïque*

## II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous parlons brièvement des énergies renouvelables, notamment du solaire photovoltaïque. Nous menons une étude approfondie sur le rayonnement solaire converti en énergie électrique. Nous discuterons également de la technologie utilisée dans les panneaux solaires et de toutes leurs propriétés électriques, ainsi que de l'étendue de leur impact sur les facteurs externes tels que l'éclairage et la chaleur.

## II.2 . Energie solaire :

Le soleil est une étoile parmi les autres. Son diamètre est d'environ cinquante fois celui de la Terre. Sa lumière, à la vitesse fantastique de 300 000 Kilomètres par seconde, met un peu plus de 8 minutes pour nous parvenir. La masse du soleil est telle qu'il peut encore rayonner pendant des milliards d'années. On évalue à environ 100 milliards de milliards de Kilowattheure l'énergie rayonnée à chaque seconde dans toutes les directions par le soleil, et la Terre avec son atmosphère n'en reçoit qu'environ 30 milliards par seconde. Pour exprimer en unités thermiques l'énergie solaire parvenant en une année à l'entrée de l'atmosphère terrestre, si l'on adopte l'unité Q employée dans les études énergétiques globales ( $Q=1018\text{BTU} \ll \text{British Thermal Unit} \gg$ ) et correspondant à 40 milliards de tonnes de charbon normal, on trouve que cette énergie solaire annuelle représente 5 000 unités Q.

On constate combien cette énergie est fantastique, si on la compare d'une part à l'énergie utilisée par l'humanité, égale en 1972 à 0.2 Q, d'autre part à l'énergie solaire utilisée par la photosynthèse sur notre globe en un an égale aussi à 0.2 Q. Le rayonnement solaire est réparti en un spectre s'étendant de la longueur d'onde 0.3 micron (ultraviolet) à la longueur d'onde 5 microns (infrarouge), avec un maximum pour 0.47 micron dans le spectre visible. Ce dernier s'étend des longueurs d'onde de 0.35 micron (violet) à 0.7 micron (rouge) et c'est au-dessus de 0.7 micron que commence le proche infrarouge [21].

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

➤L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

➤L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [22].

### **II.3. Energie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque fait partie des grandes familles des énergies renouvelables et puise sa source du soleil en captant les rayonnements lumineux et en les convertissant en électricité grâce à des modules photovoltaïques composés de cellules solaires appelées photopiles. Il ne faut donc pas confondre avec l'énergie solaire thermique qui se base sur la chaleur produite par le rayonnement solaire infrarouge.

Soleil ou lumière ? : L'énergie « solaire » doit être interpréter sur le fait que, toute source lumineuse peut être convertie en électricité, sauf que chaque source a son intensité qui permet d'avoir une certaine puissance sur le panneau PV, et cela va de soi que le soleil est la source la plus intense en énergie, et donc un panneau PV sera bien plus efficace dehors aligné face au soleil qu'à l'intérieur d'une maison.

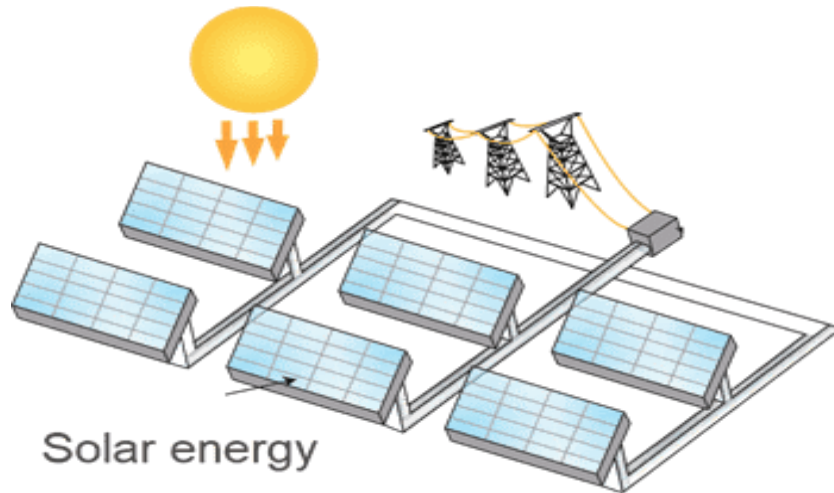
### **II.4. Historique sur l'énergie photovoltaïque :**

En 1838, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît dans l'histoire de l'énergie solaire. Le français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque pour la première fois. Bequerel expérimentait une batterie électrolytique avec des électrodes de platine et réalisait que, lorsqu'il était exposé au soleil, le courant augmentait. C'était le début de l'énergie solaire photovoltaïque

L'étape suivante a été franchie en 1873 lorsque l'ingénieur électricien anglais Willoughby Smith a découvert l'effet photovoltaïque dans les solides. Dans ce cas à propos de sélénium. Quelques années plus tard, en 1877, l'Anglais William Grylles Adams, professeur de philosophie naturelle au King's Collège de Londres et son élève Richard Evans Day, ont découvert qu'ils exposaient le sélénium à la lumière pour produire de l'électricité. Ils ont ainsi créé la première cellule photovoltaïque au sélénium. En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson et Daryl Chaplin ont découvert la cellule solaire en silicium. Cette cellule produisait suffisamment d'électricité et était suffisamment efficace pour faire fonctionner de petits appareils électriques. Ces cellules photovoltaïques avaient une grande importance dans l'avenir de l'histoire de l'énergie solaire. Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce ne sont apparues qu'en 1956, même si le coût était encore très élevé pour la plupart des gens jusqu'en 1970 environ, lorsque le prix des cellules solaires a chuté d'environ 80%. Les cellules solaires ont été utilisées dans les satellites américains et soviétiques lancés depuis la fin des années 1950 [23].

## II.5. La conversion de la lumière en électricité:

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [24].



**Figure II.2:** conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** : (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière.

## II.6. L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui

inventa la pile électrique en 1800 et donne son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [25].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

## **II.7. Les différents types des cellules photovoltaïques :**

Les photopiles au silicium cristallin sont plus répandues.

Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériaux cristallin, c'est parce que le silicium a les propriétés d'un cristal, avec un arrangement parfait des atomes.

### **II.7.1. La cellule au silicium Amorphe :**

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les poly cristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Le silicium amorphe est obtenu à partir de gaz de silicium. Ce gaz est vaporisé sur un support, en verre, en plastique souple ou en métal, grâce à un procédé de projection sous vide.

Ces cellules photovoltaïques sont gris foncé [26].

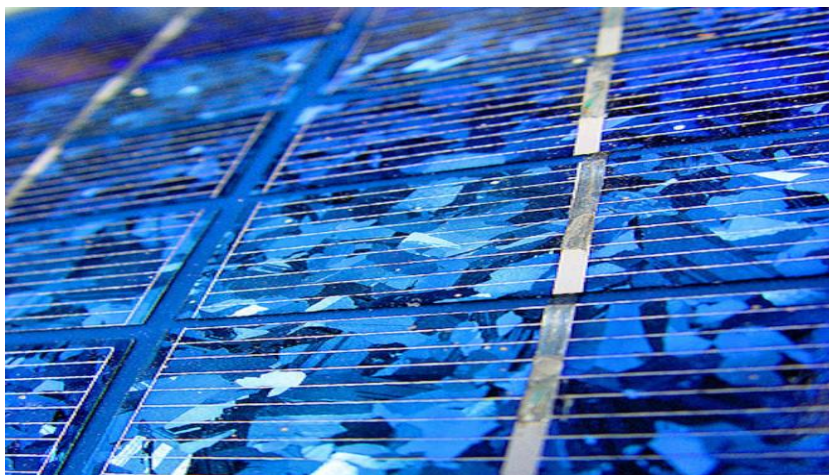


**Figure II.3:**Cellule Photovoltaïque amorphe .

### **II.7.2. Les cellules poly-cristallines :**

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

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo .

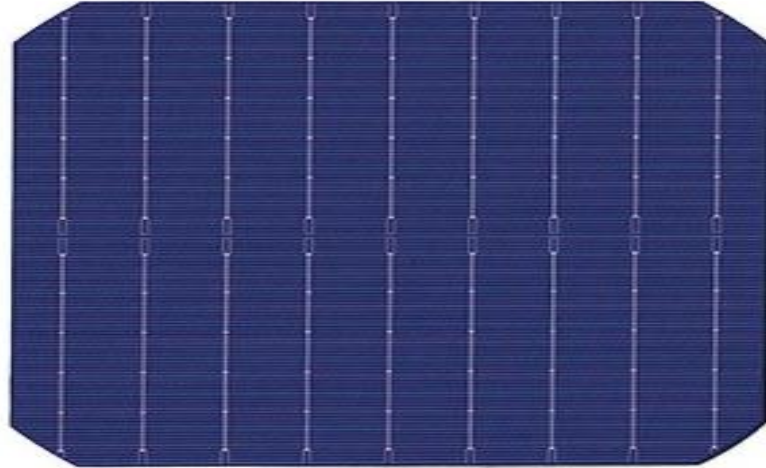


**Figure II.4:**cellules poly-cristallines .

### **II.7.3. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :**

La technologie des cellules PERC définit une architecture de cellule solaire qui diffère de l'architecture de cellule standard qui est utilisée depuis trois décennies et qui est généralement présentée dans tous les manuels photovoltaïques.

Le PERC figure en bonne place sur la liste des gains d'efficacité record. Au cours des 12 derniers mois, le record du monde a été battu 6 fois. La cellule PERC la plus efficace d'aujourd'hui, à 23,95 %, a été fabriquée par l'un des leaders chinois du photovoltaïque solaire, suivie d'une cellule à 23,6 % d'un autre leader chinois du photovoltaïque solaire.



**Figure II.5:** cellule photovoltaïque en silicium monocristallin .

## II.8. Principe de fonctionnement :

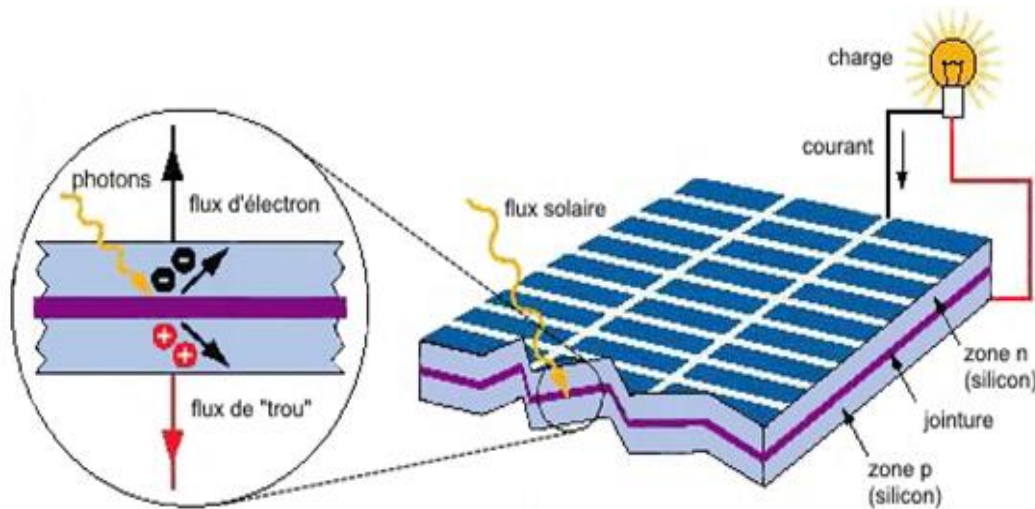
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif; conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi- conducteurs; collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN.

D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la **Figure II.6**.



**Figure II.6:** fonctionnement de la cellule PV .

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région : dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires.

On aura un photo courant de diffusion dans la zone de charge d'espace, les paires électron/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P.

On aura un photo courant de génération [27].

## II.9. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV :

Les principaux **avantages** de l'énergie PV sont :

- L'énergie PV est renouvelable et fiable car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles
- Le caractère modulaire des panneaux PV permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt aux centaines de mégawatts.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie PV présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Longue durée de vie des panneaux solaires et pas de risques électriques pour les usagers.

Les **inconvénients** de l'énergie PV sont :

- La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs PV ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions.

## II.10. Les Paramètres des cellules photovoltaïques:

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_{max}$ ,  $FQ$ ,  $FF$  et  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

### II.10.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire:

$$I_{cc}(V=0) = I_{ph}. \quad (\text{II. 1})$$

### II.10.2. Tension à circuit ouvert, ( $V_{co}$ ) :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de la cellule est nul. Il est lié à la résistance shunt, lorsque cette dernière n'est pas connectée ou connectée mais sa valeur est infinie [28].

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{eI_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (\text{II. 2})$$

La valeur de cette tension diminue avec la température et dépend de l'éclairement de la cellule

$$V_{oc} = \frac{K*T_c}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.3})$$

$\frac{K*T_c}{q}$  : représente la potentielle thermodynamique .

$T_c$  : la température absolue .

$q$  : la constante de charge d'un électron= $1.602 \cdot 10^{-19}$  C .

$K$  : la constante de Boltzmann= $1.38 \cdot 10^{-23}$  .

$I_{ph}$  : le photo courant .

$I_s$  : le courant de saturation inverse.

### II.10.3. Puissance maximale ( $P_{max}$ ) :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule).

Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}(I_{max}, V_{max})$  de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{cc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{co}$ ) donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit (V.I).

$$P = V \left( I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V}{A_{UT}} \right) - 1 \right] \right) \quad (\text{II.4})$$

Cette puissance fournie est maximale au point défini par:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial I}{\partial V} + I = 0 \quad (\text{II.5})$$

Soit :

$$I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V}{A_{UT}} \right) - 1 \right] - V I_s \left( \frac{1}{A_{UT}} \right) \exp \left( \frac{V}{A_{UT}} \right) = 0 \quad (\text{II.6})$$

La tension  $V_{max}$  et le courant  $I_{max}$  correspondant au maximum de puissance, sont alors données par:

$$\left( 1 + \frac{V_{max}}{A_{UT}} \right) \exp \left( \frac{V_{max}}{A_{UT}} \right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.7})$$

Donc:

$$I_{max} = I_s \left( \frac{V_{max}}{A_{UT}} \right) \exp \left( \frac{V_{max}}{A_{UT}} \right) \quad (\text{II.8})$$

Le produit ( $V_{max} \times I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} \times I_{cc}$ ) [29].

### II.10.4. Facteur de qualité (FQ) :

C'est un paramètre dépendant de la qualité de la diode. Il est compris entre 1 et 2.

### II.10.5. Facteur de forme (FF) :

On appelle facteur de forme ff (fill- factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $P_{max} = I_{max} \times V_{max}$ ) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit  $I_{cc} \times V_{co}$  où: [30] .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (\text{II.9})$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70% [30] .

### II.10.6. Rendement d'une cellule solaire( $\eta_c$ ):

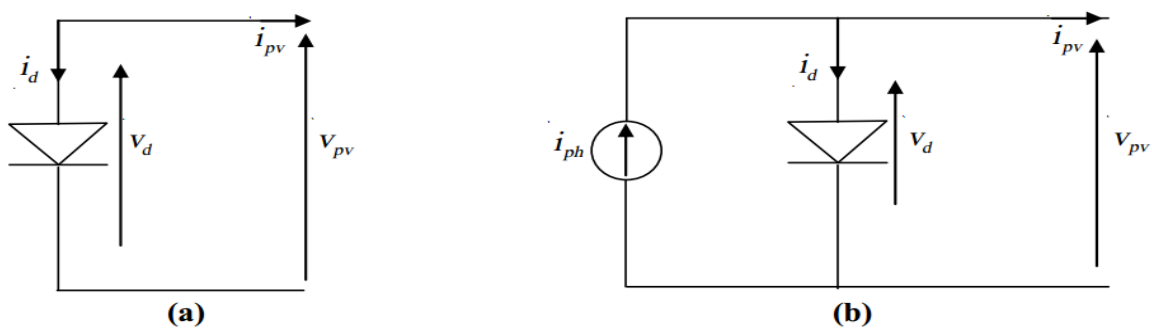
Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [30] .

$$\eta_c = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{solaire}} \quad (\text{II.10})$$

## II.11. Schéma électrique équivalent :

### II.11.1 Cellule PV idéale :

La résistance série est très petite et la résistance parallèle est suffisamment grande. Le circuit équivalent de la photopile peut devenir comme suit (**Figure II.7**): Une photopile dans l'obscurité (**Figure II.7.a**) est régie par l'expression du courant dans la diode :



**Figure II.7** :Schéma équivalent d'une photopile idéale .

(a) Sous l'obscurité ;

(b) Sous l'éclairement ;

Si la photopile est maintenant sous l'éclairement (**Figure II.7**), elle sera régie par une nouvelle expression :

$$i_{pv} = i_{ph} - i_d = i_{ph} - i_s \left[ \exp\left(\frac{qv_{pv}}{aK_bT}\right) \right] \quad (\text{II.11})$$

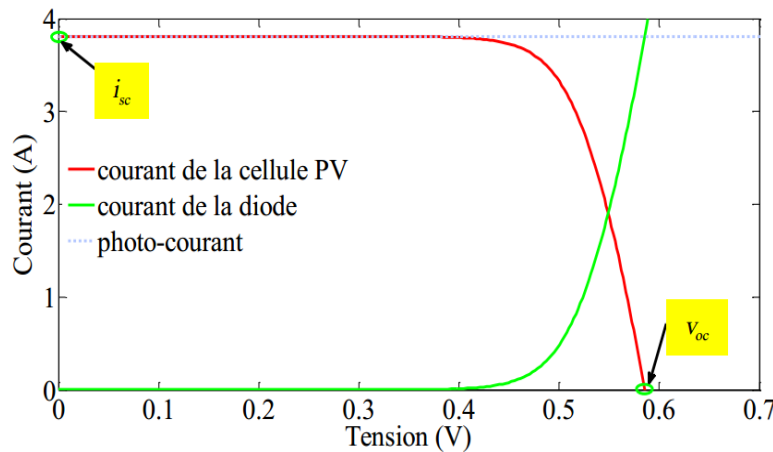
Pratiquement, on utilise une charge résistive ajustable pour construire point par point la caractéristique courant-tension de la photopile (**Figure II.8**).

Si la charge est nulle, cas de court-circuit, la tension de sortie est égale à zéro. Le courant de la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé : courant de court-circuit (short circuit current).

$$i_{sc} = i_{ph} \quad (\text{II.12})$$

Si la charge est suffisamment grande, cas du circuit ouvert, le courant de sortie est égal à zéro. La tension de la cellule est à son maximum. Cette tension est appelée la tension de circuit ouvert (open circuit voltage) .

$$V_{oc} = \frac{aK_bT}{q} \ln\left(\frac{i_{ph}}{i_s} + 1\right) \quad (\text{II.13})$$



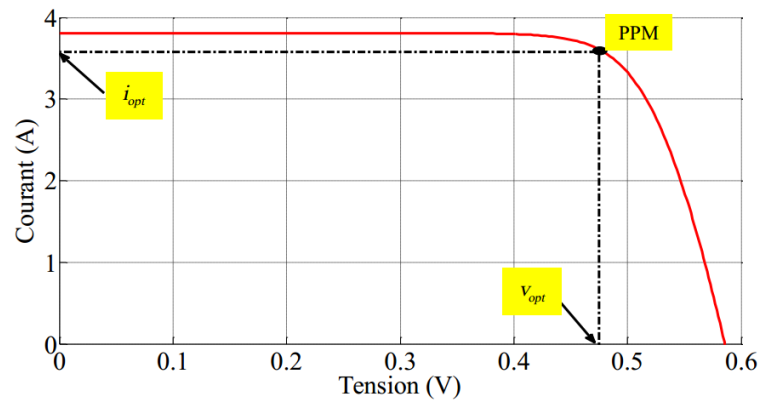
**Figure II.8** :Constitution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque .

### II.11.2. Cellule PV réelle :

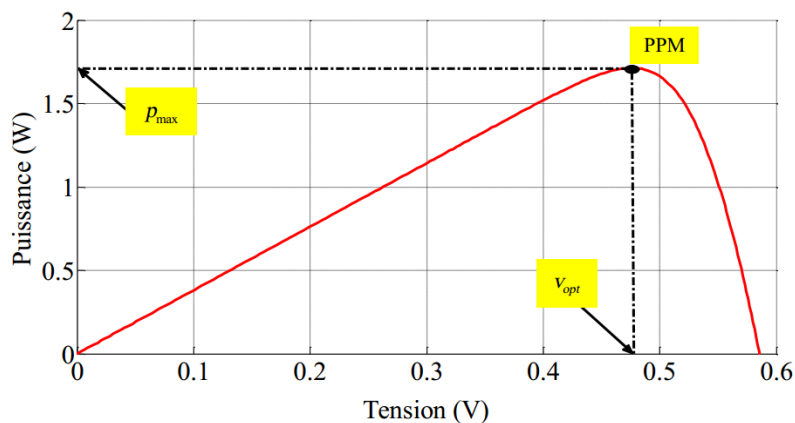
En réalité, la résistance série est très petite, et est de l'ordre de quelques milli-ohms. La résistance parallèle est suffisamment grande, et est de l'ordre du méga ohm. Dans ce cas, le circuit équivalent de la photopile est celui de la **Figure II.9**. Ainsi, l'expression du courant de la cellule peut avoir la forme suivante [31]:

$$i_{pv} = i_{ph} - i_d - \frac{v_{pv}}{r_p} = i_{ph} - i_s \left[ \exp\left(\frac{q(v_{pv} + r_s i_{pv})}{aK_bT}\right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + r_s i_{pv}}{r_p} \quad (\text{II.14})$$

En utilisant cette expression, on peut tracer la caractéristique I-V de la cellule PV (**Figure II.9**). Etant donné que la puissance de la cellule est le produit du courant par la tension, alors de même, on peut tracer la caractéristique P-V de la cellule PV (**Figure II.10**).



**Figure II.9 :**Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque .



**Figure II.10 :**Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque .

On peut conclure que la cellule PV présente une caractéristique I-V non linéaire allant du point de fonctionnement extrême correspondant au courant de court-circuit vers un autre point extrême correspondant à la tension en circuit ouvert tout en passant par le point de fonctionnement souhaité qui est le PPM. Trois modes de fonctionnement de la photopile peuvent être distingués en regardant sa caractéristique I-V. Cette cellule se comporte comme générateur de courant si sa tension est inférieure à 0,4 V. Elle a un fonctionnement de générateur de tension si son courant est moins de 3 A. Entre ces deux limites, on trouve le 3<sup>ème</sup> mode où se situe le point de fonctionnement optimal PPM. Les coordonnées de ce point de puissance maximale  $V_{opt}$ ,  $i_{opt}$  peuvent être estimées par les inéquations suivantes [32]:

$$0.71V_{oc} \leq V_{opt} \leq 0.78V_{oc} \quad (\text{II.15})$$

$$0.78i_{sc} \leq i_{opt} \leq 0.92i_{sc} \quad (\text{II.16})$$

La puissance maximale de la cellule  $P_{max}$  peut être exprimée comme suit :

$$P_{max} = V_{oc} * i_{opt} = V_{oc} * i_{sc} * FF \quad (\text{II.17})$$

Avec  $FF$  est le facteur de forme. Ce facteur mesure la qualité de la photopile et son éloignement du rectangle idéal  $V_{oc}$ ,  $i_{sc}$ . Sa valeur se situe entre 0,7 et 0,8 pour une photopile cristalline et diminue avec l'augmentation de la température.

$P_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $i_{sc}$  sont des paramètres donnés par le fabricant pour des conditions standards STC (Standard test conditions) qui sont l'ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>, la température de 25 °C et l'air de masse AM 1,5.

Le rendement de la photopile est le rapport de la puissance maximale produite  $P_{max}$  sur la puissance incidente  $p_{in}$  du rayonnement solaire qui frappe la photopile. Cette dernière puissance est égale au produit de l'éclairement  $G$  par la surface  $\delta$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} * i_{opt}}{G * \delta} \quad (\text{II.18})$$

Où :

$i_s$  : est le courant de saturation de la diode .

$a$  : est le facteur d'idéalité de la jonction .

$k_b$  : est la constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}$ ) .

$T$  : est la température de jonction des cellules .

$q$  : est la charge élémentaire de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

## II.12. Regroupement des cellules:

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière,...etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [33].

### II.12.1. Regroupement en série:

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série .

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (\text{II.19})$$

$$I = I_1 = I_2 = I_n \quad (\text{II.20})$$

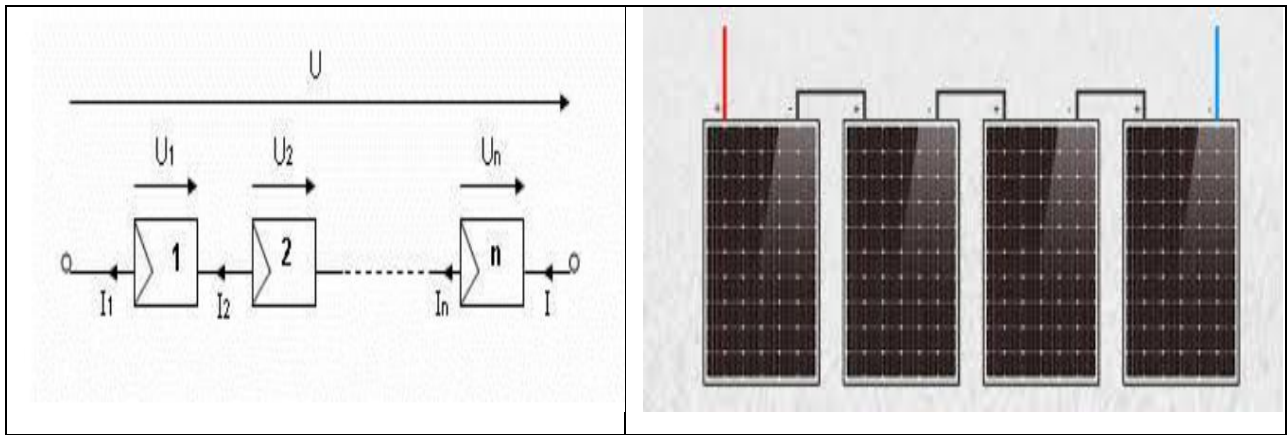


Figure II.11: Mise en série des panneaux solaires .

Avec :  $U$  = tension totale de module PV

$U_1, U_2, \dots, U_n$  = tension de module PV nombre 1,2,...,n

$I_1, I_2, \dots, I_n$  = courant de module PV nombre 1,2,...,n

### II.12.2. Regroupement en parallèle:

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

$$U = U_1 = U_2 = U_3 \dots \dots \dots = U_n \tag{II.21}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_n \tag{II.22}$$

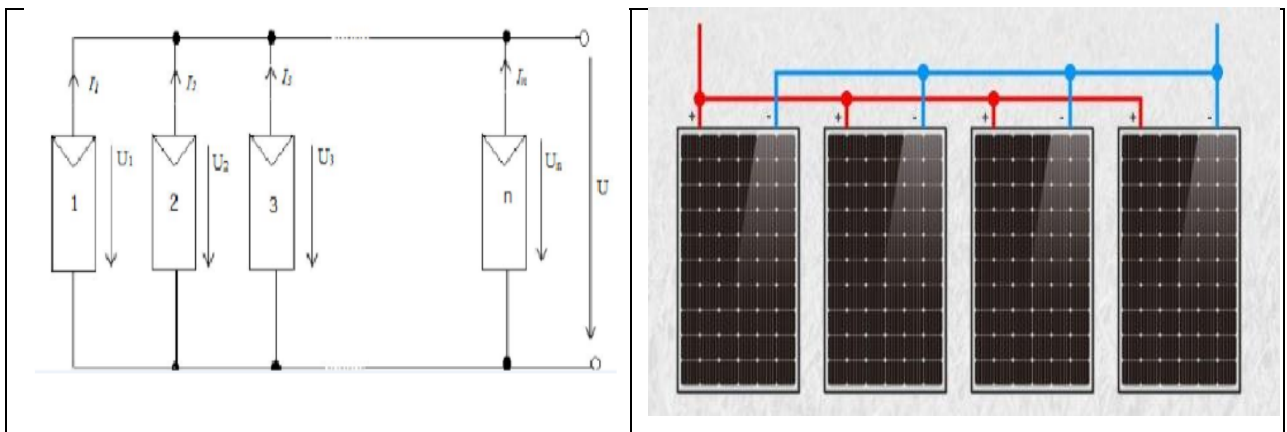


Figure II.12: Mise en parallèle des panneaux solaires .

Avec :  $U$  = tension totale de module PV .

$U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$  = tension de module PV nombre 1,2,3,...,n .

$I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$  = courant de module PV nombre 1,2,3,...,n .

### II.12.3. Regroupement Mixte (série & parallèle):

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque panneaux solaire.

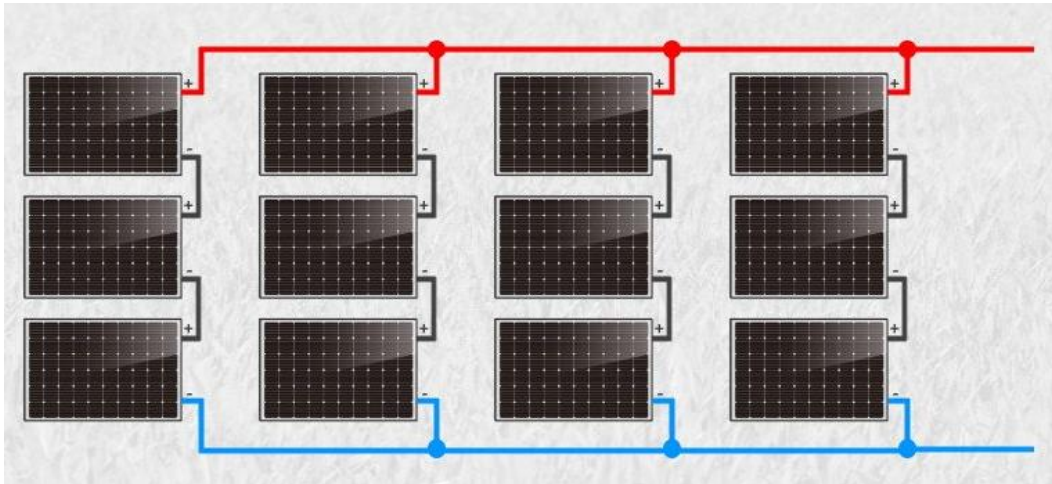


Figure II.13: schémas association mixte des panneaux .

### II.13. Constitution des champs PV :

Le champ PV est la source d'énergie électrique en courant continu. Il est constitué d'un ensemble de modules rangés sous forme de panneaux (voir **Figure II.14**). Le module est un ensemble de photopiles (cellules) assemblés pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

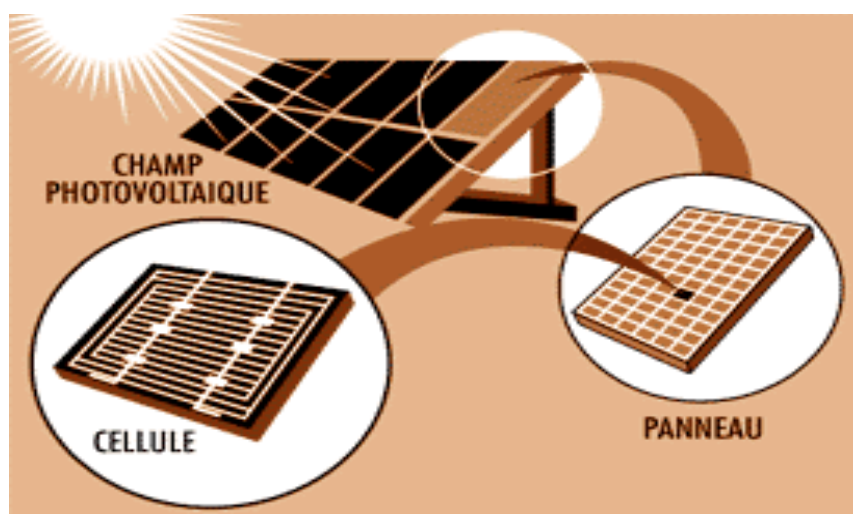


Figure II.14: Constitution d'un générateur PV .

## **II.14. Les matériaux de base de la cellule photovoltaïque :**

### **II.14.1. Les semi-conducteurs :**

Les semi-conducteurs sont des éléments qui présentent une conductivité électrique intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants, les comportements semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit via la théorie des bandes d'énergie.

Les semi-conducteurs (exemple : le silicium Si) forment des réseaux atomiques (de type diamant) ou les atomes sont reliés par les covalences. il n'existe pas d'électrons libres comme dans les métaux .la migration des électrons ne peut se faire que par (petit pas), les électrons sautent d'un atome à l'autre .

### **II.14.2. Les semi-conducteurs intrinsèques :**

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participe aux liaisons covalentes peuvent sur l'effet d'agitation thermique, devenir porteur de charge.

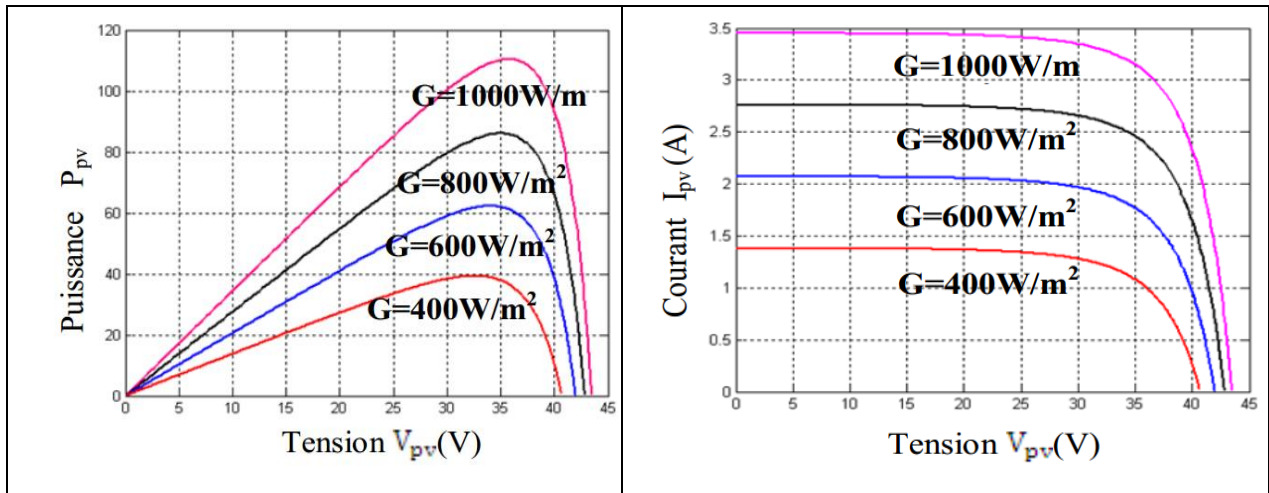
Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (bande de conduction et bande de valence) séparées par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon...). Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre d'électrons et trous est égal.

## **II.15. Modélisation du Module (panneau) photovoltaïque :**

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation.

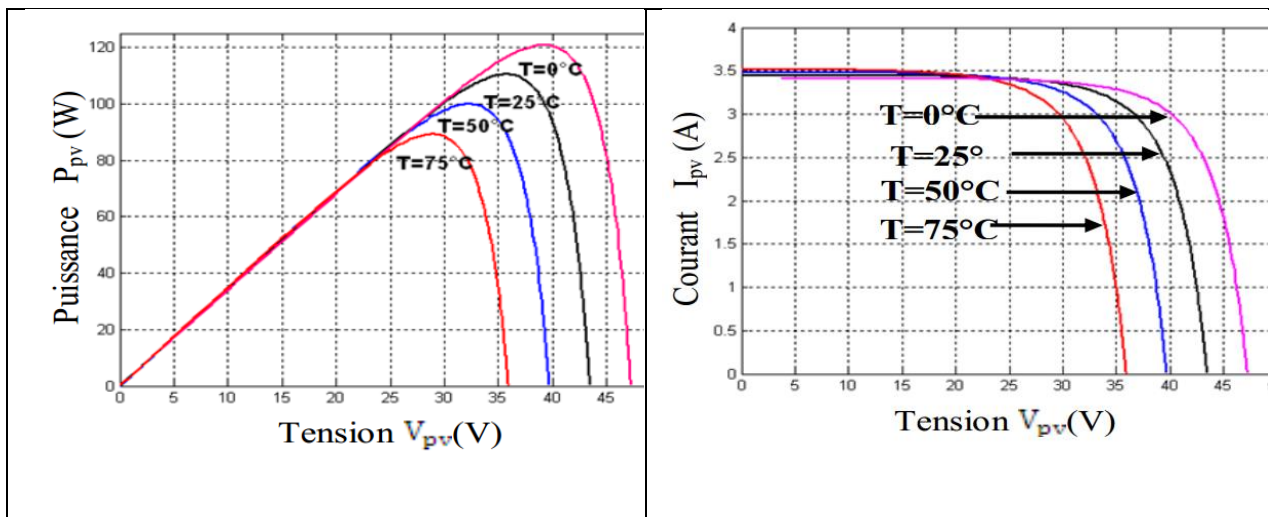
### **II.15.1. Influence de l'éclairement :**

Les caractéristiques des Figure II.15 montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (à vide) varie très peu.



**Figure II.15:** Caractéristique courant –tension et puissance –tension d’un module photovoltaïque pour différent niveau d’irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) et  $T_c=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### II.15.2. Influence de la température sur la cellule PV :



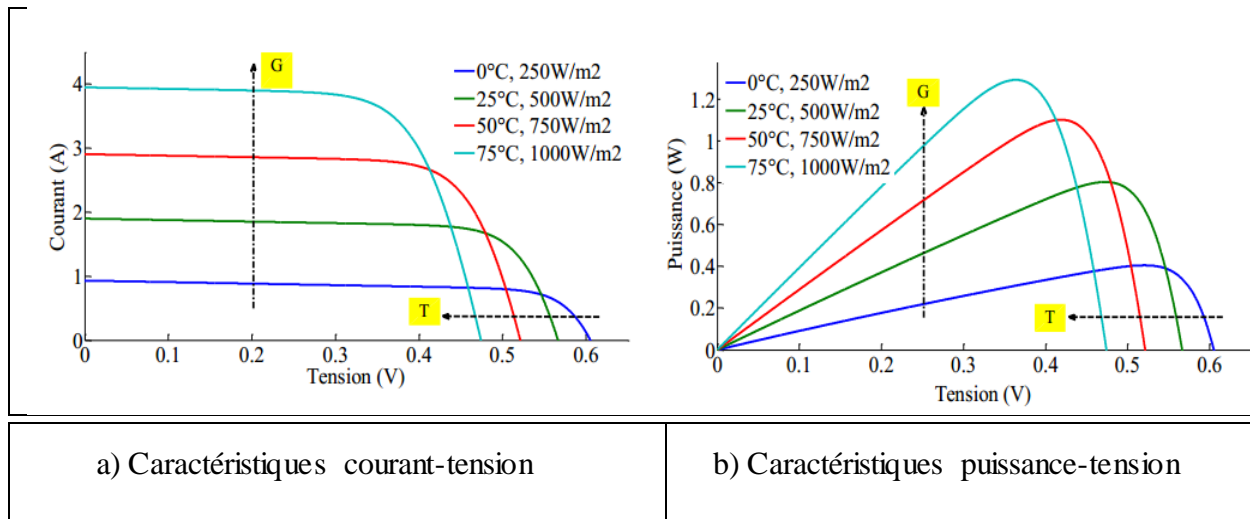
**Figure II.16:** Caractéristique puissance –tension et courant –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c=0, 25, 50, 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .

La température a un impact sur la tension  $V_{oc}$ , comme le démontre la courbe ci-dessus le  $V_{oc}$  diminue avec la croissance de la température. Ainsi nous pouvons conclure que la température a un impact négatif sur le rendement d’un module PV.

### II.15.3. Influence simultanée de l’éclairement et de la température sur la cellule PV :

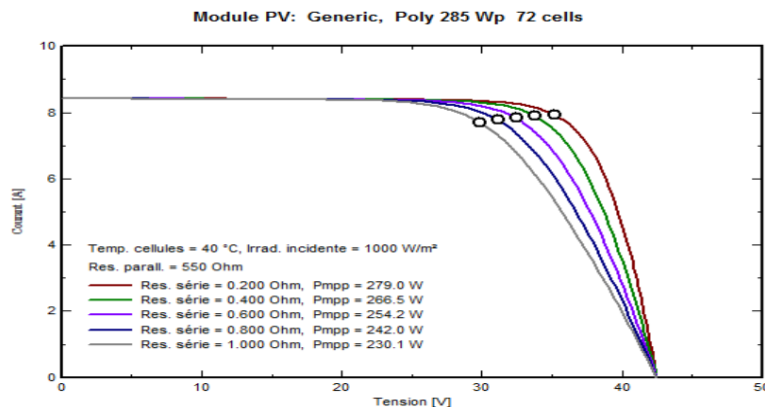
Le changement d’un paramètre atmosphérique, éclairement ou température, en fixant l’autre est peu probable dans la réalité. Généralement, le changement de ces deux paramètres qui se fait

aléatoirement est dans la plupart des temps simultané et dans la même direction. La **Figure II.17** montre l'impact de variation parallèle des conditions climatiques sur la cellule PV.



**Figure II.17** :Influence simultanée de  $G$  et  $T$  sur les caractéristiques de la cellule PV.

#### II.15.4. Influence de la résistance série :



**Figure II.18**: Comportement du module selon la résistance en série .

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que  $R_s$  est grande ou que  $R_{sh}$  est faible. La **Figure II.18** montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I = f(V)$  dans la zone où le panneau fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum (même sur la figure). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par le panneau .

### II.15.5. Influence de la résistance parallèle :

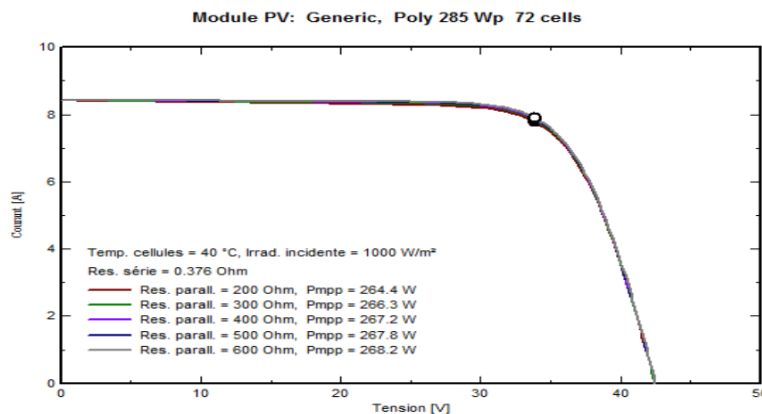


Figure II.19: Comportement du module selon la résistance en parallèle.

La résistance shunt est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. **Figure II.19** montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe I-V du panneau dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

## II.16. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT):

### II.16.1. Stratégies de suivi du point de puissance maximale :

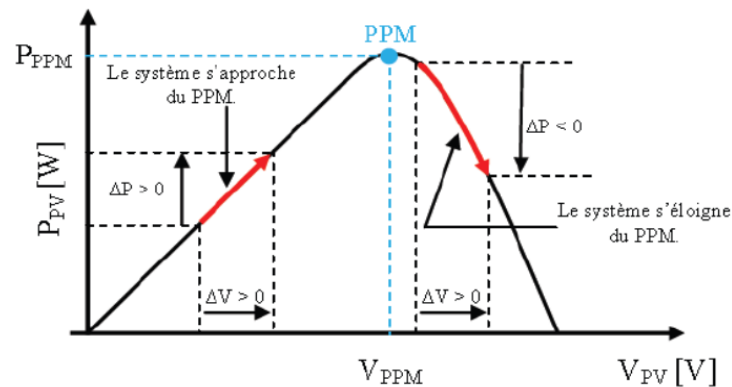
Par définition [34], une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelques soient les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{opt}$ ,  $i_{opt}$ ). Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. [35]. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [36].

On va présenter quelques techniques de recherche du point de puissance maximale.

- **Méthode de perturbation et d'observation (P&O):**

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée d'une faible amplitude (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la

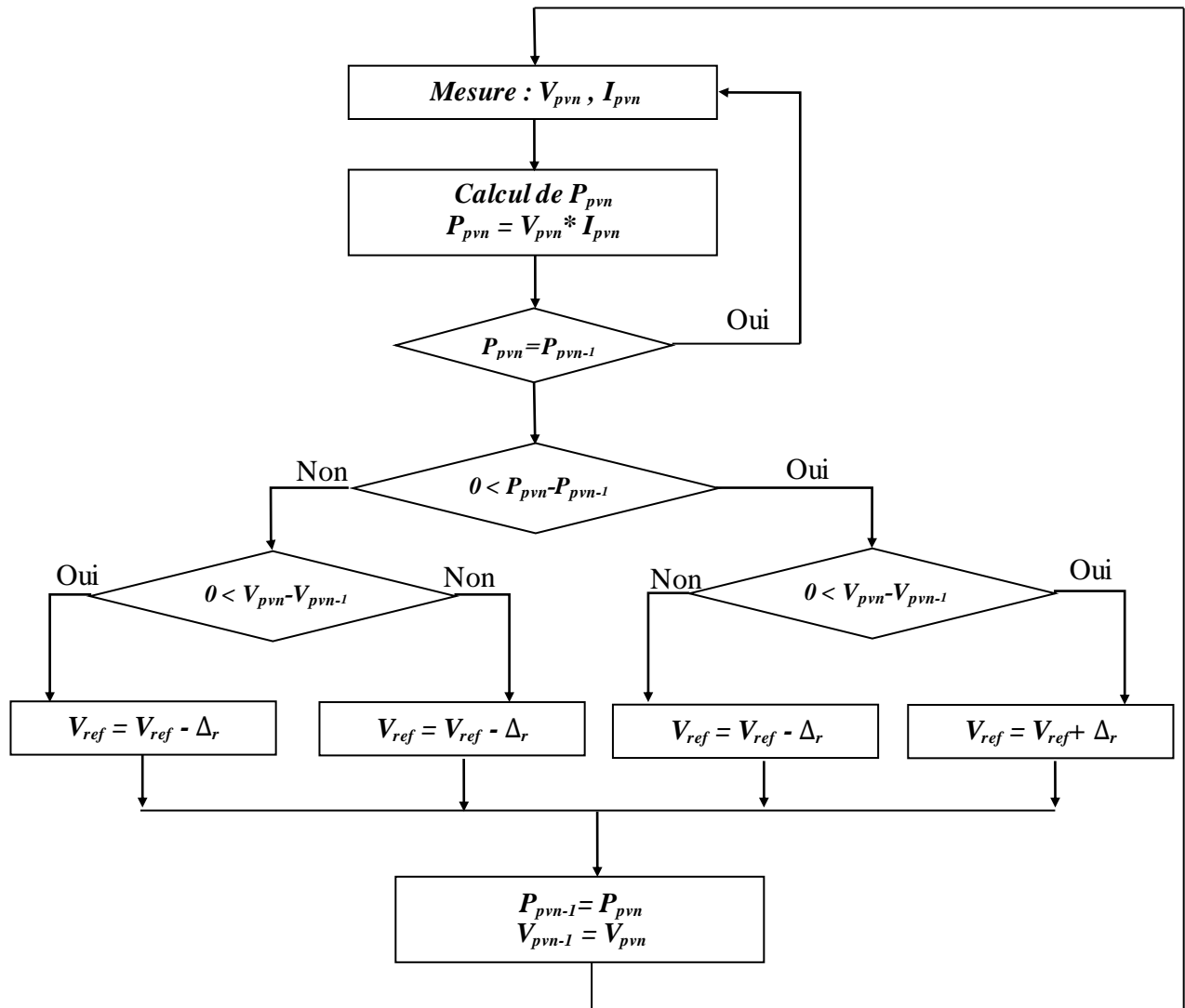
perturbation, la suivante est faite dans la même direction (cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP). Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé.



**Figure II.20 :** Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance (voir **Figure II.20**).

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la **Figure II.21**.



**Figure II.21:** Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.

Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit: la connaissance des caractéristiques de générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple.

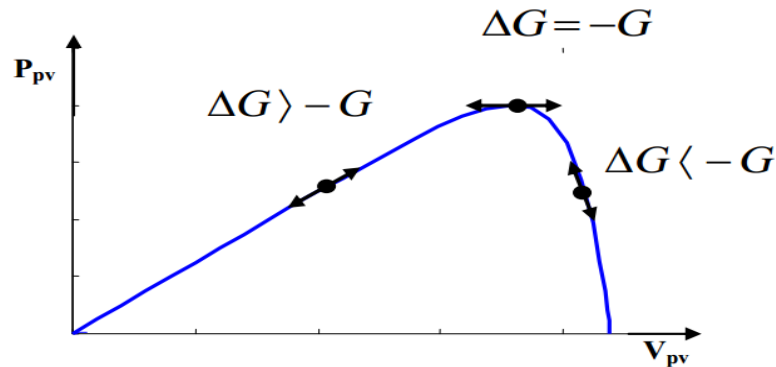
Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

- **Méthode de conductance incrémentielle:**

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. Le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle.

Son principe consiste à comparer entre la conductance ( $G' = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ ) et de sa dérivée ( $\Delta G' = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$ ) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ( $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ ).

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.23})$$



**Figure II.22 :** Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  et fonctionnement de la méthode Conductance Incrémentielle.

L'avantage principal de cet algorithme est qu'il est adapté aux conditions climatiques instables car, théoriquement, il est possible de trouver un MPP et de s'y immobiliser si la perturbation cesse.

Dans ce cas-là, la variation de tension est nulle ; l'apparition d'une variation de courant permet d'ajuster la valeur de la tension de référence pour atteindre un nouveau MPP.

La méthode conductance incrémentielle est souvent jugée efficace de point de vu efficacité de recherche du point de puissance maximale [37].

Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une grande capacité de calcul, ce qui réduit la période de contrôle du système.

La **Figure II.23**, montre l'organigramme de cette méthode.

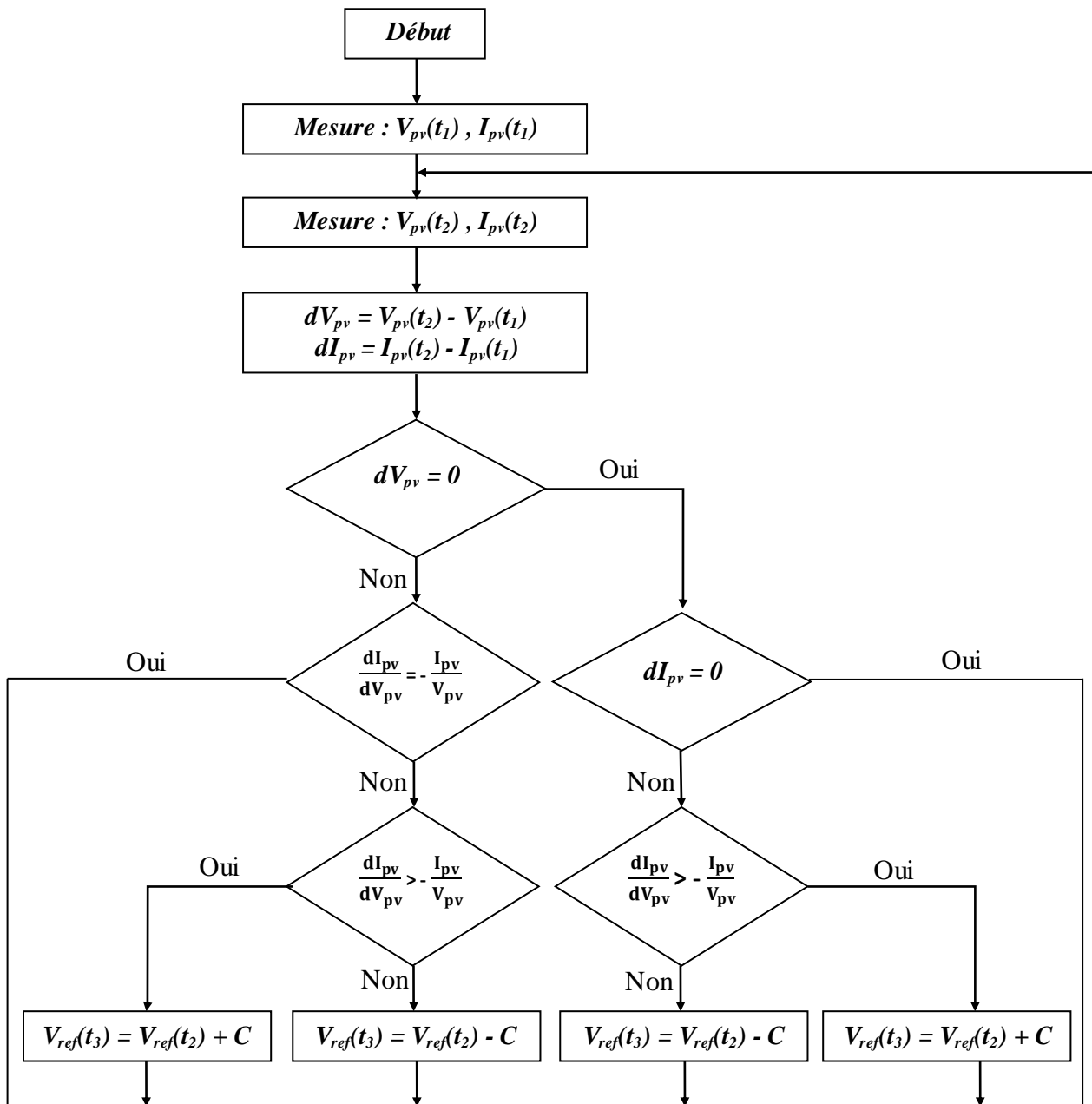


Figure II.23 : Organigramme de la méthode conductance incrémentielle.

• **Autres méthode de contrôle MPPT:**

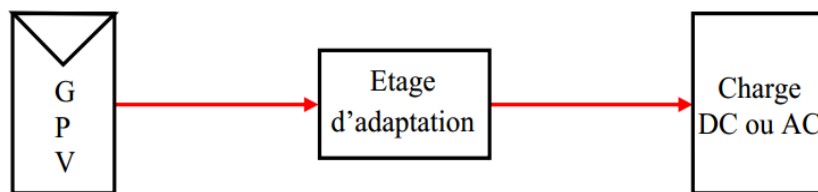
Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du MPP [34]. Ces derniers sont indépendants du modèle du processus, ils se caractérisent par leur aptitude à appréhender les problèmes de non linéarité et ils présentent des performances robustes par rapport aux variations des conditions atmosphériques et de la charge.

On retrouve aussi les méthodes à base d’algorithme génétique et de réseau de Neurone.

**II.16.2. Optimisation du rendement énergétique du système PV :**

Un GPV présente des caractéristiques courant-tension non linéaires qui dépendent entre autre du niveau d’éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de

la charge sur laquelle le GPV débite, on peut trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, on utilise un étage d'adaptation appelé : convertisseur MPPT. **Figure II. 24** présente une connexion GPV-charge via un étage d'adaptation. Ce dernier consiste en un convertisseur DC/DC si la charge est de type continu ou d'un convertisseur à deux étages DC/DC suivi par un autre DC/AC si la charge est de type alternatif. Différents types de convertisseurs DC/DC peuvent être utilisés, soit sans isolation galvanique comme Buck (dévolteur), Boost (survolteur), Buck-Boost (dévolteur - survolteur), Cuck ou Sepic ; soit avec isolation galvanique comme Flyback ou Forward. Le convertisseur DC/AC peut être monophasé ou triphasé. Cet étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT analogique ou numérique.



**Figure II. 24 :** Connexion GPV-charge à travers un étage d'adaptation

## II.17. Modélisation des convertisseurs Buck-Boost :

### II.17.1. Convertisseur Boost :

On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$ . L'interrupteur  $K$  est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe  $T_d$  et de rapport cyclique variable  $\alpha$ . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand  $K$  est fermé  $D$  est ouvert ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermé. Durant chaque période,  $K$  est fermé de l'instant  $0$  à  $\alpha T_d$  et ouvert de  $\alpha T_d$  à  $T_d$ .

On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La **Figure II.25** donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

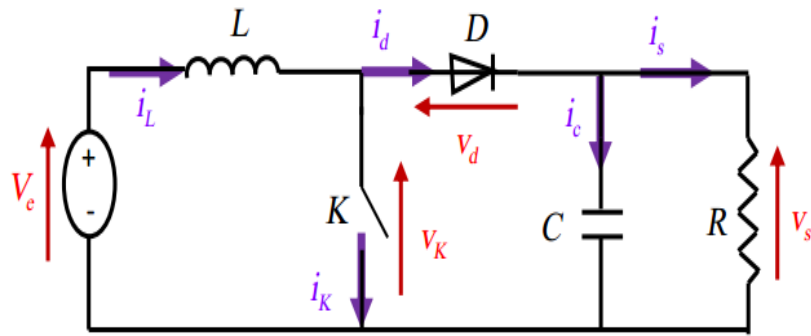


Figure II.25 : Circuit électrique du convertisseur Boost .

Lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé ( $0 < t < \alpha T_d$ ), le circuit du convertisseur devient (Figure II.26) :

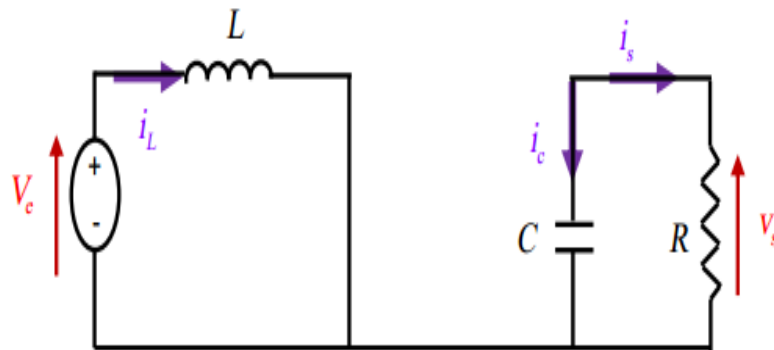


Figure II.26 :Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé .

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \tag{II.24}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \tag{II.25}$$

Avec  $I_{min}$  la valeur minimale du courant dans l'inductance.

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \tag{II.26}$$

A l'instant  $t = \alpha T_d$ , le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale  $I_{max}$ .

Lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert ( $\alpha T_d < t < T_d$ ), le circuit du convertisseur sera comme montré dans la (Figure II.27).

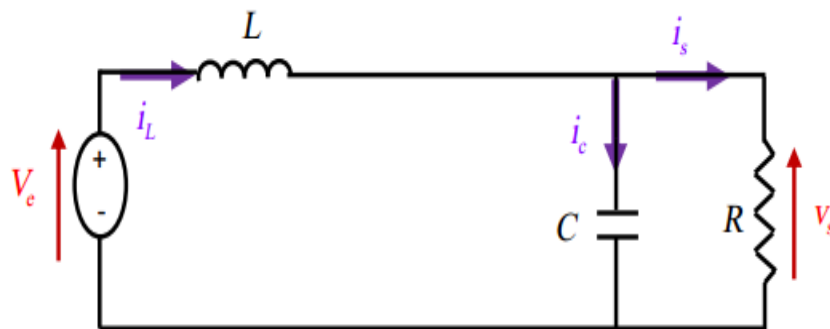


Figure II.27 :Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert .

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.27})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (\text{II.28})$$

A l'instant  $t = T_d$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$ .

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha) T_d \quad (\text{II.29})$$

Soit  $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$  l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (II.26) et (II.29), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.30})$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_S \quad (\text{II.31})$$

De l'expression (II.26), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.32})$$

Avec  $f$  la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement ( $0 < t < \alpha T_d$ ), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_S \quad (\text{II.33})$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_S}{C f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (\text{II.34})$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension.

$$I_{k,max} = i_{d,max} = I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_S}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{II.36})$$

### II.17.2. Convertisseur Buck :

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Buck. La **Figure II.28** montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est

caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source. La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par:

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (\text{II.37})$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V_e}{L \cdot f} \quad (\text{II.38})$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8Cf} = \frac{\alpha(1-\alpha) \cdot V_e}{8CL \cdot f^2} \quad (\text{II.39})$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_S \quad (\text{II.40})$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

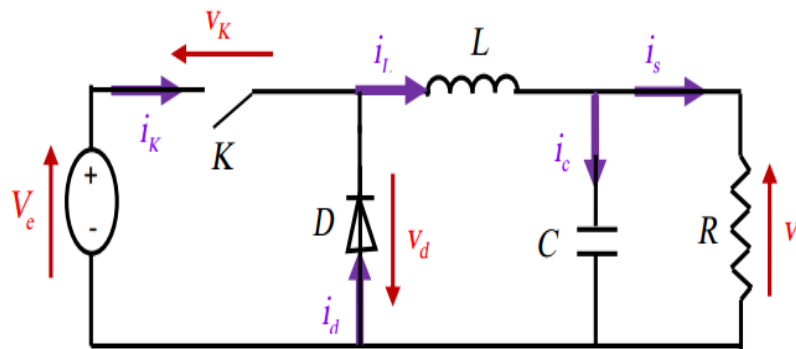


Figure II.28 : Circuit électrique du convertisseur Buck.

En tension, on a :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_e \quad (\text{II.41})$$

Et en courant

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{II.42})$$

### II.17.3. Convertisseur Buck-Boost :

La topologie et les formes d'ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la Figure II.29 La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1-\alpha} \quad (\text{II.43})$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.44})$$

et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R C f} \quad (\text{II.45})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension. Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{II.46})$$

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{II.47})$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{II.48})$$

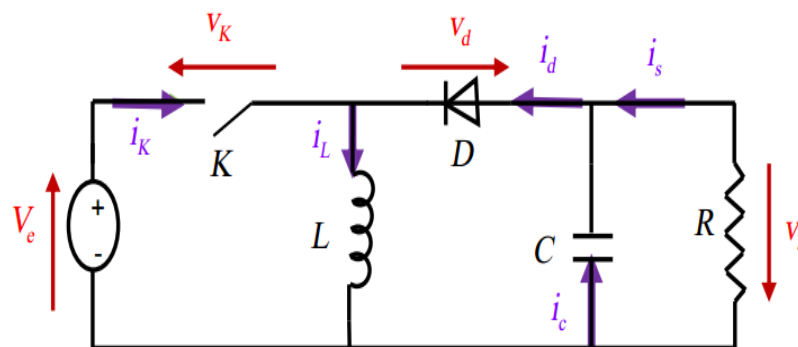


Figure II.29 : Circuit électrique du convertisseur Buck-Boost .

## II.18. Conclusion :

Nous avons étudié le principe de l'effet photoélectrique, la cellule photovoltaïque et ses composants. Différentes topologies de convertisseurs DC/DC non isolés sont comparées. La structure de type Boost est adoptée pour sa simplicité et son gain de tension relativement élevé. Des améliorations ont été apportées aux méthodes de surveillance et de perturbation P&O et une connectivité accrue à IncCond, pour corriger la variation en cas de changement soudain d'éclairage. Dans le prochain chapitre, nous concentrerons notre étude sur la réalisation de système d'irrigation .

***Chapitre III:***  
***Réalisation d'un***  
***système d'irrigation***

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

Ce chapitre consiste à mettre en exergue le côté pratique de ce que nous avons où nous allons le diviser en deux parties :

L'une est logicielle dans laquelle nous présenterons les outils utilisés pour le développement des programmes à embarquer dans les microcontrôleurs, et l'autre partie matérielle dont nous allons détailler les montages électroniques des deux blocs qui constituent notre système d'irrigation.

### **III.2. Présentation du cahier des charges :**

Dans ce projet, un système d'irrigation automatique pour les plantes a été conçu et mis en œuvre pour détecter l'humidité du sol à l'aide de l'Arduino UNO. Ce système estime l'humidité du sol à l'aide d'un capteur d'humidité du sol, puis fait fonctionner le moteur (pompe à eau) lorsque l'humidité est inférieure à un niveau spécifique. niveau et lorsque le niveau d'humidité augmente au-dessus du niveau spécifié, le système arrête le moteur.

L'état du réservoir d'eau, du moteur et le niveau d'humidité seront également affichés sur un écran numérique LCD 16 x 2. Le système est alimenté électriquement à l'aide de panneaux solaires qui y sont connectés.

- L'Arduino Uno
- Capteur d'humidité de sol (**soil moisture sensor**).
- La carte LM393 IC
- Afficheur OLED 1602A
- Relai électromécanique
- Pompe à eau Interface de communication (**esp 32**)
- Panneau photovoltaïque (**sosky**)
- Batterie

### **III.3. La partie matérielle:**

#### **III.3.1. L'Arduino uno :**

La carte Arduino la plus utilisée est la carte Arduino Uno. L'Arduino Uno est un microcontrôleur programmable qui permet, comme son nom l'indique, de contrôler des éléments

mécaniques : systèmes, lumières, moteurs, etc. Cette carte électronique permet donc à son utilisateur de programmer facilement des choses et de créer des mécanismes automatisés, sans avoir de connaissances particulières en programmation . Il est un outil pensé et destiné aux inventeurs, artistes ou amateurs qui souhaitent créer leur propre système automatique en le codant de toute pièce [38].



**Figure III.1** : carte Arduino Uno .

✓ **Caractéristique:**

- Microcontrôleur ATmega328
- Tension d'alimentation interne 5V
- Tension d'alimentation (recommandée) 7 à 12V, limites = 6 à 20 V
- Entrées/sorties numériques 14 dont 6 sorties PWM
- Entrées analogiques 6
- Courant max par broches E/S 40 mA
- Courant max sur sortie 3,3V 50mA
- Mémoire Flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le bootloader
- Mémoire SRAM 2 KB
- Mémoire EEPROM 1 KB
- Fréquence horloge 16 MHz

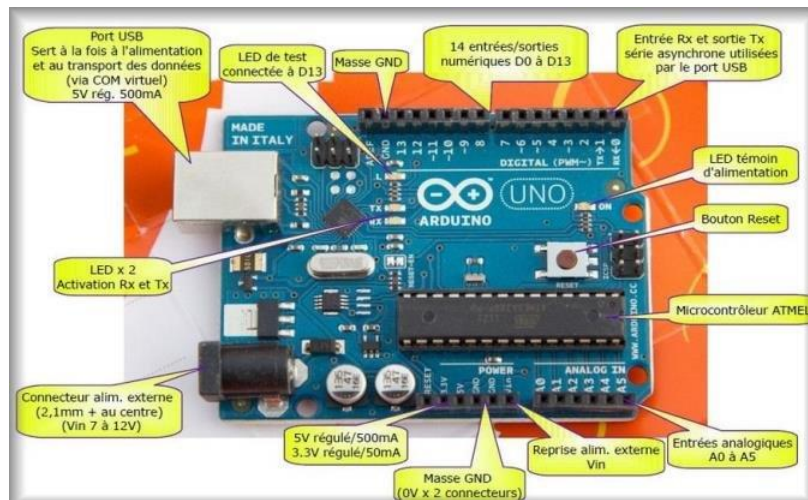


Figure III.2 : composant de la carte Arduino Uno .

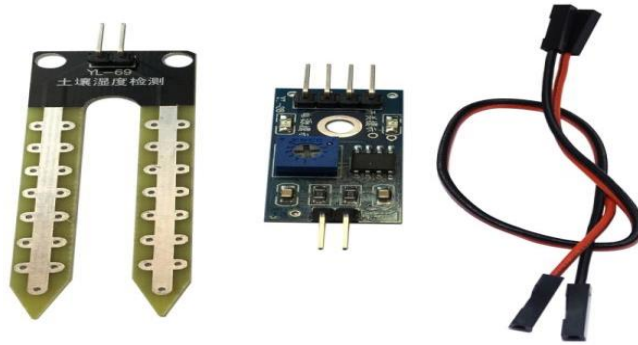
### III.3.2. Capteur d'humidité de sol (Soil Moisture Sensor) :

Ce module de capteur d'humidité du sol est utilisé pour détecter l'humidité du sol. Il mesure le contenu volumétrique de l'eau dans le sol et nous donne le niveau d'humidité comme sortie. Le module dispose de sorties numériques et analogiques et d'un potentiomètre pour ajuster le niveau du seuil. Ce module de détection d'humidité est composé d'un capteur d'humidité, de résistances, d'un condensateur, d'un potentiomètre, d'un comparateur LM393 IC, d'une LED d'alimentation et d'état dans un circuit intégré [39].

#### ✓ Caractéristique :

- Tension de fonctionnement : 3.3V à 5V DC .
- Courant de fonctionnement : 15mA .
- Sortie numérique - 0V à 5V, niveau de déclenchement réglable à partir d'une valeur prédéfinie.
- Sortie analogique - 0V à 5V basée sur le rayonnement infrarouge de la flamme du feu tombant sur le capteur.
- LED s indiquant la sortie et l'alimentation .
- Taille du circuit imprimé : 3.2cm x 1.4cm.
- Conception basée sur LM393 .

- Facile à utiliser avec des microcontrôleurs ou même avec un circuit intégré numérique/analogique normal. Petit, bon marché et facilement disponible .



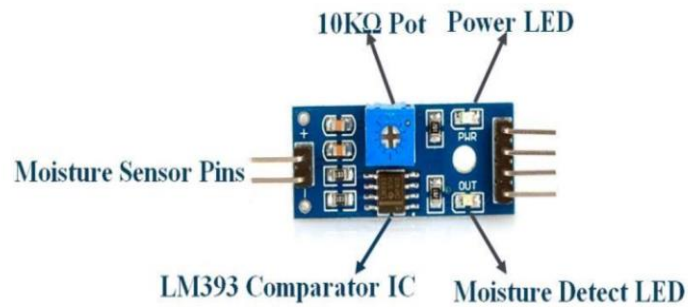
**Figure III.3 :** Capteur d'humidité de sol.

### III.3.3. La carte LM393 IC :

Le comparateur LM393 est utilisé comme comparateur de tension dans ce module de capteur d'humidité. La broche 2 du LM393 est connectée à la présélection (Pot 10K $\Omega$ ) tandis que la broche 3 est connectée à la broche du capteur d'humidité. Le circuit intégré comparateur comparera la tension de seuil définie à l'aide du pré-réglage (broche 2) et de la broche du capteur (broche 3) [40].

#### ✓ **Caractéristique :**

- Fonctionnement en alimentation simple : 2V à 30V
- Fonctionnement en double alimentation :  $\pm 1V$  à  $\pm 15V$
- Permet de comparer des tensions proches du potentiel de terre
- Compatible avec toutes les formes de logique
- Faible courant de polarisation d'entrée
- Faible courant de décalage d'entrée
- Faible tension de décalage
- Sensibilité à l'humidité de niveau 3
- Faible drain de courant d'alimentation indépendant de la tension d'alimentation



**Figure III.4 :** La carte LM393 IC

### III.3.4. Afficheur OLED 1602A:

L'afficheur texte 16×2 est utilisé pour afficher les informations du capteur, afficher les menus ou les invites. L'écran affiche des caractères noirs d'une taille de 5×8 pixels. Le rétro-éclairage intégré s'allume en appliquant une alimentation aux broches du module. L'écran de texte 16×2 sans module IIC est connecté au microcontrôleur par 16 broches.

#### ✓ Caractéristique :

- 2 lignes de 16 caractères.
- Rétro-éclairage bleu, caractères blancs
- Alimentation : 5V
- Dimensions : 36 x 79 x 20 mm
- Poids : 40 grammes



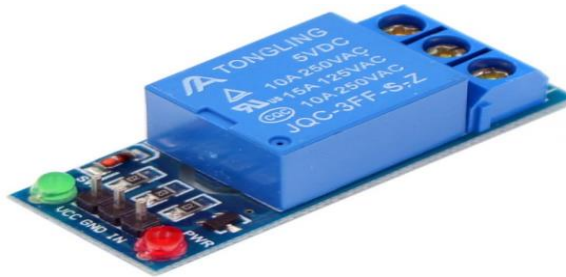
**Figure III.5 :** Afficheur OLED 1602A .

### III.3.5. Le relais (JQC-3FF-S-Z) :

Un relais est un interrupteur à commande électrique qui peut être activé ou désactivé, laissant passer ou non le courant, et qui peut être contrôlé avec de faibles tensions, comme les 5V fournis par les broches Arduino.

✓ **Caractéristique :**

- Charge maximale : courant alternative 250V/10A, courant continue 30V/10A
- Courant de déclenchement : 5Ma
- Tension de fonctionnement : 5V/12V
- Taille du Module : 50x26x18.5mm (L x L x H)
- Cc + : alimentation positive (VCC)
- Cc- : alimentation négative (GND)
- IN : peut-être un relais de contrôle de niveau haut ou bas
- Non : interface de relais normalement ouverte
- COM : relais d'interface communs
- NC : interface de relais normalement fermée



**Figure III.6 :** le relais JQC-3FF-S-Z

### III.3.6. La pompe :

R385 12V 3M DC Diaphragm Pump Micro Small Tank Aquarium Fish Bar. Principalement utilisé dans l'aquarium, modèle expérimental, piscine gonflable, lavage de voiture, arrosage, calendrier de remplissage d'eau minérale, etc.

✓ **Caractéristiques :**

- Tension de fonctionnement : 6-12V DC.
- Courant de fonctionnement de charge : 0,5-0,7A.
- Débit maximal : 1-3L/Min.
- Tête maximale : 3 m.
- Plage d'aspiration maximale : 2 m.
- Température : 80.
- Durée de vie : 2500 Heure.
- Diamètre du tuyau d'entrée : 6mm.

- Dimensions : 86 x 43 m



**Figure III.7 :** La pompe d'eau R385 12V 3M .

### III.3.7. Batterie:

Batteries come in many shapes and sizes, from miniature cells used to power hearing aids and wristwatches to, at the largest extreme, huge battery banks the size of rooms that provide standby or emergency power for telephone exchanges and computer data centers. Batteries have much lower specific energy (energy per unit mass) than common fuels such as gasoline. In automobiles, this is somewhat offset by the higher efficiency of electric motors in converting electrical energy to mechanical work, compared to combustion engines.

#### ✓ Caractéristiques :

- Tension nominale : 12 volts
- Capacité C20 : 90 Ah (à 20 heures de décharge à 25 °C)
- Capacité C100 : 104 Ah (à 100 heures de décharge à 25 °C)
- Résistance au cycle : 80% de décharge 500 cycles, 50% décharge 750 cycles, 30% en 1800 cycles.
- Courant de charge maximale : 18 Ampères
- CCA 420A 5 sec.



**Figure III.8 :** Batterie .

### III.3.8. Panneau photovoltaïque (sosky):

Un panneau photovoltaïque, également connu sous le nom de panneau solaire, est un dispositif qui convertit directement l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant l'effet photovoltaïque. Ces panneaux sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Lorsque les cellules sont exposées à la lumière du soleil, elles absorbent des photons et libèrent des électrons, ce qui crée un courant électrique pouvant être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Les panneaux photovoltaïques sont une technologie essentielle dans le domaine des énergies renouvelables, contribuant à la production d'électricité propre et durable.

#### ✓ Caractéristiques :

- Puissance maximale ( $P_{MAX}$ ) : 20 W
- Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) : 21.1V
- Tension d'alimentation maximale: 17.6 V
- Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) : 1,24 A
- Courant de puissance maximal: 1.12 A



Figure III.9 : Panneau photovoltaïque (sosky) .

### III.4. Les outils matériels:

Nous allons débiter cette partie par la réalisation des schémas électroniques des deux cartes (zone de captage et la centrale de contrôle), à l'aide du logiciel FRITZING.

### III.4.1. Réalisation à base de logiciel FRITZING :

#### a) Le montage de la carte zone de captage :

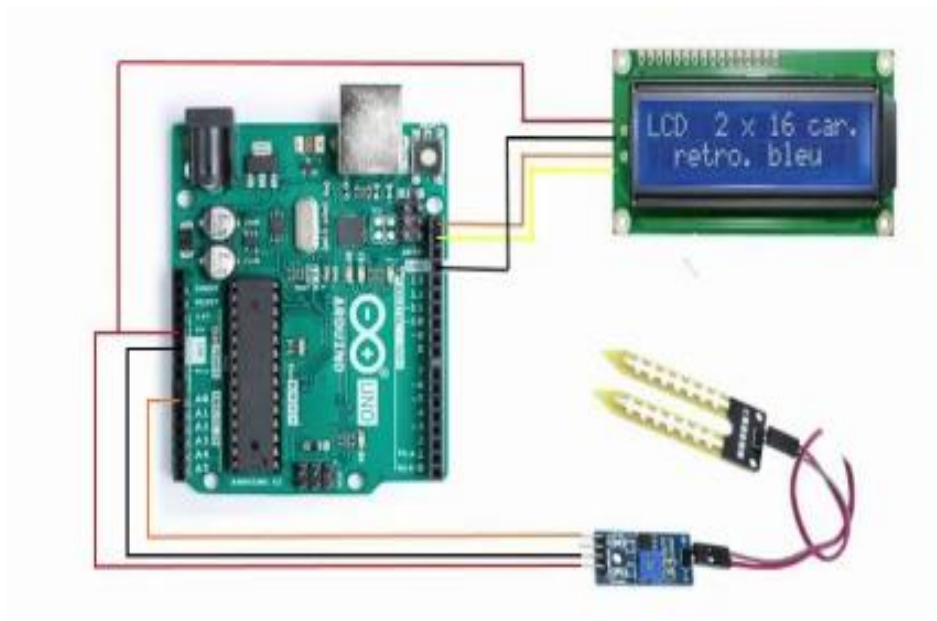


Figure III.10 : schéma câblage de la carte zone de captage.

#### b) Le schéma électronique de la zone de captage :

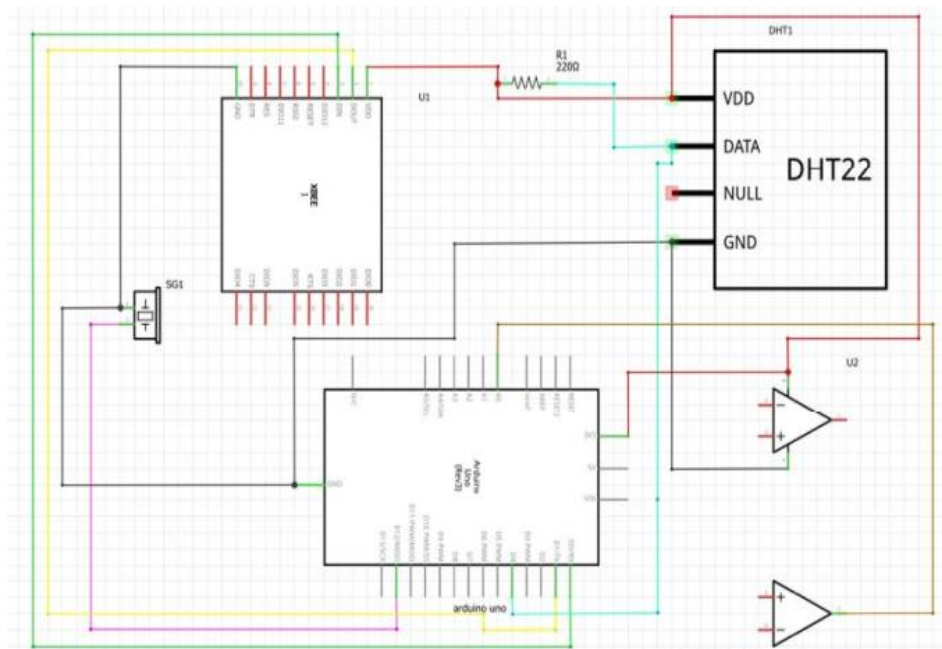


Figure III.11 : schéma électrique de la carte zone de captage.

## c) Le montage de la carte centrale de contrôle :

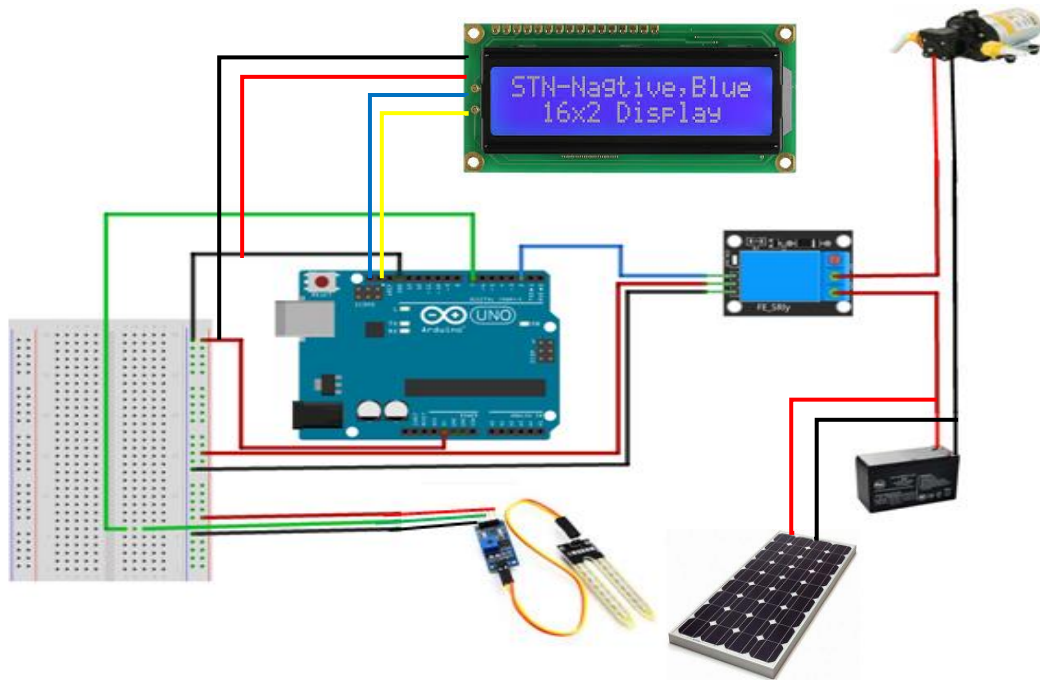


Figure III.12 : schéma câblage de la carte centrale de contrôle.

## d) Le schéma électronique de la carte centrale de contrôle :

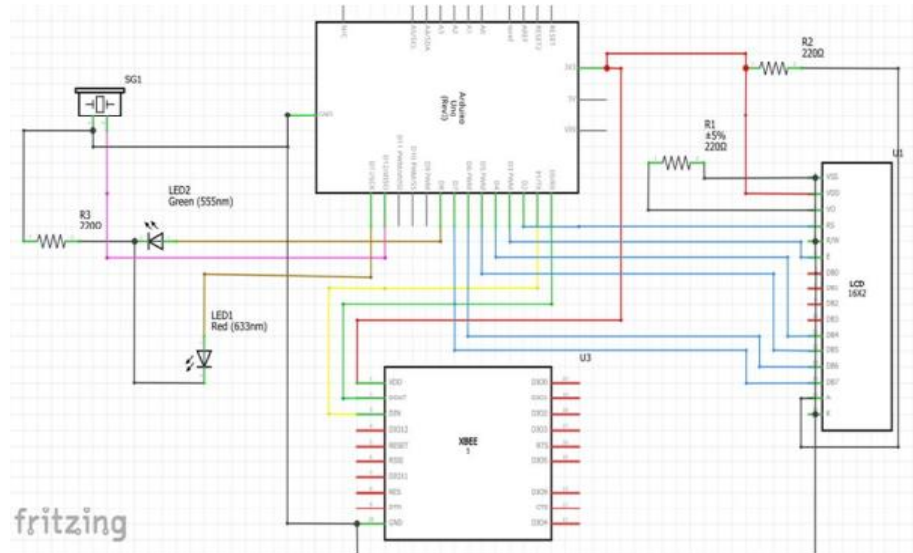
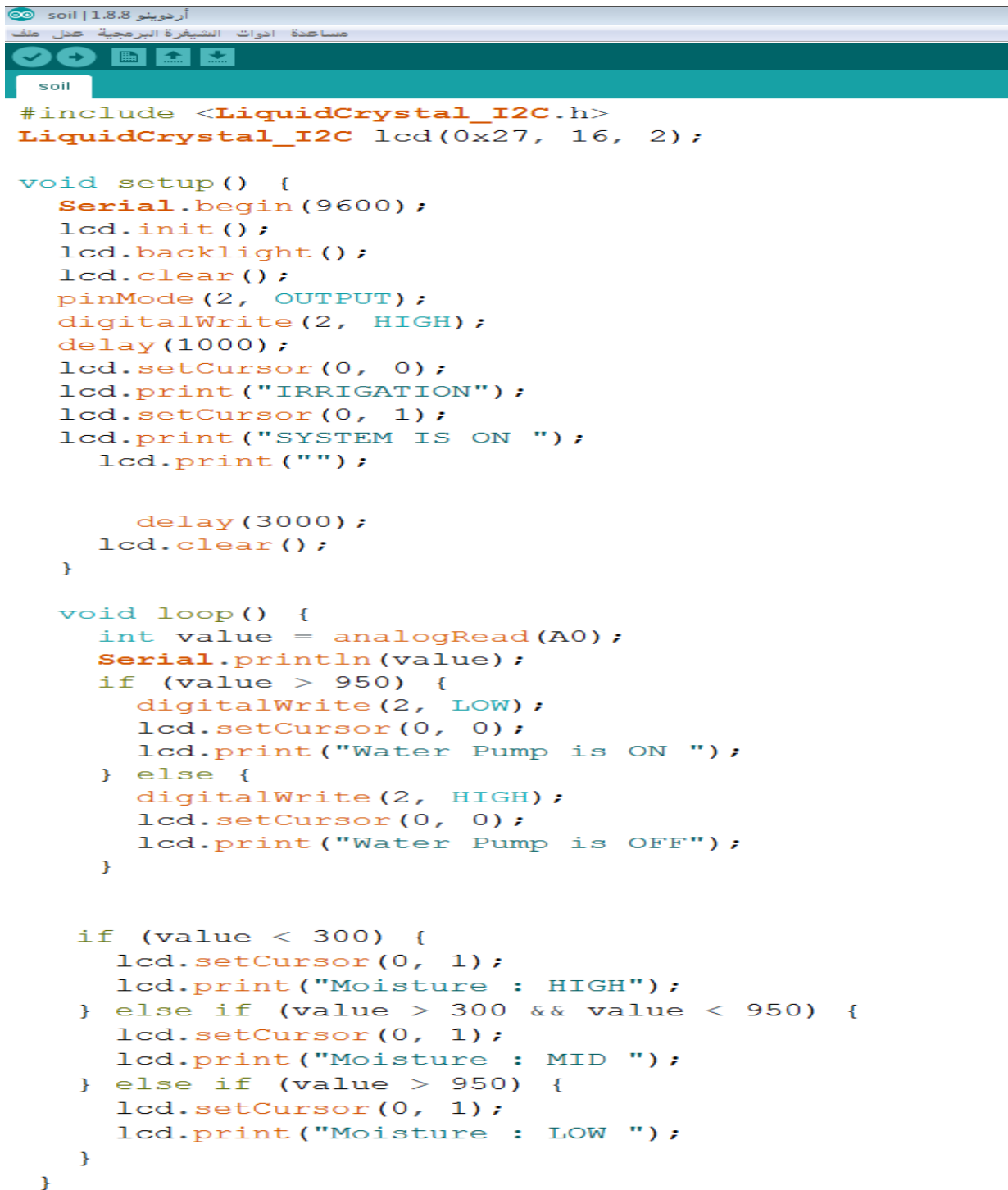


Figure III.13 : schéma électrique de la carte centrale de contrôle.

## III.4.2. Logiciel et programmation :

Notre réalisation ne fonctionne pas sans la partie software, la figure ci-dessous décrit celle-ci, et pour plus de détaille sur la programmation des différents composants.



```

soil | 1.8.8 أردوينو
مساعدة أدوات الشيفرة البرمجية عدل ملف
soil
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  pinMode(2, OUTPUT);
  digitalWrite(2, HIGH);
  delay(1000);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("IRRIGATION");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("SYSTEM IS ON ");
  lcd.print("");

  delay(3000);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  int value = analogRead(A0);
  Serial.println(value);
  if (value > 950) {
    digitalWrite(2, LOW);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Water Pump is ON ");
  } else {
    digitalWrite(2, HIGH);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Water Pump is OFF");
  }

  if (value < 300) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Moisture : HIGH");
  } else if (value > 300 && value < 950) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Moisture : MID ");
  } else if (value > 950) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Moisture : LOW ");
  }
}

```

**Figure III.14 :** Logiciel et programmation.

Les capteurs peuvent être déployés dans différents zones d'intérêt pour connaître l'endroit où il y a des zones sèches, ou zone irriguée ou bien des zones qui dépassent un certain seuil en termes de teneur en eau c-à-d des zones saturés.

### III.4.3. Explication de la configuration de l'expérience:

Dans ce projet, nous examinons un système d'irrigation automatique pour les plantes qui détecte l'humidité du sol à l'aide de l'Arduino Uno. Ce système estime l'humidité du sol à l'aide d'un capteur d'humidité du sol, puis fait fonctionner le moteur (pompe à eau) lorsque l'humidité est inférieure à un niveau spécifique. et lorsque le niveau d'humidité dépasse le niveau. Le limiteur amène le système à arrêter le moteur.

L'état du niveau d'humidité sera également affiché sur un écran numérique LCD 16×2.

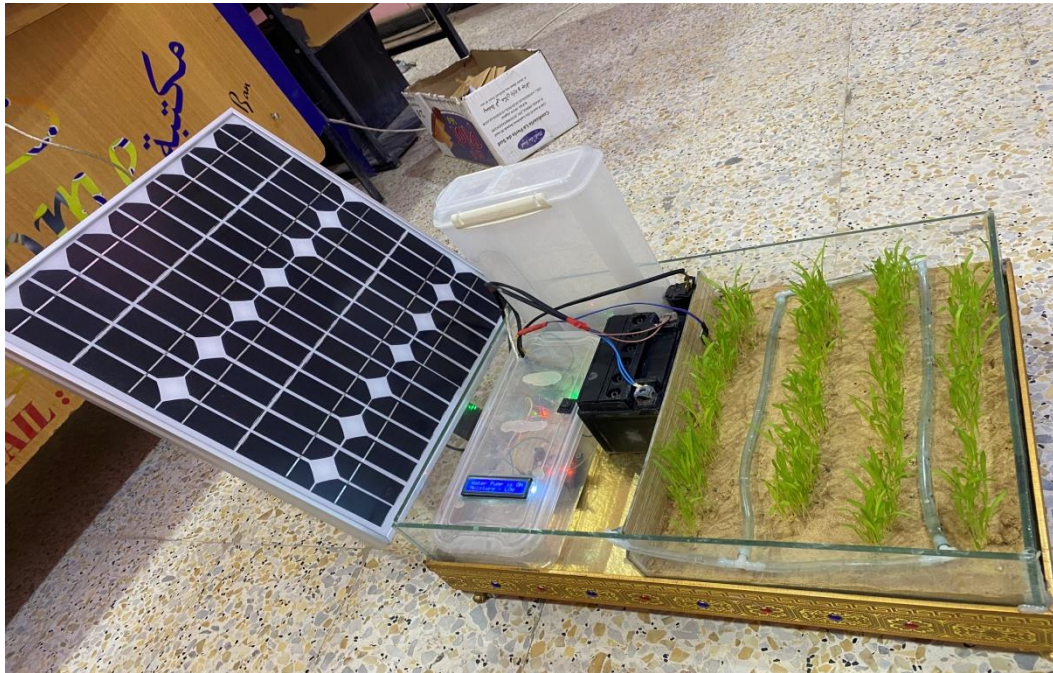


Figure III.15 : montage global de notre système réalisé.

### III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les éléments qui composent notre projet. Nous avons expliqué les liens entre ces éléments.

Nous avons expliqué les étapes de mise en œuvre de ce projet et le principe de fonctionnement du système d'irrigation, qui repose sur l'énergie photovoltaïque comme source principale et sur une carte Arduino Uno. Nous avons également expliqué les différentes étapes de mise en œuvre pratique de notre système, telles que les modèles et programmes complexes intégrés à l'Arduino.

Nous avons pu démontrer que malgré la simplicité des méthodes choisies, le système s'est révélé efficace. De plus, notre projet peut contribuer à l'amélioration des systèmes d'irrigation.

### Conclusion Générale :

Nous pouvons dire que ce mémorandum a couvert de manière complète et détaillée trois chapitres fondamentaux qui s'intègrent les uns aux autres pour fournir une vision intégrée sur l'application d'un système d'irrigation utilisant l'énergie solaire.

Dans le premier chapitre, les concepts généraux du système d'irrigation ont été passés en revue, où nous avons abordé l'importance de l'irrigation dans l'agriculture, et cela inclut les techniques d'irrigation modernes, telles que l'irrigation (goutte à goutte, aspersion, surface). La productivité agricole et la préservation des ressources en eau ont été analysées, en mettant l'accent sur les méthodes d'irrigation traditionnelles et modernes.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le principe de fonctionnement et les caractéristiques de la cellule solaire, la température et le rayonnement solaire, paramètres très importants dans le comportement des cellules solaires ; Du fait des performances électriques de la cellule, elle est très sensible à ces éléments.

Les résultats d'un convertisseur DC/DC de type BOOST qui fournit une tension continue sont présentés. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un additionneur de tension qui permet à ce système de s'adapter au changement climatique. Extraire le maximum de puissance disponible est également important pour la recherche. La méthode P&O (perturbation) a été choisie et surveillée). Implémentation de l'algorithme de suivi du point de fonctionnement maximum (MPPT) pour la puissance des panneaux photovoltaïques.

Quant au chapitre pratique, nous nous sommes concentrés sur l'application des concepts théoriques abordés dans les deux chapitres précédents à travers un projet appliqué visant à utiliser l'énergie solaire dans un système d'irrigation. Les étapes de mise en œuvre du projet ont été expliquées, depuis la conception et la programmation, en passant par l'installation du panneau solaire et du système d'irrigation, et se terminant par l'évaluation des performances et les tests d'efficacité du système. Discuter de l'impact de l'utilisation de l'énergie solaire dans le système d'irrigation sur l'amélioration de l'efficacité de la consommation d'eau et la réduction des coûts opérationnels.

En conclusion, nous avons pu atteindre les objectifs requis d'une manière ou d'une autre. Cependant, le mémorandum recommande d'adopter ces technologies à plus grande échelle et

## Conclusion Générale

---

d'encourager davantage de recherches et d'études pour les développer et améliorer leur efficacité, ce qui contribue à réaliser un développement agricole durable et à préserver l'environnement.

## Annexe

| <b>Annexe</b> |  |
|---------------|--|
| DC/AC         | Conversion continu/alternative .   |
| DC/DC         | Conversion continue/continue   |
| IncCond       | Incrémentation de conductance  |
| PV            | Photovoltaïque   |
| GPV           | Générateurs photovoltaïques  |
| MPP           | Point de puissance maximale .  |
| MPPT          | la recherche du point de puissance maximale .  |
| P&O           | Perturbation et observation  |
| MLI           | Modulation de largeurs d'impulsions  |
| IGBT          | transistor bipolaire à grille isolée   |
| FLC           | les contrôleurs par logique floue  |
| AM            | l'air de masse.  |
| PERC          | Passivated Emitter and Rear Cell   |
| CdS           | sulfure de cadmium   |
| CdTe          | tellurure de cadmium   |
| Ge            | Germanium  |
| Q             | si l'on adopte l'unité   |
| Si            | le silicium  |
| $\alpha$      | Azimet du soleil (deg)   |
| $I_b(\beta)$  | Rayonnement direct sur plan incliné ( $W/m^2$ )  |
| $I_b$         | Rayonnement direct sur plan horizontal ( $W/m^2$ )   |
| $R_b$         | Rapport entre le rayonnement direct sur un plan incliné à celui du plan Horizontal           |
| $I_{bn}$      | Rayonnement direct sur un plan normal ( $W/m^2$ )  |
| $I$           | Rayonnement reçu par la Terre ( $W/m^2$ )  |
| $r(\beta)$    | Rayonnement réfléchi sur plan incliné ( $W/m^2$ )  |
| $\rho$        | Valeur albédo du sol pour le rayonnement réfléchi  |
| $I_G(\beta)$  | Rayonnement Global sur plan incliné ( $W/m^2$ )  |
| $I_d(\beta)$  | Rayonnement diffus sur plan incliné ( $W/m^2$ )  |
| $U$           | tension totale de module PV (V)  |
| $U_1$         | tension de module PV nombre 1 (V)  |
| $U_2$         | tension de module PV nombre 2 (V)  |
| $U_3$         | tension de module PV nombre 3 (V)  |
| $U_n$         | tension de module PV nombre n (V)  |
| $I_1$         | courant de module PV nombre 1 (A)  |
| $I_2$         | courant de module PV nombre 2 (A)  |
| $I_3$         | courant de module PV nombre 3 (A)  |
| $I_n$         | courant de module PV nombre n (A)  |
| $I_{cc}$      | le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température |
| $K$           | ( $1.381 \times 10^{-23} J/K$ ) la constante de Boltzmann,                                   |
| $T (K)$       | la température effective de la cellule, (K)  |
| $q$           | ( $1.602 \times 10^{-19} C$ ) la charge de l'électron,                                       |
| $n_1$         | le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1,                                      |
| $n_2$         | le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2,                                      |
| $k_b$         | est la constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} J K$ ),                                 |

## Annexe

|                      |  |
|----------------------|--|
| I                    | le courant fourni par la cellule, (A)  |
| V                    | la tension aux bornes de la cellule, (V)   |
| R <sub>P</sub>       | la résistance shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction, (Ω)               |
| R <sub>s</sub>       | la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions(Ω) |
| $\frac{k * T_c}{q}$  | le potentiel thermodynamique;  |
| T <sub>c</sub>       | la température absolue ; (°C)  |
| q                    | la constante de charge d'un électron=1.602*10 <sup>-19</sup> C ;                           |
| I <sub>ph</sub>      | le photo courant ; (A)   |
| I <sub>s</sub>       | le courant de saturation inverse. (A)  |
| V <sub>co</sub>      | Tension à circuit ouvert (V)   |
| P <sub>max</sub>     | Puissance maximale du module (W)   |
| I <sub>max</sub>     | courant maximal du module (A)  |
| V <sub>max</sub>     | tension maximal du module (V)  |
| FQ                   | facteur de qualité   |
| FF                   | facteur dr forme   |
| η <sub>c</sub>       | Rendement d'une cellule solaire (%)  |
| V <sub>groupe</sub>  | Tension du groupe PV (V)   |
| I <sub>groupe</sub>  | Courant du groupe PV (A)   |
| V <sub>cellule</sub> | Tension de la cellule PV (V)   |
| I <sub>cellule</sub> | Courant de la cellule PV (A)   |
| N <sub>cellule</sub> | Nombre de cellules PV  |
| V <sub>string</sub>  | Tension de string PV (V)   |
| I <sub>string</sub>  | Courant de string PV (A)   |
| V <sub>module</sub>  | Tension de module PV (V)   |
| I <sub>module</sub>  | Courant du module PV (A)   |
| V <sub>champ</sub>   | Tension du champ PV (V)  |
| I <sub>champ</sub>   | Courant du champ PV (A)  |
| I <sub>shunt</sub>   | Courant shunt du module PV (A)   |
| N <sub>string</sub>  | Nombre de string PV  |
| P <sub>t</sub>       | Puissance totale(W)  |
| N                    | Nombre   |
| P <sub>i</sub>       | Puissance d'un appareil(W)   |
| E                    | l'énergie électrique journalière consommée par les usagers (Wh / j )                       |
| H                    | Le nombre d'heures ( h )   |
| P                    | la puissance ( w )   |
| P <sub>c</sub>       | la puissance crête du générateur photovoltaïque ( W <sub>c</sub> )                         |
| E <sub>c</sub>       | l'énergie journalière consommée (Wh)   |
| K                    | constant des pertes d'énergie ( 0.65- 0.75)  |
| I <sub>r</sub>       | irradiation (kW/m <sup>2</sup> /j)   |
| N <sub>pt</sub>      | le nombre totale des modules   |
| P <sub>c</sub>       | la puissance crête du panneau solaire PV(W)  |
| P <sub>p</sub>       | la puissance d'un panneau choisi (W)   |
| N <sub>pp</sub>      | le nombre des panneaux parallèles  |
| N <sub>ps</sub>      | le nombre des module séries  |
| V <sub>opt</sub>     | la tension d'un panneau choisi optimale (V)  |
| V <sub>sys</sub>     | la tension du système (V)  |
| C <sub>t</sub>       | capacité totale des batteries en (Ah)  |

## Annexe

---

|            |  |
|------------|--|
| $E_c$      | l'énergie journalière consommée (Wh)     |
| $N_{ja}$   | nombre de jour d'autonomie (J)           |
| $R$        | résistance de câble ( $\Omega$ )         |
| $I$        | le courant Passant dans le câble (A)     |
| $\Delta U$ | la chute de tension ( V )                |
| $\rho$     | la résistivité du câble                  |
| $L$        | la longueur des câbles (m)               |
| $S$        | section du câble (mm <sup>2</sup> )      |
| $V_{opt}$  | tension optimale du panneau PV (V)       |
| $I_{opt}$  | courant optimale du panneau PV (A)       |
| $V_{oc}$   | tension circuit ouvert de panneau PV (V) |
| $I_{cc}$   | courant court circuit du panneau PV (A)  |

## Bibliographies

---

- [01] : Goldani, m. et al. (2020). "drip irrigation efficiency in different textured soils: a review." Water.
- [02] : Mastroiilli, m. et al. (2019). "drip irrigation scheduling and fertigation management in processing tomato yield and water-use efficiency." agricultural water management.
- [03] : Albayrak, g. et al. (2019). "effect of drip irrigation on crop diseases." in: drip irrigation. Intechopen.
- [04] : Hopmans, j. W. et al. (2021). "drip irrigation for water savings." encyclopedia of sustainable technologies.
- [05]: Sanchez-molina, j. A. et al. (2020). "economic analysis of drip irrigation in agriculture." Water.
- [06] : Les différents système d'irrigation (Par Prof. Mohammed AZOUGGAGH).
- [07] : Fang, y. et al. (2019). "sustainable water management in agriculture under climate change." Sustainability.
- [08] : Burt, c. M. et al. (2012). "surface irrigation: will it stay or go?" journal of irrigation and drainage engineering.
- [09] :Playán, e. et al. (2015). "surface irrigation systems: analysis and optimization." agricultural water management.
- [10] : Clemmens, a. J. et al. (2019). "surface irrigation in the western united states." irrigation and drainage.
- [11] :Steward, b. L. et al. (2013). "measuring and managing irrigation performance for sugarcane." applied engineering in agriculture.
- [12] : Wallender, w. W. et al. (2013). "estimating consumptive water use of surface-irrigated crops with satellite imagery." irrigation science .
- [13] : Trout, t. J. et al. (2012). "sprinkler irrigation uniformity and wind effect: a literature review and simulation analysis." irrigation science.
- [14] : Christen, e. W. et al. (2018). "spray and microspray irrigation." irrigation engineering: theory and practice.
- [15] : Walker, w. R. et al. (2012). "effects of irrigation method and tillage on runoff and soil erosion on the southern high plains." journal of soil and water conservation.
- [16] : Qadir, m. et al. (2016). "sprinkler irrigation and wind drift: a review." sprinkler irrigation.
- [17] : Li, y. et al. (2018). "energy use and economic analysis of different irrigation systems under arid conditions." agricultural water management.

## Bibliographies

---

- [18] : Yoder, r. E. (2017). "soil erosion and water quality impacts of irrigation." irrigation engineering.
- [19] : P. Patil, B.L.Desai, Intelligent Irrigation Control System by Employing Wireless Sensor Networks ,In International Journal of Computer Applications, vol.79, no.11, pp.0975-8887, Octobre 2013.
- [20] : « Agriculture : un arrosage intelligent à énergie solaire ».
- [23] : <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/histoire> .
- [24] : Ressources naturelles du canada, Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur), divisiondel'énergierenouvelableetélectricité,n°M92-28/2001F,Ottawa,Canada 2002.
- [25]: N. Achaibou,A Malek , N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [26] : <https://total.direct-energie.com/> .
- [27] : Zerguine B., “ MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE ‘’, Mémoire de Master, Université BADJI MOKHTAR Annaba, 2010.
- [28] : Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri, étude basée sur Matlab/simulink des cellules/modules/réseaux photovoltaïques et leur vérification expérimentale International Journal of Energy and Environment, Volume 1, Issue 3, 2010 pp.487-500.
- [29] : A. Saadi«Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », mémoire de magister en électrotechnique, université Mohammed Khider, Biskra, 2001.
- [30] : B. Mamri, M. Zaidi »contribution du système photovoltaïque avec pompage », Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.
- [31] : D. Rekioua, E. Matagne, « *Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, Simulation and Control*», Springer, British Library, 2012, ISBN 978-1-4471-2348-4.
- [32] : C. Cabal, " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.", Thèse Doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2008.
- [33] : A. BORNIA, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'une panneau solaire «Mémoire Ingénieur d'Etat en Electrotechnique université MENTOURI de Constantine. 05/052009 .
- [34] : Lalouni Sofia, Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-eolienne) de production d'énergie électrique, Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.

## Bibliographies

---

[35] : S.Astier, B.Dakyo, Les systèmes photovoltaïques autonomes non embarqués pour la production d'énergie électrique, Journées EEA, Paris(France) janvier1999.

[36] : V.Salas, E.Olias, A.Barra do,A. Lazaro, Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol: 90, N°11, pp: 1555 –1578, 2006.

[37] : I. Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat de l'université du Havre, 2005.

[38] : A. KRAMA et A. GOUGUI, Etude et réalisation d'une carte de controle par Arduino via le système Androide, OUARGLA, 2015.

[39] : <https://components101.com/modules/soil-moisture-sensor-module> .

[40]: Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302) .