



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département DE GÉNIE INDUSTRIELLE**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie industrielle

**Spécialité :** Ingénierie de la maintenance en instrumentation

### **Thème**

# **Etude des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution**

Présenté et soutenu publiquement par :

**Derbouz Draoua Mustapha/ Benkeroura Mohammed Anis**

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Belkhodja Leila	MCB	IMSI UNIV ORAN2	<b>Président</b>
Benabed Khadidja	MAA	IMSI UNIV ORAN2	<b>Encadreur</b>
Djelghoum Farida	MAA	IMSI UNIV ORAN2	<b>Examineur</b>

Année 2022/2023

## **Remerciement**

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

- Nous remercions NOS Mères et NOS Pères pour tout ce qu'ils ont fait pour nous et pour leur fatigue et pour NOUS avoir soutenu dans NOS études.

- Nous remercions notre encadreur Mdm Benabed Khadidja de NOUS avoir encadré pour la préparation de NOTRE projet de fin d'étude et de NOUS avoir dirigé pour mener à bien ce travail et pour NOUS donner le goût d'une initiation dans la recherche.

- Sans oublier de remercier l'ensemble des enseignants de département de Génie industriel de l'institut maintenance et sécurité industriel ORAN pour LEURS CONSEILS  
PRECIEUX.

- Pour tous qui ont contribué de près ou de loin dans notre travail trouve ici notre profonde reconnaissance.

## Dédicace 1

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciement à la personne numéro one dans ma vie à ma chère mère : Benyniat Fatma cette mémoire est dédié à toi .

Autant des phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime.

Puisse le tout puissant redonner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

A mon père :

Qui a toujours été dans mon esprit et dans mon cœur, et je vous donne aujourd'hui mon succès. Que dieu vous bénisse dans le paradis éternel.

A toute la famille « Benyniat » Surtout mes frères Hamouda , Zinou et Mehdi et Yagoub  
A toute ma famille surtout ma sœur Wahiba et à ma Chérie Wafaa Boutaiba , merci d'être à mes coté .

A mon amie et mon binôme Anis Benkeroura et à tous mes amis.

A tous ceux qui m'ont encouragé pendant les moments les plus difficiles à ceux qui j'aime et respecte.

*MUSTAPHA*

## Dédicace 2

Je tiens avec un grand plaisir à dédier ce modeste travail: À l'être le plus cher de ma vie, ma mère. À celui qui m'a fait de moi un homme, mon père. À Mes chers frères et Sœurs. À tous mes amis de promotion de deuxième année Master IMI spécialement mon chère ami et binôme Mustapha , toute personne qui occupe une place dans mon cœur. À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom, je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

En fin je dois une immense gratitude pour l'établissement Dehas et Ali Nemer pour leur soutien et leur prestation en cour de la réalisation de ce travail.

*Anis*

## ملخص

إنتاج في الشمسي الكهروضوئي نظام وحساب دراسة هو المذكورة هذه من الهدف مبدأ و سلبياته و إيجابياته معرفة و أنواعه و خصائصه ناحية من الشمسي اللوح على الكهرياء، والتعرف و الشمسي الكهروضوئي للنظام تحدث أن يمكن التي المحتملة الأعطاب إلى تطرق كذلك و اشتغاله، الشمسي الكهروضوئي النظام من المنتجة الكهرياء كمية في الطبيعية العوامل تأثير الطاقة تنظيم في المساعدة و الشمسي الكهروضوئي للنظام التابعة العناصر ننسى أن دون و (المتناوب تيار الى المستمر التيار تحويل) له المحولة خاصة و له المخزنة كذلك و ، المنتجة الكهريائية المخاطر من الشمسي النظام حماية أجهزة على وتطرق عملها، ومبدأ خصائصها و أنواعها ومعرفة الشمسي الكهروضوئي النظام أنواع و واستعمالات والكهريائية، الطبيعية بصفة وقواعده قوانينه استعمال و الشمسي الكهروضوئي النظام حساب بطريقة المذكورة ونختم برنامج باستعمال الثانية الطريقة إما اليدوي، بحساب بطريقتين،أولا وتطبيقي حسابي مثال ووضع عامة، الكهروضوئية الأنظمة حساب (PVsyst) الاستهلاك و الموقع إحداثيات و المعطيات بإدخال وذلك النتائج ليعطينا

## Résumé

Le but de ce mémoire est d'étudier et dimensionnement un système solaire photovoltaïque raccordée au réseau pour la production d'électricité en site isolé. A cet effet, une demande de charge d'un bâtiment de 10 maisons a été choisie, et où un dimensionnement du système PV-Batteries a été effectué par un calcul numérique directe en utilisant les lois liées à la conversion photovoltaïque, et en deuxième lieu par l'intermédiaire du logiciel spécialisé le Pvsyst. Ce dernier permet un dimensionnement de tous les installations, y compris le câblage, et la protection. Des résultats obtenus, une similarité presque totale entre les deux méthodes de calcul a été remarqué.

## Sommair

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>Introduction :</b> .....	<b>4</b>
Définition d'énergie solaire : .....	4
1.1 Historique sur l'énergie solaire photovoltaïque : .....	5
1.2 Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV : .....	6
1.2.1 Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque : .....	6
1.2.2 Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque : .....	6
1.3 Variation de l'énergie solaire : .....	7
1.3.1 Effet de la nébulosité : .....	7
1.3.2 Effet lié aux saisons : .....	7
1.3.3 Hauteur maximale du soleil à midi vrai : .....	9
1.4 Le rayonnement solaire : .....	9
1.4.1 Mesure du rayonnement solaire : .....	10
1.5 les différents types du rayonnement solaire : .....	11
1.5.1 Le rayonnement direct : .....	11
1.5.2 Le rayonnement diffus : .....	13
1.5.3 Le rayonnement dû à L'albédo ou réfléchié : .....	13
1.5.4 Le rayonnement global : .....	13
1.6 L'énergie solaire photovoltaïque .....	14
1.6.1 Le gisement solaire: .....	15
1.6.2 Potentiel solaire Algérien: .....	16
1.7 Cellule solaire photovoltaïque .....	17
1.7.1 Description de la cellule photovoltaïque .....	17
1.7.2 Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque .....	18
1.8 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : .....	18
1.8.1 Les paramètres des cellules photovoltaïques: .....	20

1.9	Les types de cellules photovoltaïques :.....	23
1.9.1	La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.....	23
1.9.2	La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin.....	24
1.9.3	La cellule au silicium Amorphe .....	24
1.9.4	Les avantages et les inconvénients de chaque cellule :.....	25
1.9.5	La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.....	25
1.10	Le module photovoltaïque.....	26
1.10.1	Constitution d'un module de photovoltaïque :.....	26
1.10.2	Association en série et en parallèle des modules PV.....	27
1.11	La Protection du module PV :.....	30
1.11.1	La diode anti-retour .....	31
1.11.2	Les diodes by-pass.....	31
1.12	Simulation d'un module PV.....	31
1.12.1	Caractéristiques du module photovoltaïque .....	33
1.13	L'influence de l'éclairement et de température.....	34
<b>Conclusion :.....</b>		<b>36</b>
<b>Chapitre 2: Les installations Photovoltaïques.....</b>		<b>37</b>
<b>2</b>	<b>Introduction :.....</b>	<b>38</b>
2.1	Le système de production (Le champ PV).....	38
2.2	La construction d'un champ PV :.....	38
2.2.1	Assemblage des modules photovoltaïques :.....	38
2.2.2	Les supports de ces modules :.....	39
2.3	Système autonome :.....	40
2.3.1	Composition de système :.....	40
2.3.2	Type de system PV autonome : .....	41
2.4	Système hybride : .....	42
2.4.1	Les composants d'un système hybride ( PV – éolienne ) :.....	43

2.5	Système photovoltaïques connectés au réseau électrique : .....	44
2.5.1	Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique : 45	
2.6	Optimisation de l'énergie photovoltaïque .....	47
2.7	Comparaison entre les systèmes : .....	48
<b>Conclusion :</b> .....		<b>49</b>
<b>Chapitre 3:        Systèmes PV        raccordés au        réseau</b> .....		<b>50</b>
<b>3</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>51</b>
3.1	Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau : .....	51
3.1.1	Système PV connecté directement au réseau : .....	51
3.1.2	Systèmes à bus continu intermédiaire : .....	52
3.2	Architecture des systèmes PV connectés au réseau.....	53
3.3	Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire PV ! .....	54
3.3.1	Définition d'un convertisseur DC/DC.....	54
3.3.2	Les types des convertisseurs DC-DC .....	54
3.3.3	Hacheur dévolteur (Buck) .....	54
3.3.4	Hacheur survolteur, parallèle (Boost) .....	57
3.3.5	.Hacheur dévolteur - survolteur (série –parallèle) : .....	58
3.4	Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau : .....	60
3.4.1	Topologie d'onduleur string (String inverter) : .....	62
3.4.2	Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter) : .....	62
3.4.3	Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter) : .....	63
3.5	Onduleurs multi-niveaux : .....	65
3.5.1	Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	66
3.5.2	Onduleur multi-niveaux en pont H cascades .....	71
3.5.3	Inconvénients de l'onduleur multi-niveaux en cascade : .....	73
3.6	Comparaison entre les trois principaux onduleurs multi-niveaux : .....	74

3.7	Modélisation et simulation de structures d'onduleurs triphasés : .....	75
3.7.1	Modèle d'onduleur NPC 3-niveaux développé : .....	75
3.7.2	Modèle d'onduleur FC 3-niveaux développé : .....	75
3.7.3	Modèle d'onduleur CHB 3-niveaux développé : .....	76
3.8	Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution : Influence sur la qualité de l'énergie : .....	77
3.8.1	Injection d'harmoniques de courant : .....	77
3.8.2	Injection de courant continu au réseau : .....	77
3.8.3	Influence sur le plan de tension : .....	77
3.8.4	Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution : .....	78
3.8.5	Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques : .....	78
3.9	Choix de l'onduleur : .....	78
3.10	Mise en évidence la fiabilité de système PV raccordé au réseau : .....	80
3.11	Les grands leaders et fabricants d'onduleurs photovoltaïques .....	80
	<b>Conclusion : .....</b>	<b>81</b>
	<b>Conclusion générale : .....</b>	<b>82</b>

## Liste des figures

### Chapitre 1

Figure 1.2.: Rayonnement en fonction de la météo .....	7
Figure 1. 3: Trajectoire annuelle et journalière du soleil (hémisphère nord) .....	8
Figure 1. 4: Le mouvement de la Terre autour du Soleil. ....	9
Figure 1. 5: Hauteur maximale du soleil à midi vrai .....	9
Figure 1. 6.: Le Radiomètre.....	10
Figure 1. 7.: Le Pyromètre.....	10
Figure 1. 8: Le Pyrhéliomètre.....	11
Figure 1. 9.: Le rayonnement direct sur une surface inclinée .....	11
Figure 1. 10: Composantes du rayonnement solaire .....	14
Figure 1. 11: Carte de l'irradiation solaire en Algérie .....	15
Figure 1. 12:Synoptique d'une cellule solaire .....	17
Figure 1. 13: Création d'un courant électrique dans une cellule PV .....	18
Figure 1.14: Schéma équivalent du modèle à une diode.....	18
Figure 1. 15: Schéma équivalent du modèle à deux diodes .....	19
Figure 1. 16: formes des cellules solaires .....	23
Figure 1. 17: Cellules monocristallines.....	23
Figure 1 18: Cellules Polycristallines .....	24
Figure 1. 19: Cellule Photovoltaïque amorphe .....	24
Figure 1. 20: Rendements des différentes cellules photovoltaïques .....	26
Figure 1. 21: Composition du module photovoltaïque .....	26
Figure 1. 22: Association en série et en parallèle des modules PV .....	27
Figure 1.23: Mise en série des panneaux solaires.....	27
Figure 1. 24: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série .....	28
Figure 1. 25:Mise en parallèle des panneaux solaires.....	29

Figure 1. 26: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle. ....	29
Figure 1.27: caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques ....	30
Figure 1. 28: Protection des modules Photovoltaïques .....	31
Figure 1.29: Simulation d'un module PV par Malab-Simulink .....	32
Figure 1. 30: Caractéristiques (IV,PV) du module photovoltaïque sous Matlab-Simulink .	33
Figure 1.31: zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	33
Figure 1. 32.: Influence de l'éclairement solaire .....	35
Figure 1. 33:Influence de la température .....	35
Figure 2.1:Schéma d'un champ photovoltaïque .....	38
Figure 2.2:reperent le montage des supports de ces modules .....	39
Figure 2.3: Système PV autonome .....	40
Figure 2.4:Principe de fonctionnement du pompage « au fil du soleil » .....	42
Figure 2.5:Schéma de principe d'un pv autonome avec stockage.....	42
Figure 2.6:Schéma du système hybride (PV – éolienne) .....	43
Figure 2.7: les systèmes photovoltaïques connectés au réseau .....	45
Figure 2.8: Système photovoltaïque connecté au réseau électrique .....	45
Figure 2.9:Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique .....	46
Figure 2.10:Caractéristique du point de puissance maximale PPM .....	47
Figure 3.1:système photovoltaïque connecté directement au réseau. ....	51
Figure 3.2:système photovoltaïque connecté via un bus continu-continu. ....	52
Figure 3.3 : Types d'injection d'énergie PV au réseau.....	53
Figure 3.4:Architectures des systèmes PV connectés au réseau. ....	53
<b>Figure 3.5:</b> Schéma de principe d'un hacheur série.....	55
Figure 3.6: Caractéristique des tensions et courants dans un convertisseur Buck.....	56
Figure 3.7:Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un convertisseur Buck.....	57
Figure 3.8:.. Schéma de principe d'un hacheur survolteur ou parallèle (boost).....	57

Figure 3.9:Caractéristique des tensions et courants dans un convertisseur Boost.....	58
Figure 3.10:: Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle. ....	59
Figure 3.11:Caractéristique des tensions et courants dans un convertisseur Buck/Boost....	60
Figure 3.12:Topologie d'onduleur central .....	61
Figure3.3.13:Topologie d'onduleur string .....	62
Figure 3.14:Topologie d'onduleur mufti-string .....	63
Figure 3.3.15:Topologie d'onduleur modulaire: .....	64
Figure 3.16:Onduleur à niveaux multiples .....	66
Figure 3.17:Différentes topologies des onduleurs multi-niveau .....	67
Figure 3.18:Circuit d'une phase d'un onduleur NPC.....	67
Figure 3.19:Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux .....	68
Figure 3.20:Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant.....	70
Figure 3.21:Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascadié .....	72
Figure 3.22:Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en cascade	73
Figure 3.23: Modèle développé d'onduleur NPC 3-niveaux .....	75
Figure 3.24:Modèle développé d'onduleur FC à trois niveaux .....	76
Figure 3.25:Modèle développé d'onduleur CHE à trois niveaux .....	76

## Liste des tableaux :

### Chapitre 1

Tableau 1.1: Répartition du potentiel solaire par région climatique...**Error! Bookmark not defined.**

### Chapitre 3

Tableau 3-1: Comparaison entre les différentes topologies .....65

Tableau 3-2: États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux .....69

Tableau 3-3: États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux.....73

Tableau 3-4: Nombre de composants nécessaires à la réalisation des trois structures .....74

Tableau 3-5: liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché . .....79

## **Introduction générale :**

L'énergie solaire photovoltaïque est devenue un domaine d'étude crucial dans le secteur de l'énergie, offrant une source d'électricité propre, renouvelable et durable. Les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux jouent un rôle essentiel dans la transformation de l'énergie solaire en électricité utilisable et dans son intégration dans les réseaux électriques existants [51].

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie d'un système photovoltaïque raccordé aux réseaux, en analysant ses aspects techniques, économiques et environnementaux. Le premier chapitre établit les bases en fournissant une vue d'ensemble des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque. Le deuxième chapitre se concentre sur les installations photovoltaïques, tandis que le troisième chapitre se penche sur le système photovoltaïque raccordé aux réseaux

Le chapitre 1 explore les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, en mettant l'accent sur les principes fondamentaux de la conversion photovoltaïque. Nous examinons comment les cellules solaires transforment la lumière solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, et nous abordons les différentes technologies de cellules solaires, notamment les cellules en silicium cristallin, les cellules en couche mince et les cellules organiques. En outre, nous discutons des paramètres de performance clés tels que le rendement, la puissance crête et la durée de vie des systèmes photovoltaïques.

Le chapitre 2 se concentre sur les installations photovoltaïques, fournissant une analyse approfondie des différentes étapes impliquées dans leur conception, leur installation et leur maintenance. Nous examinons les aspects tels que la sélection de l'emplacement, le dimensionnement du système, le choix des composants, la gestion de l'ombre et l'optimisation des performances. De plus, nous discutons des défis et des opportunités associées à l'installation de systèmes photovoltaïques, en mettant en évidence les meilleures pratiques et les nouvelles tendances dans le domaine.

Le chapitre 3 se concentre spécifiquement sur le système photovoltaïque raccordé aux réseaux. Nous explorons les différentes configurations de raccordement au réseau, y compris l'autoconsommation, la vente totale et la vente d'excédent d'électricité. Nous étudions les composants clés du système, tels que les onduleurs, les dispositifs de surveillance et de contrôle, ainsi que les dispositifs de stockage d'énergie. De plus, nous

analysons les défis techniques et réglementaires liés à l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques existants, et nous examinons les solutions proposées pour optimiser leur performance et leur efficacité.

En conclusion, ce mémoire fournira une analyse complète d'un système photovoltaïque raccordé aux réseaux, en examinant les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque dans le chapitre 1, les installations photovoltaïques dans le chapitre 2 et le système PV raccordé aux réseaux dans le chapitre 3. L'étude approfondie de ces sujets permettra de mieux comprendre les enjeux, les opportunités et les défis liés à l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque comme source d'électricité propre et durable.

**Chapitre 1 :**  
**Généralités sur**  
**l'énergie Solaire**  
**Photovoltaïque**

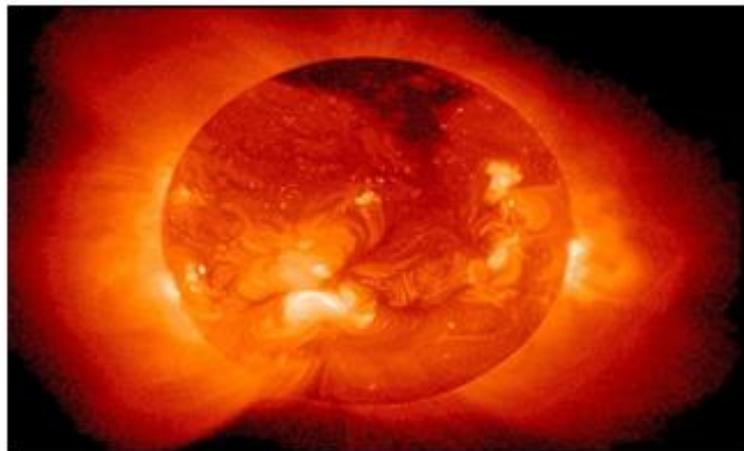
### **Introduction :**

Nous parlons dans ce chapitre d'une manière brève sur les énergies renouvelables, et spécifiquement sur l'énergie solaire photovoltaïque. Nous faisons une étude approfondie sur le rayonnement solaire, qui se transforme en énergie électrique. Nous aborderons également la technologie utilisée dans les panneaux, et par cela nous aurons terminé ce chapitre.

### **Définition d'énergie solaire :**

C'est une énergie inépuisable, tellement présente qu'on a tendance à l'oublier. Pourtant, cette énergie incidente représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale en énergie [1]. Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable. Malheureusement on ne peut pas l'exploiter directement car il faut la transformer en d'autres formes d'énergies plus utiles [2] :

- ✓ en bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive)
- ✓ en utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique)
- ✓ en transformant le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules photovoltaïques (énergie photovoltaïque).



**Figure 1.1.:** Image du soleil

### 1.1 Historique sur l'énergie solaire 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. Becquerel 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 Grylls Adams, professeur de philosophie naturelle au King's College 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 [3].

### 1.2 Les avantages et les inconvénients l'énergie solaire PV :

#### 1.2.1 Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.

-L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).

-Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.

-En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.

-Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes [4].

#### 1.2.2 Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

-Les panneaux solaires coûtent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.

-Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance. De ce fait, pour couvrir un besoin familial, une grande surface de panneaux photovoltaïques est nécessaire.

-Le rendement maximum d'un panneau solaire s'obtient uniquement quand la surface du panneau est strictement perpendiculaire aux rayons solaires. Idéalement, il faudrait donc que la position du panneau varie suivant les saisons et au cours de la journée, ce qui n'est quasiment pas réalisable.

-Le stockage de l'électricité est également très difficile avec les technologies actuelles (problème contourné en cas de raccord avec le réseau EDF).

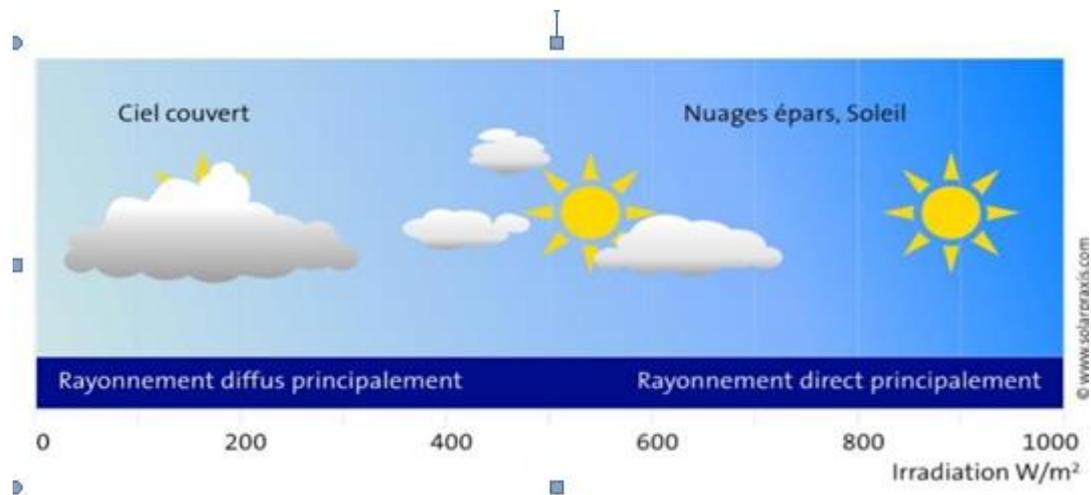
-Le recyclage des cellules photovoltaïques en fin de vie pose des problèmes environnementaux. Les batteries utilisées par les panneaux photovoltaïques sont

composées de plomb, de zinc, de cadmium, . . . et donc ont un impact sur l'environnement [4].

## 1.3 Variation de l'énergie solaire :

### 1.3.1 Effet de la nébulosité :

En météorologie, un nuage est une masse visible constituée initialement d'une grande quantité de gouttelettes d'eau (parfois de cristaux de glace associés à des aérosols chimiques ou des minéraux) en suspension dans l'atmosphère au-dessus de la surface d'une planète. L'aspect d'un nuage dépend de la lumière qu'il reçoit, de la nature, de la dimension, du nombre et de la répartition des particules qui le constituent. Les gouttelettes d'eau d'un nuage proviennent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. La quantité maximale de vapeur d'eau (gaz invisible) qui peut être contenue dans une masse d'air est fonction de la température : plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau.[5]

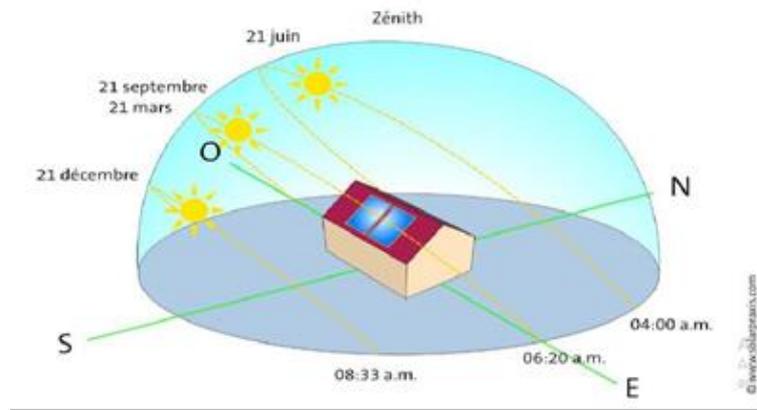


**Figure 1.1.:** Rayonnement en fonction de la météo

### 1.3.2 Effet lié aux saisons :

Une saison est une période de l'année qui observe une relative constance du climat et de la température .

D'un point de vue astronomique, une saison correspond à l'intervalle de temps durant lequel la Terre occupe une portion de l'espace de sa révolution (rotation) autour du Soleil. C'est l'inclinaison de l'axe des pôles, combinée à la révolution de la Terre autour du Soleil, qui fait qu'il se produit une alternance des saisons ; qui proviennent de la variation d'ensoleillement induite par l'orientation changeante vis-à-vis du rayonnement solaire. Elles correspondent aux périodes qui séparent le passage de la Terre à certains points de son orbite ou, réciproquement, du Soleil à certains points de la sphère céleste, et que la mécanique céleste désigne par les équinoxes et les solstices. Pour ces raisons, à tout moment, les saisons astronomiques de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud sont diamétralement opposées [6].



**Figure 1. 2:** Trajectoire annuelle et journalière du soleil (hémisphère nord)

L'énergie incidente du soleil subit des variations le long de l'année, causées principalement par la clarté du ciel (rayonnement direct), ou diffus par les nuages, ainsi que la distance proche ou lointaine du sol.

La terre tourne autour du soleil en décrivant une ellipse de faible excentricité (Période: 365 jours et  $\frac{1}{4}$ )

Déclinaison solaire  $\delta$  : angle entre la direction Terre- Soleil et le plan équatorial [7]

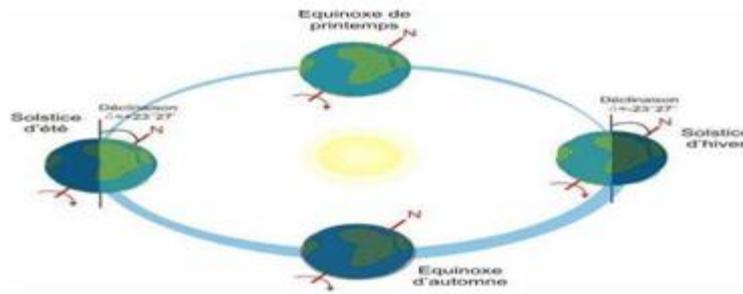


Figure 1. 3: Le mouvement de la Terre autour du Soleil.

### 1.3.3 Hauteur maximale du soleil à midi vrai :

La hauteur du Soleil est souvent assimilée à une longueur alors qu'elle désigne, en astronomie, l'angle que fait la direction de visée du Soleil avec le plan horizontal.

Le Soleil se lève toujours à l'est et se couche toujours à l'ouest, dans l'hémisphère sud comme dans l'hémisphère nord. Mais la différence, c'est qu'il est vers le sud à midi quand on est dans l'hémisphère nord, et vers le nord à midi quand on est dans l'hémisphère sud.[8]

$H_{max}$  : hauteur du soleil a  
 midi vrai  $\varphi$ :latitude du lieu

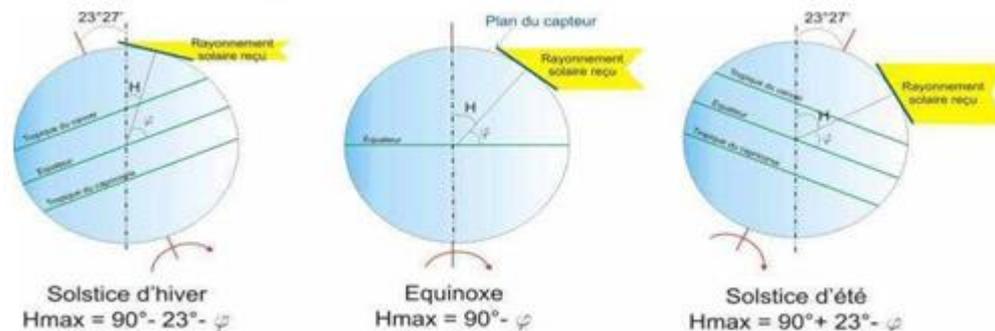


Figure 1. 4: Hauteur maximale du soleil à midi vrai

### 1.4 Le rayonnement solaire :

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaires (la fusion est la réunion de plusieurs noyaux atomiques légers en un seul (4 noyaux d'hydrogène) en un noyau d'hélium) [9]. Le rayonnement solaire peut être décomposé en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment : rayonnement direct, diffus, l'albédo et global.

### 1.4.1 Mesure du rayonnement solaire :

Pour mesurer le rayonnement solaire au niveau de sol, on peut utiliser les instruments suivants

#### 1.4.1.1 Le Radiomètre :

Le radiomètre est un appareil permettant de mettre en évidence l'énergie transportée par les radiations, il est constitué d'une ampoule de verre contenant de l'air à faible pression et un petit moulin à quatre pales ayant chacune une face noire et une face blanche. Il en résulte une dissymétrie dans l'absorption du rayonnement incident, qui provoque la mise en rotation du moulin.



**Figure 1. 5.:** Le Radiomètre

#### 1.4.1.2 Le Pyromètre:

Le pyromètre est un radiomètre pour la mesure du rayonnement dans un plan. Le rayonnement incident étant issu de l'ensemble de l'hémisphère situé au-dessus de l'instrument.



**Figure 1. 6.:** Le Pyromètre

### 1.4.1.3 Le Pyrhéliomètre:

Le pyrhéliomètre est un radiomètre muni d'un collimateur, pour la mesure du rayonnement solaire direct sous incidence normale.



Figure 1. 7: Le Pyrhéliomètre

## 1.5 les différents types du rayonnement solaire :

### 1.5.1 Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil sans diffusion par l'atmosphère [9]. C'est lui qui nous aveugle lorsque on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.

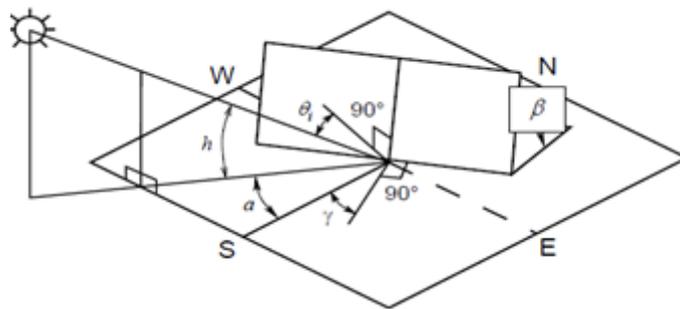


Figure 1. 8.: Le rayonnement direct sur une surface inclinée

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison ( $\beta$ ) (par rapport à l'horizontale), et de son orientation ou azimut ( $\gamma$ ) par rapport au sud (négatif vers l'est, sens anti trigonométrique).

L'angle d'incidence ( $\theta_i$ ) est l'angle formé entre la normale du plan et les rayons du soleil. On parle souvent d'incidence normale lorsque ( $\theta_i = 0$ ). L'angle d'incidence s'écrit, en fonction de la position du soleil [la hauteur ( $h$ ) et l'azimut ( $\alpha$ )], l'inclinaison ( $\beta$ ) du plan récepteur et de son azimut ( $\gamma$ ) par la relation : [11] [12]

$$\cos(\theta_i) = \cos(90 - h)\cos(\beta) + \sin(\beta)\sin(90 - h)\cos(\alpha - \gamma) \quad (1.01)$$

L'éclairement du au rayonnement direct sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque est donné par la relation [13]

$$I(\beta) = I_b R_b \quad (1.01)$$

$$R_b = \cos(\theta_i) / \sin(h) \quad (1.02)$$

$$I(\beta) = I_{bn} \cos(\theta_i) \quad (1.03)$$

Avec ( $I_{bn}$ ) est le rayonnement sur un plan normal et ( $\theta_i$ ) est l'angle d'incidence sur le plan considéré (Angle entre la normale à la surface et le rayon du soleil)

Et avec :

- $\theta_i$  : Angle d'incidence (deg)

- $\beta$  : Inclinaison de la surface réceptrice (deg)

- $\gamma$  : Angle azimutal du plan récepteur (deg)

- $h$ : Hauteur du soleil (deg)

- $\alpha$  : Azimut 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 ( $W/m^2$ )

### 1.5.2 Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est constitué de la lumière diffusée par les molécules de l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions [9]. C'est lui qui nous donne la « lumière du jour » qui nous permet de voir clair même quand le temps est couvert.

### 1.5.3 Le rayonnement dû à l'albédo ou réfléchi :

Il dépend de l'environnement du site [9], il résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). Il peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.

Le sol reçoit du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La valeur albédo du sol pour les rayonnements direct ( $\rho_b$ ) et diffus ( $\rho_d$ ) peut être différente pour une réflexion isotopique, on suppose que ( $\rho_b = \rho_d = \rho$ ) [13]

$$I_r(\beta) = 1/2 I_p(1 - \cos(\beta)) \quad (1.05)$$

Avec :

- $I_r(\beta)$  : Rayonnement réfléchi sur plan incliné ( $W/m^2$ )
- $\rho$  : Valeur albédo du sol pour le rayonnement réfléchi
- $\rho_b$  : Valeur albédo du sol pour le rayonnement direct
- $\rho_d$  : Valeur albédo du sol pour le rayonnement diffus
- $\beta$  : Inclinaison de la surface réceptrice (deg)
- $I$  : Rayonnement reçu par la Terre ( $W/m^2$ )

### 1.5.4 Le rayonnement global :

Le rayonnement global est la somme de ces trois types de rayonnement diffus, le rayonnement direct et l'albédo [9], comme présenté par la figure I.9:

$$I(\beta) = I_b(\beta) + I_d(\beta) + I_r(\beta) \quad (1.06)$$

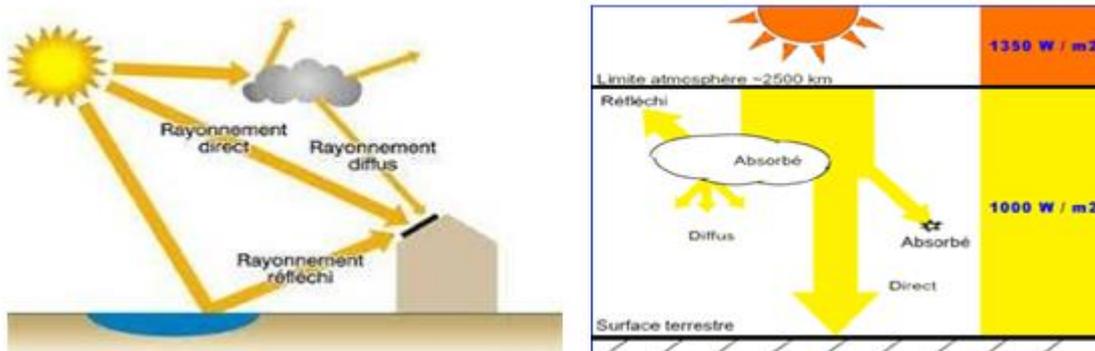
Avec :

- $I_G(\beta)$  : Rayonnement Global sur plan incliné ( $W/m^2$ )

- $I_b(\beta)$  : Rayonnement direct sur plan incliné ( $W/m^2$ )

- $I_d(\beta)$  : Rayonnement diffus sur plan incliné ( $W/m^2$ )

- $I_r(\beta)$  : Rayonnement réfléchi sur plan incliné ( $W/m^2$ )



**Figure 1. 9:** Composantes du rayonnement solaire

## 1.6 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme une source de lumière. Cette énergie peut être captée et transformée en électricité grâce à des panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Cette transformation est appelée « effet photovoltaïque ». Elle a été découverte en 1839 par Antoine-César Becquerel. Elle consiste à produire un courant lorsque la surface des panneaux est exposée à la lumière. Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots: « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière et « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro Volta, qui vient de « volt » et qui représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique [14, 2]. L'élément le plus important d'un système photovoltaïque est la cellule, élément de base de l'unité qui collecte la lumière du soleil et les modules qui rassemblent un grand nombre de cellules.

### 1.6.1 Le gisement solaire:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

#### 1.6.1.1 Données géographiques :

D'une superficie de 2.381.741 Km<sup>2</sup>, l'Algérie présente une diversité de zones climatiques qu'on peut classer en trois catégories :

- ✓ Le Tell : climat tempéré humide de type méditerranéen.
- ✓ Les Hautes plaines : climat de type continental.
- ✓ Le Sahara : climat aride et sec.

Elle se situe entre la latitude 18° et 38° Nord, et entre 9° de longitude Ouest, et 12° de longitude Est. Le méridien international 0° Greenwich passe près de Mostaganem. Les distances entre le nord et le sud, l'est et l'ouest varient de 1500 à 2000 Km [10].

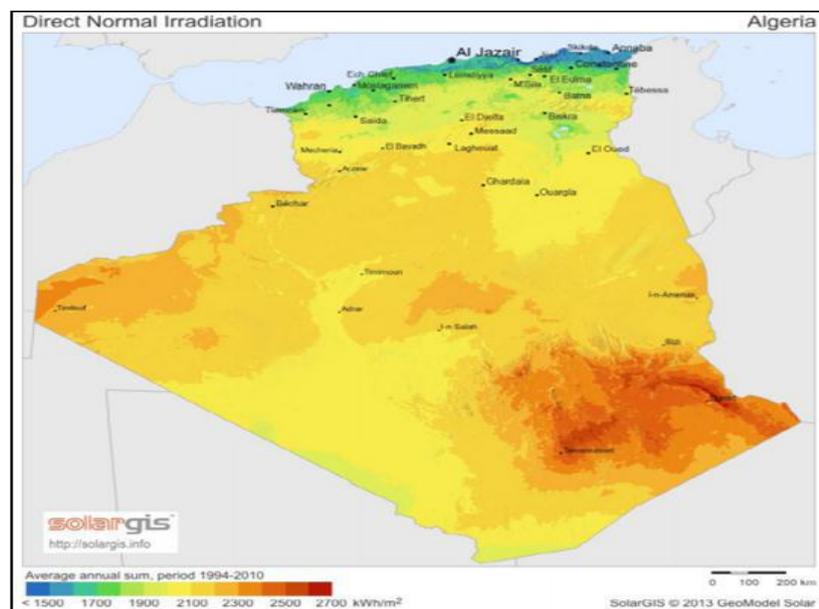


Figure 1. 10: Carte de l'irradiation solaire en Algérie

### 1.6.2 Potentiel solaire Algérien:

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure 1.11 elle appartient à l'un des principaux gisements solaires, le (MENA).

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatial Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau suivant selon l'ensoleillement reçu annuellement :

**Tableau 1.1:** Répartition du potentiel solaire par région climatique

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

L'Algérie dispose donc de suffisamment d'énergie solaire qui peut satisfaire la demande énergétique mondiale.

## 1.7 Cellule solaire photovoltaïque

### 1.7.1 Description de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est l'élément fondamental de la conversion photovoltaïque. En effet, cette cellule qui est exposée à la lumière (photons), transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La photopile délivre une tension variable entre 0V et 0.7V [9], elle dépend des propriétés des matériaux utilisés et de la température. Nous allons ici présenter la structure et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

#### 1.7.1.1 Structure d'une cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est réalisée en suivant les étapes suivantes :

-La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopée N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre: c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge positive.

-La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur. Les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P), comme illustré sur la figure 1.12.

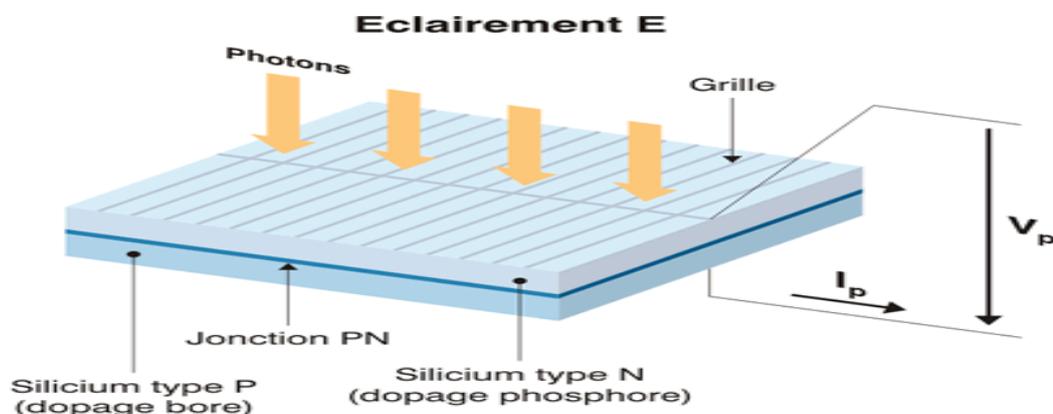
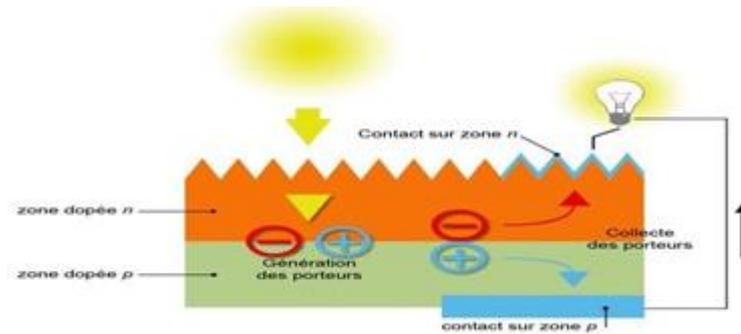


Figure 1. 11:Synoptique d'une cellule solaire

## 1.7.2 Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque fonctionne grâce au rayonnement solaire. Pour générer de l'électricité, elle fait appel à l'effet photovoltaïque qui est obtenu à la suite du choc des photons issus de la lumière solaire sur un matériau semi-conducteur. Ce dernier transmet l'énergie des photons aux électrons qui vont alors créer la tension électrique. Voici le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.



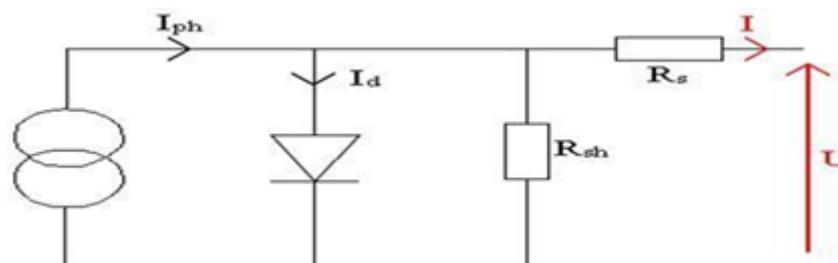
**Figure 1. 12:** Création d'un courant électrique dans une cellule PV

## 1.8 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode

### 1.8.1.1 Modèle à une diode :

La cellule photovoltaïque est représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode comme le montre la figure I.14 :



**Figure 1.13:** Schéma équivalent du modèle à une diode

L'expression du courant I devient alors : [15]

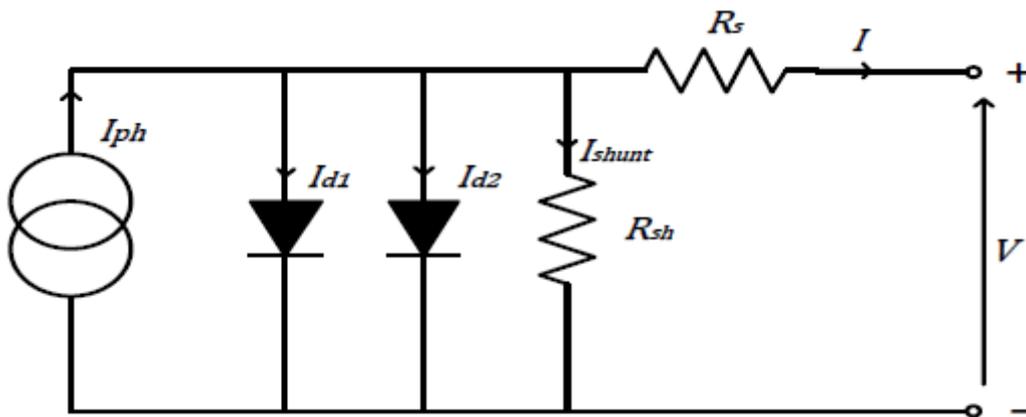
$$I = I_{cc} - I_d \left[ e^{q \left( \frac{V+I R_s}{K_i - 1} \right)} \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \dots\dots\dots(1.07)$$

La résistance parallèle (Rp) est très grande par rapport à la résistance série (Rs), son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger. Ce modèle, est largement utilisé pour la modélisation.

**1.8.1.2 Modèle à deux diodes :**

La figure suivante représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I01 et I02 et de facteurs de diode n1 et n2, une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. la résistance série Rs tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal.

Sa valeur peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique I(V) pour la tension à circuit ouvert Vco. La résistance parallèle Rsh traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction [15].



**Figure 1. 14:** Schéma équivalent du modèle à deux diodes

Le courant I délivré par la cellule est donné par l'expression suivante [15] :

$$I = I_{cc} - I_d \left[ e^{q \left( \frac{V+I R_s}{N_s \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_p} \times R_s \quad (1.08)$$

Avec :

$ICC(A)$  : le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température

$I_{d1}(A)$  : correspondant au courant de saturation de la diode1,

$I_{d2}(A)$  : correspondant au courant de saturation de la diode2,

$K(1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K})$  : la constante de Boltzmann,

$T(K)$  : la température effective de la cellule,

$q(1.602 \times 10^{-19} \text{ C})$  : 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,

$I(A)$  : le courant fourni par la cellule,

$V(V)$  : la tension aux bornes de la cellule,

$R_P(\Omega)$  : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction,

$R_S(\Omega)$  : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

### 1.8.1 Les paramètres des cellules photovoltaïques:

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $ICC$ ,  $V_{CO}$ ,  $P_{max}$ ,  $FQ$ ,  $ff$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques

#### **Courant de court-circuit, ( $ICC$ ) :**

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:

$$I_{cc} (V = 0) = I_{ph} \quad (1.09)$$

**Tension à circuit ouvert, (VCO) :**

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 [16]. La valeur de cette tension diminue avec la température et dépend de l'éclairement de la cellule

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solair}} \quad (1.10)$$

$\frac{k * TC}{q}$  : représente la potentielle thermodynamique :

$T_c$  : La température absolue ;

$q$  : la constante de charge d'un électron= $1.602 \times 10^{-19}$  C;  $K$ : la constante de Boltzmann= $1.38 \times 10^{-23}$ ;

$I_{ph}$  : la photo courant ;

$I_s$  : le de saturation inverse courant.

**Puissance maximale (Pmax) :**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée Pmax) pour un point de fonctionnement **Pmax(I<sub>max</sub>, V<sub>max</sub>)** de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et **ICC** et tension comprise entre **0** et **VCO**) donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit (V.I),

$$p = V(I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{AUT}\right) - 1 \right]) \quad (1.11)$$

Soit :

$$I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{A_{UT}}\right) - 1 \right] - V I_s \left(\frac{1}{A_{UT}}\right) \exp\left(\frac{V}{A_{UT}}\right) = 0 \quad (1.12)$$

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

$$\left(1 + \frac{V_{max}}{A_{UT}}\right) \left(\frac{V_{max}}{A_{UT}}\right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (1.13)$$

Donc:

$$I_{max} = \left(\frac{V_{max}}{A_{UT}}\right) \exp\left(\frac{V_{max}}{A_{UT}}\right) \quad (1.14)$$

Le produit ( $V_{max} \times I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{CO} \times I_{CC}$ ). [17]

#### **Facteur de qualité (FQ) :**

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

#### **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: [18]

$$f = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (1.15)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%. [18]

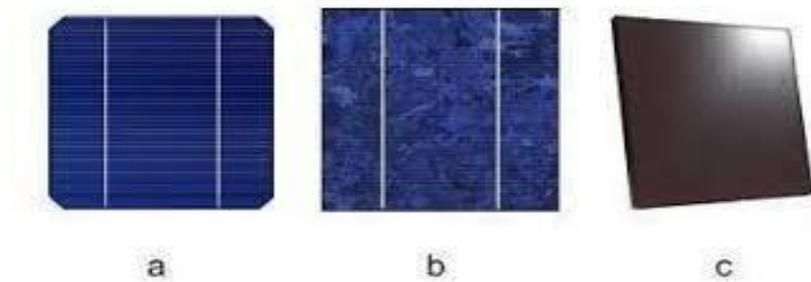
#### **1.8.1.3 Rendement d'une cellule solaire ( $\eta_c$ ) :**

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée la puissance du rayonnement solaire incident [18].

$$\eta_c = \frac{V_{max} . I_{max}}{P_{solair}} \quad (1.16)$$

### 1.9 Les types de cellules photovoltaïques :

Les photopiles au silicium cristallin sont plus répandues [1]. 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.

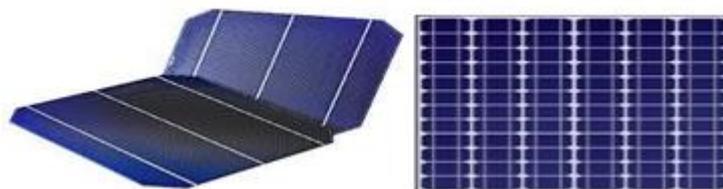


**Figure 1. 15:** formes des cellules solaires

#### 1.9.1 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.

Le silicium monocristallin est le résultat du refroidissement du silicium fondu. Une fois solidifié, il se transforme en un cristal uniforme qui est découpé en tranches fines afin de former la cellule photovoltaïque. La couleur de ce matériau est bleue, sans trace de cristaux ou autres [19].

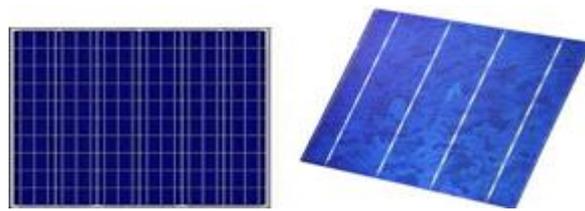


**Figure 1. 16:** Cellules monocristallines

### 1.9.2 La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

Pour obtenir du silicium polycristallin, on fait fondre le silicium dans un moule métallique carré et allongé, appelé lingotière. Le coloris de ce type de cellule est bleu et parsemé de motifs laissés par les cristaux. Cette particularité nous permet de reconnaître facilement cette cellule photovoltaïque [19].

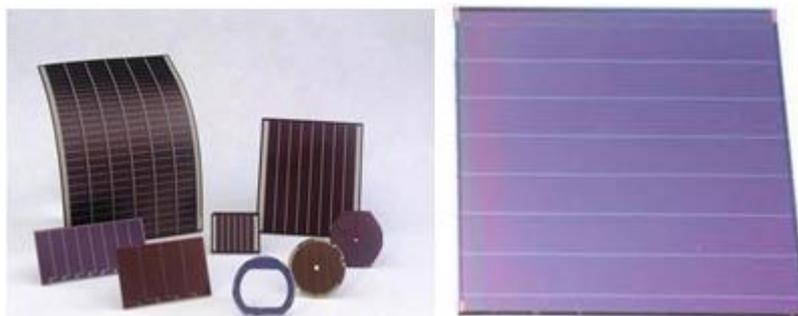


**Figure 1 17:** Cellules Polycristallines

### 1.9.3 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 polycristallines. 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. [19]



**Figure 1. 18:** Cellule Photovoltaïque amorphe

### **1.9.4 Les avantages et les inconvénients de chaque cellule :**

#### **1.9.5 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin**

Cette cellule photovoltaïque offre un rendement d'environ 25 %, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un rendement très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées.

##### **1.9.5.1 La cellule photovoltaïque en silicium polycristallin**

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Elle a cependant l'avantage de pouvoir être utilisée par temps nuageux, ceci grâce à sa flexibilité d'irradiation.

##### **1.9.5.2 La cellule au silicium amorphe**

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps [19].

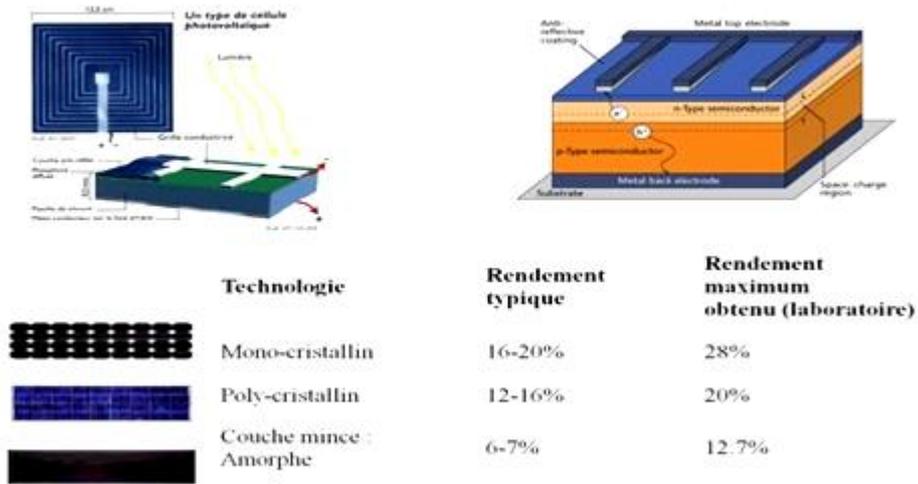


Figure 1. 19: Rendements des différentes cellules photovoltaïques

## 1.10 Le module photovoltaïque

### 1.10.1 Constitution d'un module de photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments [20]:

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïque.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules

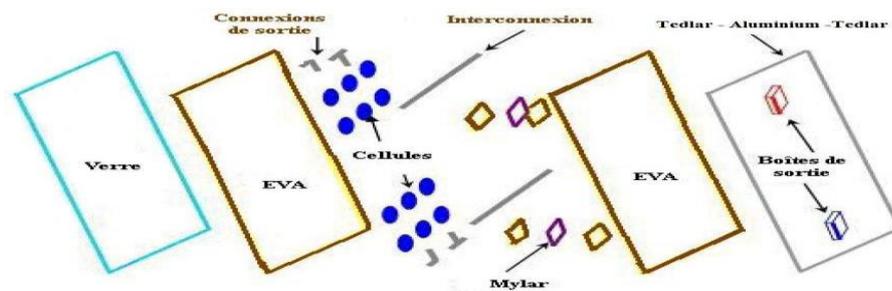
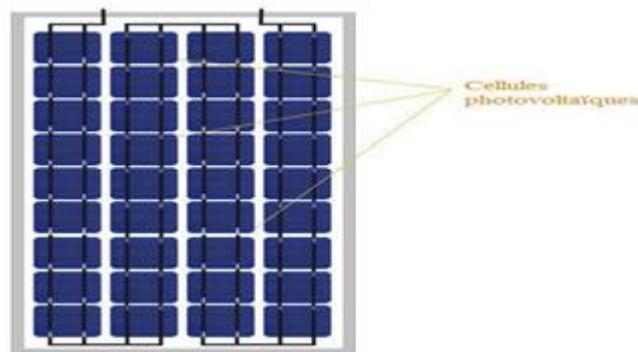


Figure 1. 20: Composition du module photovoltaïque

## 1.10.2 Association en série et en parallèle des modules PV

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 [21].



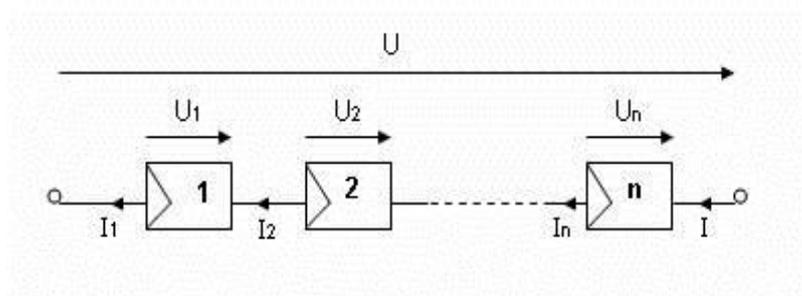
**Figure 1. 21:** Association en série et en parallèle des modules PV

### 1.10.2.1 Mise en série

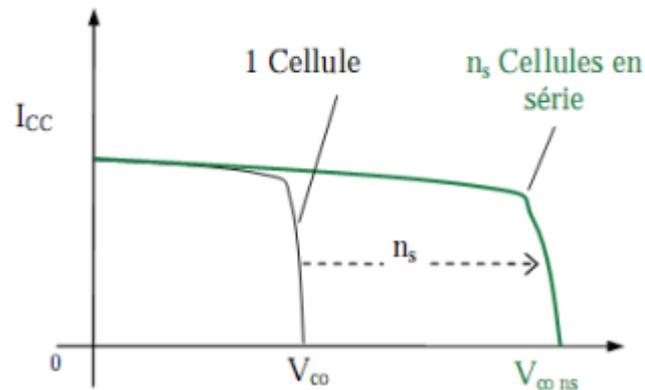
En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. [22]

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (10.I)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_n$$



**Figure 1.22:** Mise en série des panneaux solaires



**Figure 1. 23:** caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série

Avec :  $U$  = tension totale de module PV

$U_1$  = tension de module PV numéro 1

$U_2$  = tension de module PV numéro 2

$U_n$  = tension de module PV numéro n

$I_1$  = courant de module PV numéro 1

$I_2$  = courant de module PV numéro 2

$I_n$  = courant de module PV numéro n

### 1.10.2.2 Mise 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 [22].

$$U = U_1 = U_2 = U_3 \dots \dots \dots = U_n \quad (1.17)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_n$$

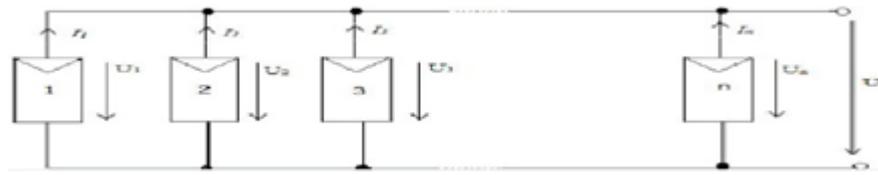


Figure 1. 24: Mise en parallèle des panneaux solaires

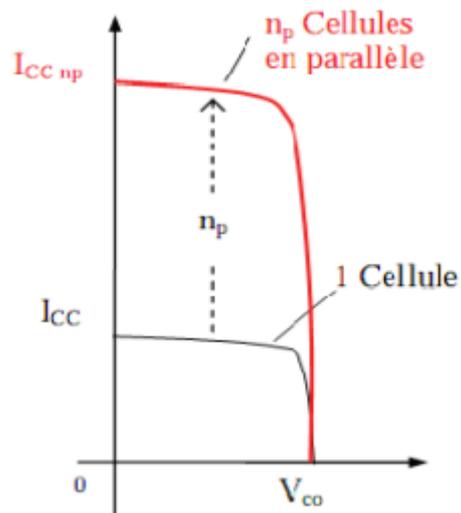


Figure 1. 25: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle.

Avec :  $U$  = tension totale de module PV

$U_1$  = tension de module PV numéro 1

$U_2$  = tension de module PV numéro 2

$U_n$  = tension de module PV numéro n

$I_1$  = courant de module PV numéro 1

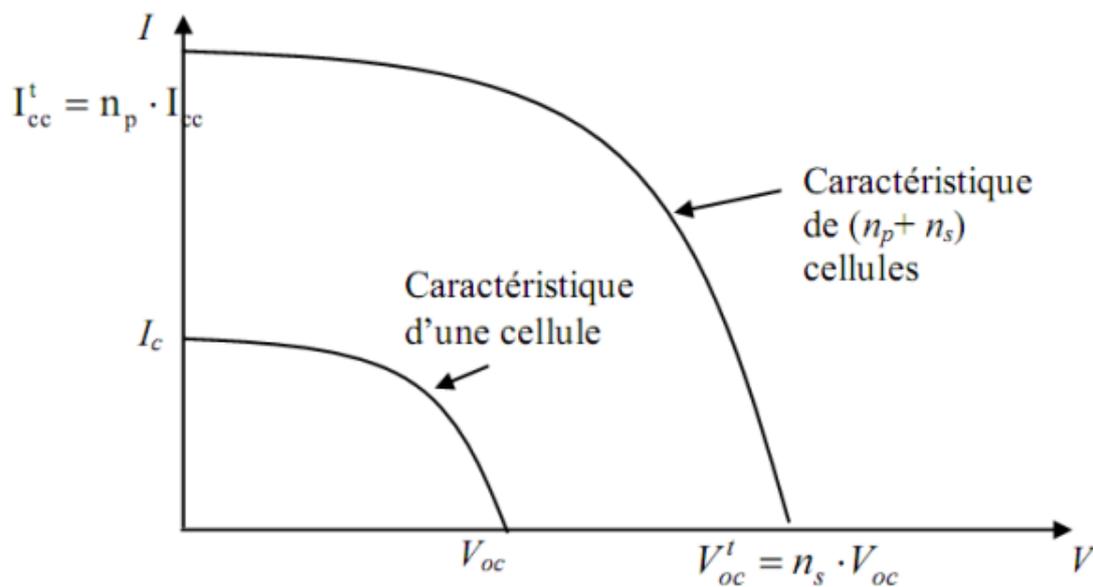
$I_2$  = courant de module PV numéro 2

$I_n$  = courant de module PV numéro n

### 1.10.2.3 Regroupement Mix (série et parallèle) :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de  $N_s$  modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.



**Figure 1.26:** caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques

### 1.11 La Protection du module PV :

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années. Il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux modules pour éviter des pannes destructrices liées à l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés [15] :

## 1.11.1 La diode anti-retour

Empêche la circulation d'un courant négatif dans les GPV lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit.

## 1.11.2 Les diodes by-pass

Servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

La figure 1.28 montre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection, et la mise en évidence du courant de circulation dans le cas de la défaillance d'une cellule.

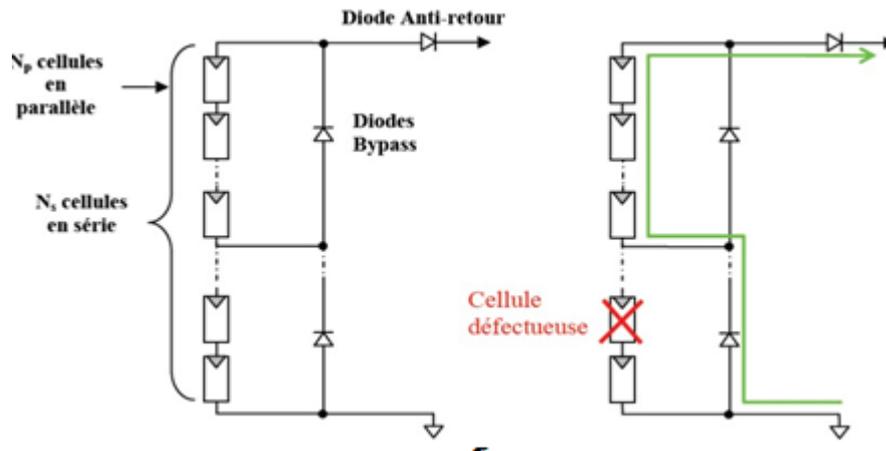
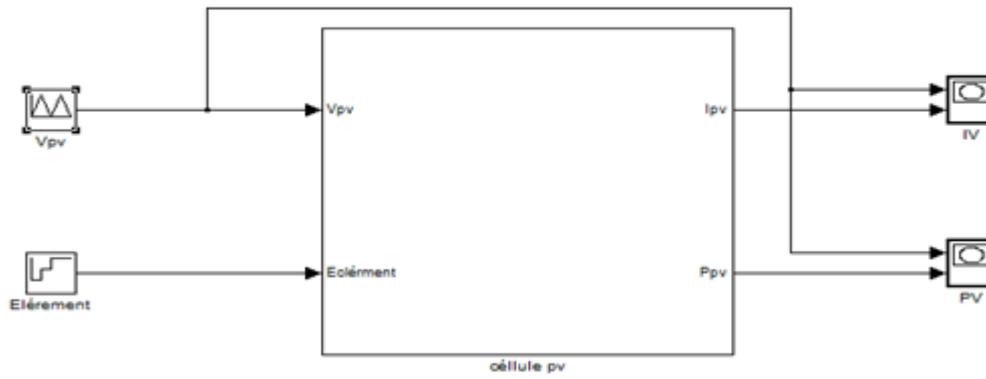


Figure 1. 27: Protection des modules Photovoltaïques

## 1.12 Simulation d'un module PV

Dans le but de maitre en œuvre les connaissances théoriques précédentes ; on a procédé à la simulation d'un panneau solaire, en utilisant le modèle à une seule diode, et ce en présentant comme entrées l'éclairement solaire et la température. La simulation est faite sous Matlab-Simulink.

$I_{cc} = 5.62$  A,  $V_{oc} = 45.2$  v,  $T = 25^\circ$ , Courant de  $P_{max} = 5.2$  A Tension de  $P_{max} = 36.6$  v, Eclairement =  $1000\text{w/m}^2$  , 52 cellules en série

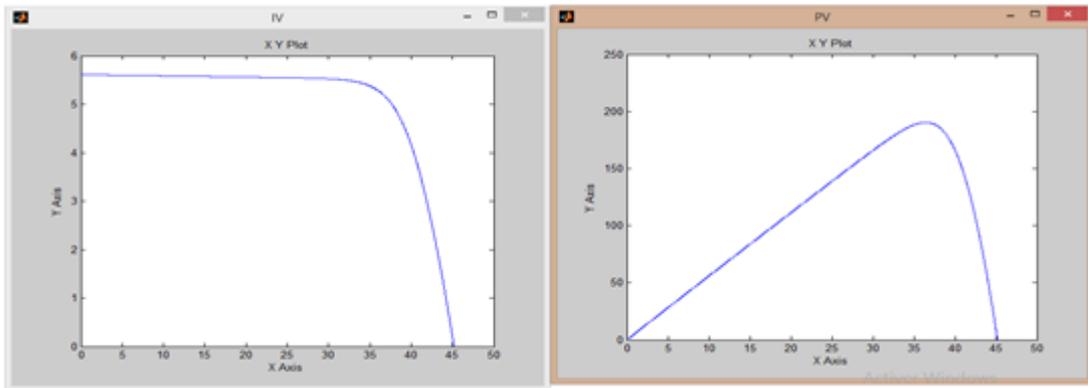


**Figure 1.28:** Simulation d'un module PV par Malab-Simulink

## 1.12.1 Caractéristiques du module photovoltaïque

### 1.12.1.1 Caractéristiques courant-tension

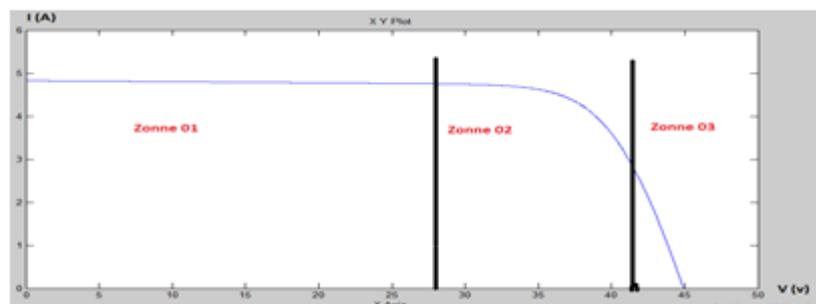
Les figures suivantes illustrent respectivement les caractéristiques courant-tension et de puissance dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$  ;  $T=25^\circ\text{C}$ ). 52 Cellule en série



**Figure 1. 29:** Caractéristiques (IV,PV) du module photovoltaïque sous Matlab-Simulink

### 1.12.1.2 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et de façon générale des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.



**Figure 1.30:** zones de fonctionnement du module photovoltaïque

La caractéristique d'un module PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température

uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur PV en trois zones :

**-Zone-1-** : Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation, l'admittance interne pouvant être modélisée par  $I/R_{sh}$ .

**-Zone-2-** : Une zone assimilable à un générateur de tension  $U_{co}$  d'impédance interne équivalente à la résistance série  $R_s$ .

**-Zone-3-** : Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de  $R_s$  et  $R_{sh}$ .

C'est dans la zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par couple  $(I_{max}, U_{max})$ , et seule une charge dont de caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.[23].

### 1.13 L'influence de l'éclairement et de température

#### 1.13.1.1 L'influence de l'éclairement

La figure suivante représente la variation du courant par rapport à la tension pour différentes intensités lumineuses et les maximums de puissance pour chaque cas. On peut remarquer que les points de fonctionnement à puissance maximale se déplacent peu et se situent autour d'une même valeur. On peut aussi remarquer que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire.

Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On déduit donc que le module peut fournir une tension correcte, même à faible éclairement.

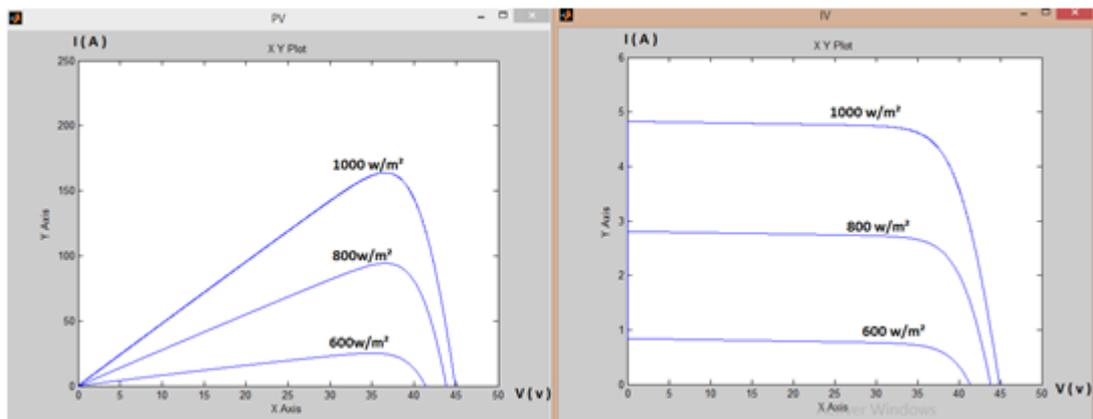


Figure 1. 31.: Influence de l'éclairement solaire

### 1.13.1.2 Influence de la température

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque. Expérimentalement, on remarque que le courant de court-circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée (de l'ordre de  $-0.4\%/K$ ). La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de  $30^\circ$ ) [24].

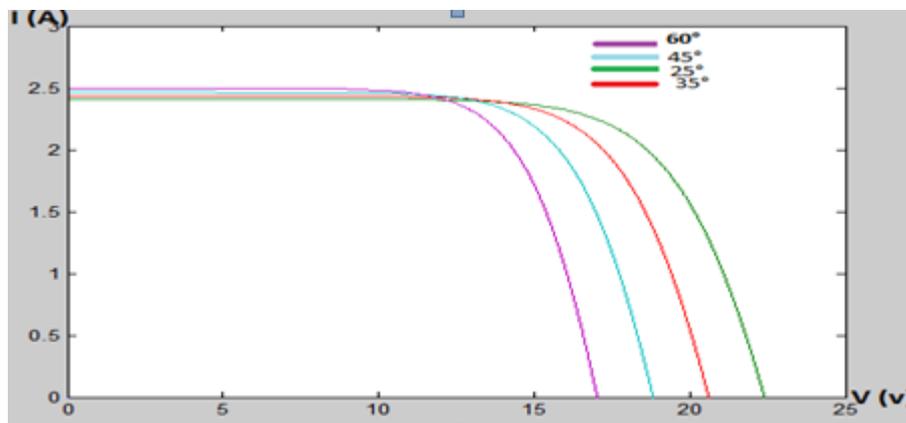


Figure 1. 32: Influence de la température

### **Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, des généralités sur la conversion photovoltaïque ont été données. Une description de la conversion, les types des cellules utilisées, les modélisations les plus utilisées, ainsi que les principaux les plus répandus sont également exposés.

Dans le deuxième chapitres on va prendre les différents types des installations photovoltaïques et ces composants ainsi leur principes de fonctionnement.

**Chapitre 2 :**  
**Les installations**  
**Photovoltaïques**

### **2 Introduction :**

Dans ce chapitre, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques est présentée.

Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, leurs types, leurs problèmes produits, leurs compositions et les critères de choix d'un système photovoltaïque.

#### **2.1 Le système de production (Le champ PV)**

Le champ photovoltaïque représente l'unité de production DC d'un système. Pour obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de

Panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle parfois une centrale.



**Figure 2.1:**Schéma d'un champ photovoltaïque

#### **2.2 La construction d'un champ PV :**

##### **2.2.1 Assemblage des modules photovoltaïques :**

Les panneaux solaires dans le champ photoélectrique sont du même type et de même taille et ont les mêmes propriétés électriques. Et n'oubliez pas que tous les panneaux ont la même direction et le même angle d'inclinaison. Tout cela augmente l'efficacité et la qualité du champ PV

### 2.2.2 Les supports de ces modules :



**Figure 2.2:**repeent le montage des supports de ces modules

Les modules photovoltaïques sont assemblés sur un support généralement métallique.

Cette charpente est réalisée le plus souvent en aluminium ou en acier galvanisé. Ce choix de matériau est justifié par des contraintes telles que [25]:

Résistance (vent)

- Tenue à la corrosion mécanique
- Conductivité thermique
- Facilité d'assemblage
- Poids,etc.

De nombreux types de châssis existent et sont fonction du nombre de modules et de leur taille, du support d'implantation (dalle, mur, toit, ...), de leur hauteur, et de leur inclinaison.

Leur hauteur doit être telle que les modules solaires soient hors de portée d'éléments indésirables (flore, faune ...). Leur inclinaison est généralement fixe et déterminée par le dimensionnement.

### 2.3 Système autonome :

On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs, etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas).

En règle générale, les systèmes photovoltaïques autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. Actuellement, l'énergie photovoltaïque est la plus compétitive dans les zones éloignées du réseau et avec une demande énergétique relativement faible (généralement inférieure à 10 kWc) [26].

#### 2.3.1 Composition de système :

Typiquement, une installation photovoltaïque autonome se compose d'un générateur photovoltaïque, d'une batterie accumulateurs permet de stocker l'énergie électrique afin de la restituer par la suite, en fonction des besoins. Elle est cruciale pour les installations autonomes, moins présentes dans l'installation raccordés au réseau et dispensable pour les installations fonctionnant au fil du soleil. D'une charge, d'un régulateur et éventuellement d'une interface de conversion DC-AC.

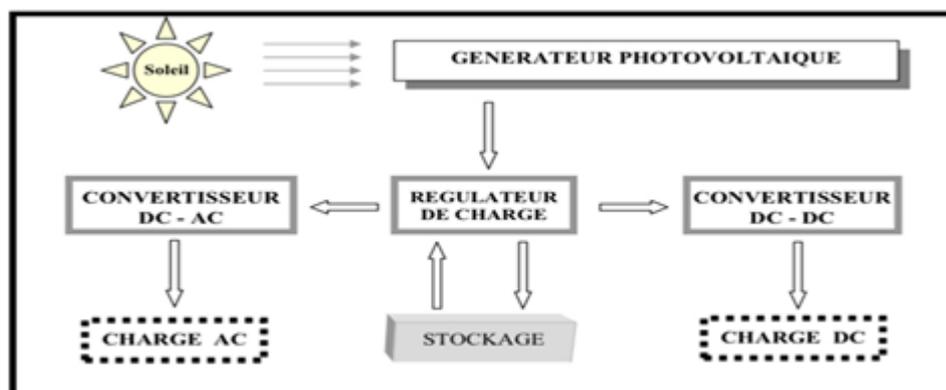


Figure 2.3: Système PV autonome

### 2.3.2 Type de system PV autonome :

Il y'a deux type dans ce cas :

- Les systèmes au fil de soleil
- Les systèmes avec stockage

#### 2.3.2.1 Système au fil de soleil :

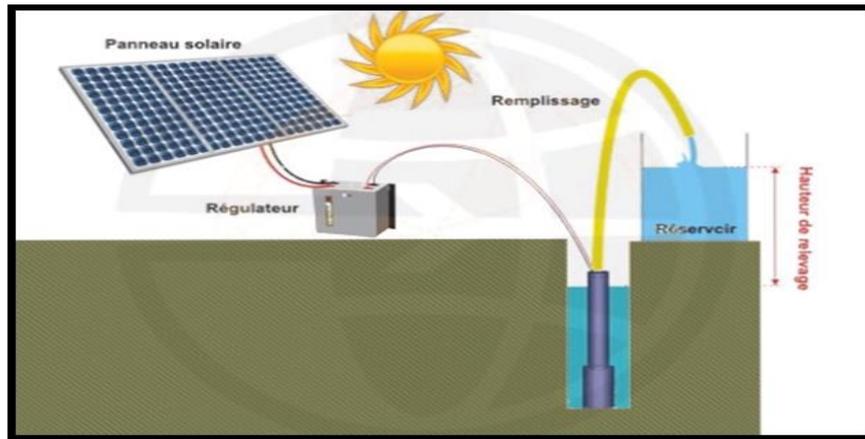
Au-dessus du système solaire se trouve un système sans stockage. Ils utilisent directement l'énergie solaire sans aucune alimentation de secours. Selon la nature de la charge à alimenter, ces systèmes sont divisés en deux catégories : les systèmes à courant continu et les systèmes à courant alternatif [27].

L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque, qui est de deux types :

- ✓ les systèmes de pompage photovoltaïques à courant continu
- ✓ les systèmes à courant alternatif.

Pour le second cas, un onduleur doit être ajouté. Comme le montre l'image 2.4 montre un exemple d'un système de pompe PV où le conditionneur de puissance peut être un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC ou les deux (les conditionneurs de puissance sont discutés ci-dessous), selon la fonction requise dans les sections suivantes). Ces systèmes sont simples, mais ils ont l'inconvénient de perdre de la puissance lorsque le soleil est éteint [27].

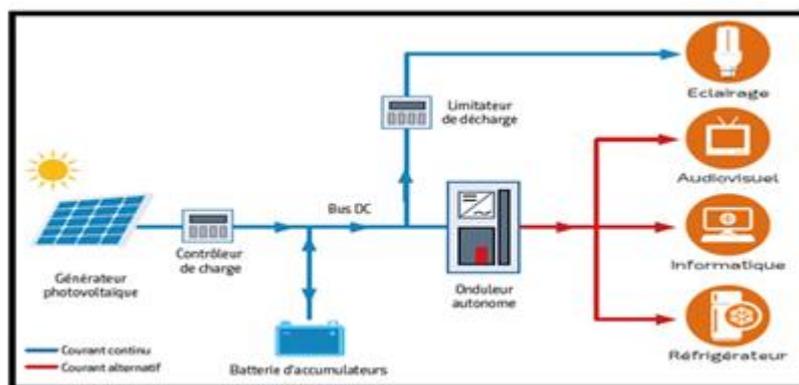
Ces systèmes utilisent souvent une autre forme de stockage, comme un réservoir d'eau pour le pompage photovoltaïque.



**Figure 2.4:**Principe de fonctionnement du pompage « au fil du soleil »

### 2.3.2.2 Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage :

Leur principe de fonctionnement est le suivant : en journée, le générateur photovoltaïque alimente les récepteurs courant continu en fonctionnement et charge la batterie de stockage. Un contrôleur de charge évite la surcharge de la batterie en cas de surproduction solaire. Durant la nuit et par mauvais temps, les récepteurs sont alimentés par la batterie. Un limiteur de décharge protège la batterie en cas de décharge profonde. En présence de récepteurs fonctionnant en alternatif, un onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative, permettant ainsi leur alimentation [27\*].



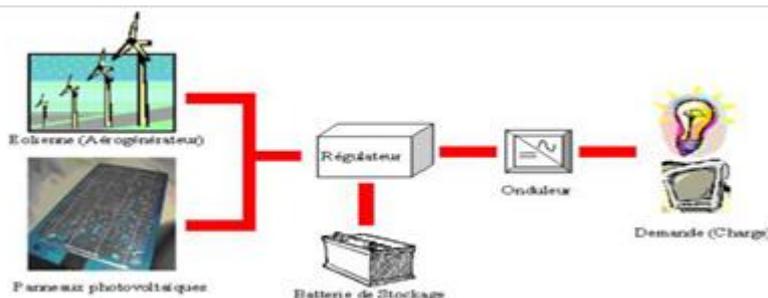
**Figure 2.5:**Schéma de principe d'un pv autonome avec stockage

### 2.4 Système hybride :

Un système énergétique hybride combine au moins deux sources d'énergie renouvelables avec une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles. Les sources d'énergie renouvelables comme le photovoltaïque et les éoliennes ne peuvent fournir de

l'électricité en permanence, mais compte tenu de leur complémentarité, leur combinaison permet d'obtenir une production d'électricité en continu. Les systèmes énergétiques hybrides sont souvent autonome et indépendants des grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des endroits éloignés.

Différentes alimentations dans un système hybride peuvent être connectées dans deux configurations, architecture de bus CC et architecture de bus CA[28].



**Figure 2.6:**Schéma du système hybride (PV – éolienne)

### 2.4.1 Les composants d'un système hybride ( PV – éolienne ) :

Les systèmes hybrides (PV-e) contiennent généralement :

- ✓ Un système générateur,
- ✓ Un système de régulation,
- ✓ Un système de stockage,

La batterie : Les batteries utilisées sont en général de type plomb-acide en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale.

- ✓ Des équipements de puissance,
- ✓ Une charge,

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs.

Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu. La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas.
- L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries [28].

### **2.5 Système photovoltaïques connectés au réseau électrique :**

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie).

Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher). C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Il y'a deux formes d'injection du courant photovoltaïque :

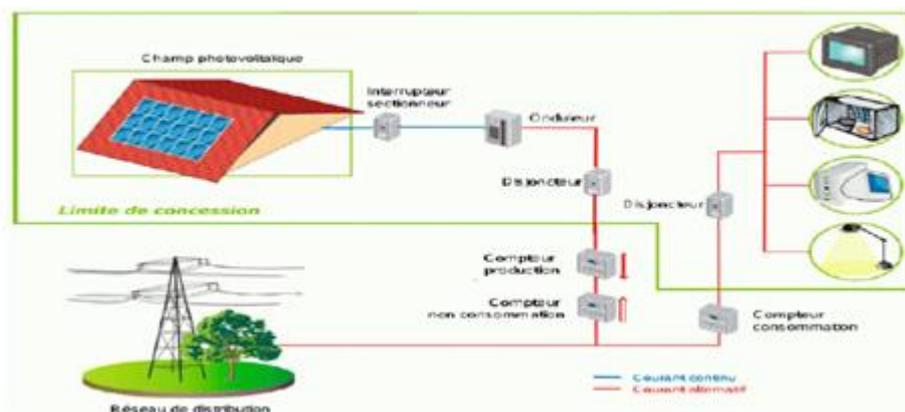
- Soit injecter la totalité de la production photovoltaïque au réseau.
- Soit injecter le surplus de la production photovoltaïque au réseau.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires :

Un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (consommation) et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

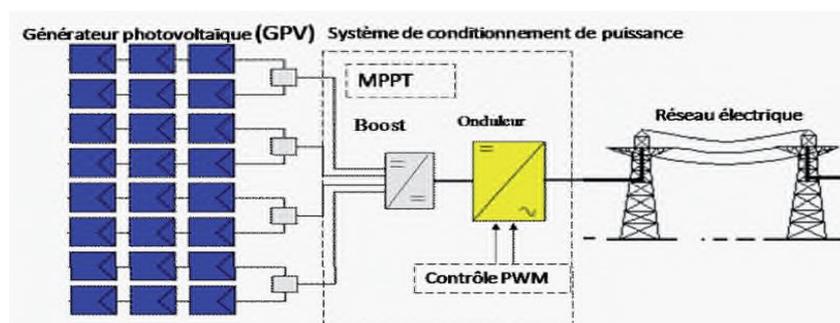
Un deuxième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

Un onduleur pour la conversion du courant continu des panneaux en alternatif, et ce dernier doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Afin de s'assurer sur sa qualité « sinusoïdale ».



**Figure 2.7:** les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau Figure 2.7 l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ des modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. De ce fait, les spécifications standards servant à la conception d'un onduleur connecté, concerneront la puissance nominale, la tension nominale du réseau, la tension maximale du DC-bus, le contrôle de l'onduleur etc.



**Figure 2.8:** Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

### 2.5.1 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique :

Afin de se connecter au réseau électrique, deux solutions s'offrent à nous : la connexion via un étage d'adaptation (DC/AC), ou bien par le biais de deux étages (DC/DC et DC/AC).

#### 2.5.1.1 La connexion via un étage d'adaptation (DC/AC) :

Il existe différentes topologies de gestion de ces systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un générateur photovoltaïque

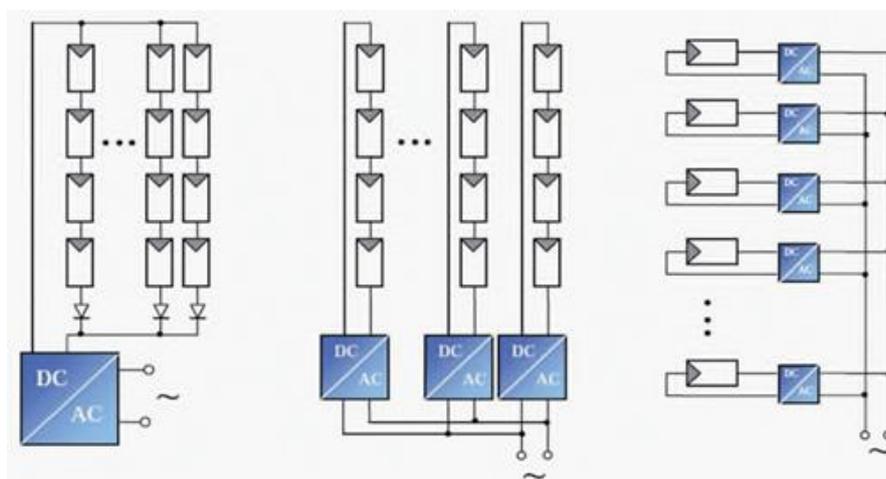
raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent vers le réseau l'énergie solaire électrique.

Les progrès réalisés dans le développement des onduleurs dédiés au photovoltaïque ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230 V/400V – 50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximal.

De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant, soit du réseau, soit de l'installation.

Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Figure 2.9. [29]



a) Onduleur central      b) onduleur string      c) onduleur intégré au PV

**Figure 2.9:** Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique

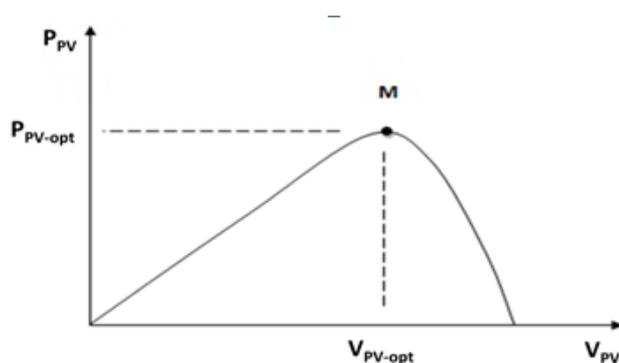
### 2.5.1.2 La connexion via deux étages (DC/DC et DC/AC)

Les convertisseurs de puissance hacheur et onduleur sont implantés pour ces raisons :

- Forcer le générateur photovoltaïque à fonctionner au point de puissance maximale.
- Produire le courant de sortie sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.
- Conversion de puissance avec un rendement  $\eta$  élevé.

### 2.6 Optimisation de l'énergie photovoltaïque

De nombreuses recherches sur les commandes MPPT ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche de PPM selon l'évolution de puissance fournie par le générateur photovoltaïque. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du PPM [30]. un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leurs algorithmes parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie. [31]



**Figure 2.10:**Caractéristique du point de puissance maximale PPM

:

### 2.7 Comparaison entre les systèmes :

- systèmes PV raccordé au réseau n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins. C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant... La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation

Mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau. Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre un niveau de prix où de kWh photovoltaïque sera compétitif avec le kWh conventionnel, issu de combustibles fossiles (pétrole, gaz ou charbon) ou fissile (nucléaire).

Il est évident que ce choix n'est aujourd'hui économiquement viable qu'avec un soutien de fonds publics significatifs, et c'est ce que ce passe dans la plupart des pays européens. Mais ce concept est tellement séduisant que de plus en plus de personnes sont intéressés et souhaitant participer à la démonstration qu'il est possible de produire soi-même d'électricité.

## Chapitre 2: les installations photovoltaïques

---

Au-delà des arguments rationnels, l'envie de devenir son propre producteur d'électricité et une motivation forte. Avec notre toit solaire, nous pourrions subvenir à une partie de nos besoins en ayant recourt au soleil, une source d'énergie abondante et renouvelable

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, une vue détaillée d'une chaîne de conversion photovoltaïque a été présentée. En fait, une description des systèmes PV, leurs éléments, leurs protections, et leurs types ont été présentées. Dans le suivant chapitre, on fera le choix d'une installation, et sur lequel, on fera une étude détaillée, et traiter le différent dispositif de ce système séparément et leur influence réciproque avec les réseaux.

**Chapitre 3:  
Systèmes PV  
raccordés au  
réseau**

### 3 Introduction

Le troisième chapitre de ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie du système photovoltaïque raccordé aux réseaux. Ce chapitre explore les différents aspects techniques et réglementaires liés à l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques existants.

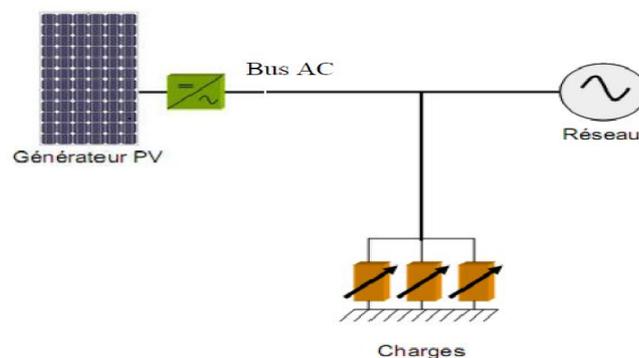
Ensuite, nous nous penchons sur les composants clés du système photovoltaïque raccordé aux réseaux. Nous examinons en détail les onduleurs, qui jouent un rôle crucial dans la conversion de l'électricité produite par les panneaux solaires en courant alternatif compatible avec le réseau. Nous discutons également des dispositifs de surveillance et de contrôle, qui permettent une gestion efficace du système et une optimisation des performances.

Enfin, nous explorons les solutions proposées pour maximiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux. Les avancées technologiques telles que les onduleurs intelligents, les dispositifs de stockage d'énergie et les systèmes de surveillance avancés offrent des possibilités d'amélioration significative des performances et de l'intégration harmonieuse des systèmes photovoltaïques.

#### 3.1 Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau :

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

##### 3.1.1 Système PV connecté directement au réseau :



**Figure 3.1:** système photovoltaïque connecté directement au réseau. [32]

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau constituent la plus grande partie des installations photovoltaïques dans le monde : en 2018, la capacité photovoltaïque mondiale installée est estimée à 464 GWc, en progression de 100 GWc pour l'année 2018. Les installations au sol de forte puissance contribuent largement à ces chiffres

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

Ces systèmes sont constitués de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux (en série et en parallèle) et branchés sur un ou plusieurs onduleurs eux-mêmes connectés au réseau de distribution ou de transport d'électricité

### 3.1.2 Systèmes à bus continu intermédiaire :

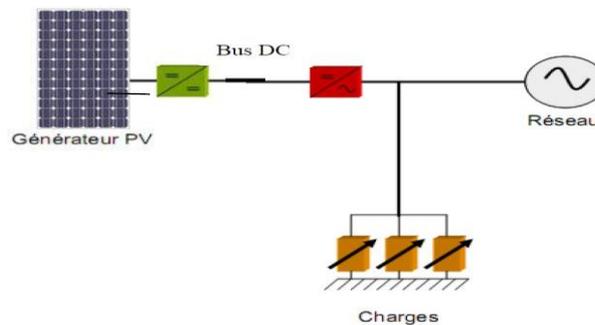


Figure 3.2: système photovoltaïque connecté via un bus continu-continu.

Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension pouvant être injectée dans le réseau. Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs.

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les

thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.

### 3.2 Architecture des systèmes PV connectés au réseau

En fonction des contrats de vente de l'énergie, on distingue les raccordements à injection totale dans laquelle l'opérateur principal rachète toute l'énergie PV produite, et les raccordements à injection partielle où le surplus l'énergie PV produite est injecté. Les figures de 3.3 suivantes illustrent les deux cas de configuration.

En fonction des applications, les systèmes PV connectés au réseau peuvent être avec ou sans stockage. Un bus intermédiaire peut souvent être placé entre l'onduleur et le générateur PV.

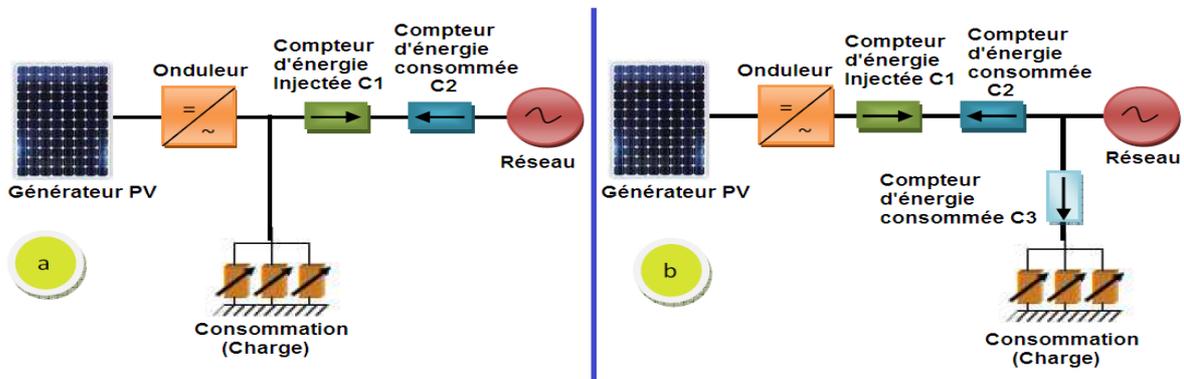


Figure 3.3 : Types d'injection d'énergie PV au réseau.[33].

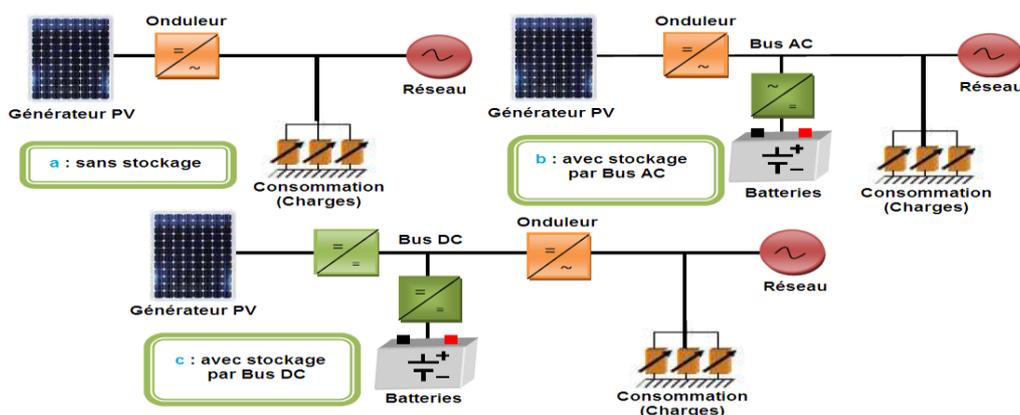


Figure 3.4: Architectures des systèmes PV connectés au réseau[33].

### 3.3 Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire PV !

#### 3.3.1 Définition d'un convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun [34].

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandées à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO (Gate Turn-Off Thyristor) ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [34].

#### 3.3.2 Les types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [35] :

- Convertisseur dévolteur (ou série);
- Convertisseur survolteur, hacheur survolteur (ou parallèle);
- Convertisseur dévolteur- survolteur hacheur série - parallèle.

#### 3.3.3 Hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur peut être trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur abaisseur, ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT) et en série avec la source figure III.5 et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement de période de hachage  $T$ , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à  $t_1$ . Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante.

Cette phase dure de  $\alpha$  à  $T$  [34]. On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes :

$$V_s = \alpha V_e \quad (3.1)$$

Avec :  $\alpha = \frac{tf}{T}$

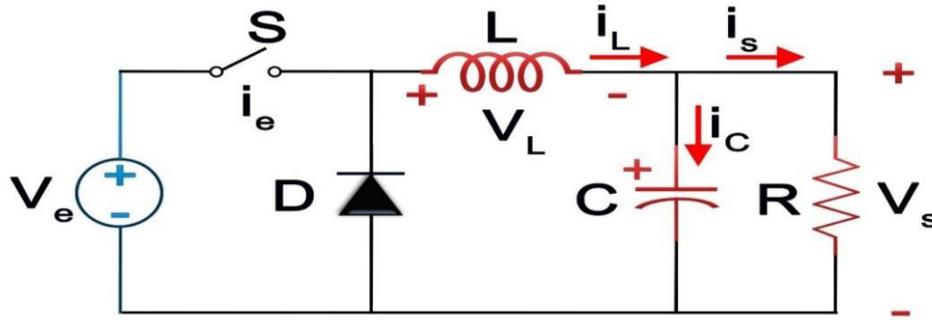


Figure 3.5: Schéma de principe d'un hacheur série

Avec:

$V_e$ : Tension d'entrée.

$V_s$ : Courant de sortie.

$i_e$ : Courant d'entrée.

$i_L$ : Courant dans l'inductance.

$V_L$ : Tension aux bornes de l'inductance

$i_c$ : Courant dans le condensateur

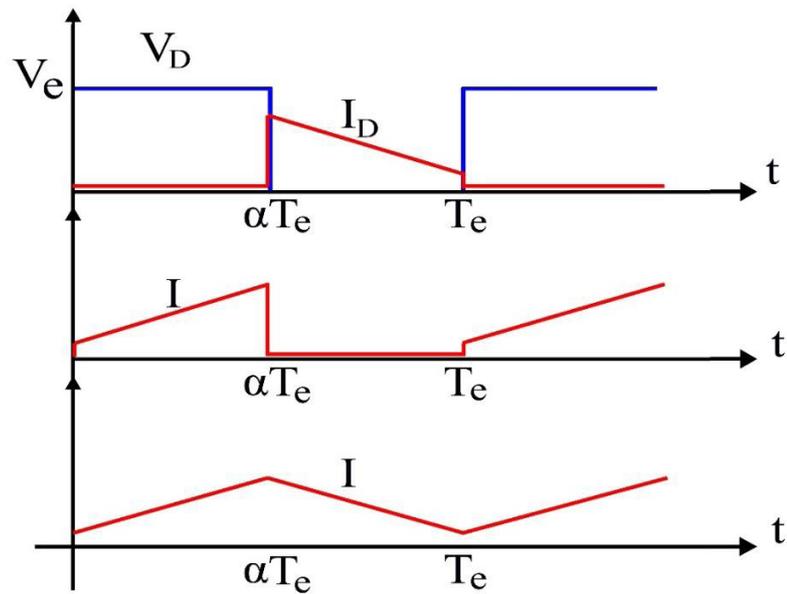
$i_s$ : Tension de sortie.

$\alpha$ : Rapport cyclique.

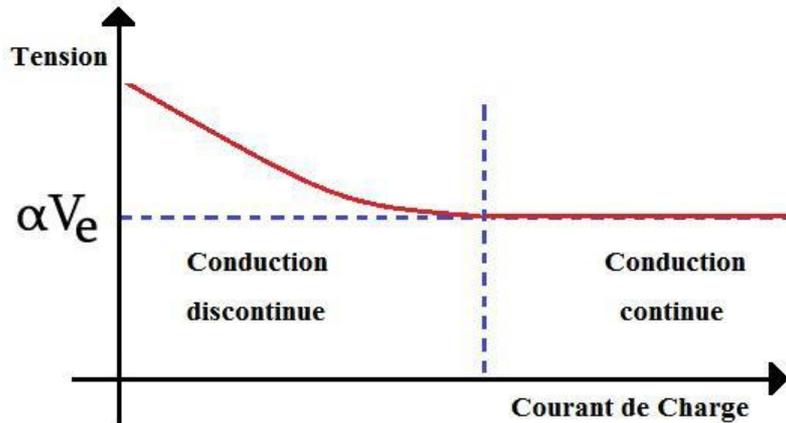
Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur. Dans le premier laps de temps, le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance se charge d'énergie fournie par la source, avec augmentation du courant. Dans le deuxième laps de temps, l'inductance (L) libère cette énergie à la charge (R) avec une diminution de courant. Voir Figure III.6 [36].

Lorsque le courant de l'inductance ne se décroît pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, et dans ce cas, la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique, la tension aux bornes de la charge :

Dans le mode de conduction discontinu (Figure 3.6) le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor (S) et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge [37].



**Figure 3.6:** Caractéristique des tensions et courants dans un convertisseur Buck.

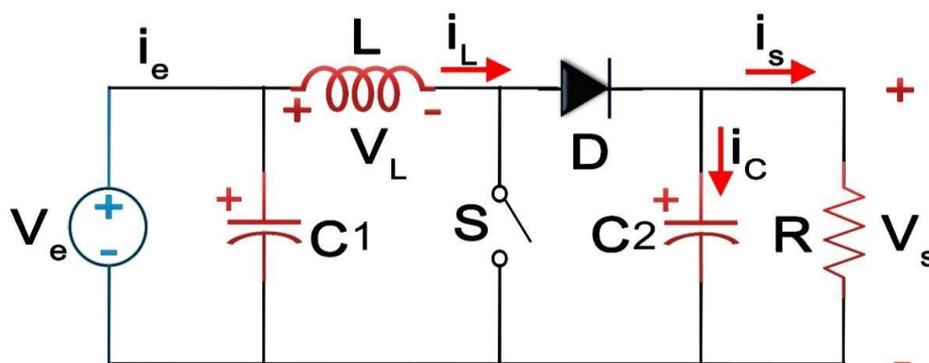


**Figure 3.7:** Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un convertisseur Buck.

### 3.3.4 Hacheur survolteur, parallèle (Boost)

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Connue aussi sous le nom d'élevateur, «boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la figure 3.8 [37].

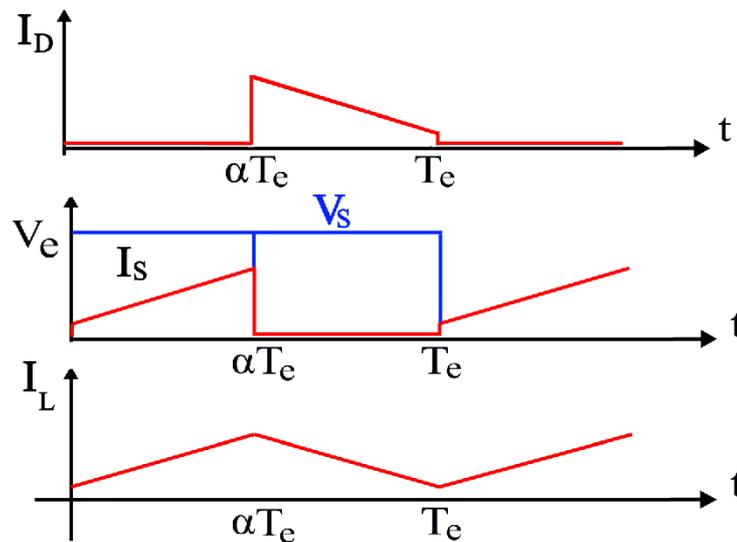
Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [36].



**Figure 3.8:** Schéma de principe d'un hacheur survolteur ou parallèle (boost).

**Fonctionnement :**

Au premier temps  $T_e$ , le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant, génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D), voir la figure 3.9 [37].



**Figure 3.9:**Caractéristique des tensions et courants dans un convertisseur Boost

**3.3.5 .Hacheur dévolteur - survolteur (série –parallèle) :**

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré à la figure 3.10 et comporte les mêmes éléments de base que les hacheurs Buck et Boost .Ce hacheur peut élever ou abaisser la tension d'entrée en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . [37, 38]

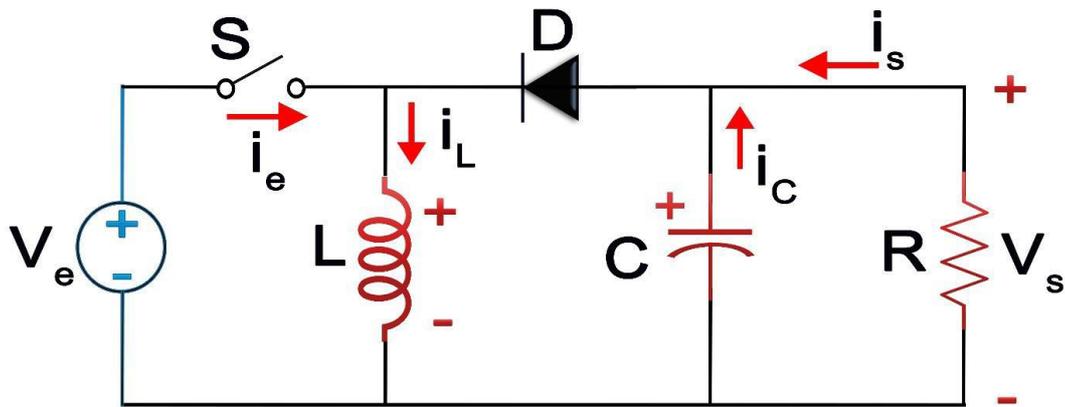


Figure 3.10:: Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.

**Fonctionnement :**

L'interrupteur commandée (S) est fermé pendant l'intervalle  $[0, \alpha T]$  et ouvert pendant  $[\alpha T, T]$  comme illustré sur la figure III.11.

✓ Pendant l'intervalle  $[0, \alpha T]$ , S est fermé et  $V_L = V_e$ . Le courant  $i_L$  croît linéairement. La diode D est bloquée et la charge se trouve donc isolée de la source.

✓ Pendant l'intervalle  $[\alpha T, T]$ , (S) est ouvert. La diode D se met à conduire et  $V_L = -V_s$ .

Le courant décroît linéairement. La bobine restitue à la charge l'énergie qu'elle a emmagasinée. [37]

Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

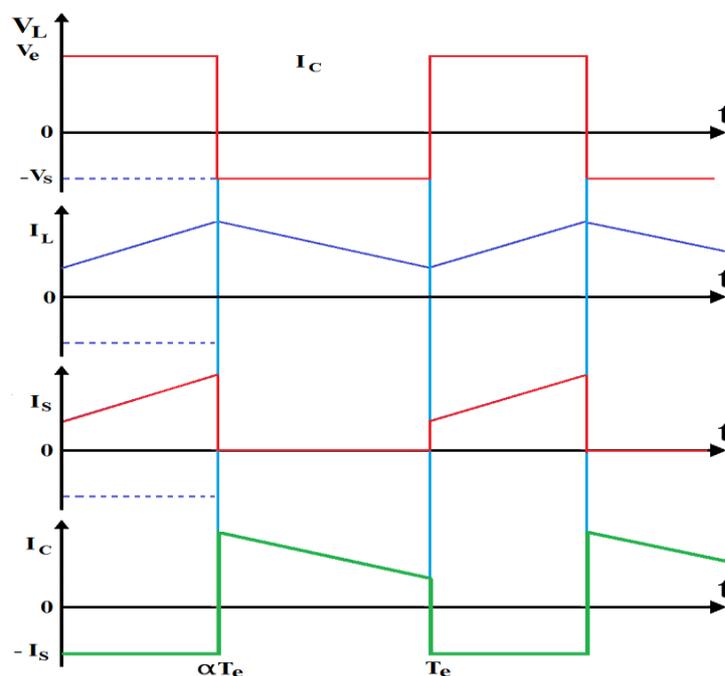
$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (3.2)$$

Avec :

$V_s$  : Tension de sortie.

$V_e$  : Tension d'entrée

$\alpha$  : Rapport cyclique.



**Figure 3.11:**Caractéristique des tensions et courants dans un convertisseur Buck/Boost.

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau ont les différentes topologies selon la connexion du générateur PV avec le réseau électrique. En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs

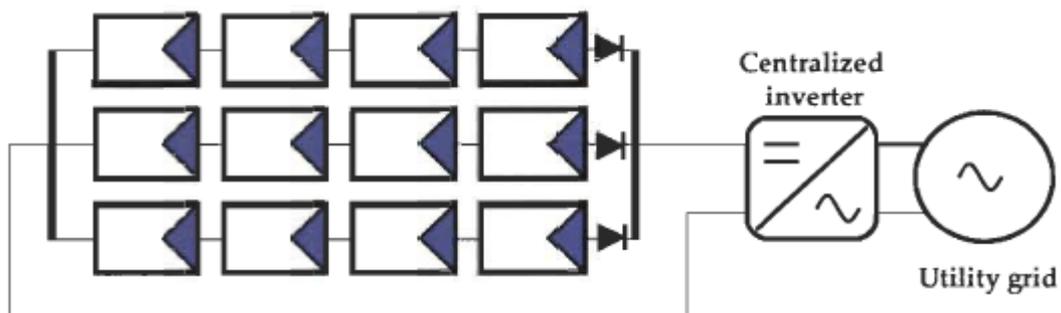
### 3.4 Topologies des systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Les topologies ont été conçues comme suivent [39][40]:

- Onduleur central
- Onduleur string
- Onduleur multi-string
- Onduleur modulaire

### Topologie d'onduleur central (Centralized inverter) :

La topologie la plus répandue consiste à utiliser un seul onduleur pour interfacier le générateur PV et le réseau électrique comme la montre en (figure 3.12). Les modules photovoltaïques sont divisés en une chaîne, générant chacune une tension suffisamment élevée pour éviter une amplification supplémentaire. Ces montages en série sont ensuite montés en parallèle pour parvenir à des niveaux de puissance élevés.



**Figure 3.12:** Topologie d'onduleur central [39]

Le principal avantage de cette topologie est le haut rendement (faibles pertes dans l'étape de conversion de puissance) et le faible coût en raison de l'utilisation d'un seul onduleur. Par contre, ce montage présente plusieurs défauts:

- pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules)
  - pertes et risques électriques dans le câblage
  - aucune évolutivité
  - aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur
- Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance.

### 3.4.1 Topologie d'onduleur string (String inverter) :

La topologie de l'onduleur string consiste à utiliser un onduleur au bout de chaque chaîne de modules PV. Les onduleurs sont ensuite connectés en parallèle au réseau électrique comme indiqué sur la Figure 3.13.

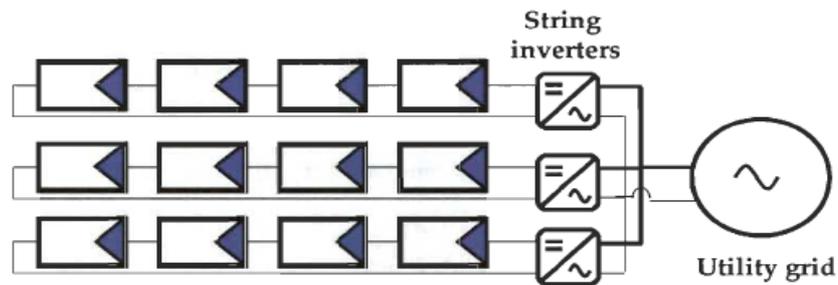


Figure 3.3.13: Topologie d'onduleur string [39].

La configuration permet un MPPT individuel pour chaque chaîne, d'où la fiabilité du système est améliorée en raison du fait que le système ne dépend plus d'un seul onduleur par rapport à la topologie onduleur central. Si un onduleur string est en panne, les autres onduleurs string peuvent continuer à alimenter le réseau. De plus, la configuration peut évoluer simplement en ajoutant des onduleurs string et les reliant aux bornes d'alimentation du réseau pour augmenter la puissance nominale de l'installation.

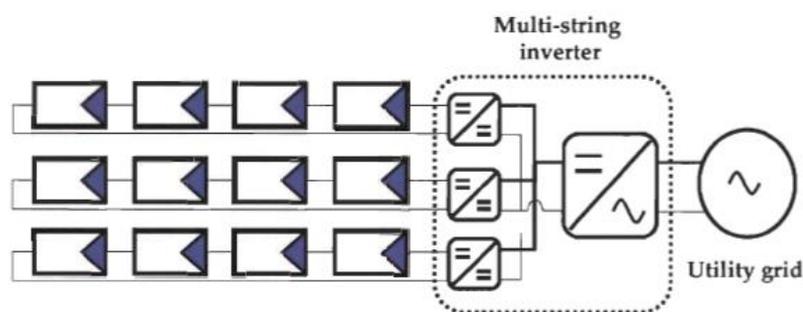
Cependant, il subsiste des inconvénients à cette topologie. Tout d'abord, le coût de système est supérieur à l'onduleur central en raison des onduleurs supplémentaires. En outre, la présence d'un onduleur sur chaque string limite les problèmes de couplage entre les modules et les onduleurs de même que la réduction des performances causée par l'ombrage ou une exposition différente. De plus, lorsque la production d'énergie PV est faible, les onduleurs string sont moins efficaces.

### 3.4.2 Topologie d'onduleur multi-string (Multi-string inverter) :

Comme illustré en Figure III.14, le principe de l'onduleur multi-string mixte est basé sur de nombreux hacheurs CC-CC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque hacheur CC-CC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM.

En effet, cette configuration de l'onduleur multi-string est une version hybride de l'onduleur string et l'onduleur central par la combinaison d'un MPPT à chaque string en utilisant moins de convertisseurs.

Le coût d'un onduleur multi-string est inférieur à celui de l'onduleur string pour une puissance nominale équivalente. En effet, cette topologie a des fonctionnalités similaires à celles de l'onduleur string, tels que l'utilisation d'un hacheur CC-CC au bout de chaque string, mais utilise un seul onduleur pour l'ensemble du réseau. Ceci réduit le coût global du système en conservant un contrôle du flux d'énergie par string.



**Figure 3.14:** Topologie d'onduleur multi-string [39]

Cependant, la fiabilité du système diminue par rapport à la topologie de l'onduleur string et les pertes dues aux hacheurs CC-CC sont ajoutées aux pertes du système.

### 3.4.3 Topologie d'onduleur modulaire (Module inverter) :

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif comme illustré en figure 3.15. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module.

Un meilleur rendement est obtenu par rapport à l'onduleur string car un MPPT est mis en œuvre pour chaque module. Dans cette configuration, les pertes liées aux incohérences entre les modules PV sont éliminées et il est possible d'optimiser l'onduleur pour le module PV et ainsi permettre un MPPT individuel pour chaque module PV. Et il présente également l'avantage de réduire les problèmes liés à l'ombrage et à la différence d'exposition des strings mais également ceux liés à l'utilisation de modules différents. Cependant, cette topologie ne convient qu'aux applications de faible puissance jusqu'à 500 W et son coût est relativement élevé.

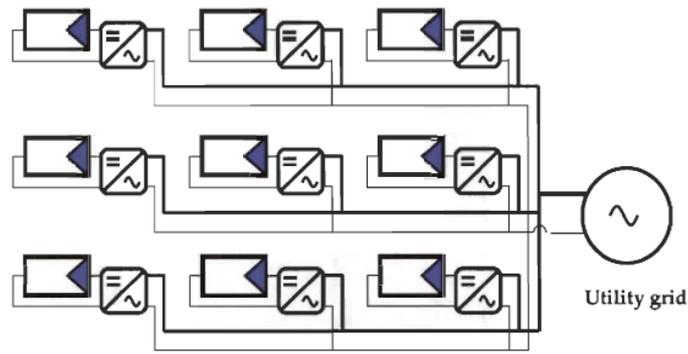


Figure 3.3.15: Topologie d'onduleur modulaire: [39]

Le tableau 3.1 suivant récapitule les avantages et inconvénients de chaque technologie [41]

:

Topologie	Avantages	Inconvénients	Puissance
Central	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facile à surveiller</li> <li>- Facile à maintenir</li> <li>- Faible coût en raison de l'onduleur central</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pertes CC dans les câbles de haute tension</li> <li>- Pertes de puissance dues à la centralisation MPPT et le décalage dans les modules PV</li> <li>- Faible fiabilité</li> <li>- Configuration pas flexible</li> </ul>	Jusqu'à plusieurs mégawatts
String	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel</li> <li>- Les pertes dans les diodes de string sont éliminées</li> <li>- Bonne fiabilité</li> <li>- Configuration flexible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût plus élevé par rapport au central</li> </ul> <p>Utilisé pour les faibles puissances</p>	3-5 kW/string
Multi-String	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel</li> <li>- Les pertes dans les diodes de string sont éliminées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tous les strings sont connectés à un seul onduleur donc la fiabilité du système diminue</li> <li>- Pertes supplémentaires à</li> </ul>	5kW

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MPPT et le contrôle de courant sont séparés</li> <li>- L'amplification de tension peut être réalisée par les hacheurs cc-cc</li> </ul>	<p>l'intérieur du hacheur CC-CC</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le coût est plus élevé par rapport au central</li> </ul>	
Modulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune perte due à l'ombrage partiel</li> <li>- Aucune perte de décalage entre les modules</li> <li>- Facile à détecter le défaut des modules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé</li> <li>- Remplacement de l'onduleur en cas de défaut pas facile</li> <li>- Durée de vie des composants électroniques réduite à cause des thermiques additionnelles</li> </ul>	Jusqu'à 500 W

**Tableau 2:** Comparaison entre les différentes topologies

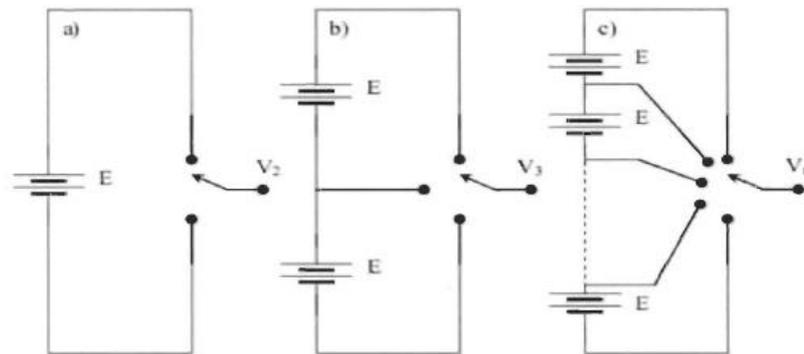
### 3.5 Onduleurs multi-niveaux :

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternatif.

Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Certaines d'entre eux exigent une alimentation électrique à haute ou moyenne tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales. De nouvelles techniques dites multi-niveaux ainsi que de nouvelles topologies de convertisseurs ont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés.

Un onduleur est dit "multi-niveaux" lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux.

Pour un réseau moyen tension, il est difficile de connecter directement un seul commutateur à semi-conducteur de puissance. En conséquence, les onduleurs multiniveaux ont été introduits comme alternative dans les applications à haute puissance et moyenne tension car ils proposent plusieurs avantages [42].



**Figure 3.16:** Onduleur à niveaux multiples

a) à deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à N niveaux [43]

La figure 3.16 aide à comprendre comment fonctionne les onduleurs multi-niveaux. Un onduleur à deux niveaux est représenté à la figure 3.16 a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou E. Sur la figure 3.16 b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, E ou 2E.

Dans la figure 3.16 c) le cas général de N niveaux est présenté.

L'augmentation de nombre du niveau permet d'améliorer les formes d'ondes en sortie du convertisseur, notamment en termes de contenu harmonique, mais cela nécessite une commande beaucoup plus complexe et un nombre important des semi-conducteurs utilisés. Cela rend le système global plus coûteux et surtout plus complexe [43].

### 3.5.1 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'objectif de cette partie est de donner un aperçu général des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- la topologie à diodes de bouclage (en anglais diode clamp);
- la topologie à condensateurs flottants (en anglais Flying Capacitor);
- la topologie en pont H cascades (en anglais Cascaded H-bridge);

La figure 3.17 représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

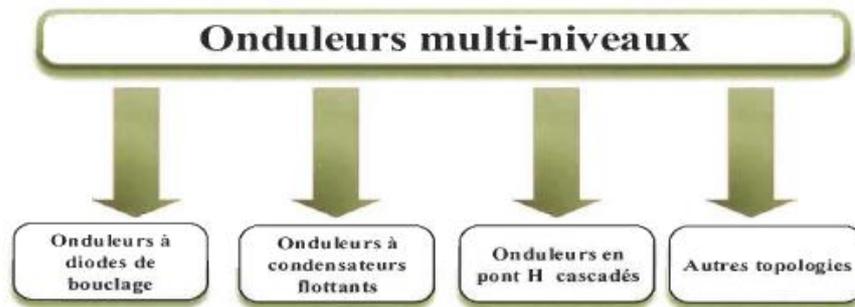


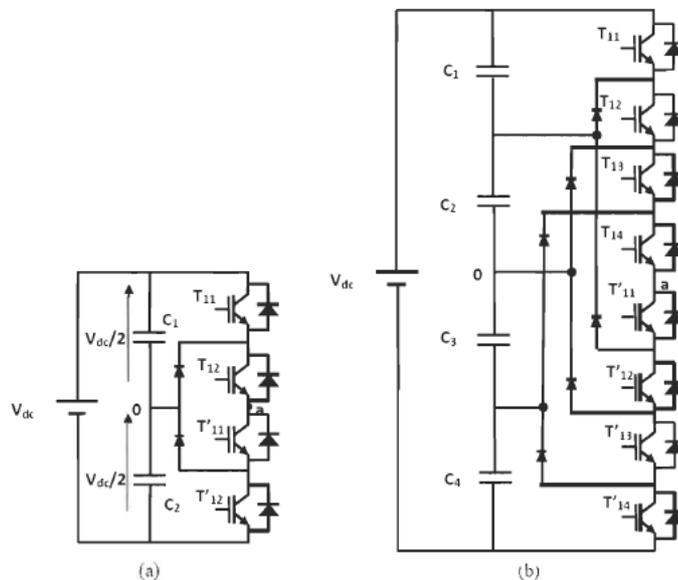
Figure 3.17: Différentes topologies des onduleurs multi-niveau [44]

### 3.5.1.1 Onduleur de tension à diodes de bouclage

La première topologie, et la plus pratique, de l'onduleur de tension multiniveaux est la structure NPC (Neutral-Point-Clamped).

Elle a été proposée, la première fois, par A.Nabae et H.Akagi en 1981.

Les onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux sont donnés par la figure 3.19.



a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux [43]

Figure 3.18: Circuit d'une phase d'un onduleur NPC

Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 condensateurs sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $V_{dc} / (N - 1)$ ,  $V_{dc}$  étant la tension d'entrée totale appliquée.

Et en particulier, pour le NPC à trois niveaux, on a trois séquences de fonctionnement:

~ Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  sont passants et  $T'_{11}$ ,  $T'_{12}$  sont bloqués comme la montre dans la figure 3.18(a). La tension de sortie  $V_{ao}$  vaut:  $+V_{dc}/2$ .

La tension appliquée aux interrupteurs  $T'_{11}$ ,  $T'_{12}$  vaut :  $+V_{dc}/2$ .

~ Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

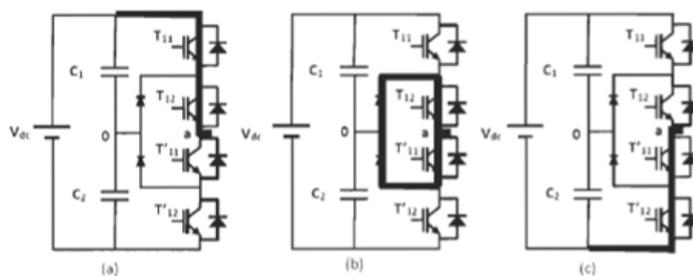
Les interrupteurs  $T_{12}$ ,  $T'_{11}$  sont passants et  $T_{11}$ ,  $T'_{12}$  sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme la montre dans la figure 3.18 (b). La tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ .

La tension appliquée aux interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T'_{12}$  vaut:  $+V_{dc}/2$ .

~ Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  sont bloqués et  $T'_{11}$ ,  $T'_{12}$  sont passants comme la montre dans la figure 3.19(c). La tension de sortie  $V_{ao}$  vaut:  $-V_{dc}/2$ .

La tension appliquée aux interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  vaut:  $+V_{dc}/2$  [43].



**Figure 3.19:** Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux

Les trois états de commutation possibles sont résumés au Tableau 3.2, l'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert.

<b>T11</b>	<b>T12</b>	<b>T'11</b>	<b>T'12</b>	<b>V<sub>ao</sub></b>
1	1	0	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	1	$-V_{dc}/2$
0	1	1	0	0

**Tableau 3:** États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux

Pour un onduleur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions.

L'onduleur de tension à trois niveaux présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur classique (à deux niveaux).

Ces avantages sont:

- Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- La méthode de commande est relativement simple.
- Cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.

Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas de grandes puissances. Ce sont:

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (diodes clamped) peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à

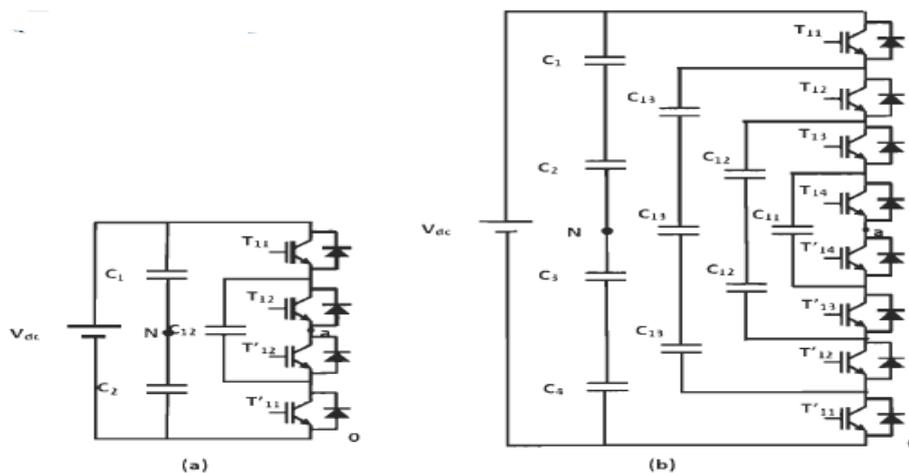
$V_{dc}(N-1) / N$ , où N est le nombre de niveaux. Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des

- questions de fiabilité et du coût de réalisation :  
L'exigence des diodes a fréquence de commutations élevée et qui doivent supporter le courant maximale circulent dans le circuit.
- Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe [45].

### 3.5.1.2 Onduleur de tension à condensateur flottant

L'onduleur à condensateur flottant (Flying Capacitor Multilevel Inverter) est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés. Elle a été proposée par Meynard et Foch en 1992. Dans cette topologie, les capacités remplacent les diodes de blocage, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flottant ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes.

Dans la topologie suivante, on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveaux en figure 3.20.



**Figure 3.20:**Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant

a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux [43]

Pour un onduleur à condensateur flottant de  $N$  niveaux, chaque bras doit contenir  $2(N-1)$  interrupteurs et  $N(N-1)/2$  capacités, et nous avons  $2N-1$  séquences de fonctionnement possible permettant de générer les  $n$  niveaux de tensions. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs.

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Elle présente plusieurs avantages, notamment:

- Elle élimine le problème des diodes de blocage dans la topologie NPC.
- La tension de blocage des interrupteurs est partout la même ;
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.
- Puisqu'elle est modulaire, l'assemblage pour un nombre de niveaux élevé est facile.

Actuellement il semble que cette topologie a quelques inconvénients:

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier.
- La topologie de l'onduleur multi-niveau à cellules imbriquées peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC.

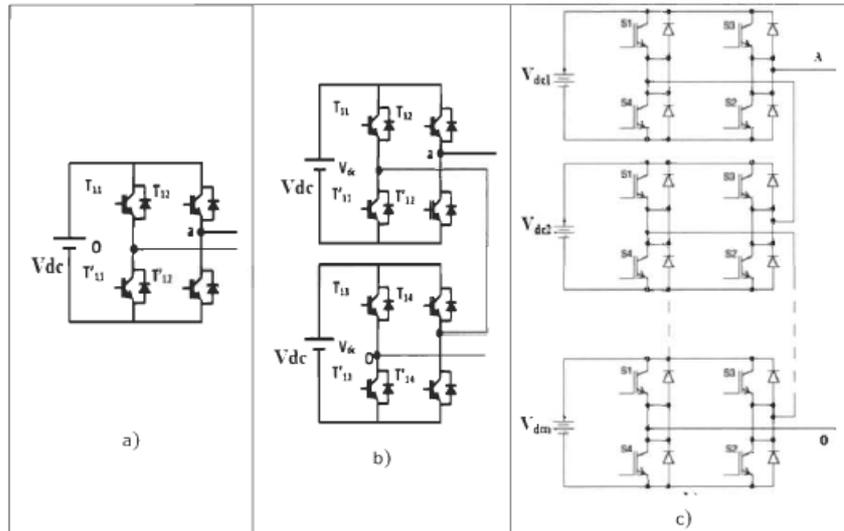
### 3.5.2 Onduleur multi-niveaux en pont H cascades

Les onduleurs multi-niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle. Un onduleur multi-niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés, ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. Les onduleurs multi-niveaux en cascade on introduit l'idée d'utiliser des sources CC séparées pour produire une onde de tension alternative.

Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continu. Les sorties de chaque onduleur monophasé, est une onde de tension alternative.

La figure 3.20(c) montre le schéma de base d'un onduleur à  $N$  niveaux en cascade formé par l'association en série de  $(N-1)/2$  ponts à deux niveaux. La tension de sortie  $V_s$

d'une telle structure est donnée par la somme des  $(N-1)$   $I_2$  tensions en sortie de ces ponts. Chaque onduleur monophasé en pont est connecté à sa propre source en courant continu. Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par:  $N = 2s + 1$ , Où  $s$  est le nombre des sources des tensions continues [46].



:a) à trois niveaux b) à cinq niveaux et c) à n niveaux [43]

**Figure 3.21:**Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascade

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à trois niveaux de tension, nous allons limiter notre étude à sa structure monophasée, figure 3.21 (a).

Comme pour le cas de l'onduleur NPC trois niveaux, nous avons trois séquences de fonctionnement possibles:

**-Séquences 1 : Génération du niveau maximum**

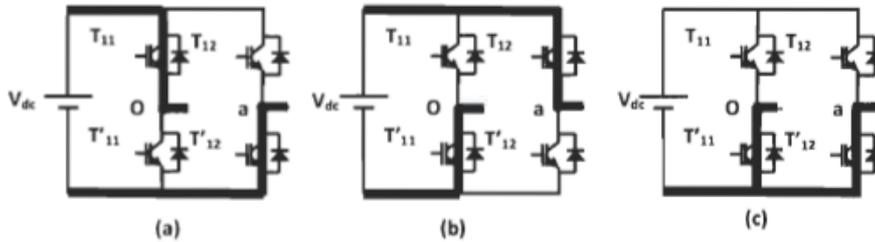
Dans ce cas, les interrupteurs sont bloqués et  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  sont passants comme le montre la figure 3.21(b). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = +V_{dc}$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  vaut  $+V_{dc}$

**-Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire**

Dans ce cas, les interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  sont bloqués et  $T_{13}$ ,  $T_{14}$  sont passants comme le montre la figure III.21(c). La tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = 0$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $T_{13}$ ,  $T_{14}$  vaut  $+V_{dc}$ .

**-Séquences 3 : Génération du niveau minimum**

Dans ce cas, les interrupteurs T11, T' 12 sont passants et T' 11 , T12 sont bloqués comme lemontre la figure 3.21(a). La tension de sortie Vao est:  $V_{ao} = -V_{dc}$ . La tension inverse appliquée aux interrupteurs T'11, T12 vaut  $+V_{dc}$



**Figure 3.22:**Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en cascade [43]

Les trois états de commutation possibles sont résumés au tableau III.4.

T11	T12	T'11	T'12	V <sub>ao</sub>
1	0	0	1	V <sub>dc</sub>
0	1	1	0	-V <sub>dc</sub>
0	0	1	1	0

**Tableau 4:**États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux

**Avantages de l'onduleur multi-niveaux en cascade :**

Les onduleurs multi-niveaux en cascade présentent les avantages suivants:

- Qualité de forme d'onde d'escalier qui réduit la compactibilité électromagnétique.
- Le contrôle modulaire peut être réalisé.
- Nécessiter moins de composants que les autres topologies pour atteindre le même nombre de niveaux de la tension de sortie.
- Dessiner le courant d'entrée avec une faible distorsion.

**3.5.3 Inconvénients de l'onduleur multi-niveaux en cascade :**

Les inconvénients de la configuration de l'onduleur multi-niveaux en cascade sont:

➤ La communication entre les ponts complets est nécessaire pour réaliser la synchronisation de la référence et des formes d'ondes porteuses. Les sources continues nécessaires, limitant ainsi leur utilisation dans certains domaines d'application [47].

**3.6 Comparaison entre les trois principaux onduleurs multi-niveaux :**

Le tableau « .4 récapitule, pour le même nombre de niveaux N de la tension simple de sortie, le nombre de composants nécessaires à la conception de chacune des trois structures multi niveaux permettant l'équilibrage de la contrainte en tension exercée sur les interrupteurs les constituant.

<b>Structures</b> <b>Les composants</b>	<b>Diode de bouclage (NPC)</b>	<b>Condensateur flottant (FC)</b>	<b>Pont H cascade (CHB)</b>
Commutateurs principaux	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$2(N-1)$
Diodes principales	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$2(N-1)$
Diodes de bouclage	$(N-1)(N-2)$	0	0
Condensateurs continus	$(N-1)$	$(N-1)$	$(N-1)/2$
Condensateurs d'équilibrage	0	$(N-1)(N-2)/2$	0

**Tableau 5:**Nombre de composants nécessaires à la réalisation des trois structures[43]

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs en pont H cascades paraissent la solution multiniveau la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant



Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure3.24.

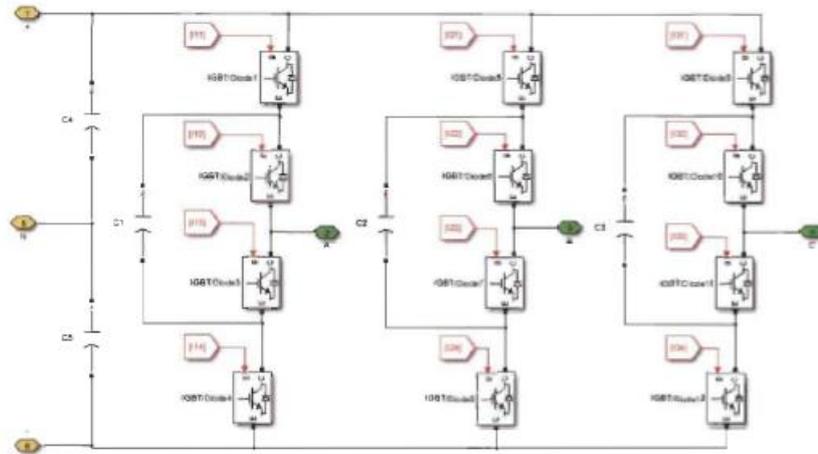


Figure 3.24:Modèle développé d'onduleur FC à trois niveaux

### 3.7.3 Modèle d'onduleur CHB 3-niveaux développé :

Nous avons développé un modèle d'onduleur FC à trois niveaux dans l'environnement

Matlab/Simulink/SimPowerSystems comme le montre la figure3.25.

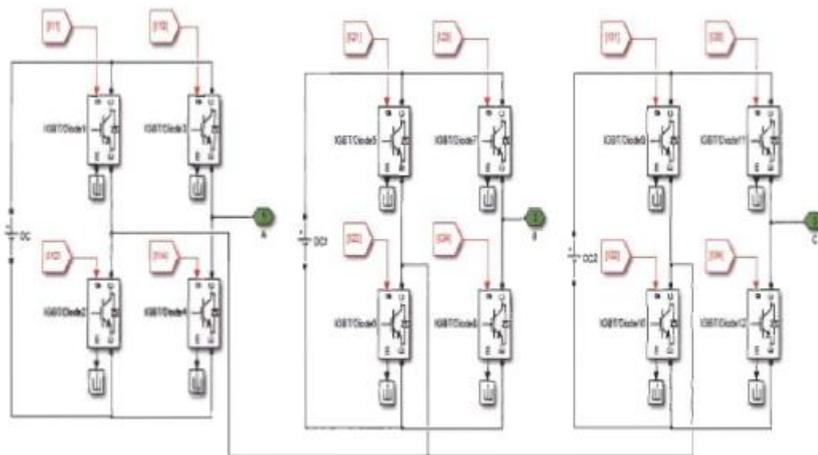


Figure 3.25:Modèle développé d'onduleur CHE à trois niveaux

### **3.8 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution : Influence sur la qualité de l'énergie :**

#### **3.8.1 Injection d'harmoniques de courant :**

La présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale), ainsi les THD sont plus importants. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie.

#### **3.8.2 Injection de courant continu au réseau :**

Une étude montre que les onduleurs actuels (avec transformateur haute fréquence et avec ou sans transformateur basse fréquence) injectent une composante continue dans le réseau. La présence de courants DC dans les réseaux de distribution peut affecter le bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiels, créer des erreurs sur les compteurs d'énergie, affecter la durée de vie des composants du réseau, notamment à travers une augmentation de leur corrosion et enfin contribuer à une saturation des transformateurs.

#### **3.8.3 Influence sur le plan de tension :**

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible. Une étude de l'université d'agriculture et technologie de Tokyo montre que, dans la localité d'Ota City qui concentre quelques 550 installations PV, l'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains systèmes, notamment en fin de semaine lorsque la consommation est faible.

### 3.8.4 Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution :

Une étude a montré que les fermes PV de plusieurs MW, généralement raccordées sur de départs HTA, conduiraient à une augmentation des pertes et que les installations PV de type résidentiel, plus proches des lieux de consommation, permettraient de l'est réduire.

### 3.8.5 Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques :

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension

dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes. Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs.

Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

### 3.9 Choix de l'onduleur :

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont :

- Caractéristiques en entrée (DC) :
- Enclenchement et déclenchement automatiques avec un seuil d'irradiation faible.
- Qualité et précision de la recherche du point de puissance maximale du champ PV (MPPT).
- Large plage de tension d'entrée (ex : 120 à 500 V).
- Protection en surtensions.
- Protection des personnes (ex : contrôle d'isolement DC).
- Caractéristiques en sortie (AC) :
- Parfaite synchronisation avec le réseau.
- Déphasage nul ou faible (facteur de puissance = 1).
- Découplage automatique du réseau si hors tolérance en tension et fréquence.
- Protection des personnes (ex : contrôle d'isolement AC).
- Caractéristiques en général :
- Rendement élevé au niveau de puissance usuelle de l'installation (ex: 92% à 98%).

- Faible consommation & niveau sonore.
- Faibles perturbations électromagnétiques & taux d'harmoniques.
- Bonne fiabilité.

Marques	SMA SUNNY BOY	SMA SUNNY BOY	SHNEID ER	MASTER VOLT	POWE R ONE	SOLARM AX	FRPNIUS
Modèles	3000 TL- 21	2500 TL-21	2800	XS 3200	3000	3000 S	IG 30 V1
Type de protection	IP 65	IP 65	IP 43	IP 44	IP 65	IP 54	IP 54
Rendement maximal	97.0%	94.1%	95%	95.4%	96.8 %	97%	94.8%
Rendement européen	96.1 %	96.0 %	94 %	94.3 %	96 %	95.4%	94.8%
Puissance nominale	3000	3000	2800	2500	3000	2500	2500
Pays du fabricant	Allemagne	Allema gne	France	Hollande	Suiss e	Suisse	Autriche
Prix	1750 €	1400 €	1390 €	1990 €	1570 €	1300 €	1260 €

**Tableau 6:** liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché [48].

Le tableau 3.5 présente quelques onduleurs photovoltaïques de technologies différentes. On peut les classer selon les critères suivant :

- La présence ou non d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau, qui peut se faire à haute fréquence ou à la fréquence du réseau.

- Le nombre d'étages de conversion distinguant deux types possibles : soit la conversion directe du courant continu en un courant alternatif. Ou bien le passage par un étage DC/DC pour augmenter la tension avant de la transformer en tension alternative.
- Le nombre de phases monophasé ou triphasé.

### **3.10 Mise en évidence la fiabilité de système PV raccordé au réseau :**

En tant que composant clé du système photovoltaïque, l'onduleur central doit être opérationnel pendant de nombreuses années, même s'il peut parfois être soumis à des situations très rudes. En effet, les intempéries, l'usure et la poussière peuvent à terme impacter sa durée de vie. Néanmoins, il est tout à fait possible de préserver ses performances en adoptant les bons gestes.

- Un diagnostic complet de l'appareil et une inspection des câbles par des services de maintenance qualifiés doivent être effectués annuellement.
- Il est important de remplacer les pièces au premier signe d'usure pour prévenir les éventuelles pannes.
- Les saletés et les poussières qui couvrent l'onduleur doivent être nettoyées régulièrement.
- Il est aussi ingénieux de prévoir des pièges contre les nuisibles tels que les souris et les cafards qui peuvent entrer dans l'appareil et risquent d'affecter son bon fonctionnement [49] .

### **3.11 Les grands leaders et fabricants d'onduleurs photovoltaïques**

Selon une étude publiée par Wood Mackenzie, les Chinois HUAWEI et SUNGROW et l'Allemand SMA ont conservé en 2019 pour la cinquième année de suite leur rang de premiers fabricants mondiaux d'onduleurs PV sur un marché qui a progressé de 18%.

Power ELECTRONICS occupe le 4e rang mondial en conservant sa première place sur le marché américain. De son côté, l'Italien FIMER, à la faveur du rachat des activités onduleurs d'ABB, réalise la plus belle progression, en devenant le cinquième fournisseur mondial d'onduleurs photovoltaïques, se classant pour la première fois dans le top 10.

Les 10 principaux fournisseurs mondiaux d'onduleurs photovoltaïques détenaient 76% du marché en 2019, le même pourcentage que l'année précédente. Depuis 2015, ce pourcentage oscille autour de 75%. De même, les cinq premiers fournisseurs d'onduleurs ont accaparé 56% du marché mondial, soit un point de moins qu'en 2018.

Une analyse de Wood Mackenzie montre que la demande mondiale d'onduleurs a augmenté de 18% l'année dernière. Les dix plus grands fournisseurs d'onduleurs représentaient 76% du commerce mondial. [50]

La figure ci-dessous représente les leaders des fabricants mondiaux de modules photovoltaïques solaires (PV) en 2019 [50].

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons examiné de manière détaillée les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux. Nous avons exploré les différents types de raccordements au réseau, les composants clés du système et les défis associés à leur intégration dans les réseaux électriques existants.

Nous avons constaté que les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux offrent de nombreux avantages, tels que la production d'électricité renouvelable, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la possibilité de vendre l'excédent d'électricité au réseau. Toutefois, ils font également face à des défis, tels que la variabilité de l'énergie solaire, la gestion de l'intermittence et les questions réglementaires liées à l'injection d'électricité dans le réseau [52].

Pour surmonter ces défis, des avancées technologiques telles que les onduleurs intelligents, les dispositifs de stockage d'énergie et les systèmes de surveillance et de contrôle avancés sont de plus en plus utilisés. De plus, des politiques et des réglementations favorables sont nécessaires pour applaudir l'intégration efficace des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques, en facilitant l'accès au raccordement, en mettant en place des tarifs d'achat incitatifs et en encourageant la flexibilité du réseau[53]

## **Conclusion générale :**

Dans le nouveau contexte de changement majeur provoqué par les énergies renouvelables et l'évolution de la distribution électrique et pour mieux comprendre le comportement des systèmes photovoltaïque, il est nécessaire en particulier de mettre en évidence, des notions sur cette énergie.

L'objectif de notre mémoire consistait à étudier une installation photovoltaïque connectée au réseau.

Dans le cadre de ce travail, nous avons présenté :

- Quelques notions sur l'énergie solaire ainsi que le potentiel solaire en Algérie.
- Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque.
- L'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement, et la tension à vide avec la température.
- La description des différentes installations photovoltaïques ou nous nous sommes intéressés à un système photovoltaïque raccordé au réseau ainsi qu'à la mise en évidence des principales composantes de cette installation, notamment l'étude des onduleurs et des convertisseurs qui ont des rôles majeur dans ce système.

Nous avons donc, au long de ce travail, pu rencontrer beaucoup de notion sur l'environnement, sur les énergies ainsi que les méthodes propres à l'exploitation. Nous avons pu aussi investir un domaine qui reste nouveau pour nous et qui promet un avenir sûr ainsi qu'une assurance dans le domaine de l'énergie aux générations futur.

## Les références :

- [01] - Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010
- [02] - Liman Amine et Soukane Samir « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome », mémoire d'Ingénieur, UMMTO, 2012
- [03] - <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/histoire>
- [04] - <http://tpe-energie-solaire.e-monsite.com/pages/science-et-technique/l-energiephotovoltaïque/avantages-et-inconvenients-du-photovoltaïque.html>
- [05] - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage>
- [06] - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Saison>
- [07] - Licence Pro ER2E- 2017-Cours Photovoltaïque M. SENECHAL Université de Lille 1
- [08] - <https://www.etoile-des-enfants.ch/article1635.html>
- [09] - Anne Labouret, Michel Viloz : « Energie solaire photovoltaïque », Dunod 3ème édition 2006.
- [10] - Amina Ouled-Henia, Choix climatiques et construction. Zones arides et semi arides. Maison à Bou-Saada, Thèse doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, (2003).
- [11] - J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 3rd Ed. JohnWiley and Sons, 2006.
- [12] - T.Muneer. Solar Radiation and Daylight Models. Elsevier Butterworth-HermannEdition 2004 (chapitre 1)
- [13] - T.Muneer. Solar Radiation and Daylight Models . Elsevier Butterworth-Hermann Edition 2004 (chapter 4.)
- [14] - Hellali Kamelia : « Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative », Mémoire de Magister, UMMTO, 2012

[15] - S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims

Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.

[16] - Alain Ricaud. &lt;&lt; Systèmes photovoltaïques &gt;&gt;. Polytech&#39; Savoie 5eme année Oct 2011

[17] - A. Saadi«Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », mémoire de magister en électrotechnique, université Mohammed Khider, Biskra, 2001.

Chapitre III: Systèmes PV raccordés au réseau

[18] - B. Mamri, M. Zaidi »contribution du système photovoltaïque avec pompage », Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.

[19] - <https://total.direct-energie.com/>

[20] - F. Guessoumi, Saadi A « Commande de panneau solaire à l&#39;aide d&#39;une carte à pic »,Mémoire ingénieur, université de Biskra, 2010.

[21] - A. BORNI, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'une panneau solaire «Mémoire Ingénieur d'Etat en Electrotechnique université

MENTOURI

[22] - S.Petibon, nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de DOCTORAT.2009. (série)

[23] - Mr Belaiche Hacene ((étude d'une installation en energie photovoltaïque integree au batiment : cas d'un laboratoire au cder )) master professionnel en genie mecanique option energetique specialite energies renouvelables . Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

[24] - F. Zouache, « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques », mémoire de magister de l'université de Constantine 2009.

Chapitre 2 :

[25] - Alain Ricaud. &lt;&lt; Systèmes photovoltaïques &gt;&gt;. Polytech&#39; Savoie 5eme année Oct 2011

[26] - Bendali Braham. Mounir MEMOIRE DE MASTER&lt;&lt; etude et simulation dune chainede production photovoltaïque&gt;&gt;.2008

[27] - <http://www.memalgeria>.

[28] - M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia &lt;&lt; Le Pompage Photovoltaïque &gt;&gt;rapport du Centre De Développement. des Energies Renouvelables, Rev. Energ. Ren. : ZonesArides (2002) 69-7

[29] : Mme. BELAID « Cours énergie solaire photovoltaïque UEF 31», Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2015.

[30] : S.PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïque», Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Toulouse, 2009.

[31] : O.GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur», Thèse de Doctorat en Electrotechnique, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.

Chapitre III: Systèmes PV raccordés au réseau

[32] : YANN RIFFONNEAU. Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau. Université Joseph Fourier, 2009.

[33]L.ABBASSEN, « Étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale Photovoltaïque » ; mémoire de magister, 2011, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou.

[34] H.Aboub, « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV», Mémoire de Magister, Université El-Oued, 2014.

- [35] W.Boucheritte, « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.
- [36] H. Fatiha, R. Aicha, « Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque », Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2014.
- [37] Y.BELKHIER, M.A AIT MAHDI, « Modélisation et Simulation D'un Système Photovoltaïque », Mémoire Master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2016/2017.
- [38] H. Buhler, « Convertisseurs statiques », Presses polytechniques et Universitaires Romandes », Lausanne 1991.
- [39] Picault D, « Reduction of mismatch losses in grid-connected photovoltaic systems using alternative topologies, » Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [40] Vighetti S, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion, » Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [41] Omran W, « Performance analysis of grid-connected photovoltaic systems, » University of Waterloo, 2010.
- [42] Zergoune M A et Hideb A, « Commande d'un onduleur multiniveaux à structure en cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective, » Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2017.
- [43] Brahim R, « Étude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux, » Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie d'Oran, 2014.
- [44] Youssouf D et Djamel B A, « Modélisation et commande d'un onduleur triphasé piloté par MU à structure multi-niveaux, » Diplôme de master en Génie Électrique, 2012.
- [45] Fares Z, « Étude et analyse de la commande des onduleurs multiniveaux par MU

### Chapitre III: Systèmes PV raccordés au réseau

[46] Mohammed MCHICHOU, "Étude et conception d'un onduleur photovoltaïque," Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2015.

[47] Teryima K D, David A O, Awuhe S T, "THD Analysis of an Overlapping Carrier Based SPWM for a 5-Level Cascaded H-bridge Multilevel Inverter," International Journal of Advanced Science and Technology, 2016.

[48] « Etude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[49] BARRADE Philippe. Livre d'Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires. Edition 2006.

[50] HIDRI Imed. Cour d'électronique de puissance les convertisseurs DC-DC et DC –AC .Institut supérieur des études technologiques de Nabeul. Janvier 2013

[51]: R. Ramaprabha, "Solar photovoltaic technology and systems - a manual for technicians, trainers and engineers." Springer, 2017.

[52]: D. Sharma, S. Ali, K. Singh, "Photovoltaic power systems: a comprehensive guide for professionals and students." CRC Press, 2016.

[53] : M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays." IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, 2009.

### Annexe :

Le Type	Avantage	Inconvénient
<b>Batterie à décharge lente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durée de vie (5 à 10 ans) -</li> <li>Prix correcte</li> <li>- Supportent bien les surchauffes, inertie thermique élevée</li> <li>- Nombreux charge de cycle (entre 500 et 1000 cycles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Recharger régulièrement ces batteries en eau distillée</li> <li>- Lourde (poid)</li> <li>- Sensible au froid</li> </ul>
<b>Batterie Gel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durée de vie (8 à 12 ans)</li> <li>- Pas d'entretien</li> <li>- Bonne tolérance aux températures élevées</li> <li>- Nombreux charge de cycle (entre 500 et 1200 cycles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chère</li> <li>- Lourde (poid)</li> <li>-Peu adaptée aux courants de charge/décharge élevés</li> </ul>
<b>Batterie Lithium-ion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durée de vie (30 ans)</li> <li>- Légère</li> <li>- Pas d'entretien</li> <li>- Faible autodécharge</li> <li>- Bonne tolérance à la température basse est élevée.</li> <li>- Charge de cycle très élevé (entre 2500 et 5000 cycles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très onéreuse</li> </ul>

**Tableau :** Une comparaison des avantages et des inconvénients de chaque type de batterie

## Programme de l'éclairage :

```
Rs=0.45;Er=1000;k=2;E=150;Tr=25;Voc=45.6;Icc=5.62;Iop=5.02;Vop=36.6;
Vth=(Vop+Rs*Iop-Voc)/log(1-Iop/Icc)
Io=(Icc-Iop)*exp(-(Vop+Rs*Iop)/Vth)
j=1;V=50;I=0;dI=0.005;r=25;
while I<=Icc
f=Icc-I-Io*(exp((V+Rs*I)/Vth)-1);
g=(-Io/Vth)*exp((V+Rs*I)/Vth);
V1=V-(f/g);
err=abs(V1-V);
if err<=10^(-7);
II(j)=I;
VV(j)=V1;
I=I+dI;
j=j+1;
end
V=V1;
end
while E<=200 & k<=3
for j=1:1:length(II)
DI=(E/Er-1)*Icc;
DV=-Rs*DI;
V3(j)=VV(j)+DV;
I3(j)=II(j)+DI;
N(j,k)=V3(j);
M(j,k)=I3(j);
end
k=k+1;
E=E+25;
end
vr=0:0.001:50;
ir1=vr/20;ir2=vr/50;ir3=vr/70;ir4=vr/100;
plot(vr,ir1,vr,ir2,vr,ir3,vr,ir4),hold on,
plot(N,M),axis([0 50 0 1.5])
```

## Programme de température

```
clear all
clc
Rs=0.45;k=2;E=200;Tr=25;Voc=22.4;Icc=2.41;Iop=2.2;Vop=17.45;T=25;
Vth=(Vop+Rs*Iop-Voc)/log(1-Iop/Icc)
Io=(Icc-Iop)*exp(-(Vop+Rs*Iop)/Vth)
j=1;V=24;I=0;dI=0.005;
while I<=Icc
f=Icc-I-Io*(exp((V+Rs*I)/Vth)-1);
g=(-Io/Vth)*exp((V+Rs*I)/Vth);
V1=V-(f/g);
err=abs(V1-V);
if err<=10^(-7);
II(j)=I;
VV(j)=V1;
I=I+dI;
j=j+1;
end
V=V1;
end
while T<=85 & k<=5
```

```
for j=1:1:length(II)
dT=T-Tr;
m=0.0006*II(j);
n=0.004*VV(j);
DI=m*dT;
DV=-n*dT-Rs*DI;
V3(j)=VV(j)+DV;
I3(j)=II(j)+DI;
N(j,k)=V3(j);
M(j,k)=I3(j);
end
k=k+1;
T=T+20;
end
plot(N,M),axis([0 25 0 3])
```

## Nomenclature :

$\theta_i$  : Angle d'incidence (deg)

$\beta$  : Inclinaison de la surface réceptrice (deg)

$\gamma$  : Angle azimutal du plan récepteur (deg)

$h$  : Hauteur du soleil (deg)

$\alpha$  : Azimut 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 ( $W/m^2$ )

$I_r(\beta)$  : Rayonnement réfléchi sur plan incliné ( $W/m^2$ )

$\rho$  : Valeur albédo du sol pour le rayonnement réfléchi

$\rho_b$  : Valeur albédo du sol pour le rayonnement direct

$\rho_d$  : Valeur albédo du sol pour le rayonnement diffus

$\beta$  : Inclinaison de la surface réceptrice (deg)

$I$  : Rayonnement reçu par la Terre ( $W/m^2$ )

$I_G(\beta)$  : 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

$I_{d1}$  : courant de saturation inverse de la diode1, (A)

$I_{d2}$  : courant de saturation inverse de la diode2, (A)

$K$  : ( $1.381 \times 10^{-23}$  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,

*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, ( $\Omega$ )

*R<sub>s</sub>*: la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions ( $\Omega$ )

*K \* T<sub>c</sub>*

*q*: le potentiel thermodynamique;

*T<sub>c</sub>* : la température absolue ; ( $^{\circ}\text{C}$ )

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

$\square_c$ : 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)

*I<sub>pybasse</sub>*: Courant de by-pass (A)

*N<sub>cellule</sub>* : Nombre de cellules PV

*Z* : Impédance ( $\Omega$ )

*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 d'appareils

*P<sub>i</sub>* : Puissance d'un appareil (W)

$\alpha$  : rapport cyclique

