

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes  
de MASTER ACADEMIQUE**  
Filière : Génie Electrique  
Spécialité : **MATERIAUX ET DISPOSITIFS  
ELECTRONIQUES ET PHOTOVOLTAIQUES**

*Présenté par*  
**Sofiane FELLOUAH**  
**Siham MESBAHI**

Thème  
**ETUDE D'UN SYSTEME  
PHOTOVOLTAIQUE CONNEXE AU  
RESEAU**

*Mémoire soutenu publiquement le 15/07/2015 devant le jury composé de :*

**Mr. Ahmed NAHI**  
M.A.A, UMMTO, FGEI, Président

**Mr. Rachid ZIRMI**  
M.C.B, UMMTO, FGEI Encadreur

**Melle. Djedjiga HATEM**  
M.C.B. UMMTO, FGEI Examineur

**Melle. Rahma KACHENOURA**  
M.C.B. UMMTO, FGEI Examineur

**Titre:** « Etude d'un système photovoltaïque connecte au réseau »

**Résumé :**

Pour injecter au réseau l'énergie électrique produite par une centrale photovoltaïque, il est primordial de connaître le réseau électrique. Sachant que l'électricité produite par ces centrales est en courant continue, pour injecter celle-ci au réseau, il faut la convertir en courant alternatif. Donc on fera appel à des onduleurs.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer le courant continu (DC) en courant alternative (AC), mais ils exploitent également la puissance délivrée. C'est ainsi que nous nous sommes focalisés sur le fonctionnement de ce convertisseur, qui est l'élément clé de la connexion au réseau d'un système photovoltaïque.

L'objectif de notre travail consiste à étudier une installation photovoltaïque connectée au réseau, et pour cela nous avons pris en considération les étapes d'étude citées auparavant.

**Mots-clés :**

Rayonnement solaire, cellules solaires, panneaux solaire, centrales photovoltaïques connectées au réseau, dimensionnement, réseau électrique, Onduleurs,

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné la force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ces années d'études n'auraient été que le pâle reflet de celles que nous avons passées.*

*Nos sincères remerciements à notre encadreur **M<sup>r</sup> ZIRMI Rachid** qui nous a bien encadré et nous a encouragés tout au long de notre travail.*

*Nous tenons à remercier **le doyen** de notre faculté qui nous a assuré les meilleures conditions de travail.*

*Nous remercions également les membres du jury, **Ahmed NAHI**, président jury, **Djedjiga HATEM** et **Rahma KACHENOURA** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.*

*Enfin nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, ainsi que tous ceux qui ont participé à notre formation.*

*FELLOUAH Sofiane et MESBAHI Siham*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À la mémoire de ma grande mère qui restera gravée dans mon cœur, je ne t'oublierai jamais « reposes en paix » ;*

*À Mes très chers parents, ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me contentés, toute la confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont vous m'entourez ;*

*À Mon frère, et mes sœurs pour leurs soutiens et leurs amours ;*

*À mes adorables nièces Sarah et Lydia ;*

*À toute ma famille, et mes amis ;*

*À Tous mes amis de la promotion sans oublier ceux de l'EPST de Tlemcen*

*À tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer ;*

*À ma très chère camarade Siham, et à toute la famille MESBAHI ;*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

*Sofiane FELLOUAH*

# Dédicaces

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance. Qu'avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie ce mémoire de Master :*

*A Ma tendre Mère : lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ;*

*A Mon cher Père : l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être ;*

*A mon cher frère ;*

*A mes oncles et tantes, cousins et cousines, et à toute la famille ;*

*A ma copine et sœur de cœur Amel ;*

*A mes aimables amis et frères de cœur ;*

*A tous les camarades de ma promotion ;*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études, leurs générosités et leurs soutiens m'obligent de leur témoigner mon profond respect et ma loyale considération ;*

*A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer ;*

*A mon très cher camarade Sofiane et sa famille FELLOUAH ;*

**Siham MESBAHI**

## *Table des matières*

Introduction .....	1
Chapitre I : GENERALITES	
1- Le rayonnement solaire .....	3
1-1 Rayonnement direct .....	4
1-2 Rayonnement diffus .....	4
1-3 Rayonnement réfléchi .....	4
1-4 Rayonnement global .....	4
2- Le Potentiel Solaire en Algérie .....	5
3- La cellule solaire .....	5
3-1 La structure d'une cellule solaire .....	5
3-2 Type de cellules .....	6
3-2-1 Les cellules monocristallines .....	6
3-2-2 Les cellules poly-cristallines .....	6
3-2-3 Les cellules amorphes .....	6
3-2-4 Les cellules nanocristallines .....	7
3-3 Principe de fonctionnement d'une Cellule photovoltaïque .....	7
3-3-1 Jonction PN .....	7
3-3-2 Principe de la conversion photovoltaïque .....	8
3-4 Circuit équivalent simple et modèle d'une cellule photovoltaïque idéale .....	8
3-5 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle .....	9
3-6 Caractéristiques courant - tension (I-V) de la cellule photovoltaïque .....	11
i) Courant de court-circuit (obtenue pour $V=0$ ) .....	11
ii) Tension de circuit ouvert (obtenue pour $I= 0$ ) .....	12
iii) Puissance optimale et facteur de forme .....	12
3-7 Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement d'une cellule solaire .....	12
3-7-1 Influence de l'ensoleillement .....	12
3-7-2 Influence de la température .....	14
3-8 Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V) .....	14

## CHAPITRE II: LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

1-	Les différents types de systèmes photovoltaïques .....	16
1-1	Installations photovoltaïques autonomes .....	16
1-2	Installations photovoltaïques raccordées au réseau .....	17
1-3	Installations photovoltaïques hybride .....	18
2-	Etude des composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	18
2-1	Le générateur photovoltaïque .....	18
2-1-1	Regroupement des cellules .....	19
2-1-1-1	Regroupement en série .....	19
2-1-1-2	Regroupement en parallèle .....	20
2-1-1-3	Regroupement (série et parallèle).....	21
2-1-2	Protection d'un générateur photovoltaïque .....	21
2-1-2-1	Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV .....	22
2-1-2-2	Protection lors de la connexion en série de plusieurs GPV .....	22
2-2	Coffret de raccordement .....	23
2-3	Câblage .....	23
2-4	Compteur photovoltaïque .....	24
2-4-1	Injection totale .....	24
2-4-2	Injection de surplus .....	25
2-5	Le régulateur .....	26
2-6	Onduleur .....	27
2-6-1	Type d'onduleurs.....	27
2-6-1-1	Onduleur Monophasé .....	28
2-6-1-2	Onduleur triphasé .....	29
2-6-2	Technologies des onduleurs couplés au réseau .....	30
2-6-2-1	Onduleurs modulaires (module inverter).....	30
2-6-2-2	Onduleurs centralisés ( <i>central inverter</i> ).....	30
2-6-2-3	Onduleurs " <i>String</i> " ou " <i>de Rangée</i> " .....	30

## Chapitre III : RESEAU ELECTRIQUE

1-	Le réseau électrique .....	33
1-1	Architecture du réseau électrique .....	33
1-1-1	Réseaux de transport et d'interconnexion .....	33
1-1-2	Réseaux de répartition .....	34

1-1-3 Réseaux de distribution .....	34
1-2 Pourquoi transporter l'électricité à haute tension.....	35
1-3 La structure du réseau électrique nationale .....	36
1-3-1 Le Réseau Interconnecté National (RIN) .....	37
1-3-2 Le pôle In Salah – Adrar – Timimoune.....	37
1-3-3 Les Réseaux Isolés du Sud .....	38
1-4 Plan de défense du réseau électrique national .....	38
1-4-1 Contre les baisses de fréquence .....	38
1-4-2 Pour les perturbations de grande amplitude .....	38
1-4-3 En cas de perturbation très importante .....	39
1-5 Matériels utilisés dans les réseaux électriques .....	39
2- Les poste électrique .....	40
2-1 Type de poste électrique.....	40
2-2 Composants des postes électriques .....	41
3- Grandeurs électriques importantes.....	42
3-1 Surveillance de la tension.....	42
3-2 Problématique de l'intensité.....	43
3-3 Intensité de court-circuit.....	44
<b>Chapitre IV : SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES CONNECTES AU RESEAU</b>	
1- Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau :.....	45
1-1 Système PV connecté directement au réseau : .....	45
1-2 Systèmes à bus continu intermédiaire : .....	45
2- Principaux types d'onduleurs :.....	46
2-1 Montage a thyristors : .....	46
2-2 Montage a pont de transistors :.....	46
2-3 Montage à pont de transistors avec convertisseur élévateur :.....	47
2-4 Montage à 3 étages avec transformateur haute fréquence :.....	47
2-5 Montage à 4 étages avec montage push pull : .....	48
2-6 Montage d'onduleur sans transformateur :.....	48
3- Principes de fonctionnement :.....	49
3-1 Onduleurs pilotés par le réseau :.....	49
3-2 Onduleurs à référence interne :.....	50
3-3 Onduleurs à circuit HF intermédiaire : .....	51

3-4	Onduleurs à synthèse de tension :.....	52
3-5	Onduleurs distribués :.....	53
3-6	Régulation et recherche du MPP .....	54
3-7	Interconnexion de plusieurs onduleurs .....	55
4-	Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV .....	55
4-1	Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution.....	55
4-1-1	Influence sur le plan de tension.....	55
4-1-2	Influence sur le plan de protection .....	56
4-1-3	Influence sur la qualité de l'énergie .....	56
4-1-3-1	Injection d'harmoniques de courant .....	56
4-1-3-2	Injection de courant continu au réseau .....	56
4-1-3-3	Déséquilibre entre phases .....	57
4-1-1	Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution.....	57
4-2	Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques.....	57
4-2-1	Régime de neutre et courants de fuite .....	57
4-2-2	Niveau de tension du réseau.....	58
4-2-3	Creux de tension et tenue des systèmes PV .....	58
4-2-4	Présence de composante continue et d'harmoniques de tension.....	58
4-2-5	Inter harmoniques.....	58
4-3	Comportement des systèmes photovoltaïques face au creux de tension .....	58
5-	Choix de l'onduleur .....	59
5-1	Isolation galvanique.....	61
5-2	Nombre d'étages de conversion .....	62
5-3	Nombre de phases.....	62
6-	Dimensionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau de 1 MW.....	62
6-1	Type du module photovoltaïque utilisé .....	62
6-2	Type d'onduleur utilisé.....	63
6-3	Calcul du nombre de modules .....	64
6-4	La compatibilité onduleur / string .....	65
	Conclusion .....	68

## *Liste des figures*

Figure 1.1 : normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	3
Figure 1.2 : différents composants de rayonnement.....	4
Figure 1.3 : structure d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure 1.4 : circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque. ....	8
Figure 1.5: circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle.....	9
Figure 1.6: caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque. ....	11
Figure 1.7: Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C. ....	13
Figure 1.8: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C. ....	13
Figure 1.9: courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à G=1000W/m <sup>2</sup> . ....	15
Figure 1.10: courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à G=1000W/m <sup>2</sup> . .....	15
Figure 2.1 : schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....	16
Figure 2.2 : installation photovoltaïque raccordée au réseau.....	17
Figure 2.3: installations photovoltaïques hybride. ....	18
Figure 2.4: générateur photovoltaïque. ....	19
Figure 2.5: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série.....	20
Figure 2.6: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle.....	20
Figure 2.7: caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques. ....	21
Figure 2.8: schématisations d'une association de deux générateurs PV en parallèle avec leurs diodes de protection (by-pass et anti-retour).....	22
Figure 2.9: coffret de raccordement avec coupe-circuit DC, fusibles et surveillance de chaîne. .....	23
Figure 2.10: câble solaire photovoltaïque. ....	24
Figure 2.11: installation avec injection totale de la production photovoltaïque. ....	25
Figure 2.12: installation avec injection du surplus de la production photovoltaïque.....	26
Figure 2.13: schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.....	28
Figure 2.14: schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont.....	28
Figure 2.15: schéma de principe d'un onduleur triphasé en pont. ....	29
Figure 2.16: onduleurs photovoltaïques connectés au réseau. ....	31

Figure 2.17: fonctionnement général d'une centrale photovoltaïque.....	32
Figure 3.1: schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique..	35
Figure 3.2 : transformateur d'électricité.....	35
Figure 3.3 : architecture générale de réseaux d'énergies électrique en Algérie.....	37
Figure 3.4: évolution de la longueur du réseau transport électricité en km Période 2000-2011. .....	38
Figure 3.5: lignes électriques soutenues par un pylône avec isolation.....	40
Figure 4.1: système photovoltaïque connecté directement au réseau. ....	45
Figure 4.2: système photovoltaïque connecté via un bus continu-continu .....	45
Figure 4.3: Circuit utilisant des thyristors.....	46
Figure 4.4: Circuit simple utilisant un pont de transistors. ....	47
Figure 4.5: Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur.....	47
Figure 4.6: Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence.....	48
Figure 4.7: Circuit à 4 étages avec montage push pull.....	48
Figure 4.8: Onduleur sans transformateur dit « à Topologie de Karschny » .....	49
Figure 4.9: a)Principes de base d'un onduleur triphasé à référence interne. ....	50
b) tension de sortie pour commutation à 6 impulsions.....	50
c) modulation de largeur d'impulsions.....	50
Figure 4.10: Principe d'un onduleur avec modulation de largeur d'impulsion à haute fréquence, et isolation galvanique par transformateur HF. ....	51
Figure 4.11: Principe d'un onduleur à synthèse de tension.....	52
Figure 4.12 : caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque poly cristallin de marque condor.....	62
Figure 4.13 : caractéristiques mécaniques d'un module photovoltaïque poly cristallin de condor.....	63
Figure 4.14 : fiche technique de l'onduleur SMA Sunny Central (250kw). ....	64

## ***Liste des tableaux***

Tableau 1.1 : Potentiel solaire en Algérie. ....	5
Tableau 4.1: liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché .....	60

## *Nomenclature*

I : le courant de sortie de la cellule ;

V : tension de sortie de la cellule ;

$I_{ph}$ : photo-courant produit par une cellule solaire ;

$I_s$  : courant de saturation inverse de la diode

T : température en kelvin ;

q: charge élémentaire d'un électron  $q=1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ;

k : constante de Boltzmann  $k = 1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$I_0$  : courant de saturation de la diode ;

n : facteur de pureté de la diode ;

$R_s$  : résistance série ;

$R_{sh}$  : résistance parallèle ou shunt ;

$P_m$  : puissance maximale ;

$P_0$  : puissance incidente ;

$V_{coNs}$ : somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série ;

$I_{ccNs}$ : courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série ;

$I_{ccNp}$ : somme des courants de court-circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle ;

$V_{coNp}$ : tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle ;

AM: air mass;

PWM: pulse with modulation;

MPPT : maximum power point tracking ;

THT: très haute tension électrique ;

HT: haute tension électrique ;

MT: moyenne tension électrique ;

BT : basse tension électrique ;

HF : hautes fréquences ;

BF : basses fréquences ;

$N_T$  : nombre total de modules ;

$N_{Série}$  : nombre de modules en série ;

$N_{String}$  : nombre de string ;

$V_{co}$  : tension du circuit ouvert d'un module ( $T=298^\circ \text{ k}$ ) ;

$\mu V_{co}$  : coefficient de température ;

$V_{MPP}$  : tension en charge, au point de puissance maximale.

## Introduction :

Alors que l'on est confronté à une réduction des ressources primaires fossiles, la consommation énergétique mondiale augmente d'environ 2% par an, c'est ainsi que la production d'énergie reste un élément stratégique à long terme. Par ailleurs, la consommation de ces énergies fossiles produit des déchets solides et des émissions de gaz qui contribuent fortement à des effets admis comme étant à risques majeurs concernant l'avenir de notre planète.

En vertu du Protocole de Kyoto, du plan de Bali, des accords de Cancun et certainement de ce qui ressortira de la conférence de Durban l'utilisation de quelques ressources conventionnelles comme le charbon, le pétrole, l'énergie nucléaire... seraient limitée ou découragée pour des raisons liées à l'environnement. Les énergies renouvelables devront jouer alors un rôle de plus en plus important.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse et tout autre type d'énergie propre et inépuisable. Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'énergie solaire photovoltaïque(PV). Cette énergie qui nous provient du soleil est transformée en électricité par la conversion directe de l'énergie des photons, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV).

Dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau, l'appareil de conditionnement de la puissance est un onduleur qui représente l'élément clé le plus délicat de l'installation.

Les onduleurs ne se limitent plus, seulement, à transformer la puissance continue (DC) générée par les modules photovoltaïques en puissance alternative sous forme de tension sinusoïdale et de fréquence souhaitées (230 V/400V – 50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée. C'est ainsi que nous nous sommes focalisés sur le fonctionnement de cet appareil, qui est l'élément clé de la connexion au réseau d'un système photovoltaïque, et aussi sur l'interaction entre le réseau de distribution et les systèmes photovoltaïque.

Nous avons alors présenté dans le premier chapitre de ce travail un aperçu général sur le rayonnement solaire, les cellules solaires photovoltaïques, ainsi que les paramètres qui influent sur le rendement de ces dernières. Le deuxième chapitre, est consacré à la définition des différents types de systèmes photovoltaïques et principalement les composantes des systèmes connectés au réseau. Nous avons ensuite présenté, au troisième chapitre, le réseau électrique et son architecture, et précisément la structure du réseau électrique Algérien.

Nous présentons, au quatrième chapitre, des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, en se basant principalement sur les principaux types d'onduleurs et leurs fonctionnements et l'interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV, nous terminons le chapitre par un dimensionnement d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau, d'une puissance de 1MW.

## 1- Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2  $\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain (2.5  $\mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur la distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m<sup>2</sup> (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure 1.1). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé.

Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m<sup>2</sup> du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m<sup>2</sup> (AM1.5). [1]

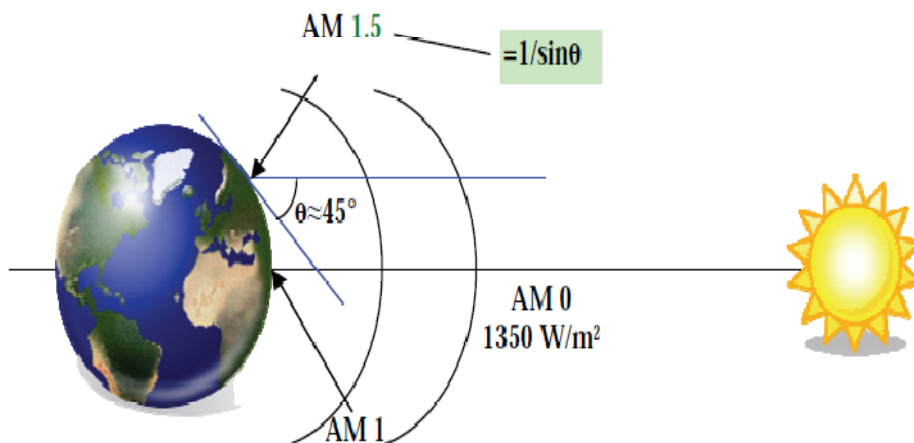


Figure 1.1 : normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [1]

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

### 1-1 Rayonnement direct

C'est le flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque solaire sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

### 1-2 Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil ayant subi de multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

### 1-3 Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature du lieu appelé Albédo  $0 \leq \epsilon \leq 1$ .

### 1-4 Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

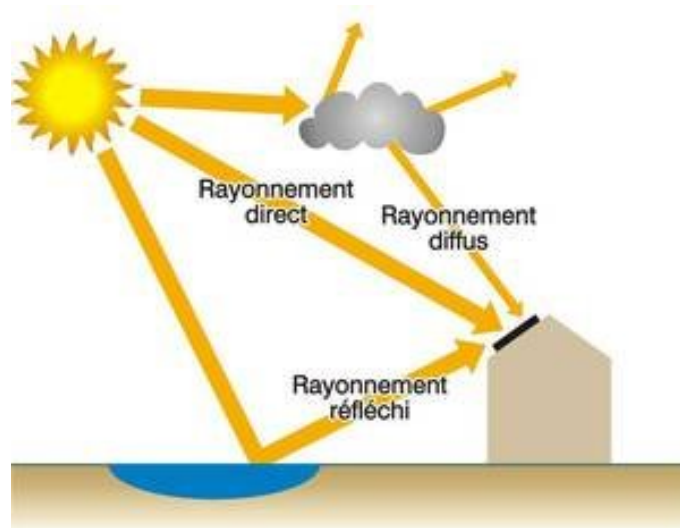


Figure 1.2 : différents composants de rayonnement.

## 2- Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au nord et  $2263\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$  au sud du pays.

Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.[2]

Tableau 1 : Potentiel solaire en Algérie. [3]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ( $\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ )	1700	1900	2650

## 3- La cellule solaire

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé «effet photovoltaïque», il a été découvert par E. Becquerel (physicien français) en 1839.

### 3-1 La structure d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce dernier est la conséquence de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Il est dû à l'interaction du rayonnement solaire avec les électrons du solide. La tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7V, en fonction du matériau utilisé et des dispositions ainsi que de la température de la cellule et de son vieillissement.

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur, capable donc à la fois de permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de cet électron de plus énergie par un circuit extérieur.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm<sup>2</sup> ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

### 3-2 Type de cellules

#### 3-2-1 Les cellules monocristallines

Elles sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, donc très "pures", mais aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en générale octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris).

- C'est la première génération de photopiles;
- Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ;
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ;
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

#### 3-2-2 Les cellules poly-cristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Les cellules sont en générale de forme rectangulaire et sont bleu nuit avec des reflets.

- Coût de production moins élevé ;
- Procédé nécessitant moins d'énergie ;
- Rendement 11-13% (18% en Labo).

#### 3-2-3 Les cellules amorphes

Elles sont produites à partir d'un "gaz de silicium" qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires», car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples.

- Coût de production bien plus bas ;
- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo) ;
- Durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

### **3-2-4 Les cellules nanocristallines**

- Une des dernières générations de photopiles ;
- Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;
- Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire ;
- Procédé et coût de production encore plus bas.

## **3-3 Principe de fonctionnement d'une Cellule photovoltaïque**

### **3-3-1 Jonction PN**

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.

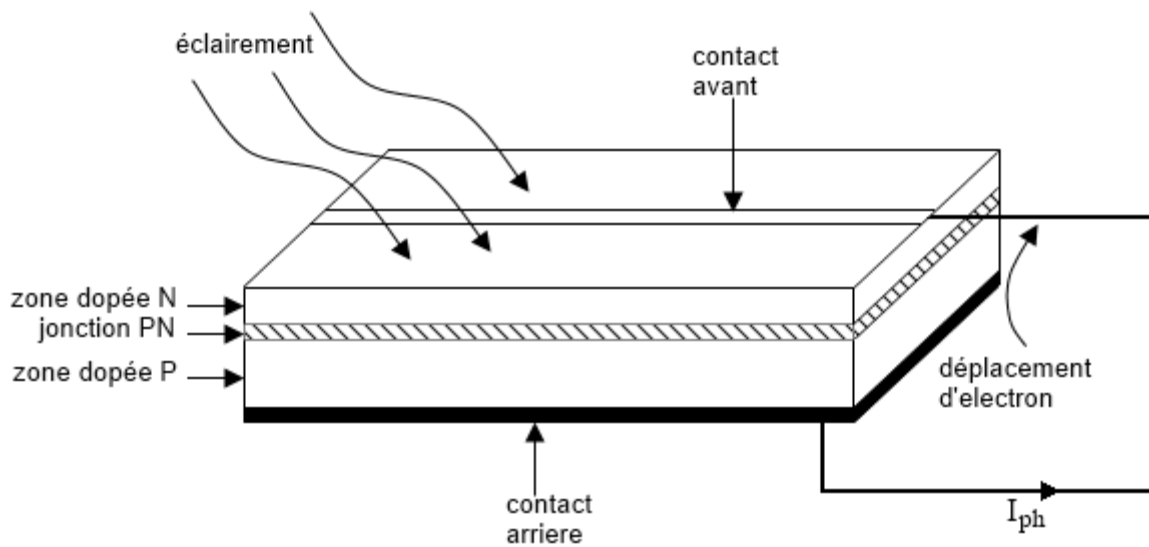


Figure 1.3 : structure d'une cellule photovoltaïque.

### 3-3-2 Principe de la conversion photovoltaïque

Le principe de la conversion photovoltaïque est résumé comme par:

- Absorption de la lumière et création de paire électron/trou ;
- Séparation des paires électron/trous sous l'effet d'un champ induit ;
- transport de charge vers les électrodes ;
- Collection des charges.

### 3-4 Circuit équivalent simple et modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

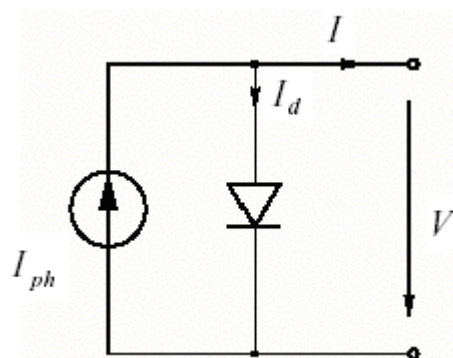


Figure 1.4 : circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque.

En appliquant la loi de Kirchoff sur ce circuit on obtient le modèle mathématique simple suivant :

$$I = I_{ph} - I_s [e^{\frac{qv}{kT}} - 1] \dots \dots \dots [1-1]$$

Le courant de saturation  $I_s$  inverse de la diode modélisé par l'équation [1-2] :

$$I_d = I_s [e^{\frac{qv}{kT}} - 1] \dots \dots \dots [1-2]$$

T : la température en kelvin ;

q:charge élémentaire d'électron  $q=1,602 \cdot 10^{-19}$  C ;

k : la constante de Boltzmann  $k = 1.380 \cdot 10^{-23}$  J/K ;

On peut dire que la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque peut être assimilée à celle d'une diode normale. La différence est l'existence de la tension  $V_{oc}$  de circuit ouvert qui mène au courant de court-circuit. Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité totale se comportera comme une diode normale.

### 3-5 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle

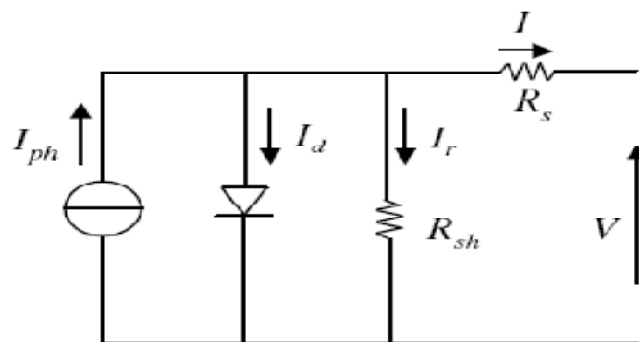


Figure 1.5: circuit équivalent de diode d'une cellule photovoltaïque réelle.

Une cellule photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant dont la tension de fonctionnement dépend du courant absorbé par la charge qui lui est appliquée.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur ce circuit on obtient le modèle mathématique suivant :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \dots \dots \dots [1-3]$$

Avec

$$I_d = I_0 \left[ e^{\frac{q(v+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \dots \dots \dots [1-4]$$

$$I_r = \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots [1-5]$$

Donc

$$I = I_{ph} - \left[ I_0 \left[ e^{\frac{q(v+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right] \times \frac{R_s}{R_s + R_{sh}} \dots \dots \dots [1-6]$$

**3-6 Caractéristiques courant - tension (I-V) de la cellule photovoltaïque**

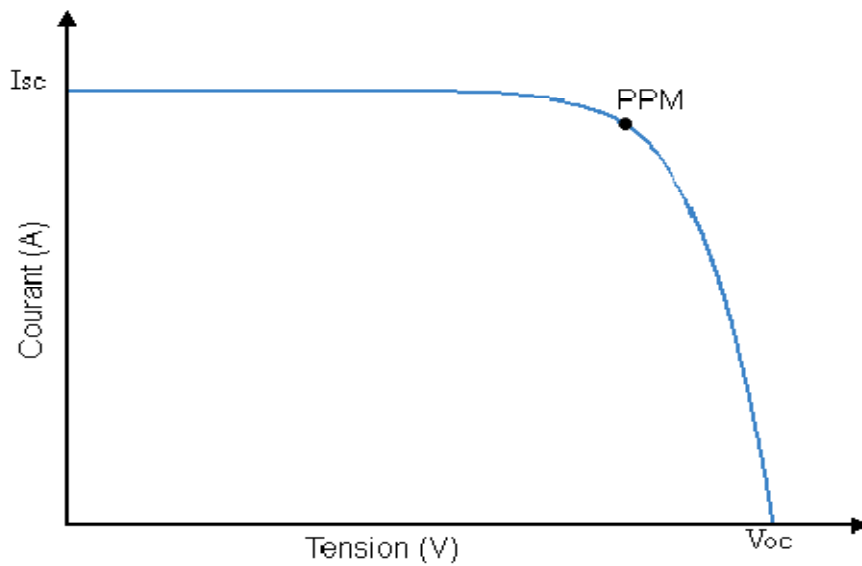


Figure 1.6: caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique I-V sous éclairement de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

**i) Courant de court-circuit (obtenue pour V=0)**

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{(V+R_s I_{cc})}{V_T}} - 1 \right] - \left( \frac{V}{R_{sh}} + \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \right) \dots \dots \dots [1-7]$$

En court circuit V=0, et pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme  $I_d$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \dots \dots \dots [1-8]$$

D'où :

$$I_{cc} \cong I_{ph} \dots \dots \dots [1-9]$$

**ii) Tension de circuit ouvert (obtenue pour I= 0)**

Son expression est déduite de l'équation [1-6] :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{V_{co}}{V_T}} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \dots\dots\dots [1-10]$$

Dans le cas idéal ( $R_s \rightarrow 0, R_{sh} \rightarrow \infty, I_{ph} = I_{cc}$ ) on obtient :

$$V_{co} = V_T \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \dots\dots\dots [1-11]$$

**iii) Puissance optimale et facteur de forme**

$$P_m = V_m \cdot I_m \dots\dots\dots [1-12]$$

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \dots\dots\dots [1-13]$$

**iv) Le rendement**

$$\eta = \frac{P_m}{P_0} \dots\dots\dots [1-14]$$

D'où :  $P_m$  est la puissance maximale ;

$P_0$  est la puissance incidente.

**3-7 Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement d'une cellule solaire [4]**

On peut remarquer que la caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température.

**3-7-1 Influence de l'ensoleillement**

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques I(V) et P(V) respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et un ensoleillement variable.

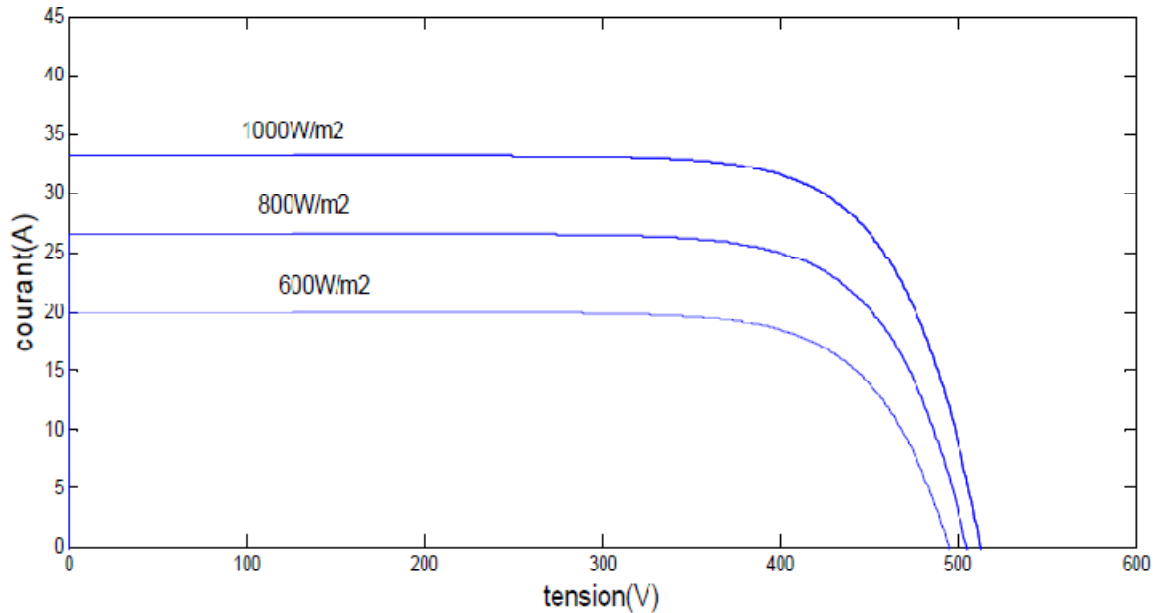


Figure 1.7: Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

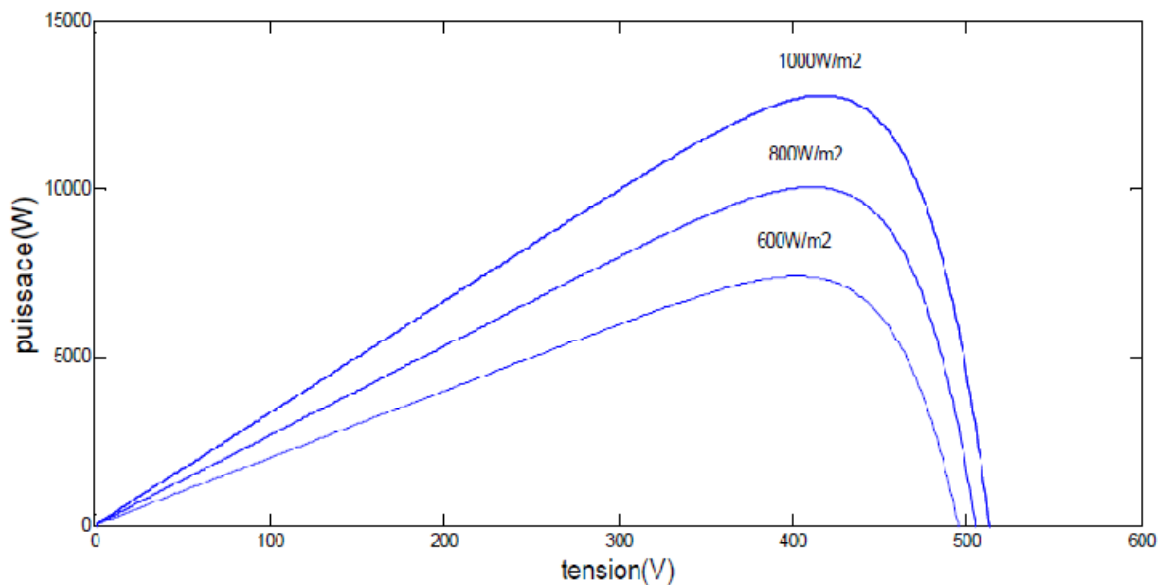


Figure 1.8: Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclaircissement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule ( $P_{\max}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ;
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### 3-7-2 Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV.

Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température.

On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

### 3-8 Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

Les figures (1.9) et (1.10) présentent des courbes I (V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% pour chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

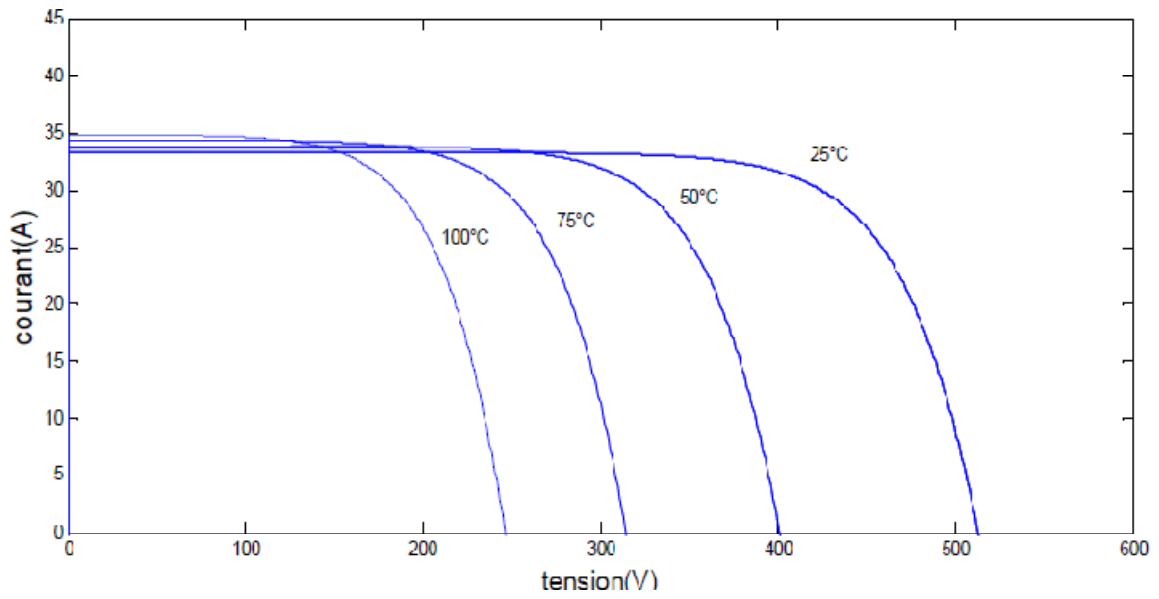


Figure 1.9: courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à  $G=1000\text{W/m}^2$ .

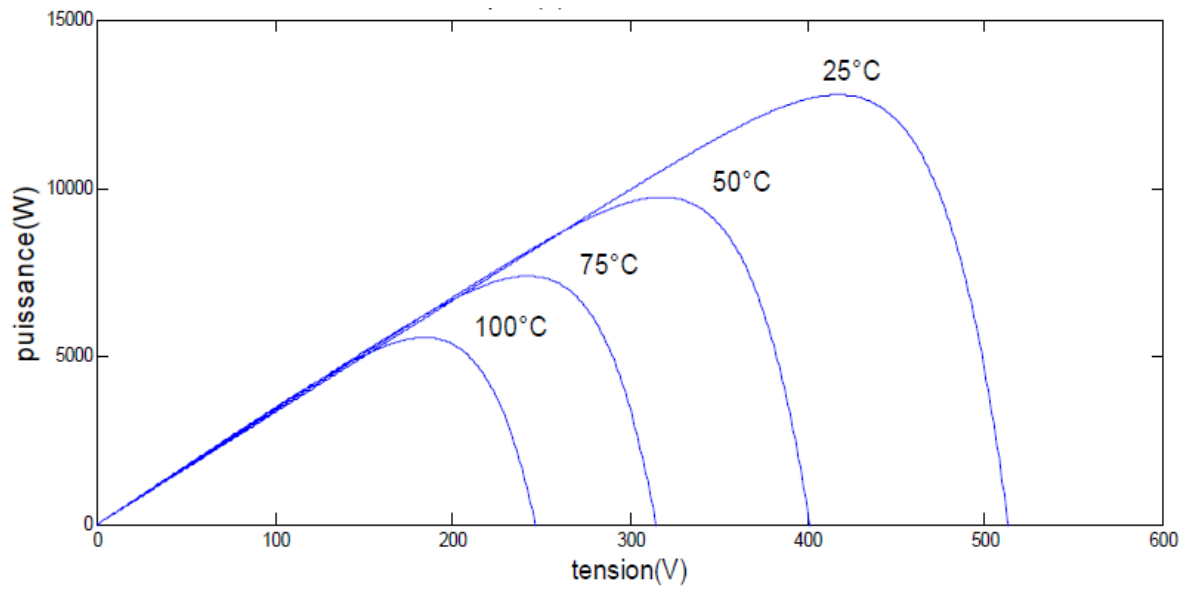


Figure 1.10: courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à  $G=1000\text{W/m}^2$ .

## 1- Les différents types de systèmes photovoltaïques

### 1-1 Installations photovoltaïques autonomes

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique.

Le champ photovoltaïque voir figure (2.1) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique).

Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil.

Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur.

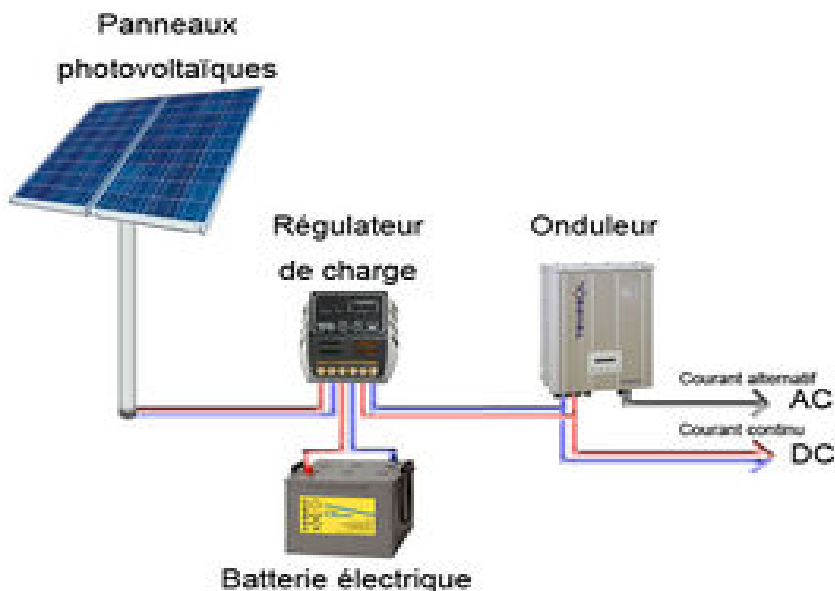


Figure 2.1 : schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

### 1-2 Installations photovoltaïques raccordées au réseau [3]

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 troisième 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 ».

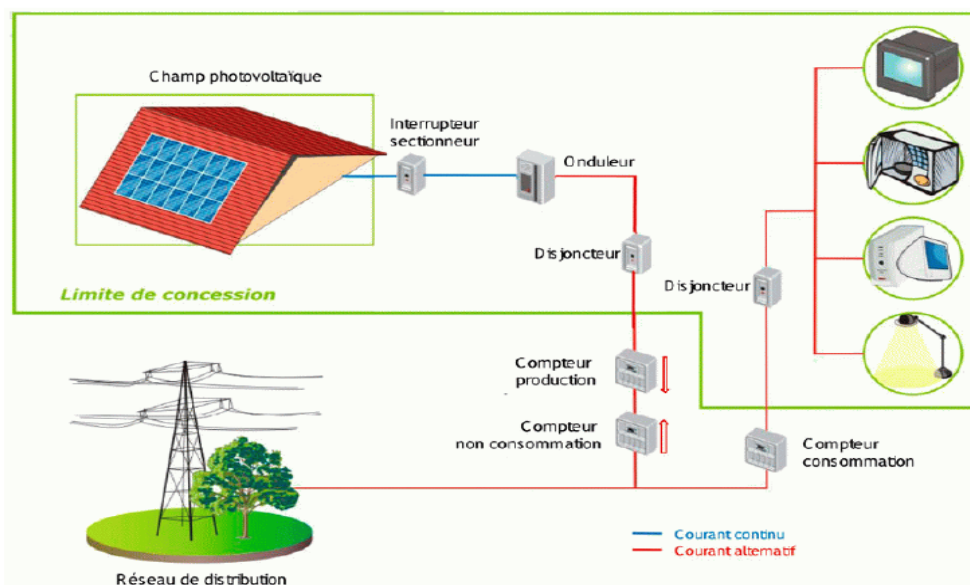


Figure 2.2 : installation photovoltaïque raccordée au réseau.

### 1-3 Installations photovoltaïques hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

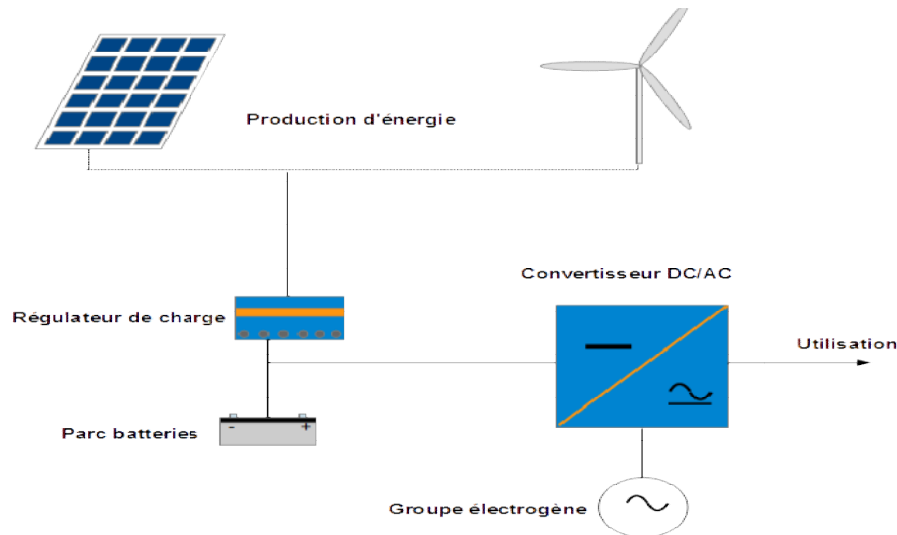


Figure 2.3: installations photovoltaïques hybride.

## 2- Etude des composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau

### 2-1 Le générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt typiquement liée à une tension de jonction PN.

Pour produire d'avantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque complet (générateur d'énergie).



Figure 2.4: générateur photovoltaïque.

### 2-1-1 Regroupement des cellules

Dans les conditions d'ensoleillement standard ( $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$  ; AM 1,5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{cm}^2$  est d'environ  $2,3 \text{ Wc}$  sous une tension de  $0,5 \text{ V}$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur photovoltaïque de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plus part des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et /ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

#### 2-1-1-1 Regroupement en série

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série (figure 2.5) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \dots \dots \dots [2-1]$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \dots \dots \dots [2-2]$$

$V_{coNs}$ : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNs}$ : courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

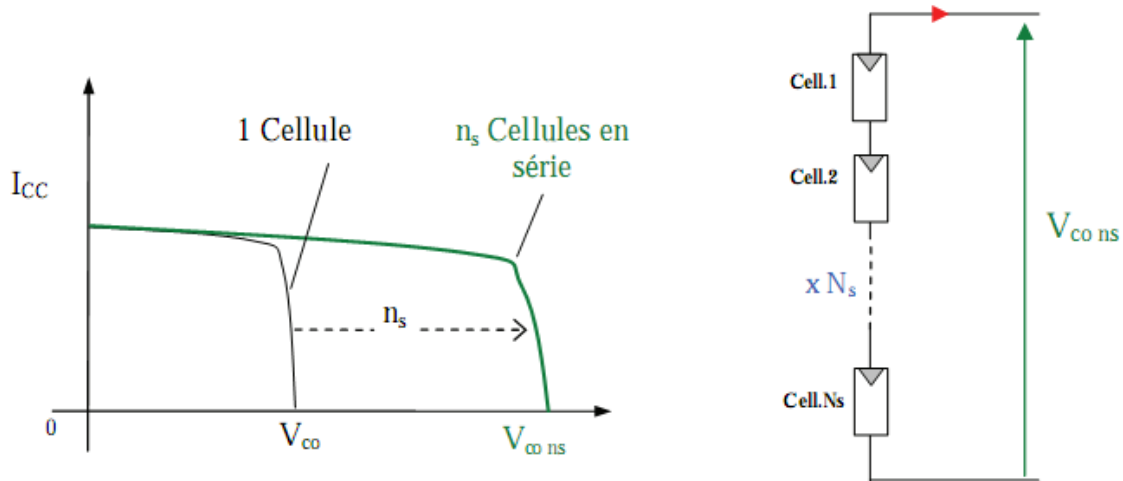


Figure 2.5: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série.

### 2-1-1-2 Regroupement en parallèle

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellule voir figure (2.6) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

Avec :  $I_{ccNp} = I_{cc} \times N_p$ ..... [2-3]

$V_{co} = V_{coNp}$ ..... [2-4]

$I_{ccNp}$ : la somme des courants de court circuit de ( $N_p$ ) cellule en parallèle.

$V_{coNp}$ : tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle.

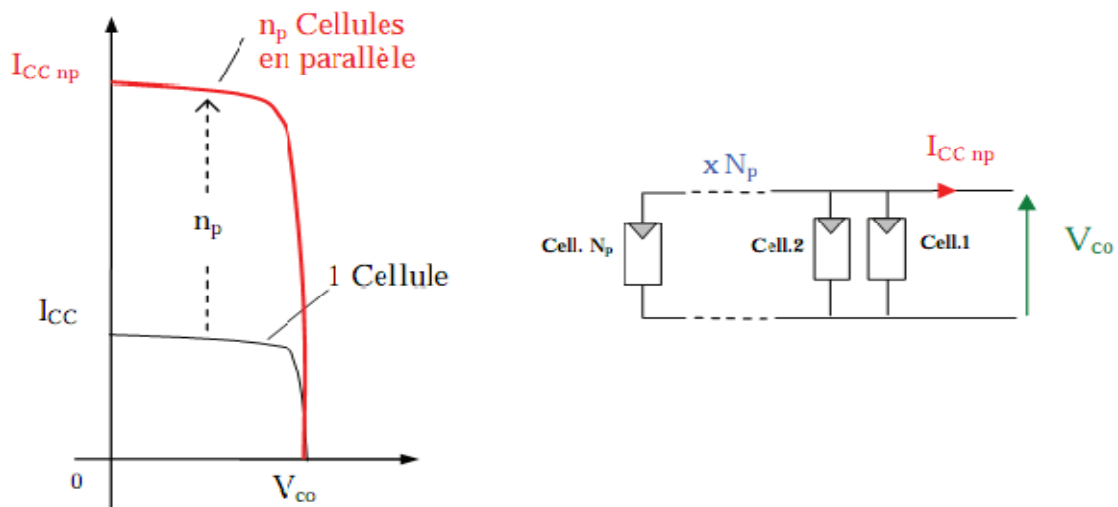


Figure 2.6: caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle.

### 2-1-1-3 Regroupement (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.

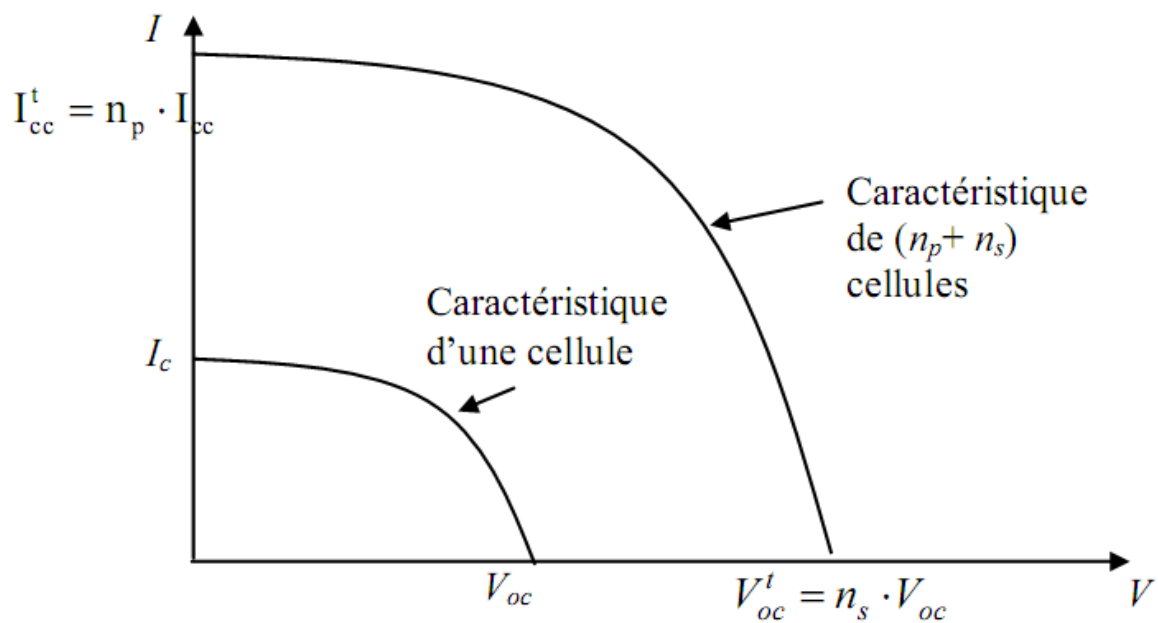


Figure 2.7: caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.

### 2-1-2 Protection d'un générateur photovoltaïque

Pour garantir la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules PV afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure 2.8) :

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en

connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

### 2-1-2-1 Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge de type batterie par exemple, le risque est que les chaînes de cellule éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la batterie se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela de diodes anti-retour mises en série avec le GPV (de blocage) comme le montre la figure 2.8. Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie ne débite sur le module PV pendant la nuit. Quand la cellule est non éclairée, une batterie pourrait se décharger à travers la cellule si nous ne disposons pas d'une diode de blocage.

### 2-1-2-2 Protection lors de la connexion en série de plusieurs GPV

Sous l'effet d'un ombrage ou de la chaleur, toutes les cellules placées en série n'ont pas les mêmes caractéristiques, créant ainsi des déséquilibres. Lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode by-pass pour empêcher le fonctionnement (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci.

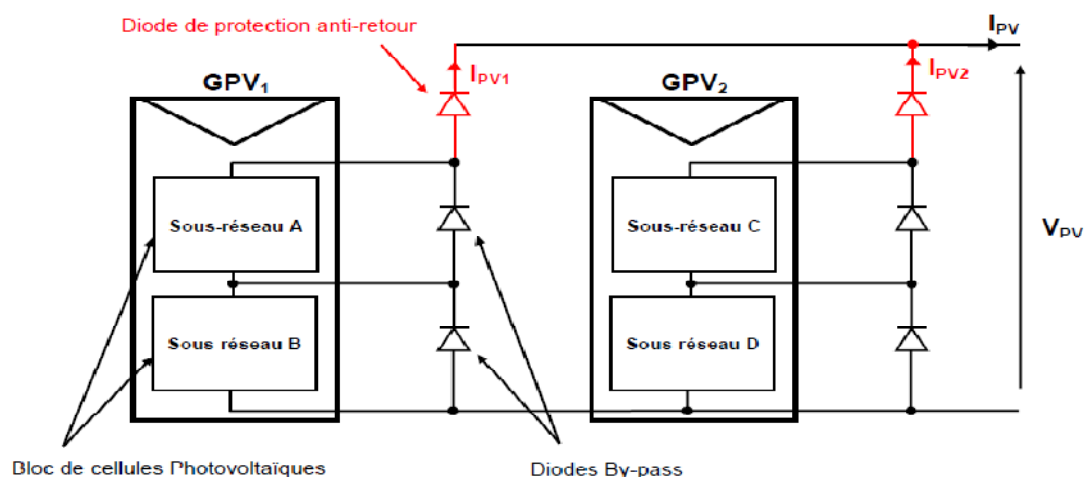


Figure 2.8: schématisations d'une association de deux générateurs PV en parallèle avec leurs diodes de protection (by-pass et anti-retour). [5]

## 2-2 Coffret de raccordement [6]

Dans les installations comportant plusieurs chaînes, chaque chaîne est conduite au coffret de raccordement du générateur.

Le coffret de raccordement contient les bornes de raccordement, les coupe-circuit et en option les fusibles de chaîne.

On monte également dans le coffret de raccordement des dispositifs de protection contre les surtensions ainsi qu'un interrupteur général DC.

Il a été introduit plus récemment dans la plupart des grandes installations des éléments de surveillance de chaîne signalant les dérangements éventuels à l'exploitant.

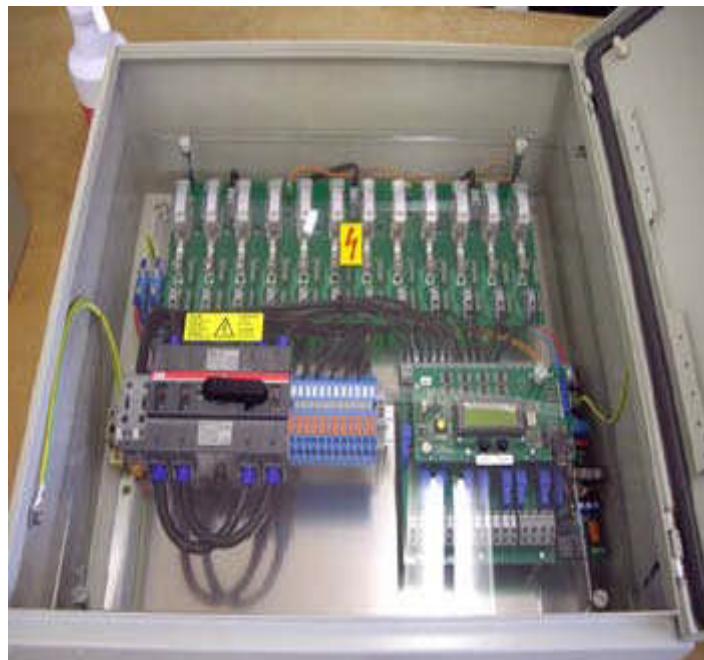


Figure 2.9: coffret de raccordement avec coupe-circuit DC, fusibles et surveillance de chaîne.

## 2-3 Câblage [6]

Le câblage du module et de la chaîne (string) est effectué au moyen de câbles solaires. Ils sont doublement isolés, résistants aux UV, flexibles (câble de cuivre généralement étamé) et résistent aux conditions atmosphériques extrêmes (- 40 °C à + 120 °C). Une grande section de câble est choisie afin d'éviter les pertes de puissance.

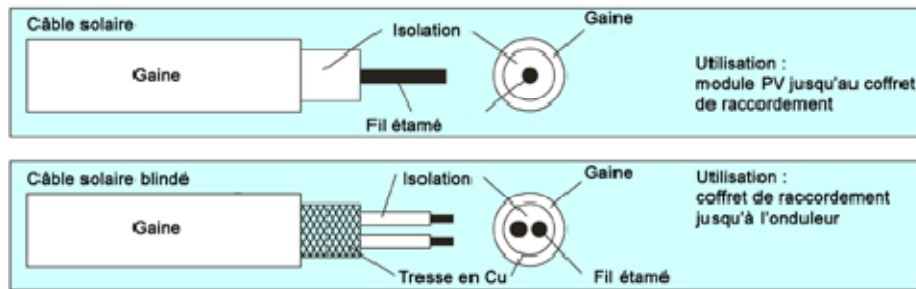


Figure 2.10: câble solaire photovoltaïque.

Pour installations standard, on utilise une grande section : jusqu'à 4 A  $\rightarrow$  2.5 mm<sup>2</sup>, jusqu'à 8 A  $\rightarrow$  4 mm<sup>2</sup>

On utilise des câbles de couleur pour un meilleur repérage :

- Rouge pour le conducteur positif ;
- Bleu pour le conducteur négatif ;
- Noir pour les autres raccordements.

Un cordon unipolaire est utilisé pour le câblage du module et de la chaîne.

Les sections les plus utilisées sont 2.5, 4 et 6 mm<sup>2</sup>.

Un câble spécial bipolaire avec de bonnes caractéristiques mécaniques est tiré entre le coffret de raccordement et l'onduleur. Fréquemment ce câble possède un blindage de cuivre de 10 mm<sup>2</sup>. Cette tresse de Cu est utilisée comme conducteur de compensation de potentiel. Sans blindage, il faut protéger le câble dans un tube métallique.

## 2-4 Compteur photovoltaïque

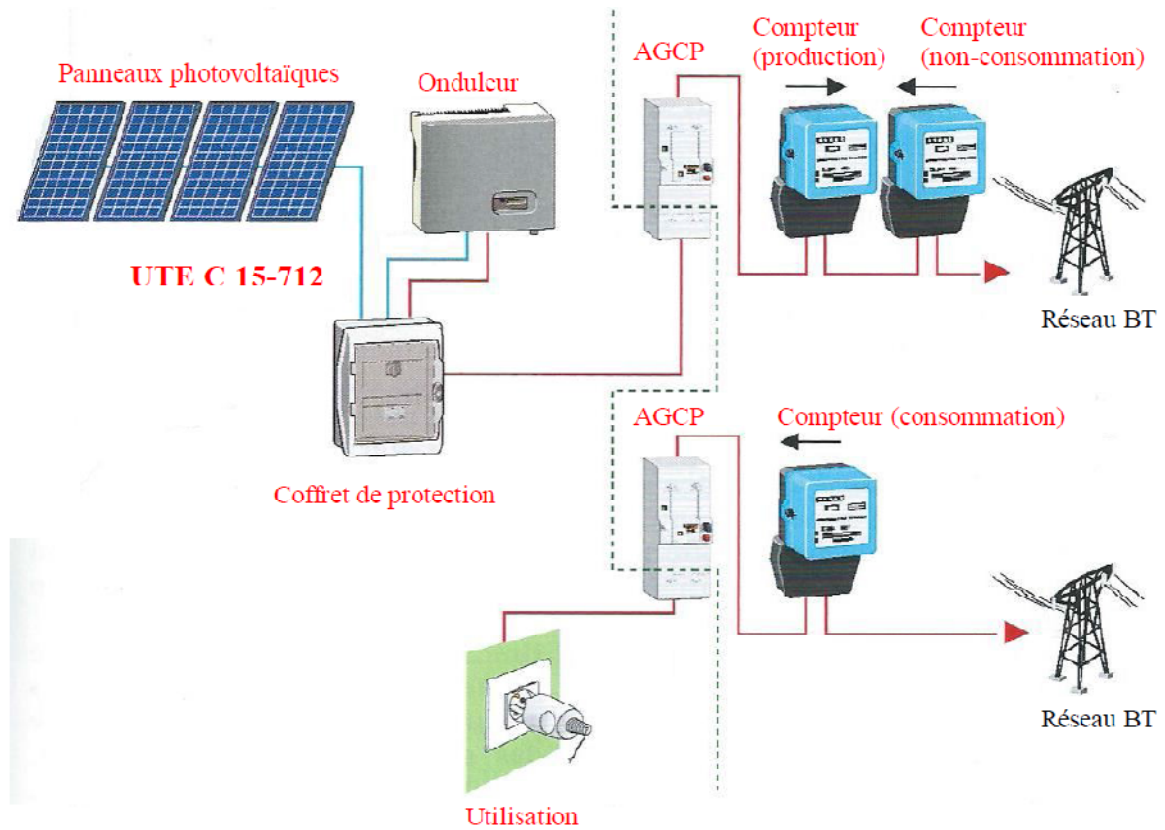
### 2-4-1 Injection totale

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production).
- Le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :

- l'un pour la production ;
- l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé).



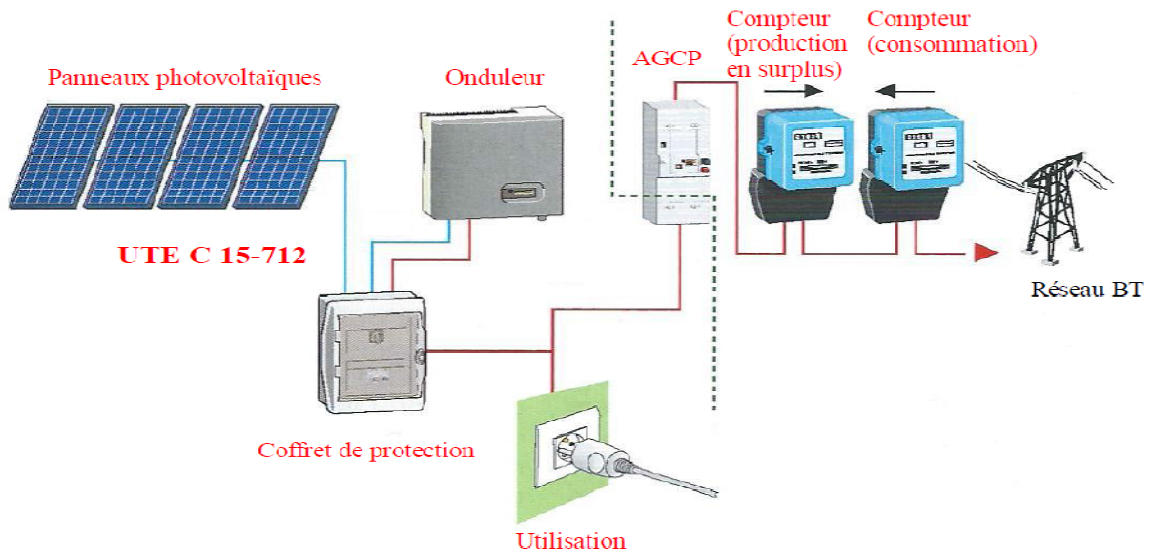
En bleu : énergie électrique continue (DC).

En rouge : énergie électrique alternative (AC).

Figure 2.11: installation avec injection totale de la production photovoltaïque.

#### 2-4-2 Injection de surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point, l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.



En bleu : énergie électrique continue (DC).

En rouge : énergie électrique alternative (AC).

Figure 2.12: installation avec injection du surplus de la production photovoltaïque.

## 2-5 Le régulateur

Le rôle du régulateur solaire est d'assurer et réguler la charge des batteries. Il optimise la puissance des panneaux et empêche les décharges/surcharges profondes nuisibles à la bonne durée de vie des batteries. Il y a actuellement sur le marché 2 types de régulateur solaire :

- Régulateur PWM : Les régulateurs solaires PWM (Pulse Wide Management) possèdent un bon rendement et permettent d'optimiser la charge de la batterie. C'est à l'heure actuelle les régulateurs présentant le meilleur rapport prix/performance.
- Régulateurs MPPT : Les régulateurs solaires MPPT (Maximum Power point Tracking) quant à eux exploitent au maximum l'énergie fournie par les panneaux en faisant varier leurs tensions en fonction de la luminosité. Selon les conditions, ils peuvent être jusqu'à 35% plus performants que les régulateurs PWM.

Les régulateurs PWM (Pulse With Modulation) sont les plus utilisés dans les installations photovoltaïques autonomes. Ils permettent d'améliorer la recharge des batteries.

Pour compléter la recharge complète, ils séparent le courant fournis par les panneaux et l'envoi vers les batteries sous forme d'impulsions. Ces impulsions sont modulées (+ou- longues, +ou- fréquentes) par la lecture précise du régulateur aux bornes de la batterie. Cela lui permet de connaître son niveau de charge. Le rôle des régulateurs PWM ne se limite pas seulement à la recharge complète de la batterie, ils permettent aussi de limiter la sulfatation

des plaques des batteries grâce aux impulsions hautes fréquences. Il existe plusieurs sortes de régulateurs PWM, certains ont des fonctions de base et d'autres plus complexes, sont équipés de logiciels qui gèrent en permanence l'état de la batterie.

Les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) possèdent une technologie avancée qui recherche en permanence le point de puissance maximum. Ce qui permet de tirer les meilleures performances des panneaux photovoltaïques. En plus de fournir une augmentation d'énergie à une installation, ils optimisent la charge de la batterie et prolonge leur durée de vie. Les régulateurs MPPT balayent la tension du panneau pour trouver le point de sortie de puissance maximum. Ils sont capables d'adapter la tension fournie par le panneau pour l'aligner à la tension que la batterie peut recevoir.

## 2-6 Onduleur

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...etc).

Parmi ces convertisseurs on cite l'onduleur.

Les onduleurs pour la connexion au réseau ont une puissance nominale d'environ 100 W à plusieurs centaines de kW. Jusqu'à 5 kW, ils fonctionnent en général en 230 V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension).

Etant connecté directement sur le champ PV, leur tension et leur courant d'entrée sont donc très variables avec les conditions d'ensoleillement et de température ambiante. L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum (souvent notée MPPT pour « Maximum Power Point Tracking »), c'est-à-dire adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit  $P = U \cdot I$  sur la caractéristique du champ PV. L'onduleur doit ensuite construire une (ou trois) tension(s) sinusoïdale(s) correspondant aux normes requises par le réseau.

### 2-6-1 Type d'onduleurs [7]

Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion :

- Onduleur Monophasé ;
- Onduleur Triphasé.

### 2-6-1-1 Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

- **Onduleur monophasé en demi-pont**

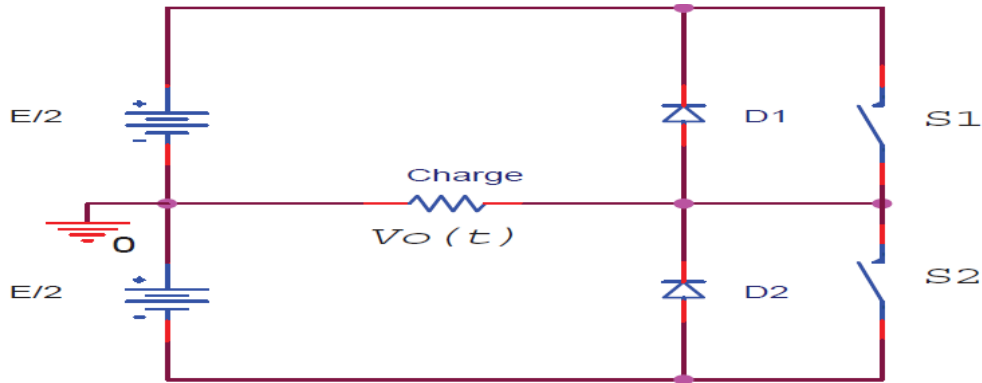


Figure 2.13: schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle ( $180^\circ$ ) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur S1, la tension aux bornes de la charge serait donc de  $- E/2$ , et prend la valeur  $+ E/2$  quand le second interrupteur, S2 est fermé. La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance (temps de montée  $t_r$ , temps de descente  $t_f$  et temps de stockage  $t_s$ ).

Les diodes D1, D2, dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

- **Onduleur monophasé en pont (Pont H)**

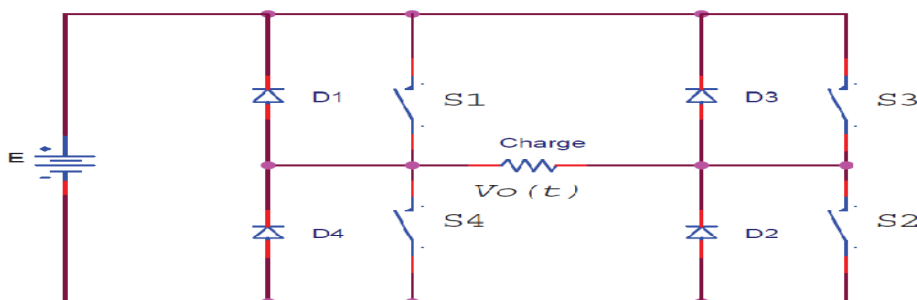


Figure 2.14: schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont.

L'onduleur en pont est représenté en figure (2.14) il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S1, S2, S3 et S4 quand les interrupteurs S1 et S2, sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur + E, et de -E lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S3 et S4.

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue.

### 2-6-1-2 Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de  $120^\circ$  degrés, l'une par rapport à l'autre.

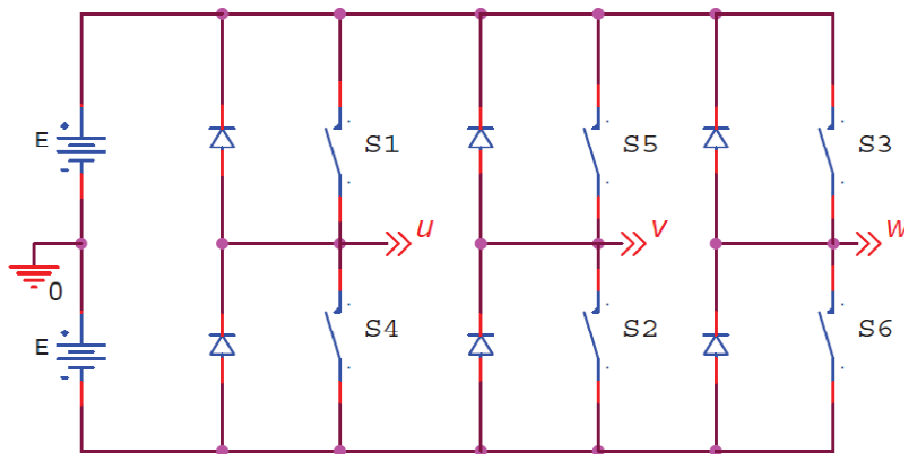


Figure 2.15: schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.

Les onduleurs triphasés sont constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs.

Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle.

## **2-6-2 Technologies des onduleurs couplés au réseau [8]**

### **2-6-2-1 Onduleurs modulaires (module inverter)**

Suivant ce concept, chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel, pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant.

### **2-6-2-2 Onduleurs centralisés (central inverter)**

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif.

Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle.

Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.

### **2-6-2-3 Onduleurs "String" ou "de Rangée"**

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé.

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante.

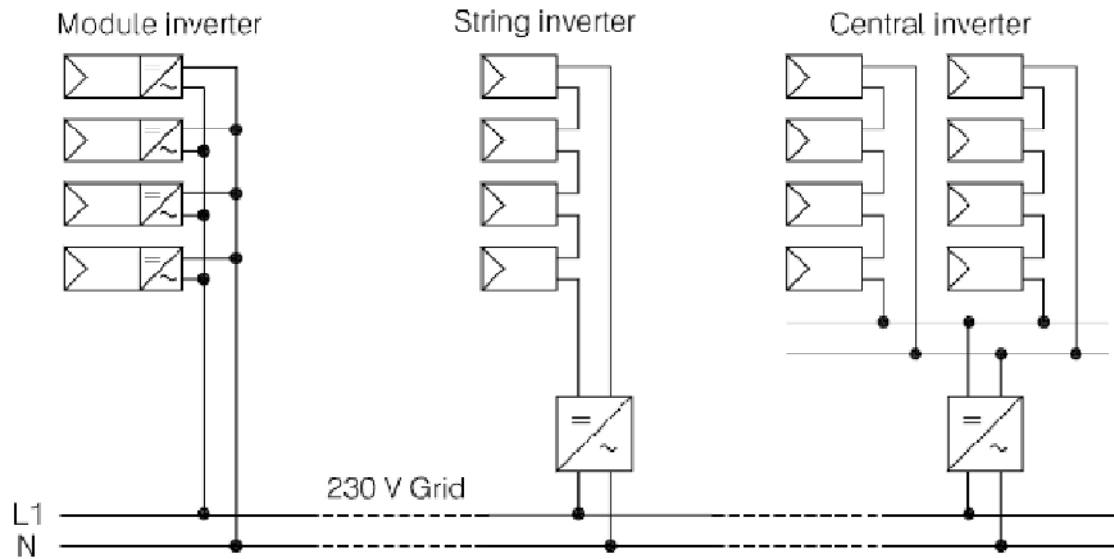


Figure 2.16: onduleurs photovoltaïques connectés au réseau.

### 2-6-3 Classification des onduleurs :

Les onduleurs sont classés:

- selon le mode de commutation :
  - Les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.
  - Les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.
- Selon la nature de la source continue
  - Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal.
  - Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale.

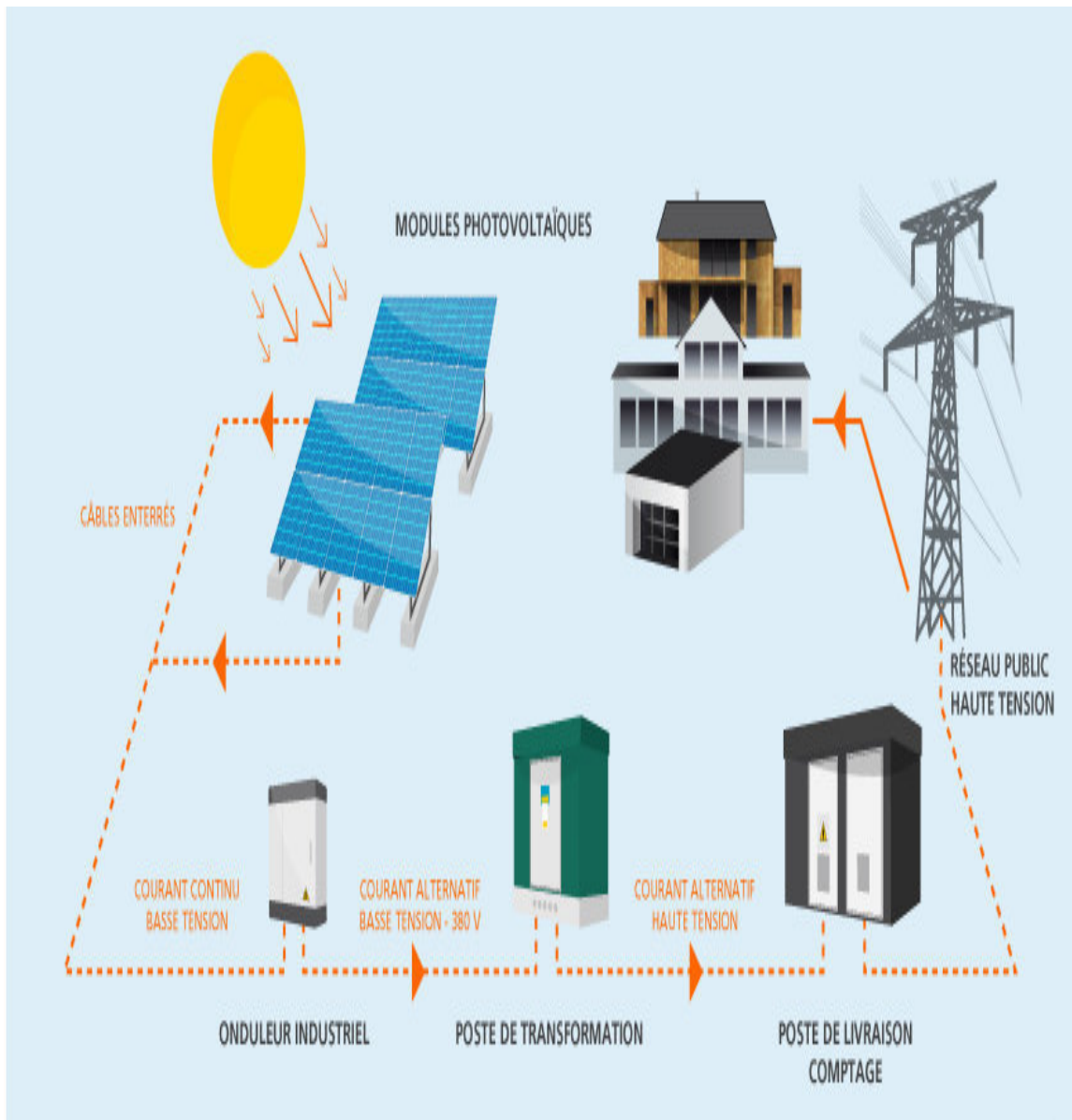


Figure 2.17: fonctionnement général d'une centrale photovoltaïque.

## 1- Le réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

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

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

Le réseau électrique peut être facilement comparé à un réseau routier, il a ses autoroutes, ses voies nationales et départementales. Une fois produites, l'électricité doit être transportée et distribuée jusqu'au consommateur. Pour cela, on distingue le réseau de transport et le réseau de distribution.

### 1-1 Architecture du réseau électrique [9]

Les réseaux électriques sont partagés en trois types :

#### 1-1-1 Réseaux de transport et d'interconnexion

Les réseaux de transport à très haute tension. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :

- De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport) ;
- De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion) ;
  - La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV ;
  - Neutre directement mis à la terre,
  - Réseau maillé.

### 1-1-2 Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation.

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres.

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- La tension est 90 kV ou 63 kV ;
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre ;
- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV ;
- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 kV ;
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

### 1-1-3 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/BTA.

Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique.

- **Réseaux de distribution à moyenne tension :**
  - HTA (30 et 10 kV le plus répandu) ;
  - Neutre à la terre par une résistance ;
  - Limitation à 300 A pour les réseaux aériens ;
  - Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains ;
  - Réseaux souterrains en boucle ouverte.

• Réseaux de distribution à basse tension :

- BTA (230 / 400 V) ;
- Neutre directement à la terre ;
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés.

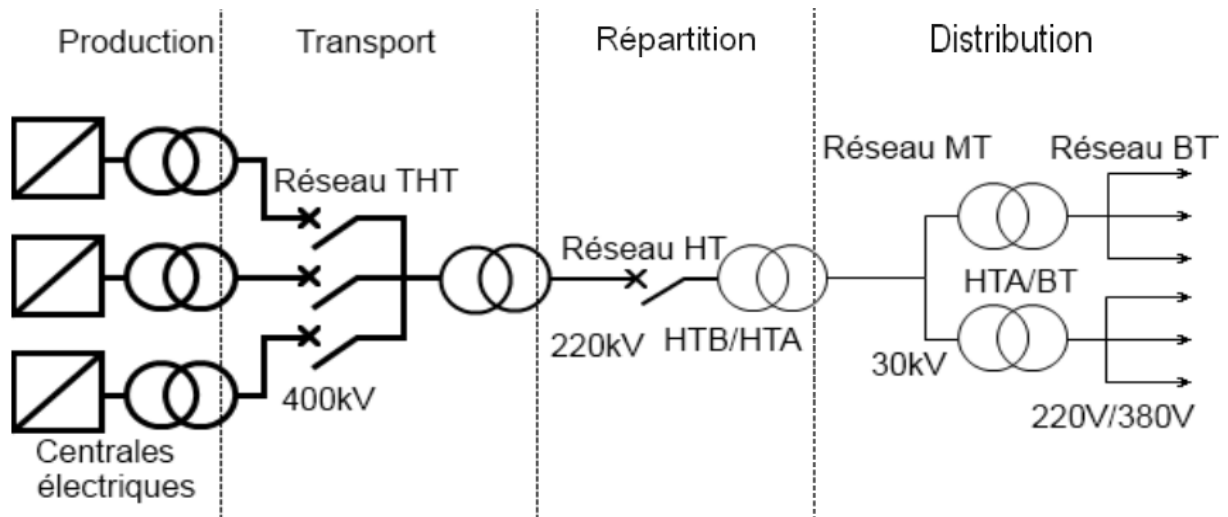


Figure 3.1: schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique.

1-2 Pourquoi transporter l'électricité a haute tension

L'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances.

Sur un transformateur d'électricité il y a le primaire et le secondaire:

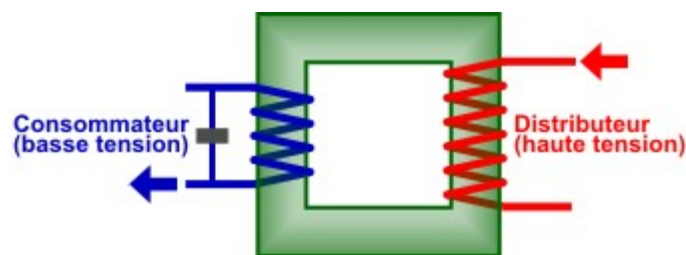


Figure 3.2 : transformateur d'électricité.

Coté distributeur (primaire), il y a une tension, appelée  $U_1$  avec un courant  $I_1$ . La puissance à l'arrivée du transformateur est de  $P_1 = U_1 \times I_1$

Coté consommateur (secondaire), il y a une tension, appelée  $U_2$  avec un courant  $I_2$ . La puissance au niveau du client est de  $P_2 = U_2 \times I_2$

Dans le cas idéal le transformateur à un rendement de 1 (pas de perte d'énergie entre le coté distributeur et le coté consommateur), donc :  $P_1 = P_2$

Soit:  $U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 \dots \dots \dots [3-1]$

Ou encore :  $U_1 / U_2 = I_2 / I_1 \dots \dots \dots [3-2]$

On prend en exemple une ligne haute tension de 20KV soit 20000 Volts, et une tension consommateur de 400 Volts (ce qui arrive chez les particuliers).

En reprenant l'équation [3-2] on arrive à :  $I_2 = 50 \times I_1$

La première conclusion, c'est que plus on augmente la tension sur la ligne, plus le courant est faible. Autrement dit: coté fournisseur il y a 20KVolts avec un courant 50 fois plus petit que du coté client 400 Volts avec un courant 50 fois plus grand que du coté fournisseur.

Le transport du courant, conduit à l'échauffement et perte d'énergie (qu'on appelle perte par effet Joule). C'est une perte sèche pour le producteur d'électricité.

Cette perte est définie par la formule  $P_j = R \times I^2$  (avec R résistance)

On voit donc que plus le courant est grand, plus la perte est importante sur le réseau.

C'est pourquoi, le producteur d'électricité transporte le courant en Haute tension afin d'avoir moins de perte.

Par exemple si  $R=1$  :

$I = 5$  Ampères, la perte par effet joule est de  $P_j = 1 \times 5^2 = 25$  Watt.

$I = 50$  Ampères, la perte par effet joule est de  $P_j = 1 \times 50^2 = 2500$  Watt.

### 1-3 La structure du réseau électrique nationale

Depuis les années 2000, le développement du réseau de transport d'électricité fait partie des priorités de l'Algérie. Il est en phase d'expansion car il doit répondre à la forte augmentation de la demande en électricité. [10]

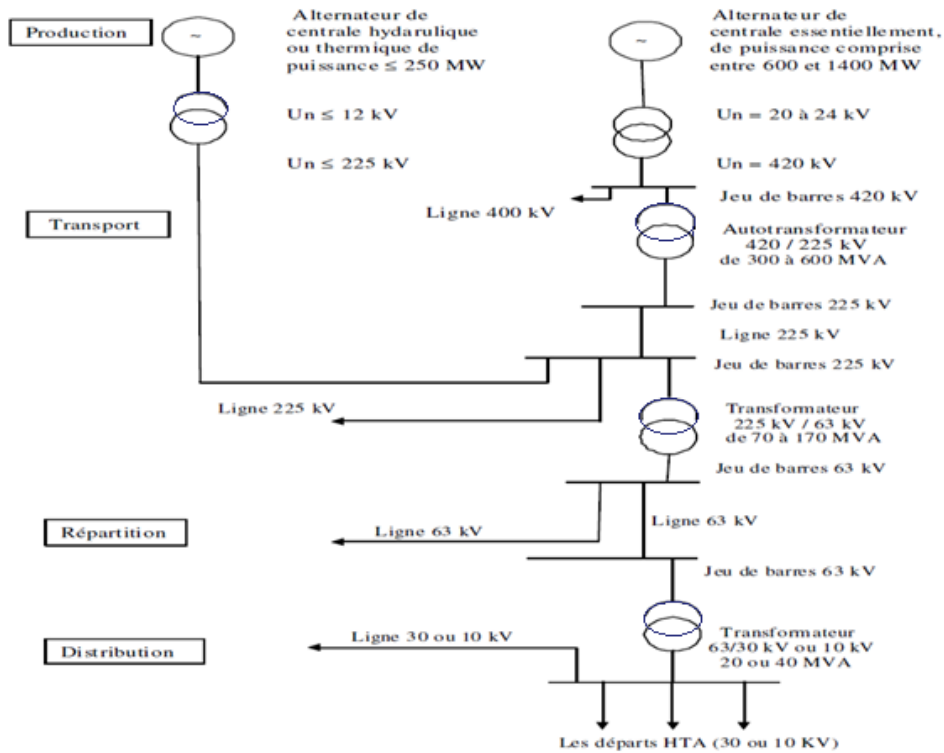


Figure 3.3 : architecture générale de réseaux d'énergies électrique en Algérie.[9]

Il se décompose en trois (03) systèmes:

### 1-3-1 Le Réseau Interconnecté National (RIN)

S'étalant sur le nord du pays et couvrant les régions de Béchar, Hassi Messaoud, HassiR'Mel et Ghardaia, est alimenté par une quarantaine de centrales de production d'électricité, reliées entre elles à travers un réseau de transport en 220 kV et 400 kV [11], permettant le transfert d'énergie des sites de production vers les centres de consommation.

### 1-3-2 Le pôle In Salah – Adrar – Timimoune

Ce pôle est alimenté par les centrales Turbines à Gaz d'Adrar et d'In Salah, interconnectées à travers un réseau 220 kV s'étalant d'In Salah à Timimoune via Aoulef et Adrar. [11]

### 1-3-3 Les réseaux isolés du sud

Il s'agit de vingt-six (26) sites du grand sud, alimentées par des réseaux locaux à travers des groupes diesels ou des turbines a gaz, compte tenu des distances mises en jeu et des niveaux de consommation relativement faibles.[11]

La longueur totale du réseau national de transport de l'électricité, tous niveaux de tensions confondus (60 à 400 kV), dont la gestion est confiée au Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE) est estimée à fin 2011 à 22 370 km, soit un accroissement de 21.3 % par rapport à 2007 [12].



Figure 3.4: évolution de la longueur du réseau transport électricité en km Période 2000-2011.[12]

## 1-4 Plan de défense du réseau électrique national

**Objectif** : le plan de défense du réseau prévoit à l'avance les incidents et les mesures à prendre en compte pour les éviter ou réduire leurs impacts. Ainsi, Il y a des mesures contre les baisses de fréquence, les ruptures de synchronisme et le manque de tension.

**1-4-1 Contre les baisses de fréquence** : Il est appliqué le plan de délestage technique

- Si le manque de production découle d'incidents inattendus ;
- Si ce manque était volontaire et prévisible, il est fait recours au délestage préventif pour réduire les contraintes sur le réseau et assurer le service minimum.

### 1-4-2 Pour les perturbations de grande amplitude

Le plan de défense cherche à limiter l'étendue de la zone perturbée. Pour cela, le réseau est progressivement découpé jusqu'à retrouver la stabilité dans chaque partie isolée. Ce découpage sacrifie la région en détresse pour préserver le reste du réseau.

### 1-4-3 En cas de perturbation très importante : l'action du plan de défense consistera

- Ouverture en premier des lignes d'interconnexion internationales et celles reliant les réseaux de Hassi Messaoud et HassiR'Mel au réseau Nord (à 48,2 Hz) ;
- Îlotage inter – régional (à 46,5 Hz) ;
- Séparation de la région perturbée et îlotage des groupes de production (à 46 Hz).

### 1-5 Matériels utilisés dans les réseaux électriques

#### i- Les lignes électriques

Les lignes électriques assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terme.

#### ii- Les pylônes

Supports des câbles aériens par lesquels transitent le courant électrique, les pylônes sont le plus souvent constitués de cornières métalliques. Ils peuvent également être tubulaires en métal ou en béton.

Leur rôle est de maintenir les câbles électriques écartés entre eux et à une certaine distance du sol et des obstacles rencontrés afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage de la ligne.

#### iii- Les isolateurs

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension, il faut compter environ 6 isolateurs en 63 kV, 9 en 90 kV, 12 en 220 kV et 19 en 420 kV. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique : elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, la neige...etc.



Figure 3.5: lignes électriques soutenues par un pylône avec isolation.

## 2- Les postes électriques

Un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs.

Un poste électrique est donc un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels).

Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. On parle généralement de sous-station.

### 2-1 Type de poste électrique

Il existe plusieurs types de postes électriques :

#### i- Postes de sortie de centrale

Le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau.

#### ii- Postes d'interconnexion

Le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques HT.

#### iii-Postes élévateurs

Le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur.

#### iv-Postes de distribution

Le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

## **2-2 Composants des postes électriques**

### **i- Le transformateur**

Un transformateur est une machine statique destinée à transformer un courant alternatif donné en un autre courant alternatif de même fréquence, mais de tension en général différente. Ces appareils sont très utilisés sur le réseau de transport où ils servent à convertir à des tensions différentes l'énergie électrique transitée.

Le transformateur est l'équipement le plus important dans un poste de transport. Son coût est extrêmement élevé et son immobilisation en cas d'incident est toujours très longue. Pour cette raison, il doit être envisagé de sorte à réduire au maximum l'effet des éventuels incidents. Ceci peut s'effectuer via un système de protection très sophistiqué.

### **ii- Le disjoncteur**

Situé à l'intérieur d'un poste électrique, le disjoncteur est un appareil destiné à protéger les circuits et les installations contre une éventuelle surcharge de courant due à un court-circuit (provoqué par la foudre ou par un contact entre le conducteur et la terre). Il permet aussi l'exploitation du réseau en interrompant ou en rétablissant le passage du courant dans une portion du circuit.

### **iii-Le sectionneur**

Situé dans un poste électrique, le sectionneur assure une coupure visible du circuit électrique. Cette coupure certaine est primordiale car elle permet d'intervenir pour l'entretien ou la réparation des appareils en toute sécurité. En mettant hors tension ou sous tension certains circuits du poste. Il assure la fonction d'aiguillage en répartissant les transits d'énergie entre les lignes électriques raccordées au poste. La commande du sectionneur peut être électrique ou manuelle.

### **iv-Surveillance et contrôle**

Les postes hébergent des systèmes de surveillance et de contrôle du réseau dans des bâtiments de relaiage.

Ils permettent d'envoyer des informations vers des centres distants qui les analysent et détectent les éventuelles anomalies.

Ces centres envoient en retour des ordres télécommandés (ouverture ou fermeture des disjoncteurs et sectionneurs) permettant de répartir le courant sur les différentes lignes ou corriger une anomalie sur le réseau.

### 3- Grandeurs électriques importantes

Les grands réseaux électriques nécessitent la surveillance constante de certains paramètres afin de maintenir le réseau, ainsi que les installations de production et de consommation qui y sont raccordées, dans les domaines d'utilisation prévus. Les principales grandeurs à surveiller sont la fréquence, la tension, l'intensité dans les ouvrages, et la puissance de court-circuit.

#### 3-1 Surveillance de la tension

Un grand réseau électrique possède de multiples niveaux de tension. Chaque niveau de tension est conçu pour une plage d'utilisation bien spécifique. Des tensions légèrement trop élevées conduisent à une usure prématurée du matériel, puis si elles sont franchement trop élevées à un « *claquage* » de l'isolant (cas des câbles souterrains, des câbles domestiques, ou des isolateurs des lignes électriques). Les surtensions très élevées (par exemple causées par la foudre) sur des conducteurs « *nus* » (c'est-à-dire sans isolant, ce qui est le cas des lignes électriques) peuvent conduire à des amorçages avec des objets proches, par exemple des arbres.

A contrario, des tensions trop basses par rapport à la plage spécifiée conduisent à un mauvais fonctionnement de beaucoup d'installations, que ce soit chez les consommateurs, ou sur le réseau en lui-même (mauvais fonctionnement des protections). De plus, des tensions basses sur les réseaux de transport d'électricité ont été la cause de grands incidents qui ont été responsables de la coupure de plusieurs millions de foyers.

Bien que les plages d'utilisation des matériels spécifient une marge de 5 à 10 % par rapport à la tension nominale, les grands opérateurs de réseaux privilégient actuellement une exploitation plutôt en tension haute car cela limite les pertes joules dans le réseau.

#### 3-2 Problématique de l'intensité

L'intensité est un paramètre particulièrement important à surveiller car elle peut entraîner la destruction de matériel coûteux (les transformateurs et les câbles), ou bien mettre en danger la sécurité des biens et des personnes (cas des lignes aériennes). Le courant

permanent admissible est l'intensité maximale à laquelle un ouvrage peut être exploité sans limitation de durée. Afin de faciliter l'exploitation des réseaux électriques, certains ouvrages peuvent être exploités à une intensité supérieure à cette intensité mais pendant une durée limitée.

Pour permettre une telle exploitation, ces ouvrages sont munis de protections spécifiques qui placent ceux-ci en sécurité de façon automatique lorsque l'intensité dépasse une certaine valeur pendant une durée définie.

Le problème créé par une intensité trop élevée (c'est-à-dire une puissance transmise élevée) est un échauffement par effet Joule important. La conséquence de cet échauffement se manifeste de différentes manières selon les ouvrages considérés :

#### **i- Pour les câbles électriques (présence d'une gaine isolante)**

La chaleur produite par le câble doit être évacuée par l'intermédiaire de l'isolant électrique, qui est souvent mauvais conducteur de chaleur. De plus, les câbles étant souvent souterrains, cette chaleur s'évacue d'autant plus mal : en cas d'intensité trop élevée, le risque est la destruction physique du câble par surchauffe.

#### **ii- Pour les transformateurs**

Les enroulements des transformateurs sont en général immergés dans un bain d'huile qui joue le rôle d'isolant électrique mais également de fluide caloporteur aéroréfrigérant. En cas d'intensité trop élevée, l'huile ne peut plus évacuer assez de chaleur et les enroulements risquent de se détériorer par surchauffe.

#### **iii- Pour les lignes électriques aériennes (absence de gaine isolante)**

Les conducteurs s'échauffant par effet Joule, ils vont aussi s'allonger par le phénomène de dilatation thermique ; la ligne électrique étant maintenue à chaque extrémité par un pylône, cet allongement va se matérialiser par une réduction de la hauteur entre la ligne et le sol, ce qui conduit à un amorçage (arc électrique créant un court-circuit) au vu des tensions importantes utilisées dans ces réseaux. Heureusement des protections sont installées sur les lignes pour éviter de tels amorçages qui sont bien sûr extrêmement dangereux.

### 3-3 Intensité de court-circuit

L'intensité de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est une grandeur théorique qui correspond au courant que l'on pourrait mesurer en un point du réseau si ce point était relié directement à la terre. Elle est égale au courant circulant dans un ouvrage lors d'un défaut triphasé franc à la terre (c'est-à-dire qui relie directement les 3 phases à la terre). L' $I_{cc}$  est fournie principalement par les groupes de production. Elle est élevée dans les nœuds du réseau que sont les postes électriques. L' $I_{cc}$  devient de plus en plus faible au fur et à mesure que les niveaux de tension décroissent et que l'on s'éloigne des postes électriques.

Les matériels utilisés dans les postes électriques sont conçus pour résister à une valeur maximale d' $I_{cc}$  : au-delà, il y a un risque de casse de matériel en cas de court-circuit (causé par la foudre, le givre, une rupture de matériel...).

Un réseau électrique a cependant tout intérêt à avoir un  $I_{cc}$  élevée. En effet, cela permet l'amortissement des perturbations émises par les grandes industries, ainsi qu'une réduction des chutes de tension lors des courts-circuits sur le réseau. Pour le consommateur, l' $I_{cc}$  correspond à l'intensité maximum que peut fournir le réseau : un  $I_{cc}$  suffisant est donc indispensable au démarrage des gros moteurs électriques. De manière générale, un  $I_{cc}$  élevée maintient une bonne qualité de l'onde électrique fournie aux clients.

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

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

### 1-1 Système PV connecté directement au réseau :

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

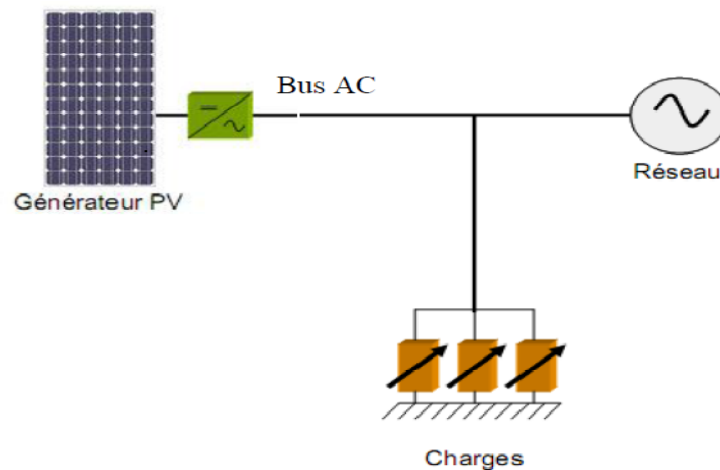


Figure 4.1: système photovoltaïque connecté directement au réseau.[13]

### 1-2 Systèmes à bus continu intermédiaire :

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.

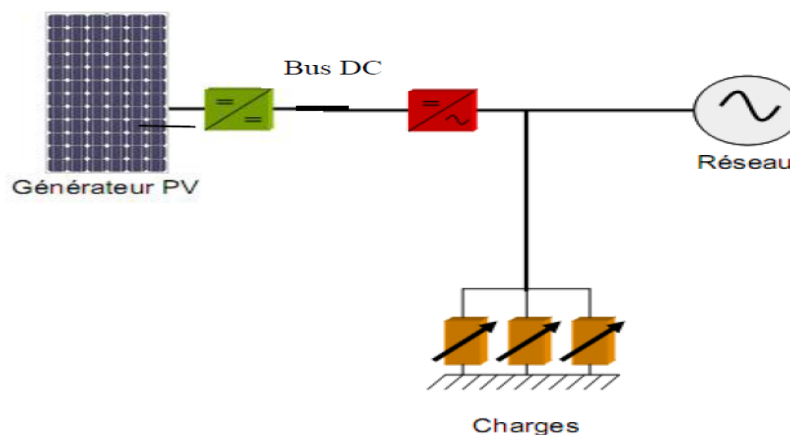


Figure 4.2: système photovoltaïque connecté via un bus continu-continu. [13]

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.

## 2- Principaux types d'onduleurs : [14]

### 2-1 Montage a thyristors :

Le montage le plus simple est composé de thyristors. Cette technologie était utilisée dans les premiers onduleurs PV (et est encore disponible en monophasé et triphasé).

Peu cher, il présente cependant un courant de sortie plus ou moins rectangulaire induisant de la puissance réactive et des harmoniques qui affectent le rendement de l'onduleur et peuvent perturber le réseau.

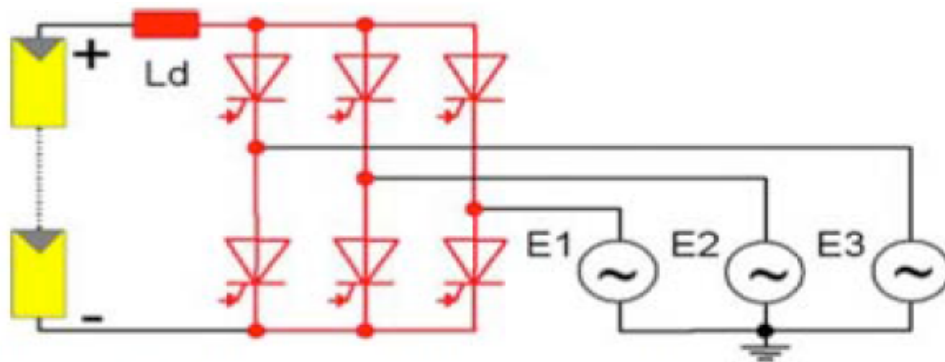


Figure 4.3: Circuit utilisant des thyristors.

### 2-2 Montage a pont de transistors :

Le montage de la (figure 4.4) présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance  $L_d$  située avant le transformateur afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

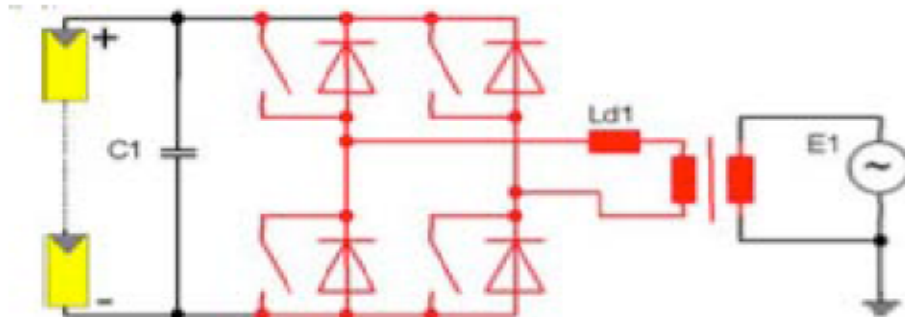


Figure 4.4: Circuit simple utilisant un pont de transistors.

### 2-3 Montage à pont de transistors avec convertisseur élévateur :

Pour travailler sur une gamme de tensions d'entrée plus large, un convertisseur élévateur («boost») peut être rajouté (en vert) en entrée du pont (figure 4.5).

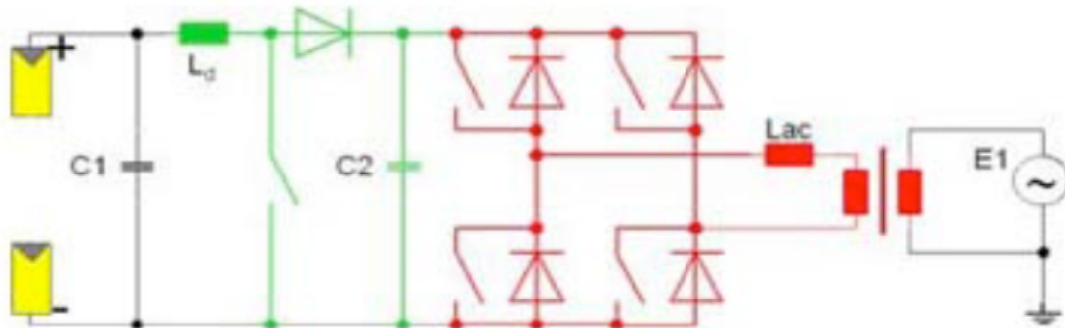


Figure 4.5: Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur.

### 2-4 Montage à 3 étages avec transformateur haute fréquence :

Le montage de la (figure 4.6) comprend 3 étages différents. Il est composé d'un transformateur haute fréquence (en bleu) qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur. À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur (en vert) permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

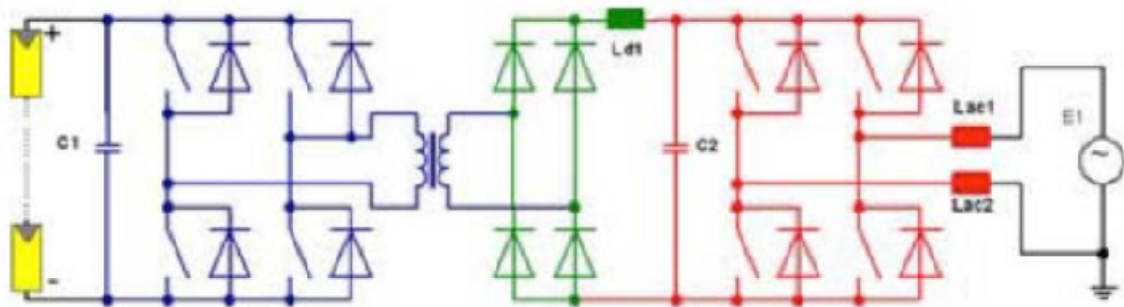


Figure 4.6: Circuit à 3 étages avec transformateur haute fréquence.

### 2-5 Montage à 4 étages avec montage push pull :

Le montage de la (figure 4.7) est constitué de 4 étages. Ce circuit nécessite le contrôle de 7 interrupteurs contre 8 pour celui de la (figure 4.6). Il est composé d'un convertisseur abaisseur de tension, d'un montage dit « pushpull » suivi d'un redresseur, et d'un pont de sortie.

La partie « convertisseur abaisseur + transformateur\* push pull\* » permet d'adapter la tension d'entrée, et permet aussi à l'onduleur d'avoir une plus large gamme de tensions d'entrée possible donc une plus grande flexibilité d'association avec les modules PV. Le redresseur « redresse » la tension en sortie du push pull, et le pont de sortie (rouge) permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

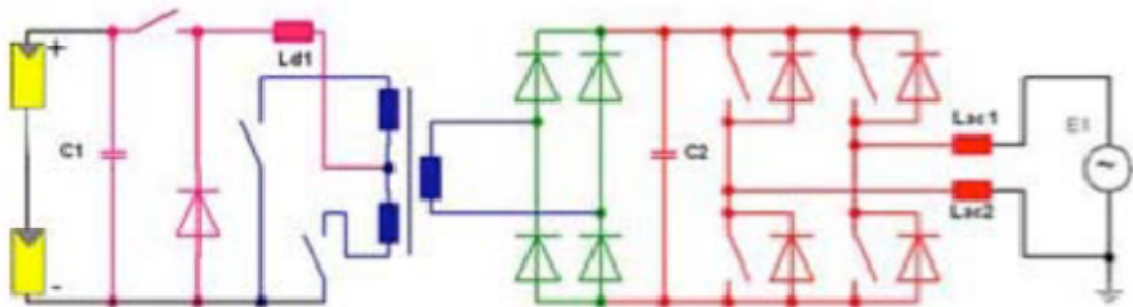


Figure 4.7: Circuit à 4 étages avec montage push pull

### 2-6 Montage d'onduleur sans transformateur :

Enfin, le montage de la (figure 4.8) représente un exemple simple de la technologie des onduleurs sans transformateur. En éliminant le transformateur, générateur de pertes importantes dans le circuit lors de la conversion de puissance, on peut augmenter le rendement.

Il faut cependant prendre en compte les problèmes de compatibilité électromagnétique que le transformateur permettait d'éliminer par isolation galvanique.

Dans ce circuit, les interrupteurs S1 (pour les courants positifs et négatifs) et S2 (pour les courants positifs) sont commandés en haute fréquence et les autres interrupteurs en 50Hz (fréquence du réseau). Pour des tensions d'entrée plus grandes, S1 peut être contrôlé seul en haute fréquence et les 4 autres en 50Hz pour former un convertisseur abaisseur et un convertisseur push pull.

Dans les 2 cas, le désavantage de ce montage est la très forte tension appliquée aux bornes des interrupteurs.

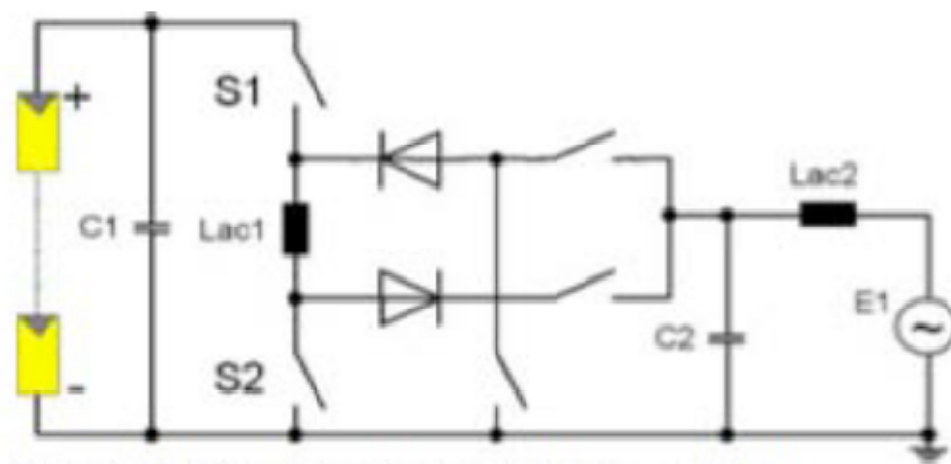


Figure 4.8: Onduleur sans transformateur dit « à Topologie de Karschny »

### 3- Principes de fonctionnement : [15]

#### 3-1 Onduleurs pilotés par le réseau :

Appelés aussi «à commutation extérieure», ces appareils sont relativement simples et bon marché. Les éléments de commutation sont des thyristors, enclenchés par un signal de commande et déclenchés lors du passage à zéro de la sinusoïde. Ils génèrent des signaux rectangulaires ou trapézoïdaux en montage triphasé, contenant beaucoup d'harmoniques. Le pilotage par le réseau implique un déphasage ( $\cos \phi$ ), et la connexion au réseau est effectuée à travers une très grosse self et un transformateur 50 Hz, accompagnés d'un filtre pour atténuer les harmoniques.

Les onduleurs à thyristors sont utilisés surtout pour de très grosses puissances. Cette technologie bénéficie d'un prix inférieur, car elle est appliquée à grande échelle dans d'autres

domaines de conversion du courant. Mais, avec tous ses inconvénients, ce principe est de moins en moins utilisé.

### 3-2 Onduleurs à référence interne :

Une fois enclenchés, les thyristors ne peuvent être coupés que par le passage du courant à zéro.

Or, si l'on veut améliorer la qualité du « signal » produit (taux d'harmoniques et déphasage), il est nécessaire de commuter la puissance plusieurs fois par période. On devra donc avoir recours à des commutateurs électroniques plus sophistiqués, tels que les thyristors à coupure (GTO), transistors de puissance, MOSFET de puissance ou les nouveaux IGBT.

Le fonctionnement sera alors commandé par des signaux de référence internes. La (figure 4.9) indique les principes de base. Dans le cas le plus simple (b), dit à 6 impulsions, on génère un signal carré avec passage à zéro. Ce montage est utilisé sur certains gros onduleurs triphasés (dizaines de kVA), mais présente encore un fort taux d'harmoniques nécessitant un filtrage important. Avec leurs possibilités de commutation rapide, les nouvelles technologies de semi-conducteurs permettent d'utiliser la technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM, pour Pulse Width Modulation), où la forme sinusoïdale du signal est reconstituée grâce à l'intégration d'une suite d'impulsions brèves de largeur variable. Cette technique est largement utilisée dans les alimentations à découpage. On peut montrer que N impulsions par demi-période permettent d'éliminer les harmoniques jusqu'au rang N.

Dans cette configuration, la connexion au réseau, et la séparation galvanique, est encore effectuée à travers un encombrant transformateur 50 Hz, avec des pertes importantes (de l'ordre de 5% de la puissance nominale pour quelques kVA).

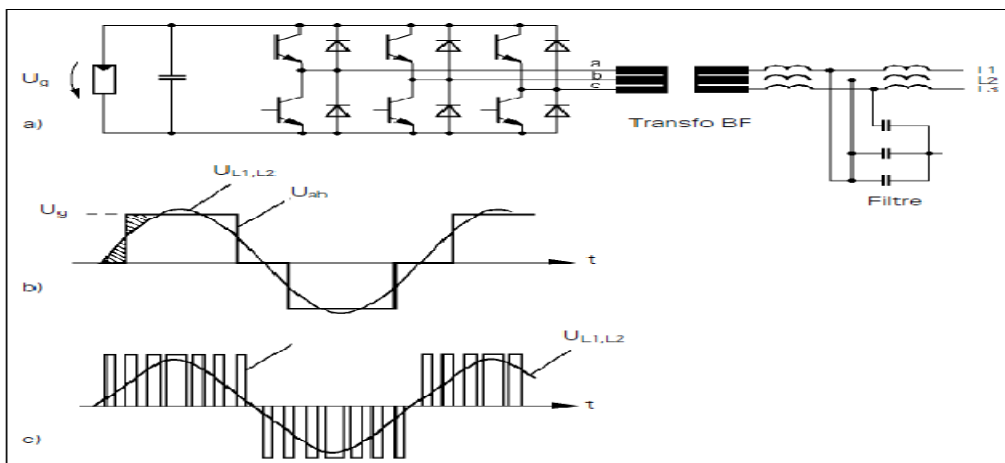


Figure 4.9: a)Principes de base d'un onduleur triphasé à référence interne.

b) tension de sortie pour commutation à 6 impulsions.

c) modulation de largeur d'impulsions.

### 3-3 Onduleurs à circuit HF intermédiaire :

On peut diminuer sensiblement ces pertes par l'utilisation d'un transformateur à haute fréquence (figure 4.10). On construit d'abord un onduleur à haute fréquence (de l'ordre de 10 à 100 kHz), qui génère des impulsions de largeur modulée. On introduit ensuite un transformateur HF, bien plus petit et de meilleures performances. La sortie de ce transformateur, redressée et filtrée, fournit deux demi-sinusoïdes de même signe, qu'il convient encore d'alternner à travers un pont de quatre thyristors.

Cette configuration est adoptée dans la plupart des onduleurs actuels, dans la gamme de quelques kW.

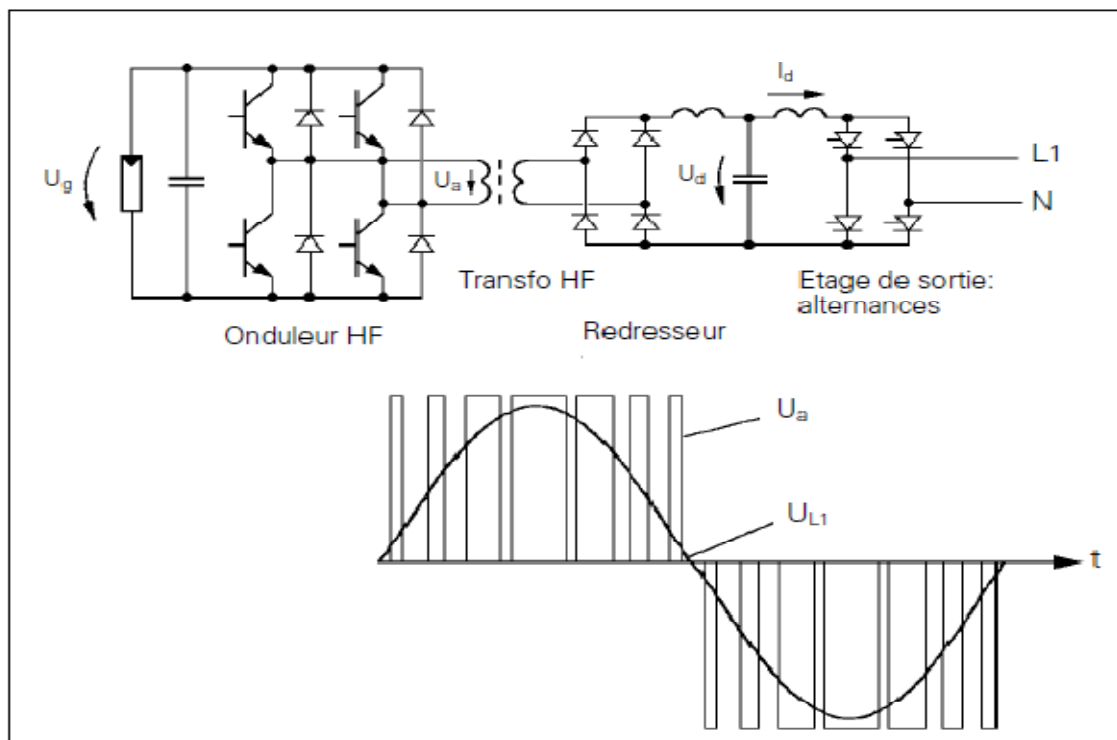


Figure 4.10: Principe d'un onduleur avec modulation de largeur d'impulsion à haute fréquence, et isolation galvanique par transformateur HF.

### 3-4 Onduleurs à synthèse de tension :

Dans ce concept original, le champ de capteurs doit être fragmenté en divers sous-champs fournissant des tensions étagées en puissances de deux demi-sinusoïdes (figure 4.11). La demi-sinusoïde est construite par additions binaires de ces tensions, selon le principe d'un convertisseur D/A. Chaque sous-champ est commuté individuellement à l'instant adéquat par un transistor, et stocke son énergie dans un condensateur entre deux contributions. Un étage

de sortie doit également alterner les demi-sinusoïdes produites, mais il n'y a pas besoin de transformateur et le rendement peut donc être excellent, même à charge partielle.

Ce principe très simple a été proposé en Allemagne depuis plusieurs années. Malheureusement, tous les éléments du champ ne peuvent pas fonctionner simultanément à leur point de puissance maximum.

De plus, il nécessite un câblage complexe, et l'adaptation du nombre de panneaux dans chaque sous-champ ne peut pas toujours être optimisée. Et en cas d'ombrage partiel, la forme de la sinusoïde peut être fortement perturbée. C'est pourquoi aucun appareil de ce type n'est actuellement commercialisé.

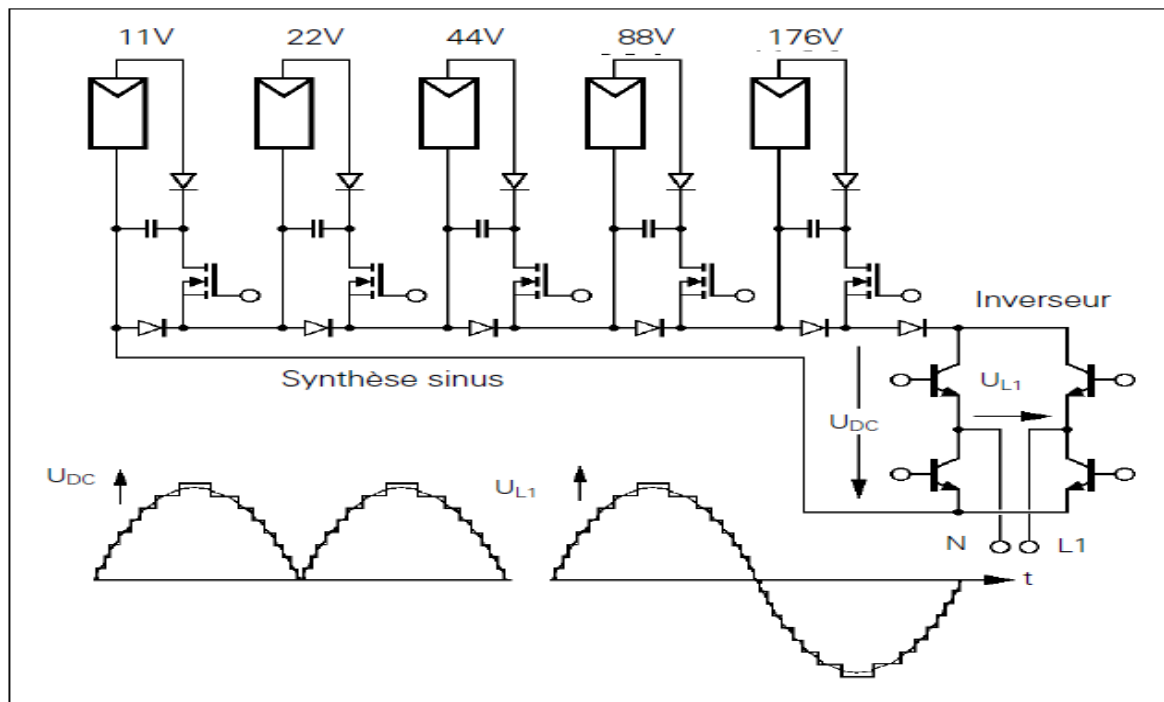


Figure 4.11: Principe d'un onduleur à synthèse de tension.

### 3-5 Onduleurs distribués :

Récemment est apparu sur le marché un nouveau concept de connexion au réseau, parfois appelé le «panneau AC». Il s'agit d'un onduleur miniaturisé, d'une puissance de l'ordre de 100 W, monté directement sur le panneau PV.

Cette conception présente de nombreux avantages:

- le système de connexion est extrêmement simplifié, puisque tous les panneaux sont reliés en parallèle grâce à un seul câble 220V AC;

- on élimine ainsi les éléments délicats du câblage du champ : diodes de protection, boîte de connexion, ainsi que les problèmes liés aux courants continus (commutateurs DC, corrosion des contacts) ;
- les opérations de montage sont sans danger électrique, car ces appareils nécessitent la présence du réseau pour fonctionner ;
- les pertes de désadaptation des panneaux PV sont éliminées ; plus encore, les panneaux sont complètement indépendants les uns des autres, ils peuvent être montés dans différentes orientations sans inconvénient;
- de même, les problèmes d'ombrages partiels ne se posent plus que pour chaque panneau individuel;
- certains modèles sont équipés d'un transmetteur sériel d'informations, permettant de surveiller d'un seul coup le bon fonctionnement de tous les modules (onduleurs + panneaux) grâce à un ordinateur;

Dans les inconvénients restent à résoudre, la protection contre la foudre, la mise à la terre, les problèmes d'échauffement, etc.

### **3-6 Régulation et recherche du MPP :**

Dans tous les appareils à PWM décrits ci-dessus, la commande de largeur des impulsions doit assurer les deux fonctions suivantes :

- la génération des demi-sinusoïdes qui seront ensuite alternées par l'étage de sortie ;
- l'adaptation de l'impédance d'entrée du convertisseur de manière à suivre, à tout instant, le point de puissance maximum du champ.

Cette régulation est habituellement gérée en temps réel par un microprocesseur.

Si elles ne sont pas «lues» directement sur le réseau (auquel cas l'onduleur suivra le comportement du réseau, par exemple dans le SI3000), les valeurs de référence pour la sinusoïde sont stockées dans une EPROM, et restituées en phase grâce à un PLL (ex. le SOLCON).

La recherche du point de puissance maximum s'exécute par approximations successives: à partir de la tension à vide, l'onduleur «prélève» sur le condensateur (dont le rôle est de stocker l'énergie du champ durant une demi-période), la quantité d'énergie correspondant au maintien d'une tension donnée, et calcule la puissance moyenne obtenue durant un pas de temps donné. Pour le pas suivant, elle compare la puissance du dernier pas avec l'avant dernier, et incrémente ou décrémente son prélèvement selon que l'énergie a

augmenté ou diminué. La recherche du MPP implique donc une perpétuelle oscillation autour de la valeur optimale réelle.

Sa constante de temps peut être de quelques secondes ou dizaines de secondes, et la précision est en général de l'ordre du pour-cent.

### **3-7 Interconnexion de plusieurs onduleurs :**

Pour des puissances supérieures à 10 kW, les onduleurs sont parfois modulaires: une seule unité de commande gère plusieurs modules de puissance.

D'autre part, pour améliorer le rendement à basse puissance, certains appareils peuvent fonctionner en «maître-esclave»: quand le premier onduleur atteint sa puissance maximale, il enclenche automatiquement la mise en parallèle du second.

## **4- Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV : [16]**

La filière photovoltaïque, dont le développement est soutenu par les pouvoirs publics (lutte contre le changement climatique, augmentation de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique, soutien de la filière industrielle, ...) possède des caractéristiques spécifiques :

- La puissance de production des installations varie de quelques kW à plusieurs MW.
- Le nombre de producteurs peut devenir à terme très important,
- La plupart des raccordements sont réalisés sur la partie basse-tension du réseau public de distribution
- Les installations comportent des convertisseurs statiques (pas de machines tournantes)
- Les équipements (onduleurs et modules) disponibles sur le marché sont variés,
- La production d'énergie est naturellement intermittente,

### **4-1 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution :**

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulaient de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts importants sur son

fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes :

#### **4-1-1 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.

#### **4-1-2 Influence sur le plan de protection :**

La contribution des systèmes PV au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection.

Mais la sélectivité et la sensibilité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquer le déclenchement intempestif du départ sain ou l'aveuglement de la protection du départ en défaut.

#### **4-1-3 Influence sur la qualité de l'énergie :**

##### **4-1-3-1 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.

##### **4-1-3-2 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.

#### **4-1-3-3 Déséquilibre entre phases :**

L'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT. Ce phénomène a été mis en évidence dans plusieurs études.

Donc, toutes les influences citées ci-dessus nuisent gravement à la qualité de service fournie.

##### **4-1-1 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.

#### **4-2 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 :

##### **4-2-1 Régime de neutre et courants de fuite :**

Le régime de neutre utilisé en basse tension est de type TT. Avec ce régime de neutre, la protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différentiels qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant. Les installations PV peuvent produire des courants de fuite du fait des caractéristiques capacitatives des panneaux, et des onduleurs (capacités des filtres EMC).

Ces capacités en présence d'une composante alternative sur le circuit à courant continu engendrent des courants de fuite dans la liaison de mise à la terre. Ces courants de fuite

peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre. De plus, ils peuvent provoquer le déclenchement intempestif des disjoncteurs différentiels.

#### **4-2-2 Niveau de tension du réseau :**

Le niveau initial (hors PV) de tension du réseau est un paramètre clé vis-à-vis du dimensionnement et du fonctionnement des installations PV et les types de protection de découplage.

#### **4-2-3 Creux de tension et tenue des systèmes PV :**

Les creux de tension sont considérés comme les plus graves perturbations de la qualité de service en raison de leurs effets sur les processus sensibles. Il s'agit d'une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau électrique, à une valeur comprise entre 10% et 90% suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps allant de 10ms à quelques secondes.

#### **4-2-4 Présence de composante continue et d'harmoniques de tension :**

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent le courant continu issu des modules photovoltaïques en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour "Pulse Width Modulation") pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal. Le fonctionnement des onduleurs sans transformateur peut être affecté par une asymétrie des tensions du réseau (déformation de la sinusoïde par addition d'harmoniques paires), par exemple en présence d'harmoniques issues de charges non-linéaires, qui se traduirait par l'ajout d'une composante DC dans la tension injectée par l'onduleur.

#### **4-2-5 Inter harmoniques :**

Les inter-harmoniques (fréquences qui ne sont pas un multiple entier de la fréquence du réseau) sont produits par des variations rapides des charges, ou la saturation des transformateurs.

### 4-3 Comportement des systèmes photovoltaïques face au creux de tension

Les installations PV raccordées aux réseaux de distribution peuvent causer les interactions, les impacts et les effets sur le réseau public de distribution.

D'autre part, les caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution ainsi que les perturbations causées par les défauts sont l'origine de fonctionnements incorrects et de déconnexions intempestives des systèmes PV. C'est pourquoi, plusieurs études sont effectuées dans les différents laboratoires pour bien analyser ces impacts et proposer des solutions efficaces, susceptibles d'améliorer leur raccordement au réseau.

Dans un réseau électrique, la tension peut varier temporairement sous l'effet des fluctuations de charge ou d'un court-circuit. Une augmentation brutale de la charge ou un court circuit provoque un creux de tension dont la profondeur et la durée varient en fonction des caractéristiques du réseau et des groupes de production concernés. Actuellement, le comportement des systèmes PV face aux creux de tension et la tenue des systèmes PV aux perturbations sous condition de défaut ont attirés plusieurs études dans le monde.

Ces études montrent une grande sensibilité des onduleurs PV face au creux de tension, entraînant leurs déconnexions qui peut être intempestive. Pourtant, ces études n'ont pas systématiquement pris en compte tous les facteurs influençant le comportement d'un système PV. En effet, l'analyse du comportement des systèmes PV raccordés au réseau de distribution face au creux de tension causé par un court-circuit est très compliquée car elle dépend :

- de la topologie de l'onduleur associée à son système de contrôle/commande (ex : PLL, courant limite de son système de contrôle) ;
- des types et de la position des défauts (triphase à la terre, triphase au neutre, biphasé à la terre, biphasé au neutre, monophasé à la terre, monophasé neutre);
- de la topologie du réseau (BT/HTA urbain ou rural), des systèmes de protection (les fusibles ou disjoncteurs, avec ou sans système de ré-enclenchement) ;
- des systèmes de protection de découplage ;

## 5- 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.

Type	Fabricant	Vendeur	Technologie	Puissance AC	Transfo	Effic. max.	Tension d'entrée	Affich. mesures	Liaison PC
<b>Onduleurs monophasés</b>									
ECOVERTER 1000	Victron (Hollande)	Total-Energie	PWM + IGBT	1 kVA	HF	93 %	50 - 90 V	Non	Non
POLYCON 2200 S, 3300 S	Studer (CH)	Studer (fin 94)	IGBT et MOSFET	2.2 kVA 3.3 kVA	Sans	97 %	100 - 750 V !	Oui	RS232
PV WR 1800	SMA (D)	Holinger, FlachGlas	Thyristors+ IGBT	1.8 kVA	HF	89 %	80 - 130 V	Oui	PV-DATA
SI-3000	Photoelectric Inc., (USA)	Fabrimex	MOSFET, IGBT	3 kVA	HF	91 %	40 - 60 V 48 V nom.	Oui	Non
Siemens 1.5 kW	Siemens (D)	Fabrimex		1.5 kVA	BF	89 %	90 V nom.		
SOLARMAX S	Sputnik Eng. (CH)	Tritec	PWM, IGBT	3.3 kVA	HF	95 %	400 - 750 V	Oui	RS232, Modem, soft
SOLCON 3300/3400 HE	Hardmeier (CH)	Hardmeier	PWM+ MOSFET	3.3 kVA 3.4 kVA	HF	92 % 91,3%	80 - 120 V 70 - 140 V	Oui	RS232, SOLTALK
Sunking 5000	SMA	Holinger	PWM, IGBT	5.0 kVA	HF	93 %	240 - 400 V	Oui	RS232, Modem, soft
TOPCLASS 2500 Grid II 4000 Grid II	ASP-(CH,D)	Fabrimex, Flachglas	PWM+ MOSFET	2.2 kVA 3.3 kVA	BF	93% 94,3%	48 - 100 V 72 - 145 V 72 - 145 V	Oui	RS232
<b>Onduleurs triphasés</b>									
AEG - Telefunken	AEG - Telefunken			12 ... 150 kVA	BF	89-92 %	420 V		
ECOPOWER	Invertomatic (CH)	Invertomatic	PWM + IGBT	15 kVA .. 100 kVA	BF (option)	95 %	± 380 V nom 1000 V max	Oui	Oui, Modem Surv. fabricant
POLYCON 10000 S ... 60000 S	Studer (CH)	Studer	PWM, IGBT et/ou MOSFET	10.. 60 kVA	Sans	97 %	100 - 750 V !	Oui	RS232
Siemens	Siemens (D)	Fabrimex		3 - 5 kVA 10-100 K	BF BF	88 % > 90 %	192 V nom. 400 V nom.		
SMA	SMA (D)	Holinger		10 ... 200 kVA	BF	> 90 %	300 V nom		RS232, Modem, soft
SOLARMAX 20	Sputnik Eng. (CH)	Tritec	PWM + IGBT	12 kVA à 100 kVA	HF	93 %	450 - 800 V 550 V nom.	Oui	RS232, Modem

Tableau 4.1: liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché. [15]

Le (tableau 4.1) 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.

### 5-1 Isolation galvanique :

#### i- Les structures non isolées (sans transformateur)

L'intérêt principal de l'élimination du transformateur est la simplification du circuit (le transformateur est un élément cher et encombrant), et l'amélioration du rendement (quelques %). Néanmoins quelques problèmes de sécurité sont causés par les capacités parasites entre les panneaux PV et la terre.

#### ii- Les structures isolées

On trouve deux catégories :

- **Isolées en haute fréquence :**

Le transformateur à hautes fréquences ( $> 1$  kHz) est situé au niveau de l'étage de conversion DC/DC.

Cette isolation HF présente l'avantage de diminuer la taille et le poids du transformateur et des éléments de filtrage. En contrepartie, elle demande une meilleure maîtrise des pertes dans le convertisseur.

- **Isolées en basse fréquence :**

Le transformateur à basse fréquence (à la fréquence du réseau) est situé sur la sortie alternative DC/AC. Cette structure est très simple mais pas moins pénalisante on comparant le prix, le volume et la taille du transformateur BF à celui HF.

Les structures isolées permettent d'obtenir des rapports d'élévation plus élevés que les structures non isolées. C'est pour cela qu'on les retrouve dans les chaînes de conversion nécessitant une forte élévation de tension. De plus, l'isolation galvanique permet d'éliminer certains rang d'harmonique, et résoudre quelques problèmes de sécurité.

Enfin en cas de panne de l'onduleur, la tension du réseau ne risque pas de se retrouver sur le champ photovoltaïque. Inversement, aucun risque d'introduire des tensions continues dans le réseau.

### 5-2 Nombre d'étages de conversion :

- **Conversion mono étage**

La conversion se fait en une seule étape, il n'y a pas d'étage d'amplification de la tension. Il faut donc que la tension du champ PV soit suffisante pour que l'onduleur puisse reconstituer la tension du réseau.

- **Conversion deux étages**

La conversion se fait en deux étapes, la première conversion DC/DC puis la seconde DC/AC. Dans cette configuration, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse fabriquer un courant sinusoïdal à la tension du réseau.

### 5-3 Nombre de phases

Un système photovoltaïque monophasé présente une puissance fluctuante (100 Hz) en sortie alors que l'entrée est une source continue constante. Un élément de stockage de puissance est donc nécessaire pour faire le tampon entre l'entrée et la sortie, ce qui réduit la durée de vie et la fiabilité de l'ensemble du système.

Afin de résoudre ce problème, on opte à connecter le système photovoltaïque en triphasé. Car il demande une puissance instantanée en entrée constante, il n'est plus nécessaire alors d'avoir des éléments de stockage, ce qui réduit le coût et augmente la fiabilité et la durée de vie de l'installation.

## 6- Dimensionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau de 1 MW :

### 6-1 Type du module photovoltaïque utilisé :

On a choisi un module CONDOR poly cristallin 72 cellules de 285w<sub>c</sub>.

- **Caractéristiques électriques :**

	Unité	Module		
Puissance nominale	W	275	280	285
Voltage Circuit ouvert (V <sub>co</sub> )	V	44	44.6	44.6
Courant de court Circuit I <sub>sc</sub>	A	8.3	8.4	8.55
Tension mpp V <sub>mpp</sub>	V	35.5	36	36
Courant mpp I <sub>mpp</sub>	I	7.75	7.78	7.92
Système voltage max VDC	V	1000		
Charge maximale De fusibles (A)	A	15		
Facteur de température (cellule):				
Température nominale de fonctionnement	NOCT	45±2°C		
Coefficient de température de puissance	%/°C	-0,37		
Coefficient de température de courant	%/°C	+0,04		
Coefficient de température de voltage	%/°C	-0,33		

Figure 4.12 : caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque poly cristallin de marque condor. [17]

- **Caractéristiques mécanique :**

Type de cellule	Cellule polycristalline avec anti-reflection
Nombre de cellules par module	72cellules (6x12)
Dimensions de la cellule	156x156 mm
Dimensions du module	1956x992x50 mm
Poids du module	21 kg
Cadre	Alliage en aluminium anodisé
Type de verre	Verre trempé, 3.2 mm d'épaisseur
Boite de jonction et connecteur	3 Diodes By-passe et câbles compatibles avec un connecteur MC4
Température d'utilisation	- 40°C à 85°C

Figure 4.13 : caractéristiques mécaniques d'un module photovoltaïque poly cristallin de condor. [17]

### 6-2 Type d'onduleur utilisé :

Le choix des onduleurs s'est porté sur le type suivant : SMA Sunny Central, de puissance 250kW.

- **Caractéristiques de l'onduleur :**

Caractéristiques techniques	
<b>Entrée DC</b>	
Puissance PV nominale, DC	262 kW
Puissance PV maximale	290 kW <sub>c</sub>
Tension d'entrée MPP max. admissible	820 V
Tension d'entrée MPP nom. admissible	500 V
Tension d'entrée MPP min. à P <sub>Nom</sub>	450 V
Courant d'entrée PV max. admissible	591 A
Courant nominal, I <sub>MPP</sub>	7.71 A
Tension de circuit ouvert, V <sub>co</sub>	40.9 V
<b>Sortie AC</b>	
Puissance nominale, AC	250 kW
Tension nominale, AC	400 V, 3 pha.
Puissance maximale, AC	250 kW
Fréquence du réseau, AC (plage)	50 Hz
Courant de sortie nominal	361 A
Courant de sortie max.	361 A
Cos φ à 20% de charge	0.99
Rendement max.	96.1%+Trans
Rendement selon normes européennes	95.3%
Température	-10°C-+45°C

Figure 4.14 : fiche technique de l'onduleur SMA Sunny Central (250kw). [18]

### 6-3 Calcul du nombre de modules:

Pour cet exemple de dimensionnement, nous nous sommes inspirés des techniques de calcul utilisées par l'Institut Bruxellois pour la Gestion de L'Environnement. [19]

- **Nombre de module total :**

$$N_T = \frac{P_c}{P_m}$$

$$N_T = \frac{1000000}{285} = 3509 \text{ modules}$$

- **Nombre de module en série:**

La plage de tensions d'entrée admissibles pour l'onduleur détermine le nombre de panneaux à connecter en série.

$$N_{\text{Série}} = \frac{\text{Tension d'entrée MPP}_{\min} \text{ à } P_{\text{Nom}}}{\text{Tension mpp du module}}$$

$$N_{\text{Série}} = \frac{450}{36} = 12.5 \text{ et donc } 13 \text{ panneau en série}$$

- **Nombre de string**

$$N_{\text{String}} = \frac{N_T}{N_{\text{série}}}$$

$$N_{\text{String}} = \frac{3509}{13} = 269.9 \text{ et donc } 270 \text{ strings}$$

Dans notre cas on a un onduleur string, donc le nombre de module dans chaque string est le même.

Le nombre de module total est :  $N_{\text{String}} \times N_{\text{série}} = 270 \times 13 = 3510$

On disposera de 3510 modules à utiliser pour 270 Strings qui sont reparti de manière a ce que chaque string comporte 13 modules.

#### 6-4 La compatibilité onduleur / string:

Elle consiste à vérifier que :

La puissance nominale de l'onduleur est comprise entre 80% et 110% de la puissance crête.

Les tensions générées doivent être dans les limites acceptables de l'onduleur :

- La tension maximale, c'est à dire à 1000 W/m<sup>2</sup>, pente 35°, à vide et à froid (-10°), doit être inférieure à la tension DC maximale admissible. C'est la tension de sécurité : au-delà de cette tension maximale, l'onduleur va disjoncter, l'installation sera en panne.
- La tension minimale, c'est à dire à 1000 W/m<sup>2</sup>, pente 35°, en charge et à chaud (70°), doit être supérieure à la tension MPP minimale admissible. C'est la tension d'accrochage: sous cette tension minimale, l'onduleur va décrocher, l'installation ne produira plus.

Le courant maximal doit être inférieur au courant admissible de l'onduleur.

Le dimensionnement des onduleurs d'une installation PV est souvent source de confusion car il faut distinguer les puissances AC et DC. Du côté DC il faut distinguer la puissance crête de l'installation et sa puissance réelle (instantanée) en cours de fonctionnement.

Enfin, il faut prendre garde à la tension des strings connecté à l'onduleur.

En effet, les strings composés par des modules placés en série développent une caractéristique courant/tension (courbe I -V).

La tension dans chaque string est égale à la tension d'un module multipliée par le nombre de modules. Le courant de chaque string est égal au courant d'un module. (Connexion en série: les tensions s'additionnent à courant égal).

La production est proportionnelle à l'éclairement, et inversement proportionnelle à la température. Pour la plupart des onduleurs, les strings doivent être égaux: ils comportent le même nombre de modules de même type, positionnés dans les mêmes conditions (orientation, inclinaison, ombrage). Pour certain onduleur multi string, ces conditions ne sont pas nécessaires. Ils sont donc particulièrement adaptés à des installations avec différentes inclinaisons et orientation.

**Tension maximale à -10 °C :**  $U_{\max} = M \times (V_{OC} + \mu V_{OC} \times 35)$

**Tension minimale à +70 °C :**  $U_{\min} = M \times (V_{MPP} + \mu V_{OC} \times 45)$

**M :** nombre de modules d'un string

**$V_{OC}$  :** tension du circuit ouvert d'un module ( $T=25^{\circ}C$ )

**$\mu V_{co}$  :** coefficient de température.

**$V_{MPP}$  :** tension en charge, au Point de Puissance Maximale.

- **Vérification de la tension maximale admise par l'onduleur:**

Un onduleur est caractérisé par une tension d'entrée maximale admissible  $V_{\max}$ . Si la tension délivrée par les modules est supérieure à  $V_{\max}$ , l'onduleur sera irrémédiablement détruit. Le dépassement de la valeur  $V_{\max}$  pour la tension d'entrée est, par ailleurs, la seule cause d'endommagement définitif de l'onduleur.

La valeur de  $V_{\max}$  apparaît sur la fiche technique de l'onduleur. Par exemple, sur la fiche technique de l'onduleur SMA Sunny Central (figure 4.13), la tension d'entrée maximale admissible indiquée est  $V_{\max} = 820 \text{ V}$ .

$$U_{\max} = 13 \times (44.6 + ((-0.33) \times 35)) = 429.65 \text{ V}$$

On a  $U_{\max} = 429.65 \text{ V}$ , elle est inférieure à la tension maximale admise par l'onduleur  $V_{\max} = 820 \text{ V}$  ce qui implique que notre onduleur sera protégé.

- **Vérification de la tension minimale admise par l'onduleur :**

L'onduleur doit à tout moment demander aux modules leur maximum de puissance. Pour cela, il déplace le point de fonctionnement du groupe photovoltaïque.

La recherche du point de puissance maximum est réalisée par un système intégré en amont de l'onduleur, nommé MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Cependant, le système MPPT ne fonctionne que pour une plage de tension d'entrée d'onduleur définie par le fabricant, et indiquée sur la fiche technique de l'onduleur. Lorsque la tension d'entrée de l'onduleur côté DC est inférieure à la tension minimale MPPT, l'onduleur continue de fonctionner mais fournit au réseau la puissance correspondante à la tension minimale MPPT.

Il faut donc s'assurer que la tension délivrée par le groupe photovoltaïque est comprise dans la plage de tension MPPT de l'onduleur auquel il est connecté. Si ce n'est pas le cas, il n'y aura aucun dommage à l'onduleur, mais seulement une perte de puissance.

$$U_{MPP} = 13 \times (36 - ((-0.33) \times 45)) = 661.05 \text{ V} > 450 \text{ V}$$

$U_{MPP}$  est supérieure la tension minimale admise par l'onduleur (450V), donc on n'aura pas une perte de tension dans notre installation.

- **Vérification du courant maximal admis par l'onduleur:**

On utilisera neuf onduleurs, donc chaque trente string seront branchés en parallèle à un onduleur.

$$I_{MPP}=30 \times 8.55 = 256.5 \text{ A}$$

Le courant qui circule dans un module est identique à celui dans un string (les module dans un string sont branchés en série).

$I_{mpp}$  est inférieur au courant maximal admis par l'onduleur SMA Sunny Central.

Les tensions générées sont dans les limites acceptables de l'onduleur, et le courant maximal est inférieur au courant admissible de l'onduleur, l'onduleur choisi est donc compatible avec les strings de notre installation.

## Conclusion

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.

Comme perspective, nous aimerons que notre travail soit enrichi par plus de recherche et un dimensionnement plus approfondi (dimensionnement du câblage, estimation de la superficie nécessaire pour accueillir cette installation photovoltaïque), et une simulation par un logiciel qualifié, pour mettre en pratique cette installation photovoltaïque.

## Références bibliographiques

- [1] : M. PETIBON Stéphane. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 2009.
- [2] : Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, Guide des Énergies Renouvelables, Édition 2007.
- [3] : M. BOUKLI-HACENE Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique. Mémoire de magister. Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, 2011.
- [4] : M. DJERIOU Salim. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. Mémoire de magister. Université FARHAT ABBAS de Sétif, 2011.
- [5] : M. Jean-François REYNAUD. Recherches d'optimums d'énergie pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de TOULOUSE, 2011.
- [6] : MODULE ELECTRICITE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE M 41.1, Edition 2009.
- [7] : M. BENSEDDIK Othmane. Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Mémoire de Master. Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2012.
- [8] : M .ABBASEN Lyes. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de magistère. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.
- [9] : M.ZELLAGUI Mohamed. Etude des protections des réseaux électriques MT. Mémoire de magister. UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.
- [10] : Melle. KHADRAOUI Fahima. La place de l'Algérie sur le marché euro-méditerranéen de l'électricité : Bilan et perspectives. Mémoire de Magister. Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, 2014.
- [11] : Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, les réseaux électriques nationaux, 2013.
- [12] : Ministère de l'Énergie et des Mines Algérie, 2011.

- [13] : YANN RIFFONNEAU. Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau. Université Joseph Fourier, 2009.
- [14] : HESPUL. Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement Etat de l'Art et Etude des Performances, 2007.
- [15] : PACER. Centrale photovoltaïque, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, 1996.
- [16] : M .Thi Minh Chau LE. Couplage onduleur photovoltaïque et réseau, aspects contrôle/ commande et rejet de perturbations.
- [17] : CONDOR électronique. Catalogue des kits solaires, 2014.
- [18] : K. Kadda, Touati-Bergheul , M. Boudour , A. Hadj Arab et A. Malek. Etude de faisabilité de l'insertion d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau de distribution de Ghardaïa. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°2 (2014) 309 – 322.
- [19] : BRUXELLES ENVIRONNEMENT. Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, le photovoltaïque – module 5 –dimensionnement d'une installation PV, 2010.