

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE  
Département : ELECTROTECHNIQUE  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
Filière : ELECTROTECHNIQUE  
Spécialité : RESEAU ELECTRIQUE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Thème:

Effet de l'intégration des énergies solaire dans les réseaux MT

Présenté par : *Mansouri Hanane*  
*Founes Samira*

Encadrant : *Labar Hocine*

Prof

UBMA

### Jury de Soutenance :

Malouki Hamza	MCB	UBMA	Président
Labar Hocine	Prof	UBMA	Encadrant
Ben alia Nadia	MCA	UBMA	Examineur
Nom et prénom	Grade	Université	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

## **Remerciements**

**Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.**

**Nous remercions tout particulièrement Monsieur LABAR HOUSSINE, mon professeur encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son accompagnement rigoureux et bienveillant tout au long de ce travail. Son expertise et ses orientations précieuses m'ont permis de progresser et d'enrichir mes connaissances.**

**Je remercie également l'ensemble des enseignants et du personnel de [DEPARTEMENT ELECTROTECHNIAUE] pour la qualité de l'enseignement dispensé et leur soutien tout au long de mon parcours académique.**

**Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien moral constant, leur patience et leur encouragement, sans lesquels ce mémoire n'aurait pas vu le jour.**

## **Dédicace**

**À**

**Moi-même**

**Parce qu'elle a su résister, persévérer, et rêver en silence.**

**Parce qu'elle a avancé malgré la fatigue, et a souri face à l'adversité.**

**Ce succès est un bouquet de lumière que j'ai semé dans l'obscurité du  
doute,**

**Et qui aujourd'hui s'épanouit entre mes mains.**

**Mansouri Hanane**

## Dédicace

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu,  
Qui m'a offert la force et le courage,  
Pour porter à terme ce modeste ouvrage,  
Fruit d'efforts, de nuits et de vœux silencieux.  
Avec un immense plaisir et un cœur grand ouvert,  
Je dédie ce travail à ceux qui m'ont toujours porté :  
À ma mère Djawhara, douce étoile de mes jours,  
À mon père Hamdi, pilier de mes recours,  
À mon frère Abd Lhak, compagnon fidèle,  
Don't l'amour et les sacrifices sont mon miel.  
Leur tendresse, leur soutien et leurs prières constantes  
Ont nourri mes pas dans cette route ardente,  
Grâce à eux, j'ai su traverser vents et marées,  
Et surmonter les épreuves qui voulaient m'arrêter.  
À tous mes amis, sur Donia et Yasmine,  
Présents ou lointains, dans chaque aube et chaque spleen,  
Que ce travail soit l'écho de vos désirs ardents,  
Le fruit sacré de votre soutien si constant.

Samira Founes

---

## Table des matières

1.Introduction générale : .....	13
Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables .....	16
Introduction .....	16
1.2 Définition des énergies renouvelable .....	16
1.3 Les type des énergies renouvelables .....	16
1.3.1 Énergie hydraulique (hydroélectricité): .....	16
1.3.2 Énergie éolienne .....	18
1.3.3 Énergie biomasse .....	19
1.3.4 Énergie géothermique .....	19
1.3.5 Énergie marine .....	21
1.3.6 Énergie solaire .....	21
1.3.7 Potentiel solaire en Algérie .....	22
1.4 L'énergie solaire photovoltaïque : .....	23
1.4.1 Principe de fonctionnement.....	24
1.4.2 Composants du système photovoltaïque .....	24
1.4.3 Types de panneaux solaires photovoltaïques .....	25
1.5 Les caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques .....	26
1.5.1 Puissance nominale (Wc - Watt crête).....	26
1.5.2 Rendement (%).....	26
1.5.3. Courant et tension électriques .....	27
1.5.4 Point de puissance maximale (MPP) .....	27
1.5.5 Coefficient de température .....	27
1.5.6 Tolérance de puissance .....	27
1.5.7 Durée de vie et garantie .....	27
1.5.8 Facteurs environnementaux.....	27
1.5.9. Dimensions et poids.....	28
1.6 fiche technique du panneau solaire photovoltaïque .....	28
1.7 des Concepts Clés des Panneaux Photovoltaïque .....	28
1.8 Conclusion .....	29
Chapitre2 : réseau électrique moyenne tension.....	32
2.1. Introduction.....	32
2.2 Types de réseaux électriques .....	32

2.3. Le réseau moyenne tension.....	34
2.3.1 Réseaux MT aérien.....	34
2.3.2 Réseaux MT souterrains.....	34
2.3.3 Caractéristiques générales.....	34
2.3.4 Composants principaux.....	35
2.3.5 Paramètres des lignes moyenne tension.....	35
2.4 Modélisation Mathématique d'un Réseau Électrique Moyenne Tension .....	36
2.5 Topologies des réseaux électriques :.....	37
2.5.1 Réseau maillé : .....	37
2.5.2 Réseau bouclé :.....	37
2.5.3 Réseau radial : .....	37
2.6 Courant et tension : .....	38
2.7 Puissance : .....	39
2.8 Régime permanent et régime transitoire : .....	40
2.8.1 Transformateur de puissance.....	41
2.8.2 Transformateur de tension (TT) : .....	41
2.8.3. Transformateur de courant (TI).....	42
2.8.4. Disjoncteur à haute tension : .....	43
2.8.5. Le sectionneur : .....	44
2.8.6. Les isolateurs:.....	45
2.8.7. Jeux de barres : .....	45
2.9 Conclusion : .....	46
Chapire3 : Perturbation dues à l'intégration de source d 'énergie Photovoltaïque .....	48
3.1 Introduction.....	48
3.2. Définition de la qualité d'énergie électrique : .....	48
3.3 Fluctuations de la Puissance et de la Fréquence .....	49
3.3 Harmoniques et Distorsions de la Tension .....	49
3.4 Harmonique du courant :.....	50
3.5 Flicker (Scintillement).....	51
3.6 Perturbations dues à la connexion/déconnexion des Sources Photovoltaïques .....	51
3.7 Impédance de Réseau Variable.....	51
3.8 Perte de Synchronisation .....	52
3.9 Harmoniques et interharmoniques .....	52

3.10 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire.....	54
3.10.1 Taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distorsion THD) .....	56
3.10.2 Facteur de puissance: .....	58
3.10.3 Solutions traditionnelles :.....	60
3.10.4 Solutions modernes :.....	61
3.11 Normes .....	61
3.12 Simulation et résultats d'un system PV raccorde au réseau MT avec STATCOM et MPPT .....	62
3.13 Rôle du contrôleur MPPT et du STATCOM dans un système PV connecté au réseau	65
3.13.1. Rôle du contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) .....	65
3.13.2. Rôle du STATCOM (Static Synchronous Compensator).....	66
3.14 Modélisation d'un réseau :.....	66
3.12 Conclusion: .....	69

## Liste de figures

Figure 1.1: Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Figure 1.2 : énergie éolienne

Figure 1.3 : diagramme montrant l'énergie géothermique

Figure1.5 : modèle économique de l'autoconsommation photovoltaïques

Figure1.6 : schéma de principe d'un système PV connecte à une charge

Figure1.7 : Configuration des cellules photovoltaïques

Figure2.1 : structure générales de réseaux électriques

Figure2.2 : les différents niveaux de tension du système électrique

Figure2.3: schema unifilaire de un line MT

Figure2.4 : structure et constitution de topologie des réseaux électriques

Figure2.5 : transformateur de puissance

Figure2.6 : transformateur de tension

Figure2.7 : transformateur de courant

Figure2.8 : Disjoncteur haute tension

Figure2.8 : Le sectionneur

Figure2.9 : isolateurs de lignes

Figure2.10 : les jeux de barres

### Chapitre 3

Figure 3.1 : les harmonique du tension

Figure3.2 : les Harmonique du courant

Figure 3.4: les perturbation en tension

Figure3.5 : courant absorbe par une charge non linéaire

Figure 3.7 : a) Filtre passif résonnant

b) Filtre passif amorti

Figure3.8 : a) filtre actif parallèle

b) filtre actif série

Figure3.9 : model Simulink d'une centrale système Photovoltaïque connecté au réseau MT

Figure3.10 : Courbes de tension, Courant et puissance pour un système PV + STATCOM sur un réseau 33Kv Figure3.11 : model Simulink système PV connecte au charge

Figure3.12 : résultat puissance au sortie de charge

Figure3.13 : résultat tension au sortie de charge

Figure3.14 : résultat courant au sortie de charge

Figure 3.15: résultats tension, courant et puissance après l'intégration de source PV

Figure3.16 : résultats tension, courant et puissance après correction STATCOM

## **Liste de tableaux**

**Tableau 1.1 : fiche technique du panneau solaire photovoltaïque**

**Tableau 1.2 : des Concepts Clés des Panneaux Photovoltaïque**

**Tableau 2.1 Modélisation Mathématique d'un Réseau Électrique Moyenne Tension**

**Tableau3.1: caracteristiques de quelques generateurs d harmoniques**

---

## Résumé

Ce mémoire traite de l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans les réseaux de distribution moyenne tension (MT) et de son impact sur la qualité de l'énergie électrique. Le premier chapitre présente les principes fondamentaux de l'énergie solaire PV et son rôle dans le mix énergétique. Le second chapitre s'intéresse aux caractéristiques techniques des réseaux MT. Le dernier chapitre examine les perturbations engendrées par l'injection de puissance PV (variations de tension, harmoniques, facteur de puissance), à travers des simulations sous MATLAB/Simulink d'un système PV avec MPPT et STATCOM connecté à un réseau MT 33 kV. Les résultats obtenus confirment l'apport du STATCOM dans l'amélioration de la stabilité et de la qualité de l'énergie du réseau.

## **Abstract**

This thesis addresses the integration of photovoltaic (PV) systems into medium-voltage (MV) distribution networks and its impact on power quality. The first chapter presents the fundamental principles of solar PV energy and its role in the energy mix. The second chapter focuses on the technical characteristics of MV networks. The final chapter examines the disturbances caused by PV power injection (voltage variations, harmonics, power factor) through MATLAB/Simulink simulations of a PV system with MPPT and STATCOM connected to a 33 kV MV network. The results obtained confirm the contribution of STATCOM in improving the stability and power quality of the network.

## ملخص

تتناول هذه الرسالة دمج أنظمة الطاقة الكهروضوئية في شبكات توزيع الجهد المتوسط وأثره على جودة الطاقة. يعرض الفصل الأول المبادئ الأساسية للطاقة الشمسية الكهروضوئية ودورها في مزيج الطاقة. ويركز الفصل الثاني على الخصائص التقنية لشبكات الجهد المتوسط. أما الفصل الأخير فيتناول الاضطرابات الناتجة عن حقن الطاقة الكهروضوئية لنظام طاقة كهروضوئية مزود MATLAB/Simulink (تغيرات الجهد، التوافقيات، معامل القدرة) من خلال محاكاة في STATCOM متصل بشبكة جهد متوسط 33 كيلو فولت. وتؤكد النتائج مساهمة STATCOM و MPPT بتقنية تحسين استقرار الشبكة وجودة الطاقة فيها.

## **1.Introduction générale :**

Avec l'augmentation de la population mondiale et les avancées technologiques, la demande en énergie électrique n'a cessé de croître, entraînant ainsi un besoin constant de développer la production d'énergie. Une grande partie de cette énergie est encore produite à partir de ressources non renouvelables, telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium, c'est-à-dire les énergies fossiles. Ce mode de production présente plusieurs défis, notamment la nécessité de construire de nouvelles centrales électriques, engendrant des coûts élevés pour l'électricité produite, mais aussi des émissions considérables de gaz à effet de serre issues de la combustion de ces ressources. Cela contribue à la pollution de l'atmosphère, facteur majeur du réchauffement climatique. De plus, l'épuisement progressif de ces ressources, telles que le pétrole et le charbon, pose une menace supplémentaire pour la durabilité de ce modèle énergétique.

L'énergie nucléaire, quant à elle, suscite des préoccupations supplémentaires, notamment en ce qui concerne la gestion des déchets radioactifs, le démantèlement des anciennes centrales et les risques industriels qui y sont associés.

Au cours des dernières décennies, la communauté internationale a pris conscience des enjeux écologiques liés à ce modèle de développement. Parmi les problèmes mondiaux les plus préoccupants figure le réchauffement climatique, responsable de la fonte des glaces polaires, phénomène ayant des conséquences dramatiques pour la planète. Face à cette situation, la question se pose : comment trouver un équilibre entre la préservation des ressources fossiles et la protection de l'environnement pour les générations futures ? Une solution semble émerger : le recours aux énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables englobent plusieurs types de sources, telles que l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse, l'énergie solaire et l'énergie marémotrice. À l'exception de l'énergie géothermique, qui provient de la chaleur interne de la Terre, et de l'énergie marémotrice, qui résulte des forces gravitationnelles exercées par la Lune sur la Terre, toutes ces sources sont directement ou indirectement liées à l'énergie solaire. Elles sont donc considérées comme une source inépuisable tant que le Soleil continuera de briller. Ces énergies sont une alternative idéale aux ressources fossiles, car elles présentent un faible impact environnemental. On parle souvent d'énergies « vertes » ou « propres », car elles n'entraînent que peu de pollution et n'affectent pas l'atmosphère de manière significative.

L'exploitation des énergies renouvelables a conduit à des progrès considérables dans le domaine énergétique à l'échelle mondiale. Elles offrent de nombreux avantages, tels que la préservation de l'environnement, la prolongation de la durée de vie des réserves fossiles et la réduction de la pollution atmosphérique générée par les centrales thermiques classiques. Cependant, ces sources d'énergie présentent aussi des défis, notamment en ce qui concerne leur intégration dans les réseaux électriques existants.

Pour analyser les effets de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique, ce mémoire se propose d'étudier les performances des réseaux électriques face à la présence de ces nouvelles sources d'énergie. La structure du mémoire sera organisée comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des principales sources d'énergies renouvelables, en expliquant leurs principes, avantages et inconvénients. Spécifiquement l'énergie photovoltaïque. Nous y définirons la cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous explorerons les différents types de réseaux électriques avant de modéliser une ligne électrique.

Enfin, le troisième chapitre se concentrera sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Nous y présenterons les différentes configurations possibles pour relier un système PV au réseau, suivies de simulations sur un générateur photovoltaïque connecté au réseau et l'injection de ce générateur dans un réseau MT.

# Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables

## **Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables**

### **Introduction**

L'énergie électrique joue un rôle essentiel dans divers secteurs tels que le chauffage, l'éclairage, l'industrie, la construction et le transport. Cependant, l'utilisation prolongée des énergies fossiles (comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel et même l'énergie nucléaire) engendre des problèmes considérables, notamment l'émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>) et la pollution, contribuant ainsi au réchauffement climatique et à la dégradation de l'environnement.

Face à ces défis environnementaux, des solutions alternatives ont été envisagées, notamment les énergies renouvelables, qui gagnent en importance. Dans ce chapitre, nous explorerons les différentes sources d'énergies renouvelables, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs

### **1.2 Définition des énergies renouvelable**

Les énergies renouvelables sont des alternatives durables aux énergies fossiles elles désignent l'ensemble des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est suffisamment rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Elles comprennent notamment l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse et géothermique. Contrairement aux énergies fossiles, leur exploitation génère peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait un levier clé pour la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique."

### **1.3 Les type des énergies renouvelables**

#### ***1.3.1 Énergie hydraulique (hydroélectricité):***

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue,

La force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité.

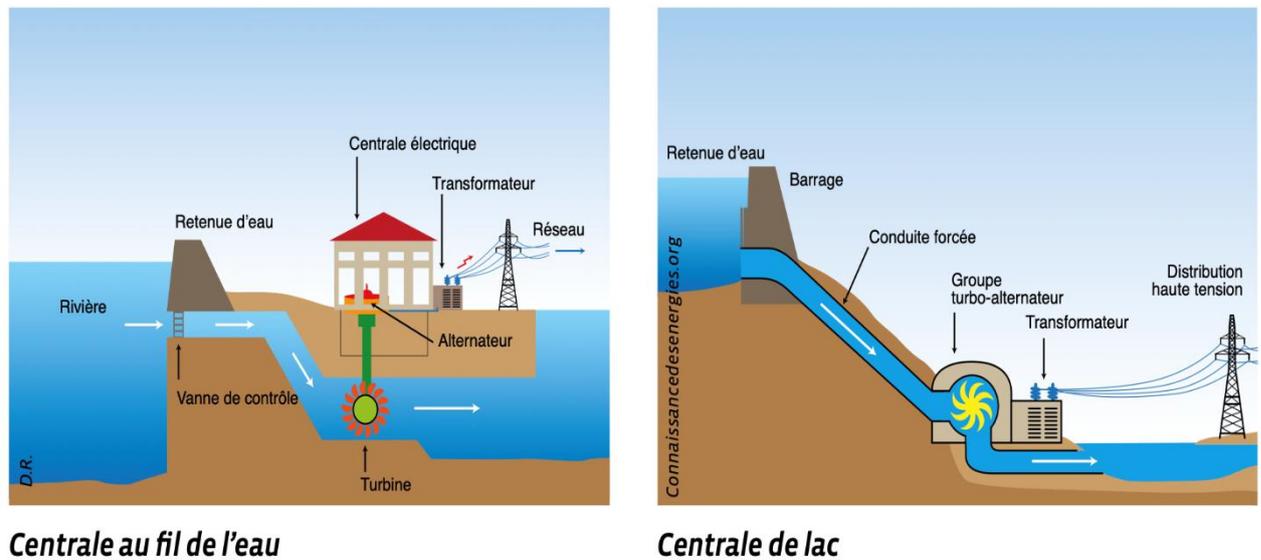


Figure 1.1: Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

On distingue plusieurs types d'énergie hydraulique :

- **Les barrages hydroélectriques** : ils stockent de l'eau dans des réservoirs et la libèrent à travers des turbines pour produire de l'électricité.
- **Les centrales au fil de l'eau** : elles exploitent directement le débit naturel des rivières sans stockage.
- **L'énergie marémotrice** : elle utilise la force des marées montantes et descendantes pour actionner des turbines.
- **L'énergie houlomotrice** : elle capte l'énergie des vagues pour générer de l'électricité.

### Avantages :

- Source d'énergie stable et prévisible.
- Faibles émissions de CO<sub>2</sub>.
- Longévité des infrastructures.

### Inconvénients :

- Impact écologique (modification des écosystèmes, déplacement de populations).
- Coût élevé de construction des barrages.
- Dépendance aux précipitations.

### 1.3.2 Énergie éolienne

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



**Figure 1.2** : énergie éolienne

Il existe deux types principaux d'éoliennes :

- **Éoliennes terrestres** : installées sur la terre ferme, souvent dans des zones venteuses comme les plaines et les côtes.
- **Éoliennes offshore** : situées en mer, elles bénéficient de vents plus réguliers et puissants, ce qui améliore leur rendement.

Bien que l'énergie éolienne soit propre et renouvelable, elle est intermittente car elle dépend des conditions météorologiques

**Avantages :**

- Pas d'émission de gaz à effet de serre.
- Ressource inépuisable.
- Coût d'exploitation faible après installation.

## *Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables*

### **Inconvénients :**

- Production intermittente (dépend du vent).
- Pollution visuelle et sonore.
- Impact sur la faune (oiseaux et chauves-souris).

### **1.3.3 Énergie biomasse**

L'énergie biomasse repose sur l'exploitation de matières organiques d'origine végétale ou animale. Elle peut être utilisée de plusieurs manières :

- **Combustion directe** : le bois et d'autres déchets organiques sont brûlés pour produire de la chaleur et de l'électricité.
- **Méthanisation** : les déchets organiques (déjections animales, résidus agricoles, bio déchets) sont décomposés par des bactéries en absence d'oxygène, produisant ainsi du biogaz qui peut être utilisé comme source d'énergie.
- **Biocarburants** : des cultures comme le colza, la canne à sucre ou le maïs sont transformées en biodiesel ou bioéthanol pour remplacer les carburants fossiles.

La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa gestion est durable, mais son exploitation excessive peut entraîner la déforestation et une compétition avec l'agriculture alimentaire.

### **Avantages :**

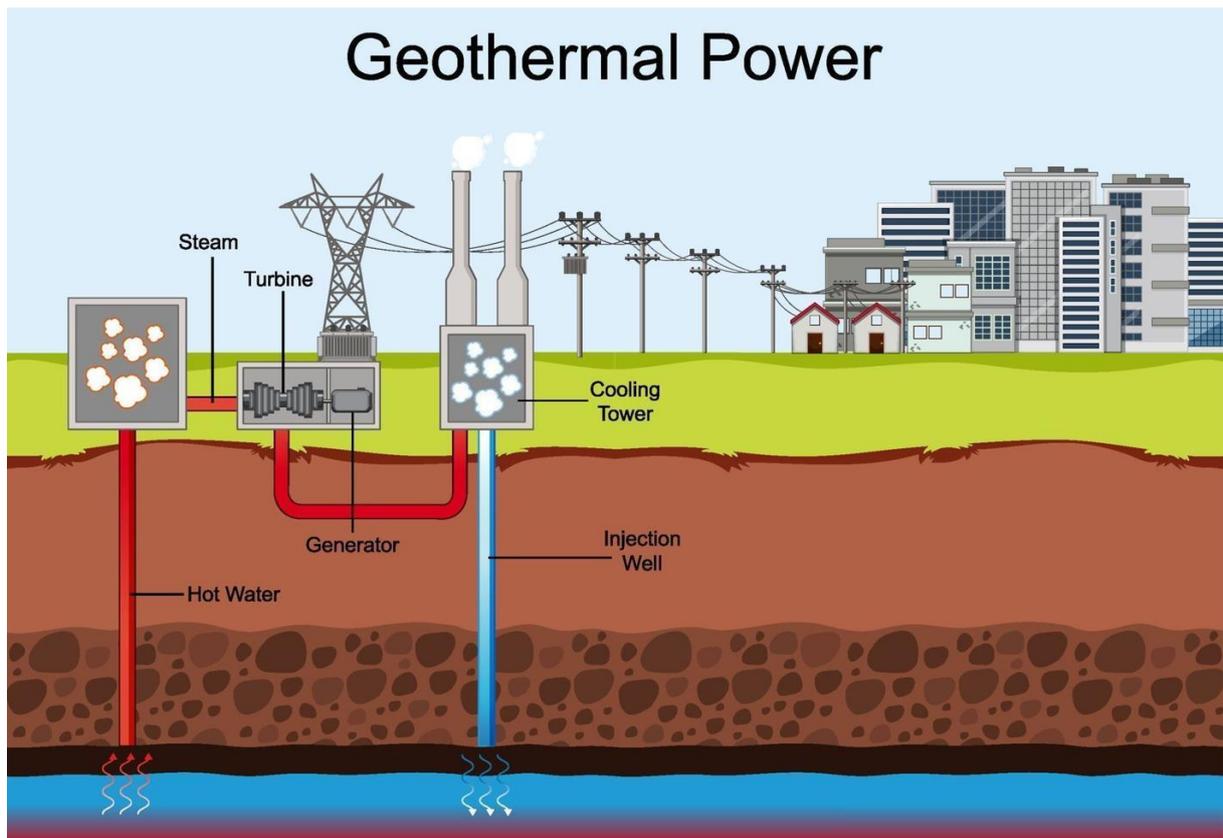
- Valorisation des déchets organiques.
- Source d'énergie renouvelable et locale.
- Réduction des déchets.

### **Inconvénients :**

- Émission de CO<sub>2</sub> et de particules fines.
- Déforestation possible si non gérée durablement.
- Rendement énergétique parfois faible.

### **1.3.4 Énergie géothermique**

L'énergie géothermique exploite la chaleur naturelle contenue dans le sous-sol terrestre. Cette chaleur provient principalement de la désintégration radioactive des éléments contenus dans la croûte terrestre. L'énergie géothermique est une source stable et non intermittente, mais son exploitation nécessite un emplacement géologique adapté.



**Figure 1.3** : diagramme montrant l'énergie géothermique

Les niveaux d'exploitation :

- **La géothermie basse température (moins de 100°C)** : utilisée pour le chauffage de bâtiments via des pompes à chaleur géothermiques.
- **La géothermie haute température (100°C à 200°C et plus)** : utilisée pour produire de l'électricité grâce à la vapeur issue des réservoirs souterrains. Cette vapeur actionne une turbine qui entraîne un générateur électrique.
- **La géothermie profonde** : elle consiste à forer jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur pour exploiter des gisements de vapeur ou d'eau chaude sous pression.

**Avantages :**

- Énergie stable et continue.
- Très faible émission de CO<sub>2</sub>.
- Peu d'impact visuel.

**Inconvénients :**

- Coût élevé d'installation.
- Localisation limitée (zones géothermiques spécifiques).
- Risque de tremblements de terre mineurs.

## *Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables*

### **1.3.5 Énergie marine**

L'énergie marine, ou des mers, est dérivée du milieu océanique. Elle se présente sous différentes formes : l'énergie marémotrice, qui provient du mouvement de l'eau généré par les marées, l'énergie des vagues, qui exploite la force des vagues, et l'énergie des courants de marée, qui consiste à capter directement l'énergie des courants marins.

#### **Avantages**

- Cette source d'énergie ne génère pas de pollution lors de sa production.
- Elle est abondante et facilement accessible.
- Son potentiel pour l'avenir est prometteur.

#### **Inconvénients**

- Elle nécessite un investissement financier conséquent.
- Sa récupération s'avère très complexe.

### **1.3.6 Énergie solaire**

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

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau.

**L'énergie solaire thermique** : elle utilise des capteurs thermiques pour absorber la chaleur du soleil. Cette chaleur est ensuite utilisée pour chauffer l'eau sanitaire, alimenter un chauffage domestique ou même produire de l'électricité via des centrales solaires thermodynamiques.

#### **Les types de capteurs solaires thermiques**

Il existe plusieurs types de capteurs adaptés aux différentes applications :

##### **a) Les capteurs plans vitrés**

- Ce sont les plus courants pour le chauffage de l'eau domestique et des piscines.
- Ils se composent d'une plaque absorbante recouverte d'un revêtement sélectif et protégée par une vitre pour limiter les pertes thermiques.

## Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables

- Un fluide caloporteur circule à travers un réseau de tubes pour capter et transporter la chaleur.

### b) Les capteurs à tubes sous vide

- Ils offrent un rendement supérieur grâce à une meilleure isolation thermique.
- Chaque tube contient un absorbeur et un fluide qui s'évapore sous l'effet de la chaleur, ce qui améliore le transfert thermique.
- Utilisés dans les régions froides ou pour des applications nécessitant une température élevée.

### c) Les capteurs non vitrés

- Ils sont principalement utilisés pour le chauffage des piscines.
- Ils sont moins chers mais présentent un rendement inférieur car ils ne sont pas protégés contre les pertes thermiques.

L'énergie solaire provient du rayonnement du soleil, une source inépuisable à l'échelle humaine.

### 1.3.7 Potentiel solaire en Algérie

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

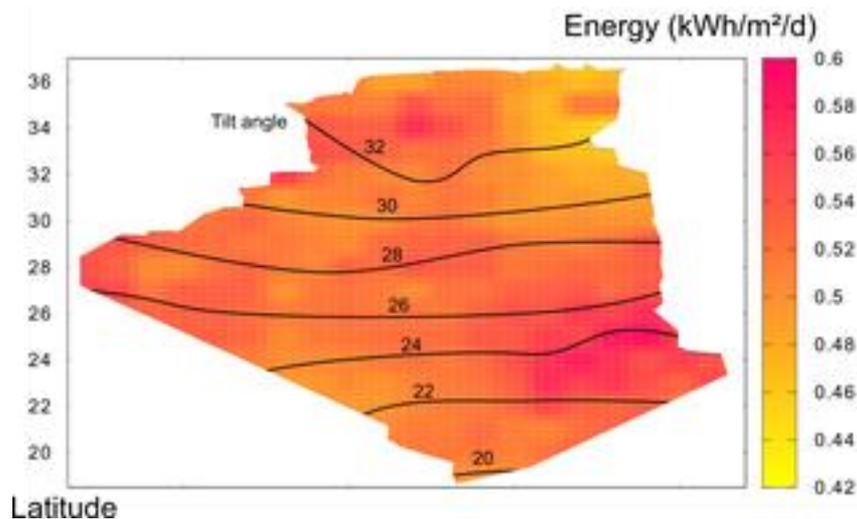
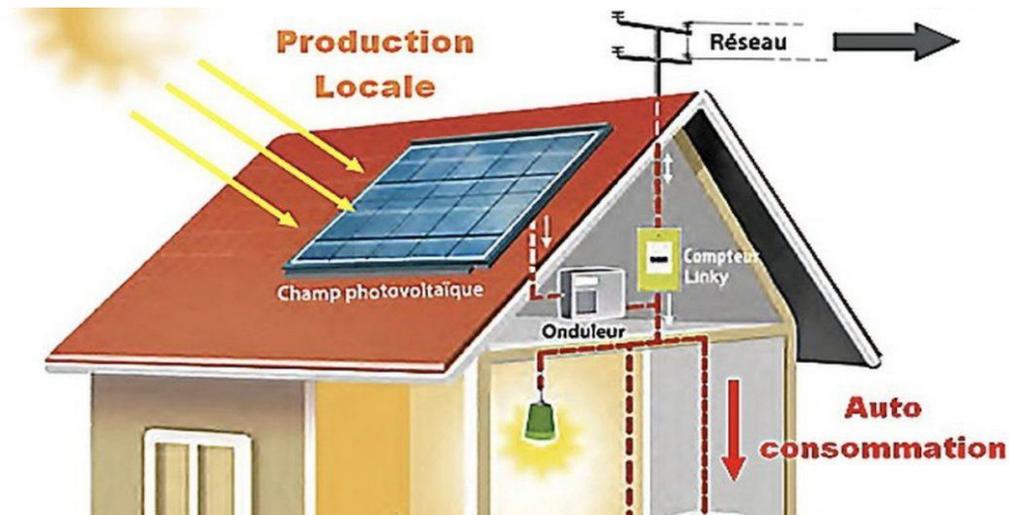


Figure1.4: potontiel solaire en algérie



**Figure1.5** : modèle économique de l'autoconsommation photovoltaïques

#### **1.4 L'énergie solaire photovoltaïque :**

Elle repose sur l'utilisation de panneaux photovoltaïques qui contiennent des cellules en silicium. Ces cellules captent la lumière du soleil et la convertissent directement en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cette électricité peut être utilisée immédiatement ou stockée dans des batteries.

##### **Avantages :**

- Ressource inépuisable et disponible partout.
- Pas d'émission de CO<sub>2</sub>.
- Entretien faible.
- Adaptés aux sites isolés. .

##### **Inconvénients :**

- Production intermittente (dépend du soleil).
- Coût initial élevé.
- Espace requis pour les panneaux solaires.
- Puissance assez faible.

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée grâce à l'amélioration des technologies et à la baisse des coûts des panneaux photovoltaïques.

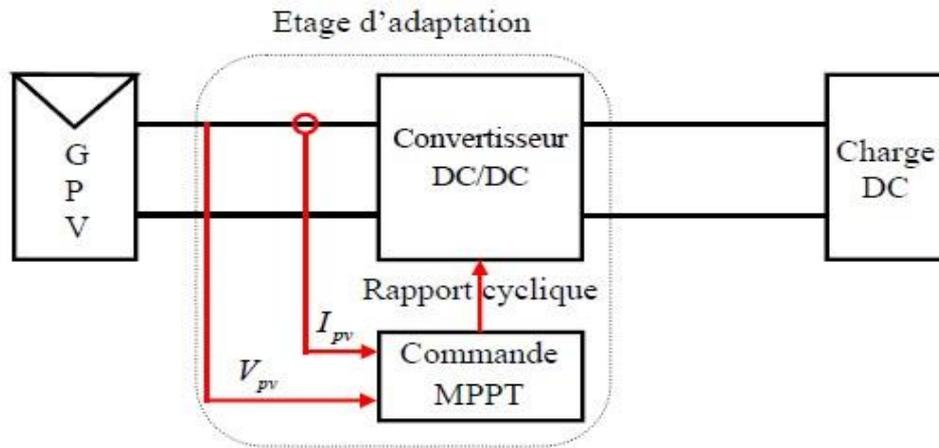


Figure 1.6 : schéma de principe d'un système PV connecté à une charge

### 1.4.1 Principe de fonctionnement

La lumière du soleil, composée de photons, frappe la surface des cellules photovoltaïques contenues dans les panneaux solaires.

#### 1. Excitation des électrons

- Les photons transmettent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur, ce qui leur permet de se détacher de leur position initiale.

#### 2. Création d'un courant électrique

- Grâce à une **jonction PN** (deux couches de silicium dopées différemment), un champ électrique est créé, forçant les électrons à circuler dans un **circuit externe**, générant ainsi un courant électrique **continu** (DC).

#### 3. Conversion en courant alternatif

- Un **onduleur** transforme le courant continu en **courant alternatif** (AC), qui est le type de courant utilisé par nos appareils domestiques et les réseaux électriques.

### 1.4.2 Composants du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque comprend plusieurs éléments clés :

#### a) Panneaux solaires photovoltaïques

Ils sont composés de nombreuses **cellules photovoltaïques** reliées en série et en parallèle. Le rendement dépend du type de cellules utilisées.

#### b) Onduleur

Il convertit le **courant continu** (DC) produit par les panneaux en **courant alternatif** (AC), compatible avec les appareils électriques et le réseau.

## *Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables*

### **c) Batterie de stockage (optionnelle)**

Dans les installations autonomes (hors réseau), l'électricité produite est stockée dans des batteries pour être utilisée en l'absence de soleil (nuit, mauvais temps).

### **d) Régulateur de charge**

Il protège les batteries contre la surcharge et la décharge excessive.

### **e) Système de monitoring et compteur**

Permet de suivre la production et la consommation d'électricité.

### **1.4.3 Types de panneaux solaires photovoltaïques**

On distingue plusieurs types de cellules photovoltaïques :

#### **1.4.3.1 Silicium monocristallin**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi cristallin.

- Rendement élevé : entre 18 et 22 %
- Meilleure efficacité en faible ensoleillement
- Coût plus élevé

#### **1.4.3.2 Silicium poly cristallin**

- Le silicium multi cristallin (Poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. À elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.
- Rendement moyen : entre 15 et 18 %
- Moins cher que le monocristallin
- Moins efficace dans les zones peu ensoleillées

### 1.4.3.3 Technologie à couches minces (Thin-Film)

- Rendement plus faible (10-12 %)
- Flexibles et légers (adaptés pour les grandes surfaces ou les bâtiments)
- Moins chers à produire

### 1.4.3.4 Cellules solaires organiques et pérovskites (nouvelles technologies)

- Prometteuses pour des rendements supérieurs à 25 %
- Encore en phase de développement

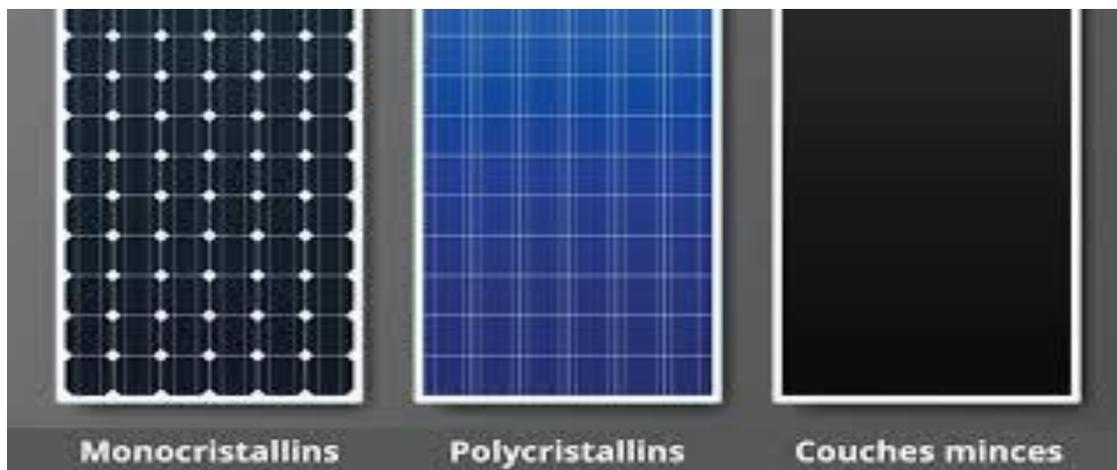


Figure1.7 : Configuration des cellules photovoltaïques

## 1.5 Les caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques

### 1.5.1 Puissance nominale (Wc - Watt crête)

- Exprimée en **Watt-crête (Wc)**, c'est la puissance maximale qu'un panneau peut produire dans des conditions standard (STC : Standard Test Conditions).
- **Exemples** : 300 Wc, 400 Wc, 500 Wc
- **Facteurs influençant la puissance réelle** : ensoleillement, température, inclinaison.

### 1.5.2 Rendement (%)

- Le rendement représente le pourcentage de l'énergie solaire convertie en électricité.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

- **Valeurs typiques** :
  - **Monocristallin** : 18-22 %
  - **Polycristallin** : 15-18 %

## Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables

- **Thin-Film** : 10-12 %

### 1.5.3. Courant et tension électriques

#### Tension en circuit ouvert (Voc)

- Tension maximale sans charge appliquée.
- Généralement entre **30V et 50V** pour un panneau.

#### Courant de court-circuit (Isc)

- Courant maximal que le panneau peut générer en court-circuit.
- Généralement entre **5A et 10A**.

### 1.5.4 Point de puissance maximale (MPP)

- **Vmp (tension maximale de puissance)** : tension lorsque le panneau produit sa puissance maximale (souvent 80-90% de Voc).
- **Imp (courant maximal de puissance)** : courant lorsque le panneau produit sa puissance maximale.

### 1.5.5 Coefficient de température

- Indique la variation des performances du panneau selon la température.
- Exprimé en  $\%/^{\circ}\text{C}$ , il montre combien la puissance diminue lorsque la température augmente.
- Exemple : **-0,4  $\%/^{\circ}\text{C}$**  signifie que si la température passe de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $45^{\circ}\text{C}$ , la puissance diminue de **8%**.

### 1.5.6 Tolérance de puissance

- Marge d'erreur sur la puissance nominale.
- Exemple : **+5W / -0W** signifie que le panneau peut produire **5W de plus**, mais jamais moins que sa puissance nominale.

### 1.5.7 Durée de vie et garantie

- **Durée de vie** : **25 à 30 ans** en moyenne.
- **Garantie produit** : **10 à 15 ans**.
- **Garantie de performance** : Garantie que le panneau conservera **80-90% de sa puissance initiale après 25 ans**

### 1.5.8 Facteurs environnementaux

#### Résistance aux intempéries

- Norme **IP65/IP67** : protection contre la poussière et l'eau.
- Résistance aux **vents forts** (jusqu'à 2400 Pa) et à la **neige** (jusqu'à 5400 Pa).

#### Dégradation

## Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables

- **PID (Potential Induced Degradation)** : Perte de puissance causée par des tensions électriques élevées.
- **LID (Light Induced Degradation)** : Perte de puissance après les premières heures d'exposition au soleil.

### 1.5.9. Dimensions et poids

- **Dimensions standards** : 1,7 m × 1 m pour un panneau de **350-400 Wc**.
- **Poids** : Environ **18 à 25 kg**.

## 1.6 fiche technique du panneau solaire photovoltaïque

Paramètre	Valeur
Puissance nominale	400 Wc
Rendement	20.5%
Tension en circuit ouvert (Voc)	48.5 V
Courant de court-circuit (Isc)	9.8 A
Vmp (tension max de puissance)	40.8 V
Imp (courant max de puissance)	9.1 A
Coefficient de température	-0,35 %/°C
Tolérance de puissance	+5W / -0W
Garantie produit	15 ans
Garantie performance	80% après 25 ans
Pois	22 kg
Dimensions	1722 × 1134 × 35 mm

## 1.7 des Concepts Clés des Panneaux Photovoltaïque

Concept	Description	Formule / Valeur typique
Puissance d'un panneau PV	Puissance instantanée générée par le panneau.	$P = U \times I$

## *Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables*

Puissance maximale (P <sub>max</sub> )	Puissance délivrée par le panneau en conditions standard (STC).	$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$
Rendement du panneau	Rapport entre la puissance générée par le panneau et l'énergie reçue (irradiance).	$\eta = P_{max} / (A \times G) \times 100$
Effet de la température sur la puissance	La puissance d'un panneau diminue lorsque la température augmente.	$P(T) = P_{ref} \times [1 + \gamma \times (T_{cell} - 25)]$
Loi des courants et tensions	Comportement des panneaux en fonction du montage : série ou parallèle.	Montage en série : $U_{tot} = U_1 + U_2 + \dots$ Montage en parallèle : $I_{tot} = I_1 + I_2 + \dots$
Énergie produite par un panneau solaire	Quantité d'énergie produite par le panneau sur une période donnée.	$E = \eta \times A \times G_{tot}$
Irradiance solaire (G)	Puissance solaire reçue par unité de surface en un instant donné.	Ex : 1000 W/m <sup>2</sup>
Irradiation ou énergie solaire (H)	Total de l'énergie solaire reçue sur une période (par exemple, par jour ou par an).	Ex : 5.5 kWh/m <sup>2</sup> .jour
Facteur de performance (PR)	Efficacité du système PV en tenant compte des pertes diverses.	$PR = E_{mesurée} / (P_{nom} \times H)$
Temps de retour sur investissement (TRI)	Durée nécessaire pour rentabiliser l'installation par les économies générées.	$TRI = \text{Investissement total (€)} / \text{Économies annuelles (€)}$

### **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux types d'énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur l'énergie solaire. Nous avons également fourni un

## *Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables*

---

aperçu de son exploitation à l'échelle mondiale ainsi que de son importance sur les plans économique, environnemental et social. Le chapitre suivant sera dédié à l'analyse de l'énergie photovoltaïque.

# Chapitre2 : réseau électrique moyenne tension

## Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension

### Chapitre2 : réseau électrique moyenne tension

#### 2.1. Introduction

Les réseaux électriques constituent l'ensemble des infrastructures permettant le transport et la distribution de l'énergie électrique depuis les centres de production (centrales électriques) jusqu'aux utilisateurs finaux (particuliers, industries, services, etc.). Ces réseaux sont constitués de lignes électriques, de transformateurs, de postes de distribution, et d'équipements de protection et de commande. L'objectif principal d'un réseau électrique est d'assurer une alimentation continue, fiable et sécurisée de l'électricité, tout en minimisant les pertes énergétiques. Il est structuré en plusieurs niveaux de tension, chacun jouant un rôle spécifique dans la chaîne de transport et de distribution. Cependant, le réseau peut être affecté par des perturbations qui se propagent rapidement et sur de vastes zones, pouvant avoir un impact critique sur l'ensemble du système électrique. Ces perturbations peuvent être exacerbées par l'ajout de productions locales sur le réseau de transport ou de distribution. Ainsi, nous observons une prolifération de systèmes de production décentralisée qui se connectent principalement à un réseau électrique qui n'est pas conçu pour les accueillir.

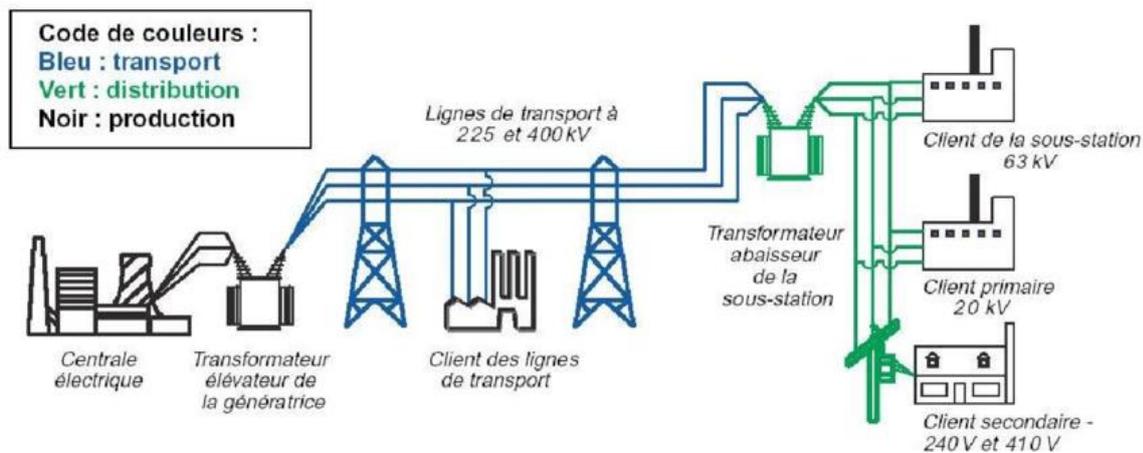


Figure2.1 : structure générales de réseaux électriques

#### 2.2 Types de réseaux électriques

Les réseaux électriques sont classés selon leur niveau de tension:

- Réseau de transport (haute et très haute tension) les lignes très haute tension (HTB2) et les lignes haute tension (HTB)

- Tensions typiques : 225 kV, 400 kV, voire plus.
- Transport sur de longues distances.
- Assure l'interconnexion entre les grands centres de production et les zones de consommation.

## Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension

- Réseau de distribution moyenne tension (MT) :
  - Tensions typiques: 5,5 kV, 15 kV, 20 kV, 30 kV.
  - Acheminement de l'énergie vers les zones urbaines, rurales ou industrielles.
- Réseau de distribution basse tension (BT) :
  - Tension typique: 230/400 V.
  - Fourniture d'électricité aux utilisateurs finaux.

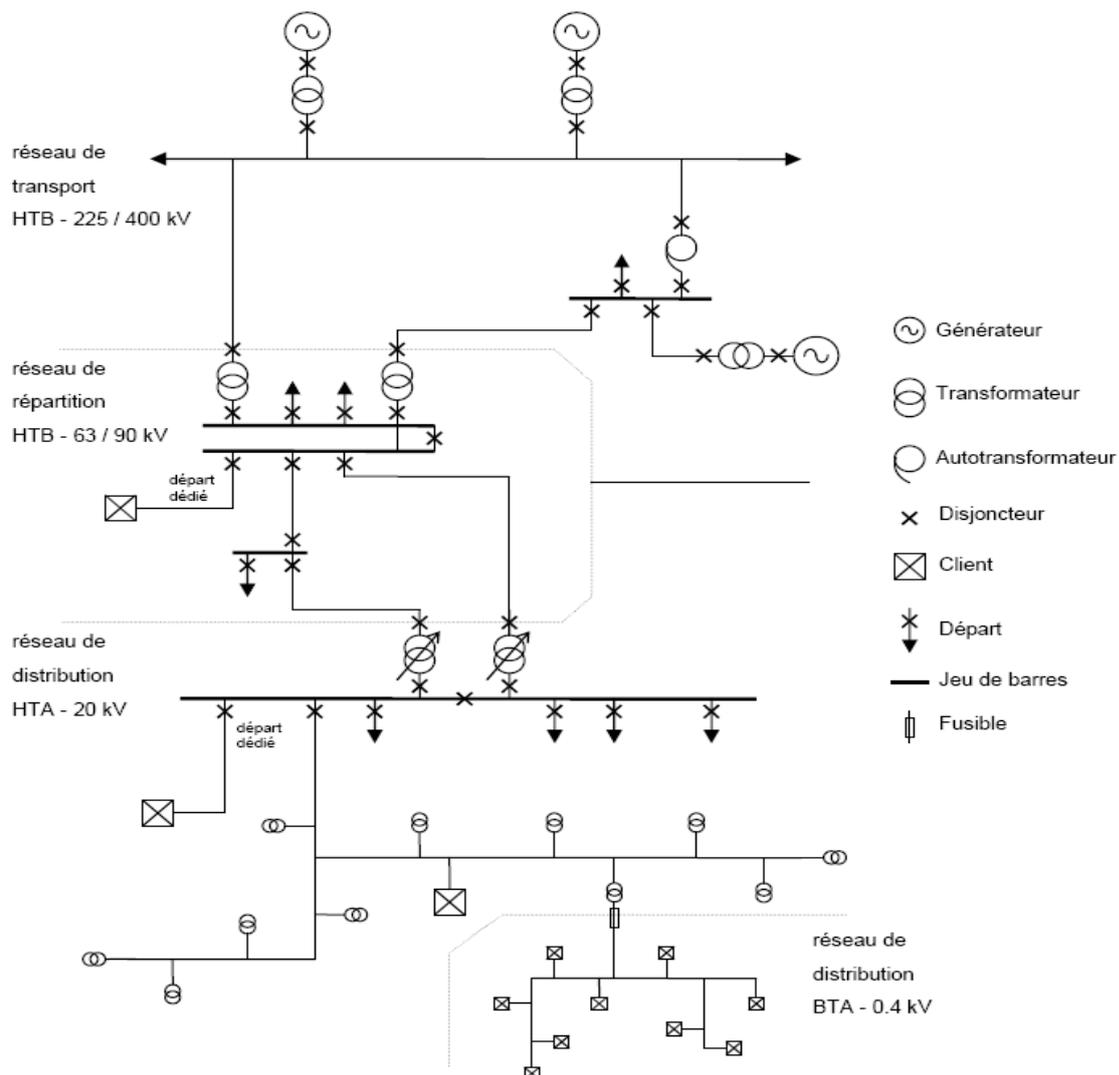


Figure 2.2 : les différents niveaux de tension du système électrique

## ***Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension***

---

### **2.3. Le réseau moyenne tension**

Le réseau MT a une structure arborescente radiale le plus souvent bouclable par une autre demi-rame ou un autre poste source pour la sécurité d'exploitation. Il est en général constitué d'une artère ou ossature principale et de dérivations. Selon la densité de charges à desservir, le réseau de distribution sera réalisé soit en lignes aériennes, soit en câbles souterrains

#### **2.3.1 Réseaux MT aérien**

Ce sont essentiellement des impératifs d'ordre géographique qui ont influencé la conception technique et structurelle des réseaux aériens MT, en particulier l'étendue des territoires, la densité des populations et la puissance unitaire des clients à desservir. C'est ainsi que sont nées deux doctrines :

La doctrine nord-américaine, à neutre distribué (figure 2.5) ;

La doctrine française et, en général, européenne (figure 2.6), à trois fils, le neutre n'étant pas distribué.

En général, les structures développées dans le monde peuvent s'apparenter à l'une ou l'autre de ces doctrines

#### **2.3.2 Réseaux MT souterrains**

Les différences de structure entre réseaux aériens et souterrains proviennent essentiellement, par nature, de la nécessité de faire face à des indisponibilités beaucoup plus longues en système souterrain, pour localiser une avarie éventuelle et en effectuer la réparation (10 à 20 h) ou bien pour réaliser des travaux programmés.

Une caractéristique fondamentale d'un réseau MT souterrain est le nombre de voies d'alimentation utilisables pour desservir une même charge (poste MT/BT) :

La structure à une voie d'alimentation, c'est-à-dire purement radiale en antenne, est simple et économique, mais n'offre pas de possibilité de reprise de service en cas d'incident ; c'est pourquoi, sauf cas particuliers rares, elle est proscrite en souterrain ;

Les structures à deux voies d'alimentation sont les plus fréquentes ; on y distingue deux grandes familles : les réseaux en double dérivation et les réseaux en coupure d'artère ;

Les structures à voies d'alimentation multiples sont plus rares, mais assurent une qualité de service encore meilleure

#### **2.3.3 Caractéristiques générales**

Le réseau moyenne tension joue un rôle clé dans la distribution de l'électricité. Il constitue l'interface entre les réseaux de transport et les réseaux de basse tension.

Plage de tension : Généralement entre 1 kV et 50 kV, les tensions les plus courantes étant 15 kV et 20 kV.

Fonction : Acheminer l'énergie des postes de transformation HT/MT jusqu'aux transformateurs MT/BT.

Topologie : Peut être en étoile, en anneau ou en réseau maillé.

## ***Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension***

---

### **2.3.4 Composants principaux**

- Postes HT/MT : Transforment la haute tension du réseau de transport en moyenne tension.
- Lignes MT : Aériennes (conducteurs nus sur poteaux), Souterraines (câbles isolés).
- Transformateurs MT/BT : Convertissent la tension moyenne en basse tension.
- Dispositifs de protection : Disjoncteurs, fusibles, parafoudres, relais de protection.

### **2.3.5 Paramètres des lignes moyenne tension**

- Résistance (R) : Oppose le passage du courant.
- Inductance (L) : Génère une tension réactive.
- Capacité (C) : Capacité entre conducteurs ou conducteur-terre.
- Impédance (Z) :  $R + j\omega L$ .
- Chute de tension : Dépend de la charge et des caractéristiques de ligne.
- Courant admissible : Limité par l'échauffement.
- Isolement : Essentiel en lignes souterraines.
- Distance de sécurité : Varie selon la tension et le type de ligne.

#### 2.3.4 Lois et formules associées

- Résistance:  $R = \rho \times (l/S)$
- Inductance:  $L \approx 2 \times 10^{-7} \times \ln(D/r)$
- Capacité:  $C = (\pi\epsilon_0) / \ln(D/r)$
- Impedance:  $Z = R + j\omega L$
- Admittance:  $Y = j\omega C$
- Chute de tension:  $\Delta U = I \times (R \cos\phi + X \sin\phi)$
- Pertes Joules:  $P = R \times I^2$

## *Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension*

### 2.4 Modélisation Mathématique d'un Réseau Électrique Moyenne Tension

Paramètre	Description	Formule / Remarques
Tension nominale	Tension entre phases (ex: 20 kV)	MT = 1 kV à 33 Kv
Fréquence	Fréquence du réseau	50 Hz (standard)
Résistance linéique (R)	Opposition ohmique du conducteur	$R = \rho \cdot L / S$
Réactance linéique (X)	Due à l'inductance des câbles	$X = 2\pi fL$
Impédance totale (Z)	Impédance série de la ligne	$Z = (R + jX) \cdot L$
Admittance parallèle (B)	Due à la capacité entre conducteurs et terre	$Y = j\omega C \cdot L$ (modèle $\pi$ )
Chute de tension ( $\Delta V$ )	Baisse de tension entre le poste et la charge	$\Delta V = RI \cos\phi + XI \sin\phi$
Puissance transmise (S)	Puissance active + réactive	$S = P + jQ = \sqrt{3} \cdot U \cdot I^*$
Courant de court-circuit	À utiliser pour dimensionner la protection	$I_{cc} = U / Z_{eq}$
Type de conducteur	Cuivre ou aluminium, isolé ou nu	Section dépend de I, $\Delta V$ , échauffement
Méthode de pose	Aérien, torsadé, souterrain	Choix selon environnement, coût et sécurité
Compensation réactive	Condensateurs pour améliorer le facteur de puissance	Réduit pertes et surcharge
Isolement	Protection contre les surtensions (foudre, manœuvre)	Niveau > tension nominale (ex: 60 kV pour 20 kV)

Une représentation schématique d'un réseau MT comportant une source, un transformateur, une ligne MT, une charge, et une capacité en parallèle.

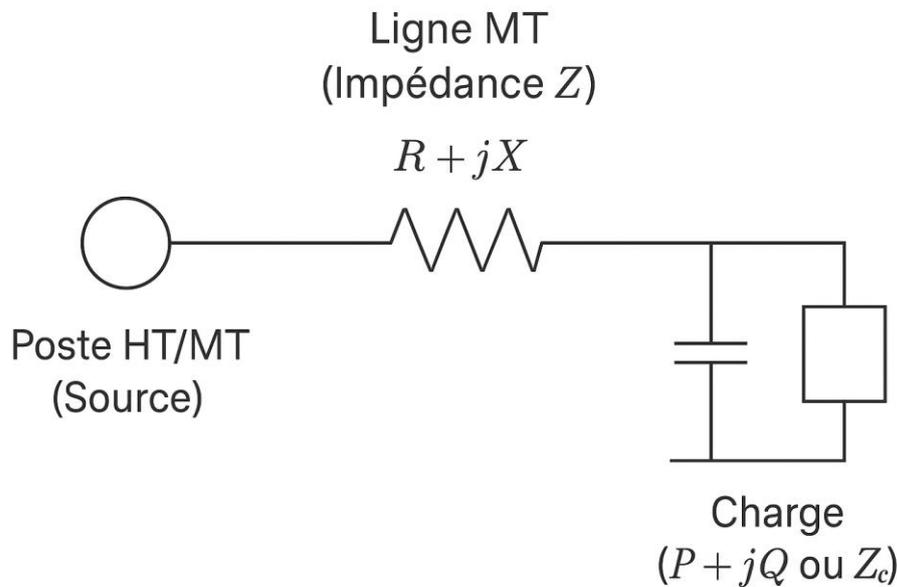


Figure 2.3: schéma unifilaire d'une ligne MT

### 2.5 Topologies des réseaux électriques :

Les topologies varient d'un type de réseau à un autre. Elles sont déterminées par plusieurs facteurs, notamment le niveau de fiabilité souhaité, la flexibilité, la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation.

#### 2.5.1 Réseau maillé :

Cette topologie est presque standard pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont interconnectés par des lignes à très haute tension (THT) au niveau des postes d'interconnexion, formant ainsi un maillage. Cette structure offre une meilleure fiabilité, mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale.

#### 2.5.2 Réseau bouclé :

Cette topologie est principalement utilisée dans les réseaux de répartition et de distribution en moyenne tension (MT). Les postes de répartition haute tension (HT) ou MT, alimentés par le réseau à très haute tension (THT), sont interconnectés pour former des boucles, ce qui vise à augmenter la disponibilité du service. Cependant, il est important de noter que tous les réseaux MT ne sont pas nécessairement bouclés.

#### 2.5.3 Réseau radial :

C'est une topologie simple que l'on retrouve fréquemment dans la distribution en MT et basse tension (BT). Elle se compose d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT, qui sont eux-mêmes alimentés par un poste source HT ou MT. En moyenne

Cette structure est couramment utilisée en milieu rural et parfois en milieu urbain, surtout

## Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension

lorsque la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle se compose d'un poste de répartition qui alimente plusieurs distributions grâce à des piquages à différents niveaux des lignes qui alimentent les postes MT/BT.

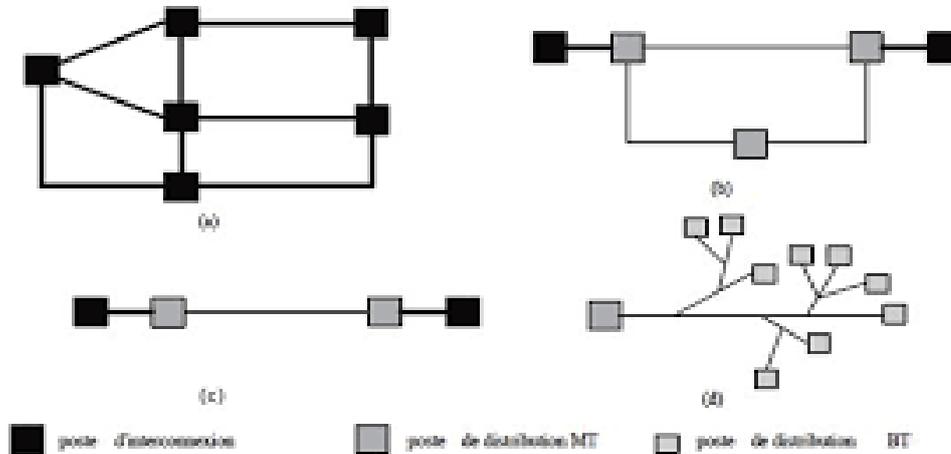


Figure 2.4 : structure et constitution de topologie des réseaux électriques

### 2.6 Courant et tension :

Nous examinons la distribution de l'énergie électrique dans une installation domestique.

La source d'énergie provient du réseau électrique de distribution.

La charge est constituée de l'ensemble des appareils connectés au réseau domestique, qui sont tous branchés en parallèle. Nous faisons l'hypothèse que ce réseau électrique fonctionne comme un générateur idéal de tension alternative.

Cela signifie que, quelle que soit la charge, la tension mesurée au niveau du compteur électrique (et donc pour tous les appareils, étant donné qu'ils sont en parallèle) est une sinusoïde avec une amplitude et une fréquence constantes. La fréquence fondamentale, notée  $F_f$ , est de 50 Hz en Europe, en Asie et en Afrique, et de 60 Hz aux États-Unis. L'amplitude efficace de cette sinusoïde est de 230 V.

$$v(t) = \sqrt{2}V_e \cos(2\pi F_f t + \theta_0)$$

On note donc :

Cette hypothèse est théoriquement incorrecte, car un générateur parfait de tension n'existe pas.

En effet, l'activation d'appareils sur le réseau entraîne de légères perturbations de la tension théorique  $v(t)$ .

Des recherches ont d'ailleurs été menées pour exploiter ces perturbations afin de caractériser les appareils connectés.

## Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension

Cependant, ces perturbations sont suffisamment faibles pour être considérées comme négligeables dans le cadre de notre étude.

Nous supposons donc que seul le courant est représentatif de la charge présente, la tension étant déterminée par le réseau de distribution.

Le courant demandé par la charge n'est pas nécessairement sinusoïdal, car de nombreux appareils domestiques présentent des charges non linéaires (comme ceux équipés d'une alimentation à découpage, par exemple).

Ainsi, le courant est simplement périodique avec une fréquence fondamentale  $F_f$ , étant donné que la tension est également périodique.

La représentation en série de Fourier est donc appropriée pour modéliser le courant  $i(t)$  demandé.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(2\pi F_f n t + \theta_n)$$

Donc en note :

Ce sont les coefficients de Fourier de  $i(t)$ . Nous faisons l'hypothèse que la valeur moyenne du courant sur une période est nulle.

### 2.7 Puissance :

La puissance active correspond à la puissance moyenne utilisée sur une période donnée.

$$P = \frac{1}{T} \int_T v(t) i(t) dt \quad \text{ou} \quad T = \frac{1}{F_f}$$

C'est la période des signaux de tension et de courant. On constate que seule la composante fondamentale du courant contribue à la puissance active.

En effet, en considérant les expressions de  $i(t)$  et  $v(t)$  que nous avons obtenues précédemment.

On obtiens  $P = V_g I_1 \cos \varphi$  avec  $\varphi = \theta_0 - \theta_1$

(Dans le cas d'une charge purement résistive, le courant et la tension sont parfaitement synchronisés. Ainsi, la puissance instantanée  $v(t)i(t)$  reste positive à tout moment  $t$ , ce qui signifie que l'énergie circule uniquement de la source vers la charge.

En revanche, dans le cas général, la charge peut inclure des éléments inductifs ou capacitifs. Dans ce cas, il peut y avoir des moments  $t$  où la puissance instantanée  $v(t)i(t)$  devient négative, indiquant que la charge renvoie temporairement de l'énergie vers la source.

## **Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension**

---

Pour décrire ce phénomène, on définit la puissance réactive :

On note  $Q = V_g I_1 \sin \varphi$

On a observé que les harmoniques du courant ne contribuent pas en moyenne à la transmission de puissance de la source vers la charge. Néanmoins, ces valeurs dépendent de la nature de la charge et peuvent s'avérer utiles pour sa caractérisation dans le cadre du suivi des courbes de charge.

On définit alors les puissances actives  $P_n$  et réactives  $Q_n$  des harmoniques du courant :

I-6 :

$$Q_n = V_g I_n \sin(\theta_0 - \theta_n) \quad P_n = V_g I_n \cos(\theta_0 - \theta_n)$$

Pour tout  $n > 1$

### **2.8 Régime permanent et régime transitoire :**

La relation entre la tension et le courant demandés par la charge est décrite par une équation différentielle, dont l'expression précise dépend des composants de la charge et de leur agencement.

La solution de cette équation se compose de deux parties : une solution libre et une solution forcée.

La première représente la réponse de la charge à une perturbation ponctuelle, tandis que la seconde correspond à la réponse de la charge à une contrainte extérieure continue.

En électricité, ces deux parties de la solution se rapportent respectivement au régime transitoire et au régime permanent.

Lorsqu'un appareil est mis en marche ou qu'il change de mode de fonctionnement, il subit une perturbation instantanée qui engendre un régime transitoire, tandis que la tension du réseau appliquée génère le régime permanent. Le régime transitoire s'estompe au bout d'un temps caractéristique, qui varie selon la charge (généralement quelques secondes).

Le régime permanent persiste jusqu'à ce que l'appareil soit de nouveau perturbé, que ce soit par un changement de mode de fonctionnement ou par son arrêt.

Les poste

Les postes électriques sont des éléments principaux du réseau électrique, servent à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Ils permettent 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.

## *Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension*

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau,
- Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques HTB,
- Postes élévateurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur,
- Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

### **2.8.1 Transformateur de puissance**

Le transformateur de puissance est sans doute l'appareil qui a permis le développement et la prédominance des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Sa fonction principale a été d'augmenter la tension de transport afin de diminuer le courant et, par conséquent, de réduire les pertes joules dans les lignes. Cette augmentation de tension s'accompagne naturellement d'une diminution de la tension aux points d'utilisation. De manière plus générale, un transformateur est un élément essentiel pour l'interconnexion des différents réseaux d'énergie.)



**Figure2.5** : transformateur de puissance

### **2.8.2 Transformateur de tension (TT) :**

Les transformateurs de tension sont utilisés sur les lignes à haute tension pour alimenter des appareils de mesure (comme des voltmètres et des wattmètres) ou de protection (tels que des relais). Leur rôle est d'isoler ces appareils de la haute tension tout en les alimentant avec des tensions appropriées. Le rapport de transformation est conçu de manière à ce que la tension secondaire soit d'environ une centaine de volts, ce qui permet d'utiliser des instruments standards pour mesurer des tensions élevées.



**Figure 2.6 :** transformateur de tension

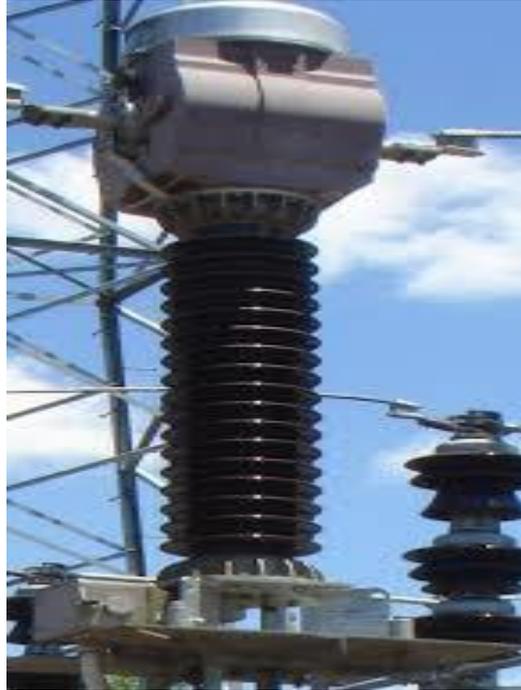
### **2.8.3. Transformateur de courant (TI)**

Les transformateurs de courant sont utilisés pour réduire à une valeur facilement mesurable les courants élevés des lignes à haute ou à basse tension. Ils isolent également les appareils de mesure ou de protection des lignes à haute tension. Le circuit primaire de ces transformateurs est connecté en série avec la ligne dont on souhaite mesurer l'intensité. Ces transformateurs sont exclusivement destinés à des fins de mesure et de protection, ce qui signifie que leur puissance est relativement faible, généralement entre 15 et 200 VA. Le courant nominal secondaire se situe habituellement entre 1 et 5 A.

L'utilisation de transformateurs de courant sur les lignes à haute tension est cruciale pour des raisons de sécurité.

Par exemple, une ligne à 200 kV peut transporter une intensité de 40 A, qui est mesurable avec un ampèremètre de 0-50 A ; cependant, il serait dangereux pour quiconque d'approcher l'instrument sans risquer une électrisation mortelle.

Il est donc essentiel que l'instrument soit isolé de la haute tension à l'aide d'un transformateur. Comme pour les transformateurs de tension, il est nécessaire de relier l'un des fils secondaires à la terre.



**Figure2.7 :** transformateur de courant

### **2.8.4. Disjoncteur à haute tension :**

Le disjoncteur à haute tension est conçu pour établir, supporter et interrompre des courants dans les limites de sa tension assignée (c'est-à-dire la tension maximale du réseau électrique qu'il protège), selon la définition de la Commission électrotechnique internationale.

Il fonctionne dans deux types de conditions : n- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique ; n- Dans des conditions anormales spécifiques, notamment pour éliminer un court-circuit dans le réseau causé par la foudre ou d'autres facteurs. En raison de ses caractéristiques, le disjoncteur est un dispositif de protection indispensable pour un réseau à haute tension, car il est le seul capable d'interrompre un courant de court-circuit, évitant ainsi d'endommager le matériel connecté au réseau.



**Figure2.8** : Disjoncteur haute tension

### 2.8.5. Le sectionneur :

Le sectionneur est un dispositif électromécanique qui permet de séparer mécaniquement un circuit électrique de son alimentation (bien qu'un disjoncteur isole, il ne sépare pas). Il garantit une distance de sectionnement suffisante sur le plan électrique. Son objectif peut être d'assurer la sécurité des personnes travaillant sur la partie isolée du réseau électrique ou de retirer une section défectueuse du réseau afin de pouvoir continuer à utiliser les autres parties.



**Figure2.8** : Le sectionneur

## Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension

### 2.8.6. Les isolateurs :

Un isolateur est un élément électrotechnique conçu pour fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus. On les retrouve principalement sur les lignes à haute tension, mais aussi sur les lignes télégraphiques et dans les postes électriques. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Dans le réseau de transport, les isolateurs sont souvent disposés en chaîne, et leur longueur augmente avec le niveau de tension.

Les isolateurs remplissent deux fonctions principales : Ils empêchent le courant électrique circulant dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes.

Ils maintiennent les conducteurs de phase en place sur le pylône.)

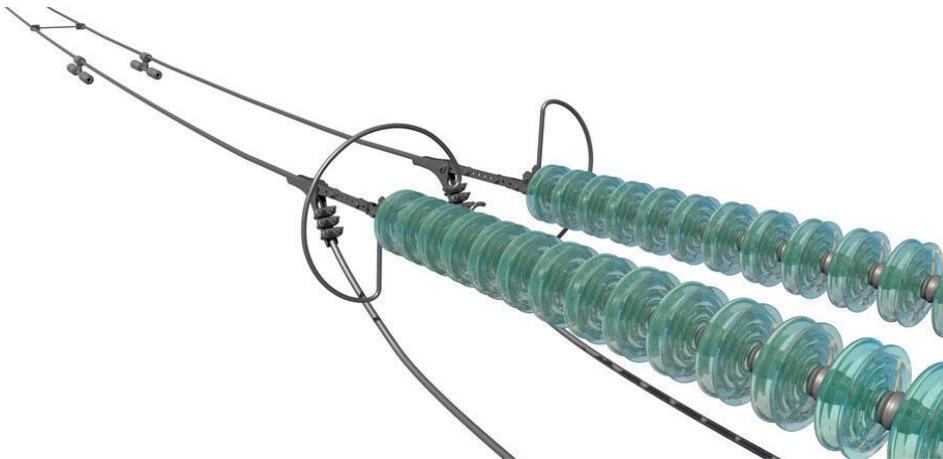


Figure 2.9 : isolateurs de lignes

### 2.8.7. Jeux de barres :

Les jeux de barres sont généralement constitués de barres plates ou de tubes creux en cuivre ou en aluminium.

Dans les installations à haute tension, ces jeux de barres peuvent être « posés » sur des isolants, ce qui les transforme en tubes.

Ils peuvent également être « tendus », c'est-à-dire qu'ils sont flexibles et suspendus par des chaînes isolantes à des structures métalliques.

Les jeux de barres jouent un rôle crucial en reliant les différentes composantes d'un poste électrique, ce qui les rend à la fois essentiels et fragiles.

En effet, si un jeu de barres subit un court-circuit, cela peut entraîner la mise hors tension de l'ensemble du poste.

Pour éviter ce problème, plusieurs jeux de barres sont souvent connectés en parallèle, ce qui permet également d'effectuer la maintenance d'un jeu de barres sans avoir à arrêter complètement le poste.

## *Chapitre 2 réseau électrique moyenne tension*

---



**Figure2.10** :les jeux de barres

### **2.9 Conclusion :**

Le réseau Moyenne Tension constitue un maillon fondamental dans la chaîne de distribution de l'énergie électrique, assurant le transfert efficace entre la haute et la basse tension. Ce chapitre a mis en évidence ses caractéristiques techniques, ses configurations principales ainsi que les dispositifs de protection associés. La compréhension et la maîtrise des réseaux MT sont essentielles pour garantir la fiabilité, la sécurité et l'optimisation du système électrique dans son ensemble.

Chapire3 : Perturbation dues à  
l'intégration de source d 'énergie  
Photovoltaïque

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

### **Chapire3 : Perturbation dues à l'intégration de source d 'énergie Photovoltaïque**

#### **3.1 Introduction**

Depuis plusieurs décennies, les distributeurs d'énergie électrique œuvrent à garantir une fourniture d'électricité de qualité. Les premiers efforts ont principalement porté sur la **continuité de service**, afin d'assurer un accès permanent à l'énergie pour les usagers.

Avec l'évolution technologique et la généralisation des équipements à base d'électronique dans les systèmes de commande et de contrôle, les exigences en matière de qualité de l'énergie ont considérablement évolué. Il ne s'agit plus seulement de fournir de l'électricité en continu, mais également de **maintenir des caractéristiques électriques optimales**, indispensables au bon fonctionnement de ces dispositifs sensibles.

L'énergie électrique est aujourd'hui délivrée sous forme d'un **système triphasé sinusoïdal**, dont les principaux paramètres de qualité sont :

**La fréquence** : elle doit être stable et conforme aux normes (par exemple 50 Hz en Europe).

**L'amplitude des tensions** : les trois phases doivent présenter des amplitudes équivalentes.

**La forme d'onde** : elle doit se rapprocher le plus possible d'une sinusoïde parfaite, sans distorsions.

**L'équilibre du système** : cela implique une symétrie parfaite entre les trois phases, tant en amplitude qu'en déphasage.

#### **3.2. Définition de la qualité d'énergie électrique :**

Définition de la qualité d'énergie électrique : La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension.

### **3.3 Fluctuations de la Puissance et de la Fréquence**

Les systèmes photovoltaïques produisent de l'électricité en fonction de l'ensoleillement, qui varie au cours de la journée et en fonction des conditions météorologiques. Cela entraîne des fluctuations de la puissance produite.

Modélisation de la puissance produite par un panneau photovoltaïque :

La puissance  $P(t)$  générée par un panneau photovoltaïque peut être modélisée par la relation :

$$P(t) = \eta A G(t)$$

où :

- $\eta$  est le rendement du panneau photovoltaïque (dépendant de la technologie du panneau),
- $A$  est la surface captée par les cellules photovoltaïques,
- $G(t)$  est l'irradiance solaire à un instant  $t$ , généralement mesurée en  $W/m^2$ .

L'irradiance  $G(t)$  varie au cours de la journée en fonction de l'angle du soleil, de la couverture nuageuse, et d'autres facteurs climatiques. Ces variations entraînent des changements dans la production d'énergie, affectant ainsi la stabilité de la tension et de la fréquence du réseau.

Impact sur la fréquence du réseau :

La fréquence  $f(t)$  du réseau est liée à l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie. Lorsqu'il y a une fluctuation de la puissance générée par les panneaux photovoltaïques, cela peut perturber l'équilibre de l'énergie dans le réseau et entraîner des variations de la fréquence. La variation de la fréquence peut être modélisée par la relation :

$$\Delta P = (1/2) M \Delta f$$

où :

- $\Delta P$  est la variation de puissance injectée par les panneaux photovoltaïques dans le réseau,
- $M$  est l'inertie du réseau,
- $\Delta f$  est la variation de la fréquence.

Des variations rapides de  $P(t)$  peuvent entraîner des fluctuations de la fréquence  $\Delta f$ , perturbant ainsi la stabilité du réseau.

### **3.3 Harmoniques et Distorsions de la Tension**

Les onduleurs, qui sont des dispositifs nécessaires pour convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif (AC) injecté dans le réseau, introduisent souvent des distorsions harmoniques dans la forme d'onde de la tension.

Les onduleurs peuvent générer des harmoniques de hautes fréquences qui se propagent dans le réseau. Ces harmoniques peuvent entraîner des effets indésirables tels que la surchauffe des transformateurs, des moteurs et d'autres équipements, ainsi que des pertes d'efficacité.

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

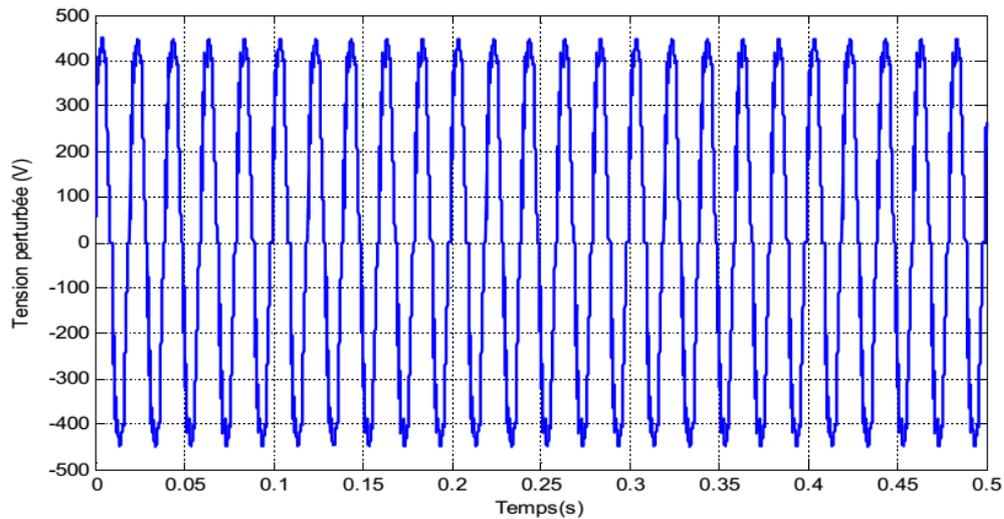


Figure 3.1 : les harmonique du tension

### 3.4 Harmonique du courant :

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires. Ces charges sont les sources principales des courants harmoniques, c'est à dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel elles sont raccordées

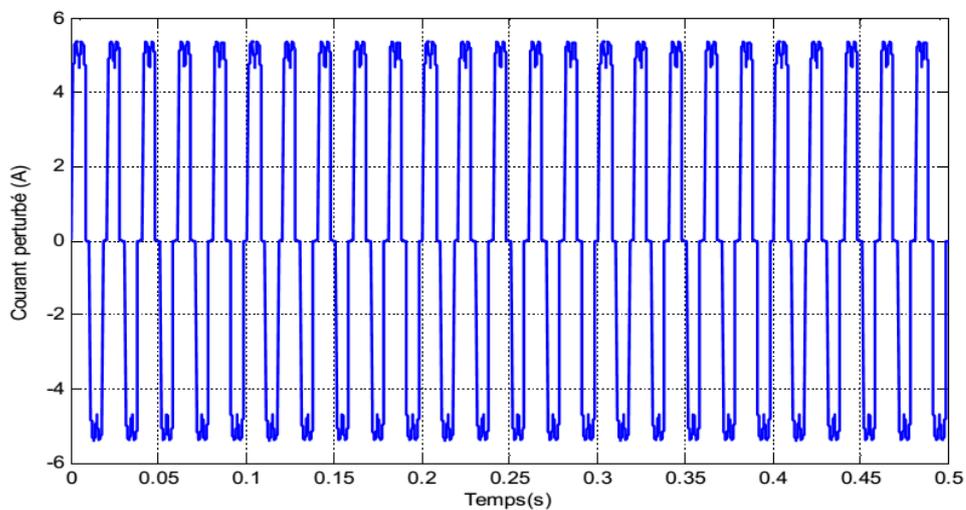


Figure3.2 : les Harmonique du courant

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

### **3.5 Flicker (Scintillement)**

Le flicker est un phénomène visuel qui résulte des variations rapides de la tension causées par la fluctuation de la puissance produite par les panneaux photovoltaïques. Le scintillement se manifeste par des variations perceptibles de l'intensité lumineuse des lampes.

Modélisation du flicker :

Le flicker peut être quantifié à l'aide de l'indice de flicker Pst, qui mesure la variation de la tension à une fréquence rapide (typiquement entre 0,1 Hz et 30 Hz). L'indice de flicker est calculé comme suit :

$$Pst = \sqrt{(1/N \sum_{i=1}^N ((V_{i+1} - V_i) / V_{moye})^2)}$$

où :

- $V_i$  est la tension instantanée à l'instant  $i$ ,
- $V_{moye}$  est la tension moyenne du réseau.

Le flicker est causé par des fluctuations rapides dans la production d'énergie photovoltaïque dues à des variations de l'ensoleillement. Par exemple, un nuage passant peut rapidement réduire l'irradiance et la production d'énergie, provoquant des oscillations de la tension.

### **3.6 Perturbations dues à la connexion/déconnexion des Sources Photovoltaïques**

L'intégration de panneaux photovoltaïques dans un réseau peut entraîner des perturbations transitoires lors de leur connexion ou déconnexion.

Modélisation des transitoires :

Lors de la connexion d'un système photovoltaïque au réseau, le courant injecté peut varier rapidement. Les transitoires associés peuvent être modélisés à l'aide des équations différentielles suivantes, qui gouvernent le courant et la tension dans un circuit RLC :

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = V(t)$$

où :

- $L$  est l'inductance du réseau,
- $R$  est la résistance,
- $i(t)$  est le courant injecté dans le réseau,
- $V(t)$  est la tension appliquée.

Les transitoires peuvent provoquer des pics de courant et de tension qui perturbent le réseau. De tels phénomènes transitoires peuvent affecter les autres équipements du réseau, notamment les moteurs et les transformateurs.

### **3.7 Impédance de Réseau Variable**

Les panneaux photovoltaïques sont souvent installés de manière distribuée dans le réseau, ce qui modifie l'impédance du réseau et affecte la manière dont l'énergie est distribuée.

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

Modélisation de l'impédance du réseau :

L'impédance du réseau peut être modélisée par :

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$$

où :

- $R(\omega)$  est la résistance,
- $X(\omega)$  est la réactance (inductive ou capacitive) du réseau.

L'ajout de panneaux photovoltaïques dans le réseau peut modifier cette impédance en fonction de leur emplacement et de leur production d'énergie. Par exemple, lorsque la production solaire est élevée, l'impédance du réseau peut diminuer localement, entraînant des variations de la tension. Si la production solaire excède la demande locale, cela peut provoquer des surtensions.

### **3.8 Perte de Synchronisation**

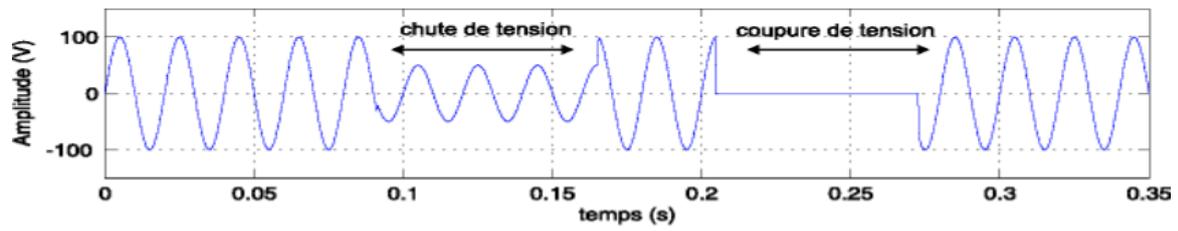
Bien que les systèmes photovoltaïques utilisent généralement des onduleurs pour injecter l'énergie dans le réseau à une fréquence synchronisée, des problèmes peuvent survenir si l'onduleur est mal configuré ou si des sources photovoltaïques sont déconnectées sans précaution.

### **3.9 Harmoniques et interharmoniques**

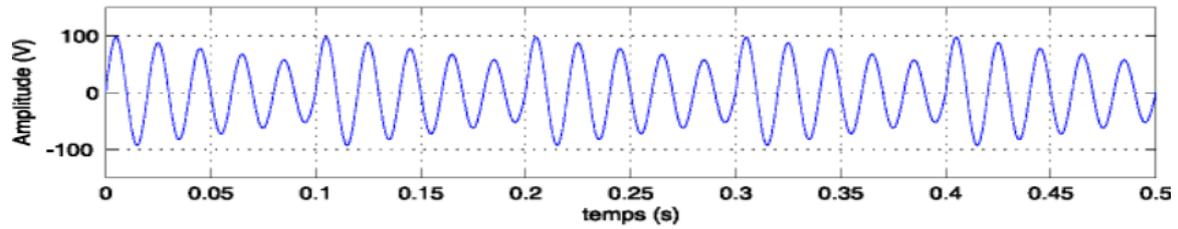
Les harmoniques sont des composantes sinusoïdales de fréquences multiples entières de celle de la fréquence fondamentale (50 Hz) qui se superposent à cette dernière. Par exemple, la figure 3.1(e) illustre la superposition d'une harmonique d'ordre 3 sur un courant de fréquence fondamentale à 50 Hz. Ces harmoniques proviennent principalement de l'utilisation croissante d'équipements électroniques de puissance, tels que les thyristors et les transistors.

Les interharmoniques, quant à elles, se superposent également à l'onde fondamentale, mais leurs fréquences ne sont pas des multiples entiers de celle du réseau. Leur présence, en constante augmentation, est principalement due à des dispositifs tels que les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements de commande électrique similaires.

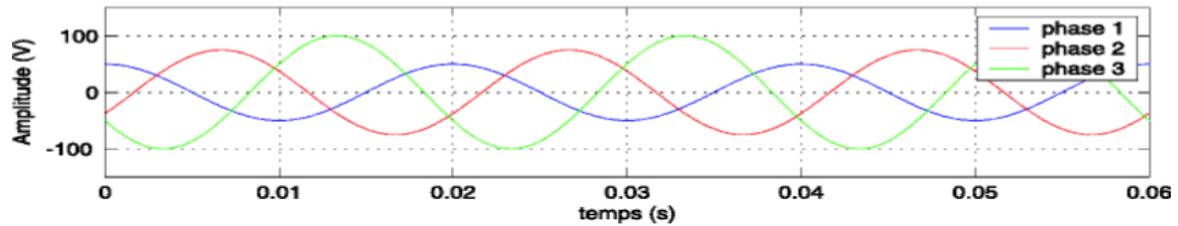
### Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire



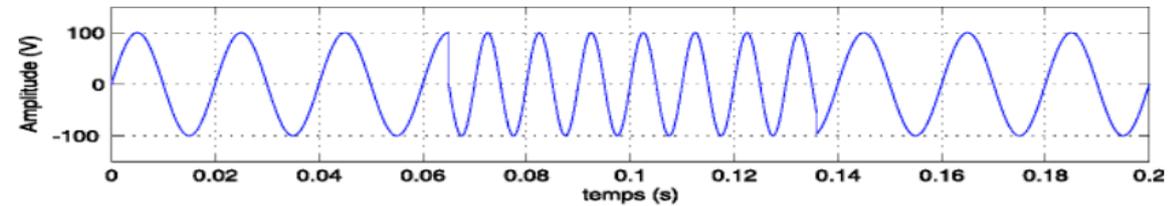
(a) Creux et coupures de tension.



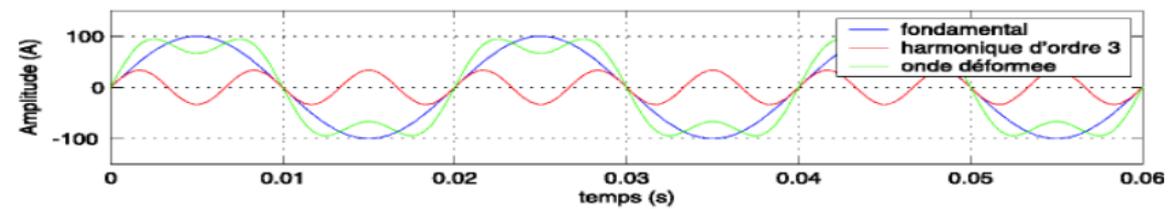
(b) Fluctuations de tension.



(c) Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.



(d) Variation de fréquence.



(e) Harmoniques.

Figure 3.4: les perturbations en tension

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

### **3.10 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire**

Le courant absorbé par une charge non linéaire, peut être décomposé en série de Fourier, son expression mathématique est de la forme

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2) + I_{3m} \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots + I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n)$$

ou d'une autre manière

$$y = f(\omega t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t) + b_1 \cos(\omega t) + a_2 \sin(2\omega t) + b_2 \cos(2\omega t) + a_3 \sin(3\omega t) + b_3 \cos(3\omega t) + \dots + a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) \quad 1.1$$

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) \quad 1.2$$

Le développement de l'équation 1.2 est appelé série de Fourier et lorsque l'on peut exprimer  $f(\omega t)$  (t) mathématiquement, on obtient les expressions suivantes:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t$$

Les équations 1.1 et 1.2 sont équivalentes en posant:

$$a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) = I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad 1.3$$

Cette égalité donne l'amplitude de l'harmonique de rang n

$$I_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Et son déphasage

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

$$a_n = I_{nm} \cos\phi_n$$

### *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

$$b_n = I_{mn} \sin\phi_n$$

Le courant de la charge non linéaire peut être exprimé selon l'équation 1.3 de la forme suivante:

$$ich(wt) = \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \sin(nwt) + b_n \cos(nwt)\}$$

Substituant l'équation 1.8 dans l'équation 1.9, on obtient

$$ich(wt) = \sum_{n=1}^{\infty} \{I_{nm} \cos\phi_n \sin(nwt) + I_{nm} \sin\phi_n \cos(nwt)\}$$

D'après les expressions ci-dessus, le courant de la charge non linéaire est donné par :

$$ich(wt) = I_{nm} \sin(nwt + \phi_n)$$

Ce courant peut être subdivisé en une composante fondamentale et des composantes harmoniques:

$$ich(wt) = I_{1m} \sin(wt + \phi_1) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{nm} \sin(nwt + \phi_n)$$

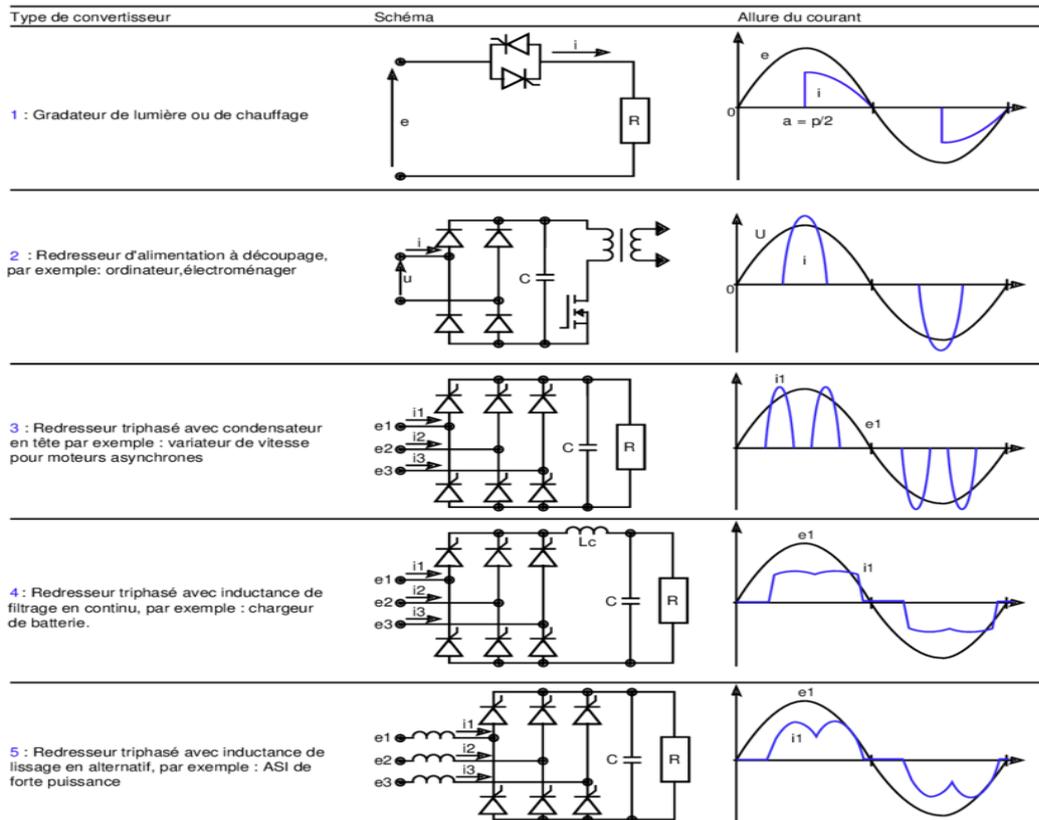
Figure : courant absorbe par une charge non linéaire

$$i_s(wt) = i_{s1}(t) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} i_{sn}(t)$$

$$f_n = nf$$

$$i_s(wt) = \sqrt{2} I_{S1} \sin(wt + \phi_1) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} \sqrt{2} I_{Sn} \sin(nwt + \phi_n)$$

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire



**Figure 3.5 :** courant absorbé par une charge non linéaire

et la tension de la source est donné par:

$$V_s(wt) = \sqrt{2}V \sin (wt)$$

### 3.10.1 Taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distorsion THD)

La pollution harmonique peut être évaluée par le taux de distorsion harmonique, le taux de distorsion harmonique THDi du courant de source peut être calculé de la manière suivante :

$$THD_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} (I_{sn})^2}}{I_1} .100$$

D'après l'équation 1.16, le THD mesure le rapport entre les harmoniques et le fondamental. Le courant efficace de la source peut être calculé d'après la formule suivante

### Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

---

$$I_S = \sqrt{\left(\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_S^2(t) dt\right)}$$

$$I_S = \sqrt{I_{S1}^2 + \int_{n \neq 1}^{\infty} I_{Sn}^2}$$

La composante harmonique du courant de source instantané peut être obtenue d'après la formule suivante:

$$I_{h(wt)} = i_S(wt) - i_{s1}(wt) = \sum_{n \neq 1}^{\infty} i_{sn}(wt)$$

Et le courant efficace harmonique de la source est:

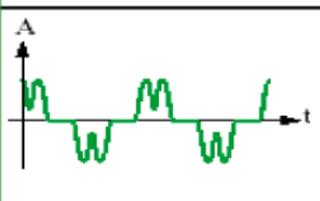
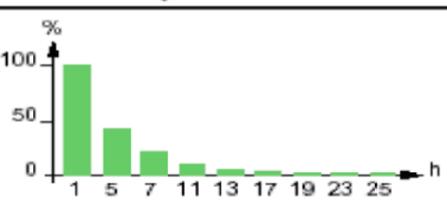
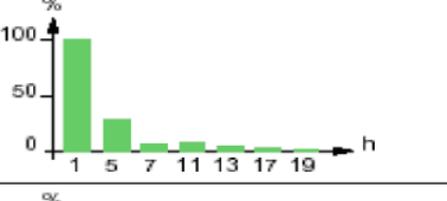
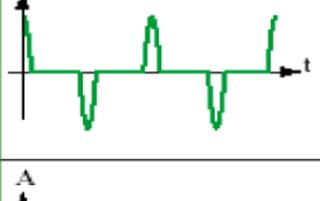
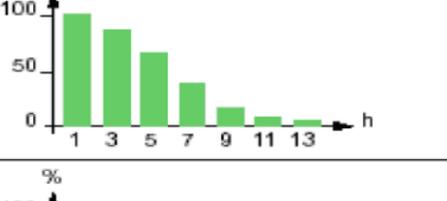
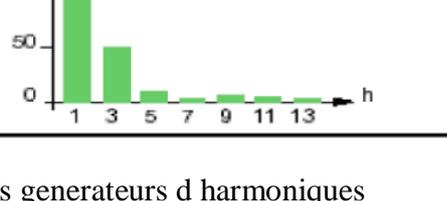
$$I_h = \sqrt{(I_S^2 - I_1^2)} = \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{Sn}^2}$$

Par conséquent le THDi est égale:

$$THD_i \% = \frac{\sqrt{I_S^2 - I_1^2}}{I_{S1}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{I_S^2}}{I_S} - 1 \cdot 100$$

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

Le THDi de quelques charges non linéaires est donné par le tableau .

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique Ordinateur			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

**Tableau3.1:** caracteristiques de quelques generateurs d harmoniques

Dans le cas général, pour mesurer la pollution harmonique dans un réseau électrique, on calcule le taux de distorsion harmonique en tension THD<sub>v</sub> car il permet également d'intégrer l'influence de l'impédance de court circuit. Plus l'impédance de court circuit est faible, moins le courant aura d'influence sur la tension.

$$THD_v \% = \sqrt{\frac{V_s^2}{V_{s1}^2} - 1} \cdot 100$$

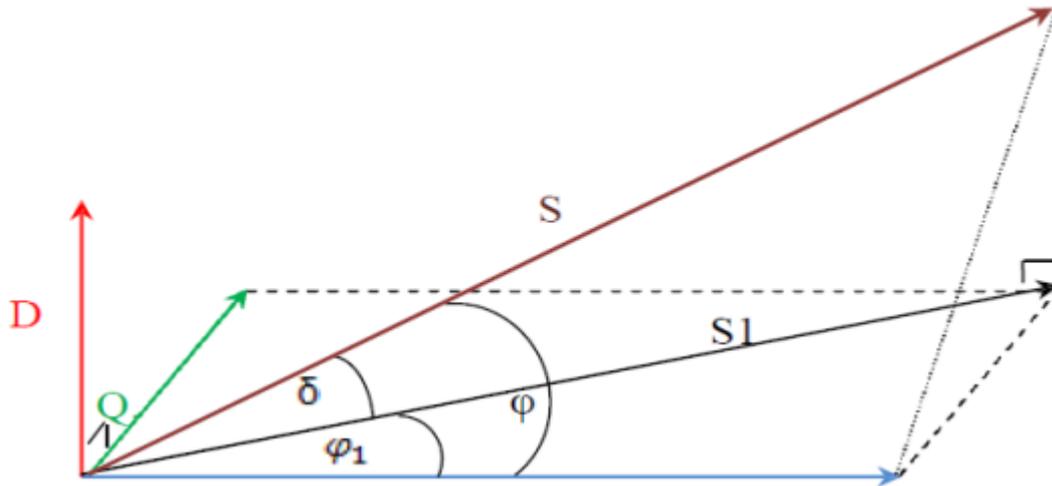
### 3.10.2 Facteur de puissance:

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) entre en considération. Elle est donnée par la relation:

### Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

$$D = V \cdot \sqrt{\int_{n \neq 1}^{\infty} I_{Sn}^2}$$



Le facteur de puissance est donc égale:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Avec

$$P = V \cdot I_{S1} \cos \phi_1$$

$$Q = V \cdot I_{S1} \sin \phi_1$$

On peut aussi calculer le facteur de puissance de la manière suivante:

$$FP = \frac{V \cdot I_{S1}}{V \cdot I_S} = \frac{I_{S1}}{I_S} \cos \phi_1$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

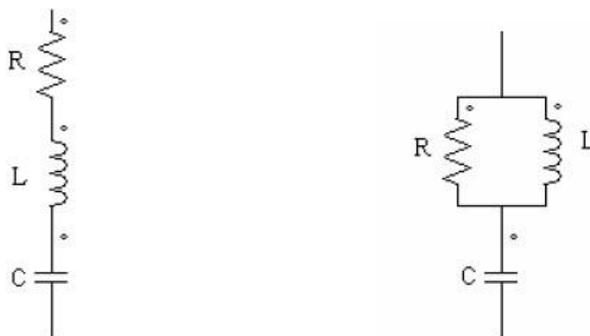
### **3.10.3 Solutions traditionnelles :**

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.

L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut



**Figure 3.7 :** a) Filtre passif résonnant

b) Filtre passif amorti

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

### 3.10.4 Solutions modernes :

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux-électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques.

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que les avoir- faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

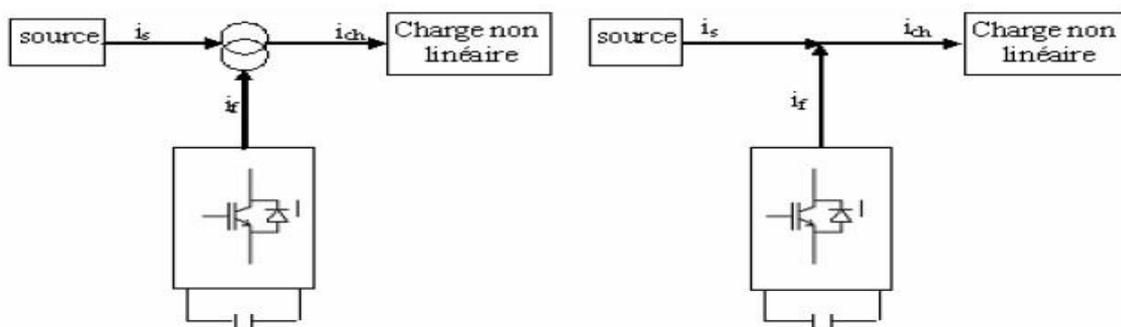


Figure3.8 : a) filtre actif parallèle

b) filtre actif série

### 3.11 Normes

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000).

### 3.12 Simulation et résultats d'un system PV raccorde au réseau MT avec STATCOM et MPPT

Le système Photovoltaïque propose contient une centrale photovoltaïque, un hacheur survolteur (BOOST) avec commande MPPT de type incrémentation d'inductance, onduleur de tension DC-AC commande par MLI de type vectoriel, un filtre RL et STATCOM et un réseau électrique MT

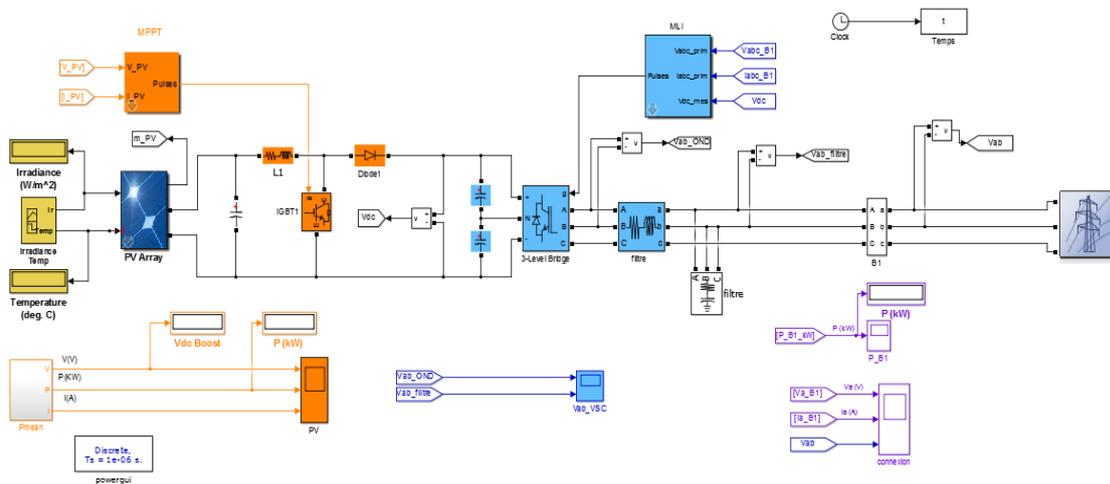
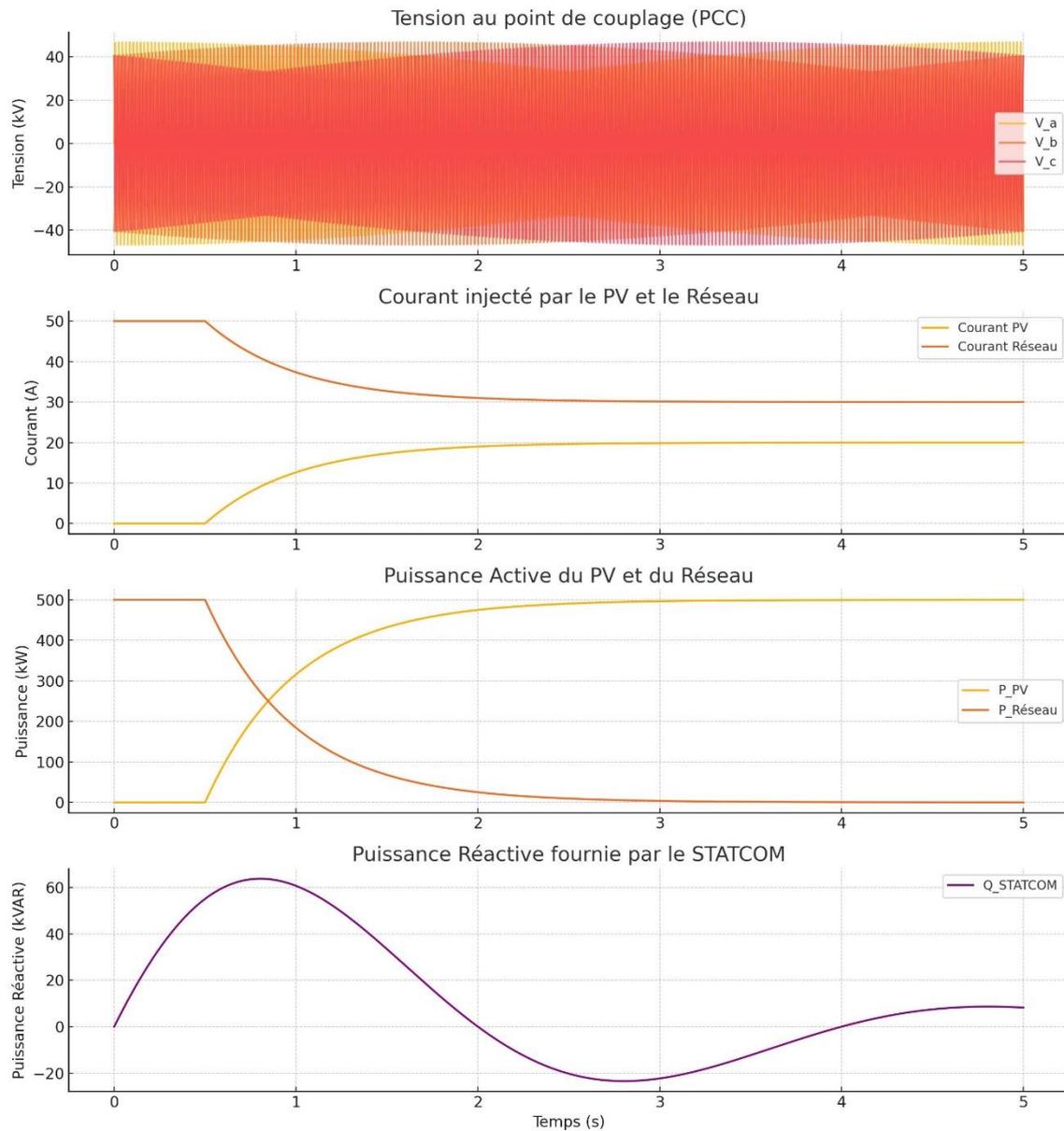


Figure 3.9 : model Simulink d'une centrale système Photovoltaïque connecté au réseau MT

### Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

Courbes de Tension, Courant et Puissance pour un Système PV + STATCOM sur un Réseau 33kV



**Figure3.10** : Courbes de tension, Courant et puissance pour un système PV + STATCOM sur un réseau 33Kv

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

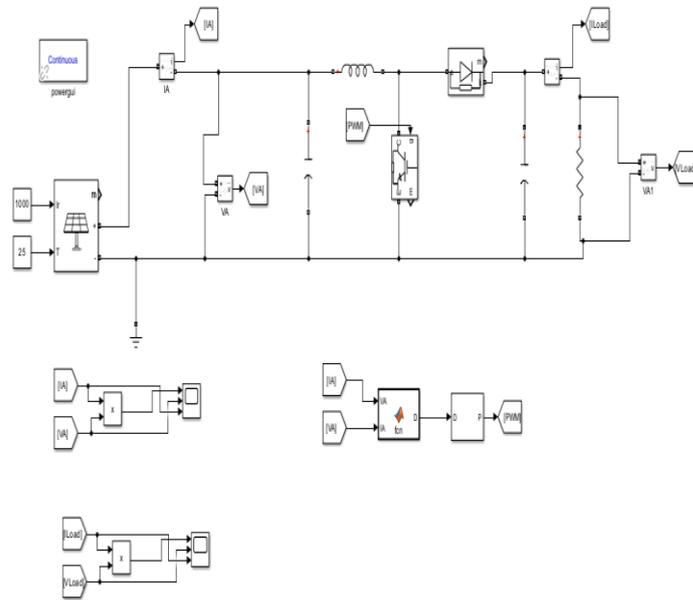


Figure3.11 : model Simulink système PV connecte au charge

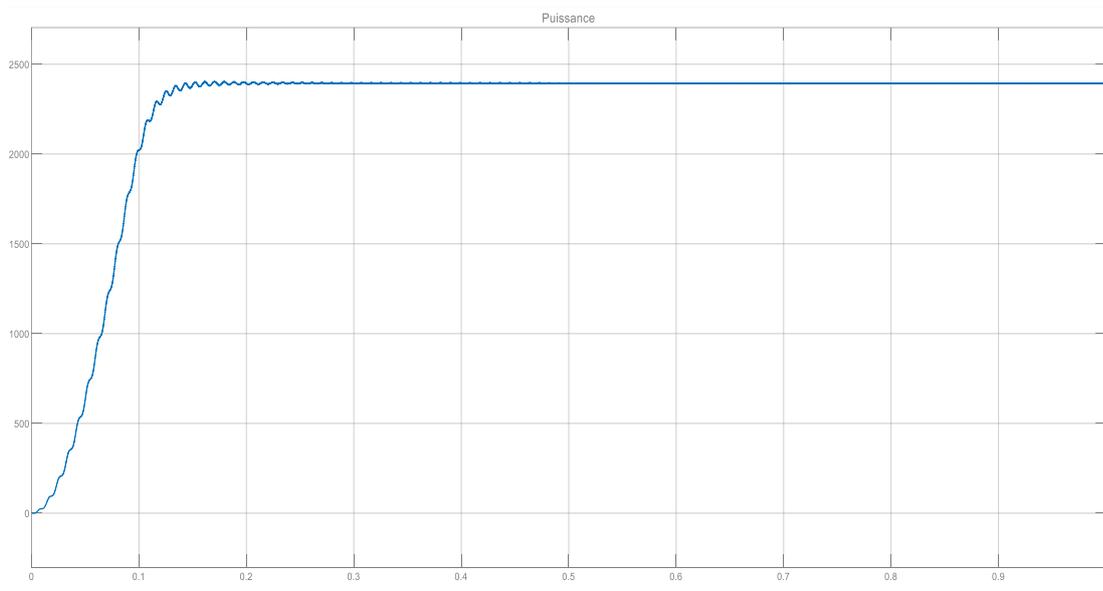
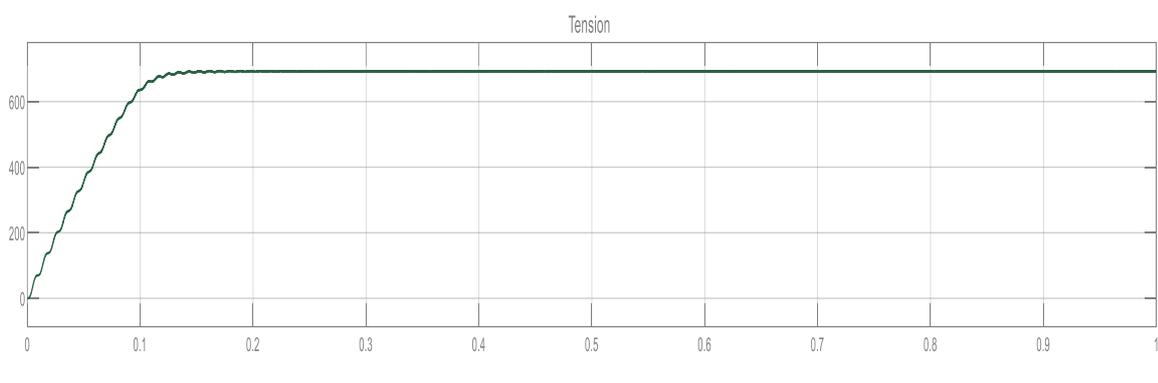
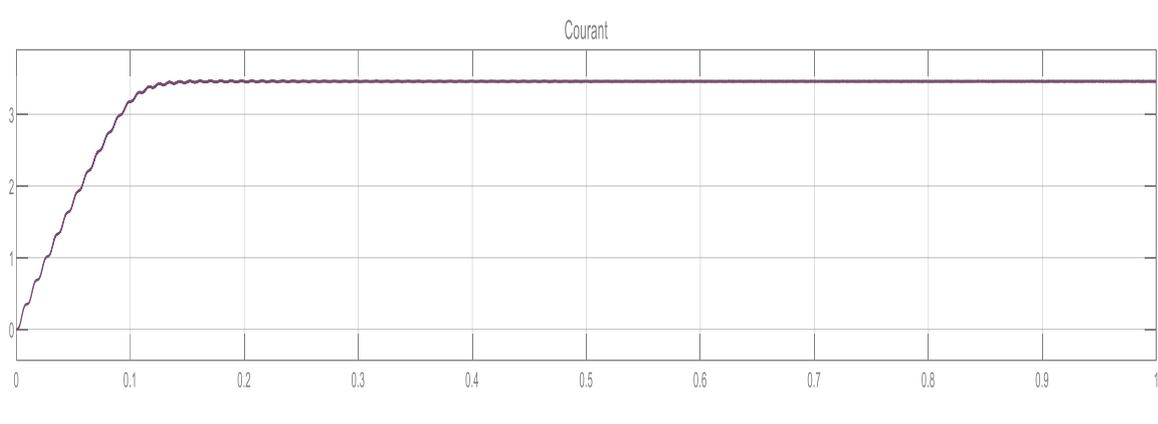


Figure3.12: résultat puissance au sortie de charge

## Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire



**Figure3.13:** résultat tension au sortie de charge



**Figure3.14:** résultat courant au sortie de charge

### 3.13 Rôle du contrôleur MPPT et du STATCOM dans un système PV connecté au réseau

#### 3.13.1. Rôle du contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Le contrôleur MPPT est chargé d'extraire le maximum de puissance possible des panneaux solaires, quelles que soient les conditions d'ensoleillement et de température.

- Fonctions principales :
- Suivi du point de puissance maximale : Les panneaux PV ont un point de fonctionnement optimal où ils délivrent leur puissance maximale. Le MPPT adapte la tension et le courant pour atteindre ce point.
- Optimisation du rendement : En suivant constamment le point de puissance maximale, il améliore l'efficacité du système PV.

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

- Adaptabilité : Le MPPT réagit aux variations rapides de l'irradiance solaire (nuages, ombres, etc.).

- Methods utilisées :

- Perturb and Observe (P&O)

### **3.13.2. Rôle du STATCOM (Static Synchronous Compensator)**

Le STATCOM est un dispositif de compensation dynamique utilisé dans les systèmes d'alimentation en courant alternatif, en particulier dans les réseaux électriques incluant des sources d'énergie renouvelable comme le solaire.

- Fonctions principaux :

- Régulation de la tension : Il injecte ou absorbe de la puissance réactive pour stabiliser la tension du réseau.

- Amélioration de la qualité de l'énergie : Il corrige les déséquilibres de tension, réduit les fluctuations rapides (flicker), et compense les creux de tension.

- Support pendant les perturbations : Il aide à maintenir la stabilité du réseau pendant les variations de charge ou les défauts temporaires.

- Réduction du facteur de puissance inductif ou capacitif : En ajustant dynamiquement le flux de puissance réactive.

Importance dans un système PV : Les systèmes PV n'injectent pas naturellement de puissance réactive. Le STATCOM compense ce manque et assure l'intégration harmonieuse au réseau, surtout en présence de forte pénétration solaire.

#### Interaction entre MPPT et STATCOM

Le MPPT maximise la production des panneaux PV (partie DC du système), tandis que le STATCOM stabilise la connexion AC au réseau (qualité et stabilité de l'énergie injectée). Ils travaillent en complément pour garantir performance et stabilité du système PV.

### **3.14 Modélisation d'un réseau :**

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $\frac{2\pi}{3}$ , et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que  $(V_a, V_b, V_c)$  est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(U_{ab}, U_{bc}, U_{ca})$ .

On a :

Des tensions entre une phase et la terre, dites encore **tensions simples**  $V_i(t)$

### Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

---

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

Des tensions entre deux phases, dites encore **tensions composées** :  $U_{ij}(t)$   $\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases}$

Relations pour un système triphasé équilibré :

$$\begin{aligned} V_m &= \sqrt{2}V_{eff} \\ U_m &= \sqrt{3}V_m \\ U_{eff} &= \sqrt{3}V_{eff} \end{aligned}$$

### Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire

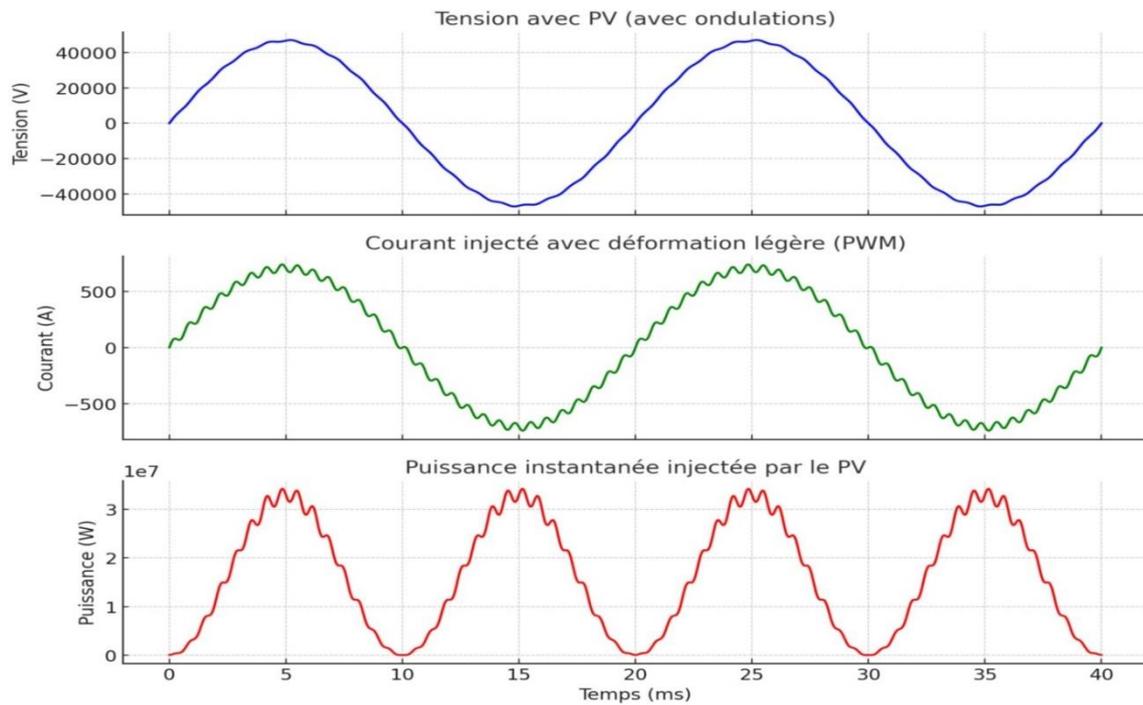


Figure 3.15: résultats tension, courant et puissance après l'intégration de source PV

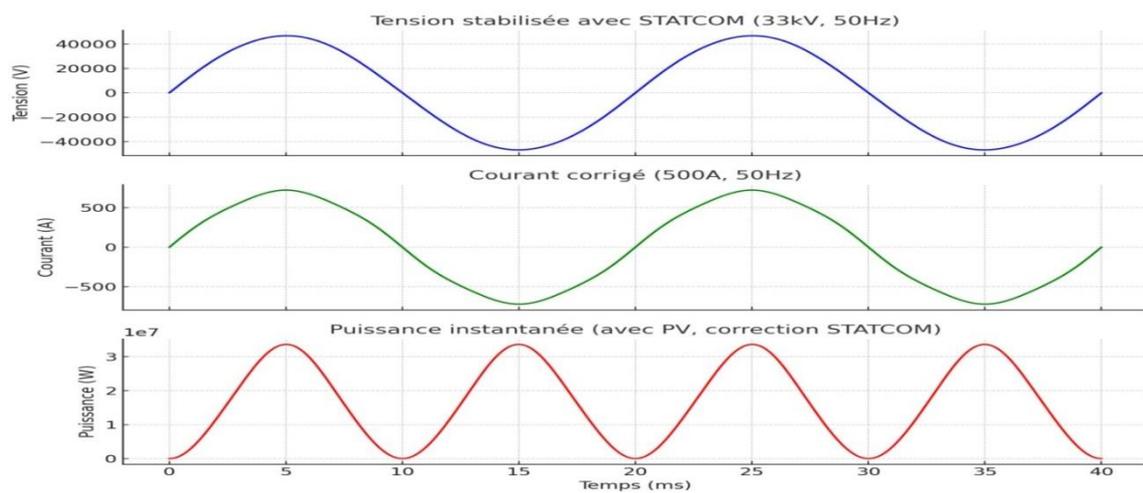


Figure3.16 : résultats tension, courant et puissance après correction STATCOM

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

### **3.12 Conclusion :**

En conclusion, la croissance démographique mondiale, conjuguée à l'essor des activités industrielles et technologiques, exerce une pression sans précédent sur la production et la consommation d'énergie. Le modèle énergétique actuellement dominant, reposant majoritairement sur les ressources fossiles telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel ou encore l'uranium, montre aujourd'hui ses limites tant sur le plan environnemental que sur celui de la durabilité. En effet, outre les émissions massives de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique, ce modèle souffre de l'épuisement progressif des ressources, de coûts croissants liés à l'exploitation, et des risques environnementaux majeurs, notamment dans le cas de l'énergie nucléaire.

Face à cette situation critique, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative stratégique, capable de répondre à la double exigence de sécurité énergétique et de préservation de l'environnement. Parmi elles, l'énergie solaire, du fait de son abondance, de sa disponibilité et de son faible impact environnemental, occupe une place centrale dans les scénarios de transition énergétique. Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les énergies renouvelables soulèvent des problématiques complexes en matière d'intermittence, de stabilité du réseau, de gestion de la variabilité de la production, et d'adaptation des infrastructures électriques existantes.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif est d'étudier les implications techniques de l'intégration de l'énergie photovoltaïque au sein des réseaux électriques, en particulier les réseaux de moyenne tension. Pour cela, une approche méthodique et structurée est adoptée. Le premier chapitre est consacré à une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables, avec un accent particulier sur le fonctionnement, les caractéristiques et les performances des systèmes photovoltaïques. Le second chapitre s'attache à poser les bases de compréhension des réseaux électriques, en décrivant leur architecture, leur fonctionnement, ainsi que les outils de modélisation nécessaires à leur analyse. Enfin, le troisième chapitre s'intéresse spécifiquement à l'intégration des systèmes photovoltaïques connectés au réseau, à travers des études de simulation visant à évaluer leur comportement, leur efficacité et leur impact sur le réseau de distribution.

L'ensemble de ce travail vise à fournir une compréhension approfondie des enjeux liés à la transition énergétique, en mettant en évidence les atouts des énergies renouvelables tout en soulignant les défis techniques associés à leur déploiement à grande échelle. Plus particulièrement, il ambitionne de démontrer que, moyennant des choix technologiques adaptés et une planification rigoureuse, l'énergie photovoltaïque peut jouer un rôle majeur dans la construction d'un système électrique plus durable, plus résilient et mieux adapté aux exigences environnementales du XXI<sup>e</sup> siècle.

## *Chapitre 3 : Perturbation dues à l'intégration de source d'énergie solaire*

---

### **Bibliographies**

[1] H. Saadat, « Power System Analysis », 3rd Edition. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering, 1999

[2] *D.Ould Abdeslam*“ Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ”, thèse de doctorat, Université de Haute Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques, 2005.

[3] *M.ShafieeKhoor*“Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques”, Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006

[4] *B. KORICH*“Commande D'un Convertisseur AC/DC Triphasé à quatre bras En Régime Déséquilibré ”, Mémoire de magister, Ecole Militaire Poly technique (EMP), Alger, 2009

[5] *A. BOULAHIA*“Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique”, Mémoire de Magister en électrotechnique Université.de Constantine Avril 2009

[6] <http://www.futura-sciences.com/>

[7] <http://jeunes.edf.com/>

[8] <http://fr.wikipedia.org/>

[9] Nichiporuk Oleksiy, Simulation fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigués, Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005