

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



Université 20 Août 1955-Skikda



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **Master**

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème :

Evaluation de la Distorsion Harmonique dans les Réseaux de Distribution Munis de Systèmes Photovoltaïques

Par :

Ziadi Chibane Amani

Kebir Aya

Soutenu le : 28/06/2026

Devant le Jury composé de :

Président	BOUKADOUM Ahcene	Prof	Université 20 Août 1955-Skikda
Encadreur	BOUDEBBOUZ Omar	Prof	Université 20 Août 1955-Skikda
Examineur	OUERGLI Abderahmane	MAA	Université 20 Août 1955-Skikda

Année universitaire : 2025/ 2026



Remerciements

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

Nous remercions en premier lieu notre encadrant, monsieur BOUDEBBOUZ Omar pour son aide, ses conseils précieux et son suivi tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants du département pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leurs conseils tout au long de notre parcours universitaire.

Un grand remerciement est également adressé aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour le temps qu'ils ont bien consacré à ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles et nos amies et nos collègues pour leur soutien moral et leurs encouragements constants.



Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, qui sont la raison de ma réussite, à mon père Ahcene qui m'a toujours soutenue, à ma mère Souad qui m'a entourée d'amour et d'encouragements.

À ma famille pour leur soutien et leur affection.

À mes enseignants pour leurs conseils et leur aide.

À mes collègues et à mes amies, surtout Sara et Feriel, merci pour votre présence et votre soutien.

À ma collègue Amani, qui a été une excellente amie et une formidable partenaire tout au long de ce projet.

Et à toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin.

K.Aya





Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, qui sont la raison de ma réussite, à mon père Ammar qui m'a toujours soutenue, à ma mère Zohra qui m'a entourée d'amour et d'encouragements.

À mon frère Ayoub et mes sœurs Chourouk, Manar et Yousra, mon soutien de toujours, pour leur amour et leur présence constant à mes côtés.

À ma famille pour leur soutien et leur affection.

À mes enseignants pour leurs conseils et leur aide.

À mes collègues et à mes amies, merci pour votre présence et votre soutien.

À ma collègue Aya, qui a été une excellente amie et une formidable partenaire tout au long de ce projet.

Et à toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin.



Z.Ch. Amani

Résumé

L'intégration de la production d'énergie solaire photovoltaïque (PV) influe directement sur la qualité de la tension au sein des réseaux de distribution modernes (Smart Grids).

Dans la partie théorique, un accent particulier est mis sur les structures classiques et modernes des réseaux de distribution. Les technologies des systèmes solaires notamment leurs générations harmoniques et leur réglementation selon les normes internationales (IEEE/CEI) ont été abordées.

Notre méthodologie repose sur la recherche des profils de tensions vraies nodales en combinant la présence des systèmes PV avec les charges non linéaires dans une structure radiale. Elle est composée de trois sections principales à savoir : la recherche des tensions fondamentales grâce au modèle d'écoulement de puissance (backward/forward), la recherche des tensions harmoniques grâce au modèle de propagation harmoniques et finalement la recherche de l'optimal du TDH selon un balayage d'emplacement des PV et des charges non linéaires sur tous les nœuds du réseau excepté le balancier.

Pour appliquer cette méthodologie, une simulation a été réalisée sur MATLAB en utilisant un réseau électrique radial de 10 nœuds.

Les résultats des simulations montrent que l'injection de puissance active par le générateur solaire en bout de ligne (Nœud 10) permet de soutenir efficacement la tension et de corriger les chutes de tension. Cependant, une production excessive dépassant les besoins du réseau entraîne des effets inverses, tels que l'inversion du flux de puissance et des surtensions critiques et dangereuses.

D'un autre côté, il apparaît que la présence des éléments non linéaires augmente la distorsion harmonique totale (TDH). Ce taux atteint son maximum aux extrémités du réseau pour atteindre une valeur maximale de 7,18 %.

Enfin, la QEE au sein du réseau repose sur une optimisation précise permettant de déterminer la taille adéquate et l'emplacement stratégique du générateur PV. Il est fortement conseillé de le placer à proximité des appareils perturbateurs afin de garantir l'efficacité énergétique, de réduire le TDH et de maintenir la stabilité globale du réseau.

Mots-clés : Énergie solaire photovoltaïque (PV), Qualité de l'énergie électrique (QEE), Réseaux de distribution modernes (Smart Grids), Distorsion harmonique (TDH), Charges non linéaires, Écoulement de puissance (Backward-ForwardSweep).

Abstract

The integration of solar photovoltaic (PV) power generation directly influences voltage quality within modern distribution networks (Smart Grids).

In the theoretical section, particular emphasis is placed on the conventional and modern structures of distribution networks. Solar system technologies, notably their harmonic generations and their regulation according to international standards (IEEE/IEC), have been addressed.

Our methodology is based on the search for true nodal voltage profiles by combining the presence of PV systems with non-linear loads in a radial structure. It is composed of three main sections, namely: the search for fundamental voltages using the power flow model (backward/forward), the search for harmonic voltages using the harmonic propagation model, and finally, the search for the optimal THD based on a location sweep of PV and non linear loads across all network nodes except for the slack bus.

To apply this methodology, a simulation was carried out on MATLAB using a 10-node radial electrical network.

The simulation results show that the injection of active power by the solar generator at the end of the line (Node 10) effectively supports the voltage and corrects voltage drops. However, excessive production exceeding the network requirements leads to adverse effects, such as power flow reversal and critical, dangerous over voltages.

On the other hand, it appears that the presence of non-linear elements increases the total harmonic distortion (THD). This rate reaches its maximum at the extremities of the network, reaching a maximum value of 7.18%.

Finally, power quality (PQ) within the network relies on precise optimization to determine the appropriate size and strategic location of the PV generator. It is highly recommended to place it close to disturbing devices in order to ensure energy efficiency, reduce THD, and maintain the overall stability of the network.

Keywords: Solar photovoltaic (PV) energy, Power Quality (PQ), Modern distribution networks (Smart Grids), Total Harmonic Distortion (THD), Non-linear loads, Power flow (Backward-Forward Sweep).

ملخص

إن دمج إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) يؤثر مباشرة على جودة الجهد داخل شبكات التوزيع الحديثة (Smart grid).

في الجزء النظري، تم التركيز بشكل خاص على الهياكل الكلاسيكية والحديثة لشبكات التوزيع. كما تم التطرق إلى تقنيات الأنظمة الشمسية، خاصة التوافقيات التي تولدها، وتنظيمها حسب المعايير الدولية (IEEE/IEC).

منهجيتنا تركز على البحث عن ملفات الجهود الحقيقية العقدية عن طريق دمج وجود الأنظمة الكهروضوئية (PV) مع الأحمال غير الخطية في بنية شعاعية. وهي مكونة من ثلاثة أقسام رئيسية لمعرفة: البحث عن الجهود الأساسية بفضل نموذج تدفق القدرة (Backward/Forward)، البحث عن الجهود التوافقية بفضل نموذج الانتشار التوافقي، وأخيرا البحث عن القيمة المثلى للتشوه التوافقي حسب مسح للموقع لي PV و الحمولات غير الخطية على كل عقد الشبكة باستثناء عقدة المصدر.

لتطبيق هذه المنهجية أجريت محاكاة باستخدام برنامج MATLAB على شبكة كهربائية شعاعية مكونة من 10 عقد.

نتائج المحاكاة تبين أن حقن القدرة الفعالة بواسطة المولد الشمسي في نهاية الخط يسمح بدعم الجهد بفعالية وبتصحيح هبوط الجهد. ومع ذلك إنتاج مفرط يتجاوز احتياجات الشبكة يتسبب في تأثيرات عكسية مثل انعكاس تدفق القدرة و حدوث ارتفاعات خطيرة في الجهد.

من جانب آخر يظهر أن وجود العناصر غير الخطية يزيد من التشوه التوافقي الكلي (TDH) وتبلغ هذه النسبة قيمتها القصوى عند أطراف الشبكة لتصل إلى 7.18 بالمائة.

وأخيرا، فإن جودة الطاقة الكهربائية داخل الشبكة تركز على تحسين دقيق يسمح بتحديد الحجم المناسب والموقع الاستراتيجي للمولد الكهروضوئي. من المنصوح به بشدة وضعه بالقرب من الأجهزة المحدثة للاضطرابات من أجل ضمان الكفاءة الطاقوية وتقليل التشوه التوافقي الكلي (TDH) والحفاظ على الاستقرار العام للشبكة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية، (PV) جودة الطاقة الكهربائية، (QEE) شبكات التوزيع الحديثة (Smart Grids)، التشوه توافقي (TDH)، الأحمال غير الخطية، تدفق القدرة (Backward/Forward).

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 2

Chapitre 1 : Réseaux de distribution (classiques et modernes)

1.1. Introduction..... 5

1.2. Généralité sur les réseaux de distribution..... 5

1.2.1. Définition des réseaux de distribution.....5

1.2.2. Le rôle des réseaux de distribution..... 5

1.2.3. Classification des réseaux de distribution..... 6

A. Selon le niveau de tension.....6

B. Selon la structure du réseau (topologie).....6

1.3. Dynamique d'évolution des réseaux électriques..... 8

1.3.1. Configuration traditionnelle des réseaux électriques8

1.3.2. Les réseaux électriques intelligents (Smart Grids)..... 9

A. Définition du Smart Grid..... 9

B. Les motivations des réseaux intelligents..... 9

C. Les piliers de cette évolution technologique incluent..... 9

D. Caractéristiques du Smart grid..... 10

E. Améliorations sur la chaîne de valeur..... 10

F. Avantages et Limites..... 10

G. Parties prenantes..... 10

H. Historique et Évolution.....11

1.4. Ecoulement de puissances en présence/absence des systèmes PV.....11

1.5. Conclusion..... 13

Chapitre 2 : Chaîne de production à base de système photovoltaïque

2.1. Introduction..... 14

Table des matières

2.2. Les ressources d'énergie renouvelable.....	14
2.2.1. Définition d'énergie renouvelable.....	15
2.3. L'énergie solaire.....	14
2.3.1. Les types d'énergie solaire.....	16
A. L'énergie solaire photovoltaïque.....	16
B. L'énergie solaire thermique.....	16
C. L'énergie solaire thermodynamique.....	16
2.4. Le Rayonnement Solaire.....	17
2.4.1. Les types de rayonnement solaire.....	17
A. Rayonnement direct	17
B. Rayonnement diffusé.....	17
C. Rayonnement réfléchi.....	17
D. Rayonnement global.....	17
2.4.2. Spectre solaire.....	18
2.5. Le module photovoltaïque.....	18
2.5.1. Caractéristiques du module photovoltaïque.....	19
2.6. Description des éléments d'un système photovoltaïque.....	19
2.6.1. Historique.....	19
2.6.2. Cellule solaire photovoltaïque.....	20
A. Constitution de la cellule photovoltaïque.....	20
B. Les types de cellule photovoltaïque.....	20
C. Principe de fonctionnement d'une cellule.....	22
2.6.3 L'effet photovoltaïque.....	22
2.6.4 Générateur PV.....	23
2.7. Système de Régulation.....	23
2.7.1. Régulateur de décharge.....	24
2.7.2. Régulateur de charge.....	24
2.8. Système de stockage	25
2.9. L'influence de la température et de l'éclairement.....	25
2.9.1. Influence de température.....	25
2.9.2. L'influence de l'éclairement.....	26

Table des matières

2.9.3. Influence de la résistance série.....	28
2.9.4. Influence de la résistance shunt	28
2.10. Les composantes d'une centrale photovoltaïque.....	29
2.10.1. Les panneaux solaires (capteurs).....	30
2.10.2 Les types de panneaux photovoltaïques.....	31
A. Les panneaux orientables.....	31
B. Les panneaux fixes.....	31
C. Les panneaux mobiles (Le suiveur solaire)	31
2.11. Système PV	31
2.11.1. Les types des systèmes PV	32
A. Système PV autonome	32
B. Le système PV connecté au réseau de distribution	32
C. Les systèmes hybrides (Les systèmes hybrides)	32
2.12. Les convertisseurs.....	33
2.12.1. Les convertisseurs DC/DC.....	33
2.12.2 Le convertisseur Boost.....	33
2.12.3. Le convertisseur Buck	34
2.12.4. MPPT (Maximum Power Point Tracking)	34
2.12.5. Le convertisseur DC-AC (Onduleur)	35
A. Principes de fonctionnement.....	35
B. Caractéristiques d'un onduleur pour système PV.....	35
C. Architecture des onduleurs.....	36
C.1.Onduleur central	36
C.2. Onduleur de chaîne (String).....	36
C.3.Onduleur multi-chaîne (Multi-string)	37
2.13. Classification des centrales PV raccordées au réseau (CPCR)	37
2.14. Coût d'installation d'une centrale PV	37
2.15. Avantages et inconvénients d'une installation PV	38
2.15.1. Avantages	38
2.15.2. Inconvénients.....	38
2.16. Conclusion	39

Chapitre 3 : Qualité d'énergie électrique et les réseaux de distribution modernes

3.1. Introduction.....	40
3.2. Définition générale de la QEE.....	40
3.3. Définitions alternatives.....	40
3.4. Phénomènes de la QEE.....	41
3.4.1. Asymétrie (déséquilibre).....	41
3.4.2. Distorsion harmonique.....	41
3.4.2Taux de distorsion harmonique (TDH)	41
A. Concept nom linière.....	41
B. Sources harmoniques	42
3.4.3. Fluctuations de tension.....	42
3.4.4. Phénomène de papillotement (Flicker).....	42
3.4.5. Variation de la fréquence.....	42
3.4.6. Creux de tension.....	42
3.4.7. Surtensions.....	42
3.5. Classification des phénomènes de la QEE.....	43
3.6. Dégradation de l'onde de tension et de courant.....	43
3.6.1. Qualité de la tension.....	44
A. Amplitude.....	44
B. Fréquence.....	44
C. Forme d'onde.....	44
D. Symétrie	44
3.6.2. Qualité de courant.....	45
3.7. Caractéristiques des déformations de l'onde.....	46
3.7.1. Caractérisation du contenu harmonique.....	46
A. Série trigonométrique.....	45
B. Propriétés de symétrie.....	46
C. Forme sinusoïdale (polaire).....	46
D. Valeur efficace d'une grandeur déformée.....	46
E. Représentation spectrale.....	46
3.7.2. Taux de distorsion harmonique individuel et global TDH.....	46
3.7.3. Analyse cinétique en présence des harmoniques.....	47
3.8. Normalisation de la QEE.....	47
3.9. L'onduleur photovoltaïque.....	49
3.10. Charge non linéaire.....	50
3.11. Le réseau classique et la nature des charges.....	52

Table des matières

3.12. Le réseau moderne et l'intégration du PV.....	53
3.13. Étude de l'influence des harmoniques sur la qualité de l'énergie électrique.....	53
3.14. Conclusion.....	55

Chapitre 4 : Simulation et Validation sur un Réseau de distribution radial

4.1. Introduction.....	57
4.2. Réseau d'étude.....	57
4.3. Données de réseau.....	57
4.4. Partie 1 : Etude de l'influence du générateur photovoltaïque sur le profil de tension.....	59
4.4.1. Méthode d'écoulement de puissance (Backward-ForwardSweep).....	59
4.4.2. Résultats de simulation.....	60
4.4.3. Interprétation des résultats.....	66
4.5. Partie 2 : Analyse harmonique du réseau.....	66
4.5.1. Méthodologie d'analyse harmonique.....	66
4.5.2. Résultats de simulation.....	67
4.5.3. Interprétation des résultats.....	69
4.6. Partie 3 : Optimisation de l'intégration photovoltaïque.....	70
4.6.1. Principe de l'optimisation.....	70
4.6.2. Résultats de l'optimisation.....	71
4.6.3. Interprétation des résultats.....	73
4.7. Conclusion.....	74
Conclusion générale Et Perspectives.....	75
Références.....	77

Liste des Figures

Figure1.1 : illustration d'un réseau radial.....	7
Figure1.2 : illustration d'un réseau bouclé.	7
Figure1.3 : illustration d'un réseau maillé.	8
Figure1.4 : Ecoulement de puissance en absence des systèmes PV.	11
Figure1.5 : Ecoulement de puissances en présence des systèmes PV.	12
Figure1.6 : Inversion du flux de puissance en présence de forte production PV.	12
Figure2.1 : Les cinq grands types d'énergie renouvelables.	14
Figure2.2 : Les énergies renouvelables.	15
Figure2.3 : Energie solaire.	16
Figure2.4 : Les types de rayonnement solaire reçu au sol.	18
Figure2.5 : Constitution du module photovoltaïque.	19
Figure2.6 : Cellule monocristalline.	21
Figure2.7 : cellule poly cristalline.	21
Figure2.8 : cellule amorphe.	22
Figure2.9 : La jonction PN.	22
Figure2.10 : Régulateur PWM.	24
Figure2.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température...26	26
Figure2.12 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.26	26
Figure2.13 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température.26	26
Figure2.14 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....27	27
Figure2.15 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement...27	27
Figure2.16 : Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement..27	27
Figure2.17 : Influence de résistance série sur la caractéristique courant-tension.....28	28
Figure2.18 : Influence de résistance série sur la caractéristique puissance-tension.....28	28
Figure2.19 : Influence de résistance parallèle sur la caractéristique courant-tension.....29	29
Figure2.20 : Influence de résistance parallèle sur la caractéristique puissance-tension.....29	29
Figure2.21 : Schéma général d'une installation photovoltaïque.....29	29
Figure2.22 : Panneau solaire.....30	30
Figure2.23 : Boite de dérivation.....30	30

Liste des Figures

Figure2.24 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome.....	32
Figure2.25 : Système hybride.....	33
Figure2.26 : Chaîne de conversion PV raccordée au réseau.....	33
Figure2.27 : Le convertisseur boost.....	34
Figure2.28 : Convertisseur Buck.....	34
Figure2.29 : Topologie onduleur central raccordée au réseau.....	36
Figure2.30 : Topologie onduleur chaîne raccordée au réseau.	36
Figure2.31 : Topologie onduleur multi-chaîne raccordée au réseau.....	37
Figure3.1 . La distorsion du courant causée par la résistance non-linéaire.....	42
Figure3.2 : Illustration des concepts de base de la normalisation en matière de qualité de l'électricité, à l'aide de statistiques temps/lieu concernant le système entier.....	48
Figure3.3 : Schéma fonctionnel de l'onduleur photovoltaïque.....	50
Figure3.4 : Classement des onduleurs photovoltaïques.....	50
Figure3.5 : Signaux relatifs à une charge non linéaire.....	51
Figure3.6 : Diagramme de puissances avec une charge non linéaire.....	52
Figure3.7 : Impact d'une charge non-linéaire sur le flux de puissance harmonique dans un réseau de distribution.....	53
Figure4.1 : Schéma unifilaire du réseau de distribution radial étudié à la fréquence fondamentale.....	57
Figure4.2 : Schéma du réseau de distribution radial à 6 nœuds.....	60
Figure4.3 : Evolution des tensions – nœud PV = 2 (pour P_{pv} allant de 0.010 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.02$ pu).....	61
Figure4.4 : Evolution des tensions - nœud PV = 5 (pour P_{pv} allant de 0.010 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.02$ pu).....	62
Figure4.5 : Evolution des tensions - nœud PV = 10 (pour P_{pv} allant de 0.010 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.02$ pu).....	62
Figure4.6 : Evolution des tensions - nœud PV = 2 (pour P_{pv} allant de 0.060 pu à 0.100 pu avec $Q_{pv} = 0.05$ pu,).....	63
Figure4.7 : Evolution des tensions - nœud PV = 5 (pour P_{pv} allant de 0.060 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.05$ pu).....	63
Figure4.8 : Evolution des tensions - nœud PV = 10 (pour P_{pv} allant de 0.060 pu à 0.100 pu avec $Q_{pv} = 0.05$ pu,).....	64
Figure4.9 : Evolution des tensions - nœud PV = 2 (pour P_{pv} allant de 0.090 pu à 0.200 pu, avec $Q_{pv} = 0.05$ pu).....	65

Liste des Figures

Figure4.10: Evolution des tensions - nœud PV = 5 (pour P_{pv} allant de 0.090 pu à 0.200 pu, avec $Q_{pv}=0.05$ pu).....	65
Figure4.11 : Evolution des tensions - nœud PV = 10 (pour P_{pv} allant de 0.090 pu à 0.200 pu, avec $Q_{pv}=0.05$ pu).....	66
Figure4.12 : Zone optimale d'injection de la puissance photovoltaïque (PV) en fonction de l'emplacement de la charge non linéaire et du bus d'injection.....	72
Figure4.13 : Taux de distorsion harmonique totale optimal (TDH) de la tension lors de l'injection PV en présence d'une charge non linéaire.....	72

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Classification des centrales PV raccordées au réseau.....	37
Tableau 3.1 : Classification des divers phénomènes de la QEE.....	43
Tableau 4.1 : Puissances en unités absolues.....	58
Tableau 4.2 : Résistances et réactances des lignes en unités absolues.....	58
Tableau 4.3 : Puissances en unités relatives.....	58
Tableau 4.4 : Résistance et réactance des lignes en unités relatives	59
Tableau 4.5 : Les valeurs des tensions harmoniques de chaque nœud du réseau.....	67
Tableau 4.6 : Les valeurs de distorsion harmonique totale pour chaque nœud du réseau.....	69

Liste des Abréviations

DC : Le courant continu

AC : Le courant alternatif

MT : Moyenne tension

BT : Basse tension

HT : Haute tension

HTB : Haute tension B

HTA : Haute tension A

BTA : Basse tension A

TIC : Technologies de l'information et de la communication

ENR : Energies Renouvelables

EDF : électricité de France

RTE : réseaux de transport d'électricité

P_c (W) : Puissance crête

V_{c0} (V) : Tension à vide

I_{cc} (A) : Courant de court-circuit

P_m (W) : La puissance maximale

V_m (V) : Tension maximale

I_m (A) : Courant maximale

PN : Jonction positive-négative

i_{cell} (A) : Le courant de la cellule.

v_{cell} (V) : La tension de la cellule.

PV : Photovoltaïque

GPV : Le générateur photovoltaïque

UV : Ultraviolet

L'ADEME : L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

PPM : Point de puissance maximale

V_{opt} (V) : Tension optimale (Tension correspondant au point de puissance maximale)

I_{opt} (A) : Courant optimal (Courant correspondant au point de puissance maximale)

PWM : MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse Width Modulation).

MPPT : Suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

Liste des Abréviations

V_{oc} : La tension en circuit ouvert

$I(A)$: Intensité du courant

VDR : Résistance dépendante de la tension (Voltage Dependent Resistor)

ΔP : Variation de la puissance.

ΔV : Variation de la tension

TDH : Taux de distorsion harmonique

CPCR : Coût Périodique de Remplacement

QEE : La qualité d'énergie électrique

d_h : La valeur efficace de la composante harmonique de rang h

d_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale

n : Le rang harmonique

A_1 : Amplitude de la composante fondamentale

A_2 : Amplitude de l'harmonique de rang 2

A_3 : Amplitude de l'harmonique de rang 3

A_n : Amplitude de l'harmonique de rang n

P : La puissance active

Q : La puissance réactive

S : La puissance apparente

R : La résistance de la ligne

X : La réactance de la ligne

S_{base} : La puissance apparente de base

Z_{base} : L'impédance de base

U_n : La tension nominale de base

P_{pv} : La puissance active injectée par le générateur photovoltaïque

Q_{pv} : La puissance réactive injectée par le générateur photovoltaïque

h : Ordre harmonique

jdb : Jeu de barres

Introduction Générale

Introduction générale

Dans le contexte de notre mémoire de fin d'étude, nous nous intéressons au sujet de l'énergie renouvelable, des réseaux de distribution et de la qualité de l'énergie électrique.

Les énergies renouvelables sont actuellement très utilisées et ont une grande importance dans le domaine de la production de l'énergie électrique. On trouve plusieurs types d'énergies renouvelables : solaire, éolienne, biomasse, ...etc.

Les réseaux électriques sont maintenant sujets à beaucoup de modifications suite à l'intégration des sources d'énergie primaire renouvelable. Concernant l'axe de recherche de la qualité de l'énergie électrique (QEE), il semble qu'il y ait aussi beaucoup d'évolution et de développement suite à la modernisation des réseaux électriques et particulièrement l'intégration des énergies renouvelables.

Parmi les sujets les plus importants de la qualité de l'énergie électrique (QEE) figurent la tension électrique, où les déviations se manifestent par des distorsions affectant l'onde fondamentale, en plus de la distorsion résultant de la circulation des courants harmoniques. Cela entraîne une variation de la valeur efficace d'une manière différente de ce qui se produit dans le cas de la fondamentale seule, c'est-à-dire que l'étude s'intéresse à la double variation, la relation est donnée par: $V = \sqrt{V_1^2 + V_H^2}$ qui est appelée la valeur efficace réelle.

On remarque que le concept de la valeur réelle peut conduire à une divergence dans l'évaluation du niveau de qualité de l'énergie électrique. En effet, on peut constater une augmentation de la tension fondamentale ne dépassant pas seulement 10 %, mais également une augmentation de la valeur V_H . Par conséquent, toute augmentation de V_H est considérée comme inacceptable, tandis qu'une augmentation raisonnable de V_1 est considérée comme acceptable ou souhaitable.

Dans l'aspect de validation, on a utilisé un test de simulation basé sur plusieurs scénarios fonctionnant selon le niveau de tension du réseau. L'accent a été mis surtout sur la variation de la tension en termes d'amplitude fondamentale.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur les réseaux de distribution classiques et modernes qu'ont évolué après l'intégration des source d'énergie électrique renouvelable.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la chaîne de production à base d'un système photovoltaïque, où l'accent a été mis sur la modélisation et les composants du système solaire photovoltaïque.

Le troisième chapitre traite de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution modernes, et a également abordé l'étude des problèmes qui affectent l'onde fondamentale de la tension et du courant, en particulier la pollution harmonique.

Le quatrième chapitre est dédié à la simulation du phénomène des harmoniques dans une structure radiale résultant des systèmes PV et des charges non linéaires.

Introduction générale

Ensuite, une analyse approfondie des résultats a été présentée avant de terminer par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE 1

Réseaux de distribution (classiques et modernes)

1.1. Introduction

Le domaine des réseaux électriques est très vaste. Les premières structures ont vu le jour au début du 20^{ème} siècle, puis elles n'ont cessé d'évoluer jusqu'à atteindre des niveaux de tension de transport de plus de 1000 kV. En effet, les premiers réseaux ont été construits d'abord avec le courant continu (DC).

Au cours de la période (1910-1930), les réseaux électriques étaient principalement locaux et isolés et le courant alternatif (AC) a été adopté pour réduire les pertes d'énergie importantes pendant le transport sur de longues distances grâce aux transformateurs notamment aux États-Unis et en Europe.

Entre 1930 et 1960, les réseaux électriques se sont beaucoup développés et plusieurs villes ont été reliées entre elles. Les lignes à haute tension ont permis de transporter l'électricité plus loin avec moins de pertes d'énergie et l'électricité est arrivée dans les zones rurales comme les États-Unis et le Royaume-Uni.

De 1960 à 1990, les réseaux électriques sont devenus nationaux et interconnectés. Les lignes à très haute tension ont permis de transporter plus d'électricité sur de longues distances. Les pays comme la France et le Canada ont utilisé le nucléaire et l'hydroélectricité pour produire plus d'énergie.

Enfin, depuis les années 2010 les réseaux électriques deviennent intelligents (Smart Grid). Cette nouvelle génération est basée sur des nouvelles technologies et des énergies renouvelables

1.2. Généralité sur les réseaux de distribution

1.2.1. Définition des réseaux de distribution

« Le système de distribution commence généralement par la sous-station de distribution qui est alimentée par une ou plusieurs lignes de sous –transport. Dans certains cas, la sous –station de distribution est alimentée directement par une ligne de transport à haute tension, auquel cas il n'y a probablement pas de système de sous –transport. Cela varie d'une entreprise à l'autre. Chaque sous –station de distribution dessert un ou plusieurs feeders primaires (lignes d'alimentation primaires), à de rares exceptions près, les feeders sont de types radial, ce qui signifie qu'il n'existe qu'un seul chemin pour que l'énergie circule de la sous-station de distribution vers l'utilisateur » [1].

1.2.2. Le rôle des réseaux de distribution

La planification du réseau de distribution joue un rôle fondamental dans la satisfaction de la demande croissante en énergie électrique. Elle garantit que les extensions et les renforcements du réseau de distribution soient à la fois techniquement adaptés et raisonnablement économiques. Alors que la planification systématique a été largement développée et appliquée dans les domaines de la production et du transport d'énergie.

L'objectif principal de la planification du système de distribution est d'anticiper la croissance de la charge et l'augmentation de sa densité [2].

1.2.3. Classification des réseaux de distribution

Les réseaux de distribution peuvent être classés selon différents critères, notamment le niveau de tension et la structure topologique.

A. Selon le niveau de tension

En Algérie, le réseau de distribution correspond aux niveaux de tension inférieurs ou égaux à 50 KV. Il comprend principalement deux catégories : le réseau moyenne tension (MT), exploite généralement aux niveaux de 10KV et 30KV et alimenté à partir des postes HTB/HTA, ainsi que le réseau basse tension (BT) de 0,4 KV, raccordé au réseau MT par des postes MT /BT [3].

- **Réseau de distribution à moyenne tension**

- HTA (fonctionnement aux niveaux de 10KV et 30KV).
- Limitation du courant : 300A pour les réseaux aériens et 1000A pour les réseaux souterrains.
- Neutre relié à la terre par une résistance.
- Réseaux souterrains généralement exploités en boucle ouverte.

- **Réseau de distribution à basse tension**

- BTA (fonctionnement au niveau de 230 /400V).
- Neutre directement relié à la terre.
- Types de réseau : radial, maillés, bouclés.

- **Les postes de transformation HTB /HTA**

Les postes de transformation HTB /HTA marquent la limite entre le réseau de transport (HTB) et le réseau de distribution (HTA). Ils reçoivent généralement l'alimentation à partir de deux lignes HTB. Chaque poste contient habituellement deux transformateurs. Chaque transformateur dessert un demi-jeu de barres (une rame), auquel sont connectés les départs HTA. Des disjoncteurs situés en tête de chaque départ protègent le réseau HTA contre les défauts [4].

B. Selon la structure du réseau (topologie)

Il est essentiel de trouver un compromis entre le coût des investissements supplémentaires et le coût lié à une éventuelle défaillance, évaluée par l'énergie qui pourrait ne pas être distribuée. Ce compromis varie en fonction des fonctions assurées par les réseaux, de leur niveau de tension et du type d'utilisateurs qui y sont raccordés. Cette analyse conduit à l'existence de différentes topologies de réseau, parmi lesquelles on distingue les réseaux radiaux, bouclés et maillés [5].

○ Les réseaux radiaux

Les réseaux radiaux représentent une topologie simple, couramment utilisée dans la distribution moyenne (MT) et basse tension (BT). Ils sont constitués d'une ligne unique alimentée par des postes de distribution MT ou BT, eux-mêmes alimentés à partir d'un poste source HT ou MT [6].

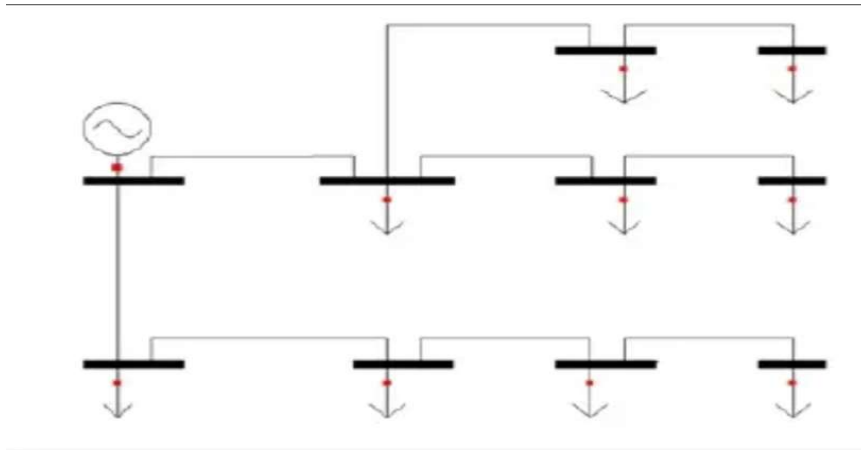


Figure 1.1 : illustration d'un réseau radial. [7]

○ Les réseaux bouclés

Les réseaux bouclés représentent une topologie utilisée dans les réseaux de répartition et distribution (MT). Un réseau bouclé est un réseau maillé simplifié présentant un certain nombre de boucles fermées. Le réseau est dit bouclé car pour chaque phase, les lignes forment un circuit fermé sur lui-même. Chacune de boucle contient un nombre limité de sources [7].

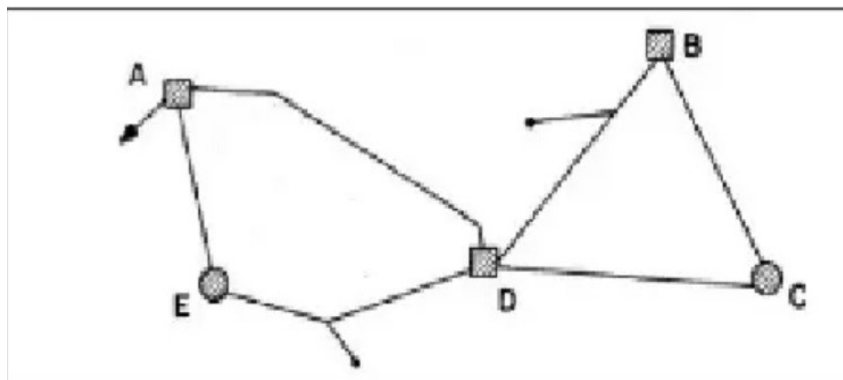


Figure1.2 : illustration d'un réseau bouclé. [7]

○ Les réseaux maillés

Ce sont des réseaux où les connections forment principalement des boucles avec des cotés partagés, créant ainsi une structure similaire à celle d'un filet. Par conséquent, si un hôte tombe en panne, ses voisins emprunteront une autre voie. Ceci permet d'éviter des points critiques qui, en cas de défaillance, interrompent la connexion d'une portion du réseau.

Cette configuration exige que tous les segments de lignes (ou de câbles) soient en mesure de supporter des surcharges constantes, et qu'ils soient équipés à leurs deux bouts d'instruments de coupure, isolant en cas de défaillance [7].

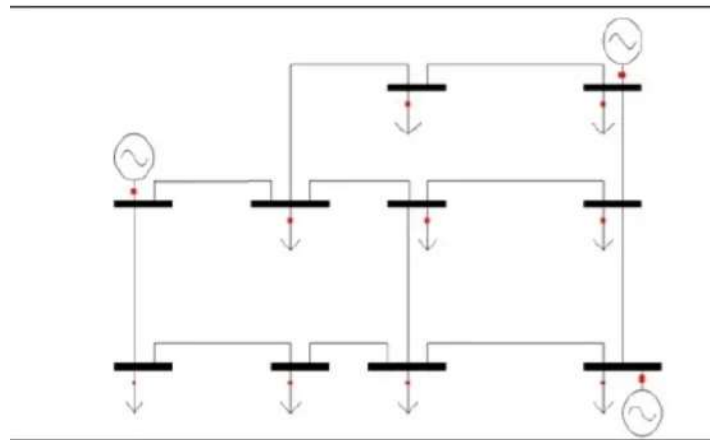


Figure 1.3 : illustration d'un réseau maillé. [7]

1.3. Dynamique d'évolution des réseaux électriques

Au cours de la dernière décennie, les systèmes électriques ont traversé une phase de mutation profonde. Cette transformation majeure englobe plusieurs dimensions stratégiques [8] :

- **La modernisation des infrastructures** : une mise à niveau technique pour répondre aux nouvelles exigences énergétiques.
- **L'intégration des TIC** : l'incorporation des technologies de l'information et de la communication pour une gestion intelligente des flux.
- **La sécurité systémique** : le renforcement des dispositifs de protection et de fiabilité des réseaux.
- **La reconfiguration topologique** : une adaptation structurelle nécessaire pour accueillir les nouveaux modes de production décentralisée, de transport et de distribution.

1.3.1. Configuration traditionnelle des réseaux électriques

L'architecture classique des réseaux repose sur un modèle de flux vertical et unidirectionnel. Dans cette configuration [8] :

- Le transfert de l'énergie s'effectue suivant un sens unique et linéaire.
- Le flux parcourt successivement les étapes de la chaîne énergétique, allant de la production massive vers le transport, pour aboutir enfin à la distribution aux consommateurs finaux.

1.3.2. Les réseaux électriques intelligents (Smart Grids)

Un réseau électrique intelligent se définit comme une infrastructure capable d'optimiser l'interaction entre les comportements et les actions de l'ensemble des acteurs connectés, qu'ils soient producteurs, consommateurs, ou les deux simultanément. Cette approche vise à instaurer un système énergétique à la fois pérenne et rentable, caractérisé par une réduction des pertes techniques ainsi qu'un haut degré de fiabilité, de sécurité et de qualité de fourniture [9].

A. Définition du Smart Grid

Un smart grid, ou réseau d'énergie intelligent, désigne un réseau qui intègre des technologies de l'information et de la communication. En collectant des informations sur l'état du réseau, les smart grids contribuent à une adéquation entre production, distribution et consommation. Ils permettent aussi le développement de nouveaux usages (autoconsommation, recharge de véhicules électriques, stockage) [9].

B. Les motivations des réseaux intelligents

Le transport et la distribution efficaces de l'électricité sont une exigence essentielle pour réaliser le développement durable et la prospérité partout dans le monde. En raison de la diminution de la disponibilité de l'énergie primaire (fossile et nucléaire) et de la hausse de ses prix, en particulier dans les pays européens, l'orientation vers les énergies renouvelables comme le vent et l'énergie solaire s'est imposée. C'est pourquoi des stratégies ont été mises en place afin d'augmenter l'efficacité de l'énergie importée d'Afrique du Nord (projet Desertec), notamment l'énergie solaire (photovoltaïque). Le taux de dépendance de la production d'énergie à partir de sources renouvelables par rapport à la météo est mesuré à travers le rapport entre l'énergie produite et la puissance installée. Ce taux est considéré comme le pire pour l'énergie photovoltaïque, ce qui est la cause principale des distorsions et des perturbations de la qualité de l'énergie au niveau des réseaux de distribution (que nous aborderons dans le troisième chapitre), ce qui a conduit à la modernisation des réseaux électriques (smart grid) [10].

C. Les piliers de cette évolution technologique incluent

- **L'inter connectivité avancée** : Le déploiement de solutions innovantes sur l'intégralité de la chaîne de valeur, reliant les unités de production aux équipements terminaux chez le client.
- **L'infrastructure numérique** : L'usage intensif de capteurs et de dispositifs numériques pour assurer la protection, la mesure et la communication bidirectionnelle avec les centres de pilotage.
- **Le rôle actif du consommateur** : La mise à disposition de données précises permettant à l'utilisateur de superviser sa consommation, de gérer son autoproduction (PV, éolienne) et d'optimiser l'efficacité énergétique en synergie avec les opérateurs du réseau.

- **L'optimisation globale** : Une distribution d'énergie plus agile et durable, surpassant les performances des réseaux conventionnels tout en garantissant la continuité de l'approvisionnement [9].

D. Caractéristiques du Smart grid

Il y a quatre caractéristiques principales [9] :

- **Flexibilité** : Gestion fine de l'équilibre production/consommation.
- **Fiabilité** : Amélioration de l'efficacité et de la sécurité.
- **Accessibilité** : Intégration des énergies renouvelables.
- **Économie** : Réduction des coûts grâce à une meilleure gestion du système.

E. Améliorations sur la chaîne de valeur

Le réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques à tous les niveaux [9] :

- **Contrôle des flux en temps réel** : Des capteurs indiquent instantanément les flux et la consommation, permettant aux opérateurs de réorienter l'énergie ou d'ajuster les prix.
- **Interopérabilité des réseaux** : Liaison fluide entre les réseaux de transport et de distribution pour une gestion coordonnée.
- **Intégration des ENR** : Prévion de la production intermittente (éolien, solaire) pour une meilleure insertion dans le mix énergétique.
- **Gestion responsable** : Les compteurs communicants (Linky) permettent aux consommateurs de réguler eux-mêmes leur consommation.

F. Avantages et Limites

○ Les avantages

- Sécurité accrue et réduction des risques de pannes généralisées.
- Efficacité énergétique globale (réduction des pics de consommation).
- Moindre impact environnemental via l'intégration des énergies vertes [9].

○ Les limites

- **Diversité des acteurs** : Difficulté d'harmoniser les systèmes de communication.
- **Complexité des données** : Gestion et stockage d'un volume massif d'informations.
- **Protection des données** : Enjeux de confidentialité et cyber sécurité.
- **Coûts** : Investissements colossaux (plusieurs dizaines de milliards d'euros) [9].

G. Parties prenantes

- **Consommateurs** : Acteurs clés via la régulation de leur propre demande.
- **Producteurs (ex : EDF)** : Adaptation de la production en temps réel.

- **Gestionnaires de réseaux (RTE, Enedis)** : Maintenance et installation des équipements de mesure.
- **Fournisseurs technologiques (Intel, Cisco, etc.)** : Développement des solutions logicielles.
- **Pouvoirs publics** : Encadrement réglementaire et définition des normes [9].

H. Historique et Évolution

- **Années 80** : Premiers pas avec la lecture automatique des compteurs.
- **Années 90-2000** : Émergence du compteur communicant (Projet Telegestore en Italie).
- **2005** : Généralisation de l'expression "Smart Grids" en Europe.
- **Aujourd'hui** : Une évolution progressive vers l'optimisation des réseaux plutôt qu'une révolution brutale [9].

1.4. Ecoulement de puissances en présence/absence des systèmes PV

Dans le cas où il y a absence totale du système photovoltaïque (PV), le flux de puissance dans le réseau de distribution est donc unidirectionnel, dirigé de la source principale vers les différentes charges. Par conséquent, le réseau fonctionne dans son mode classique, sans injection inverse de puissance.

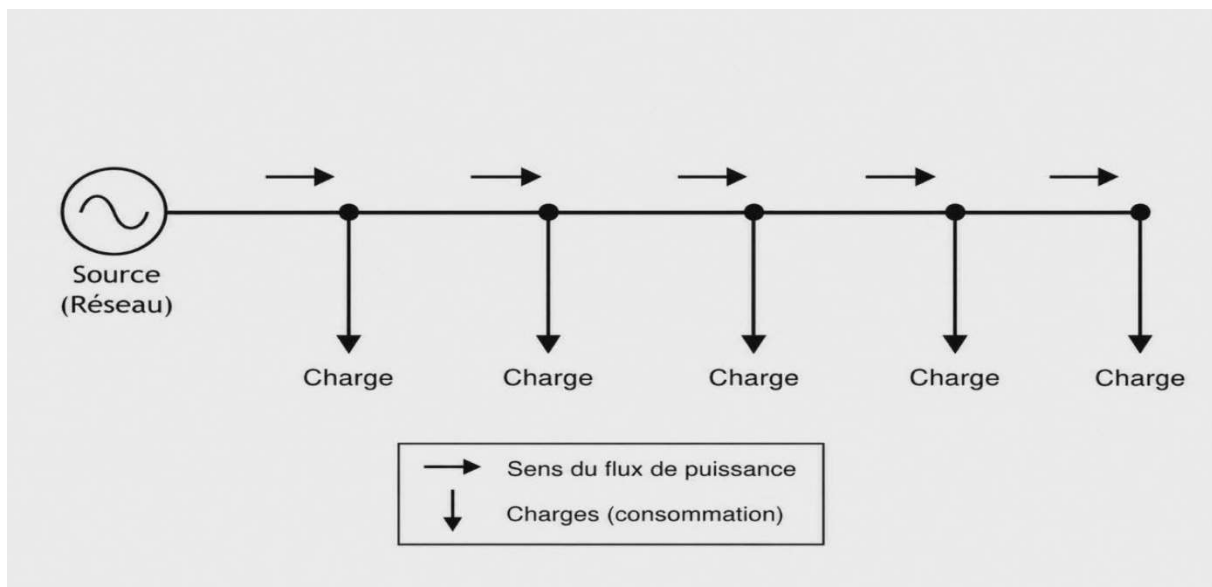


Figure1.4 : Ecoulement de puissance en absence des systèmes PV.

Dans le cas où il y a présence d'un système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau de distribution, mais la puissance produite reste inférieure à la puissance consommée par les charges. Ainsi, le système photovoltaïque(PV) contribue à l'alimentation d'une partie des charges seulement, tandis que le reste de la puissance est fourni par la source principale. Le flux de puissance demeure unidirectionnel malgré la présence du système photovoltaïque(PV).

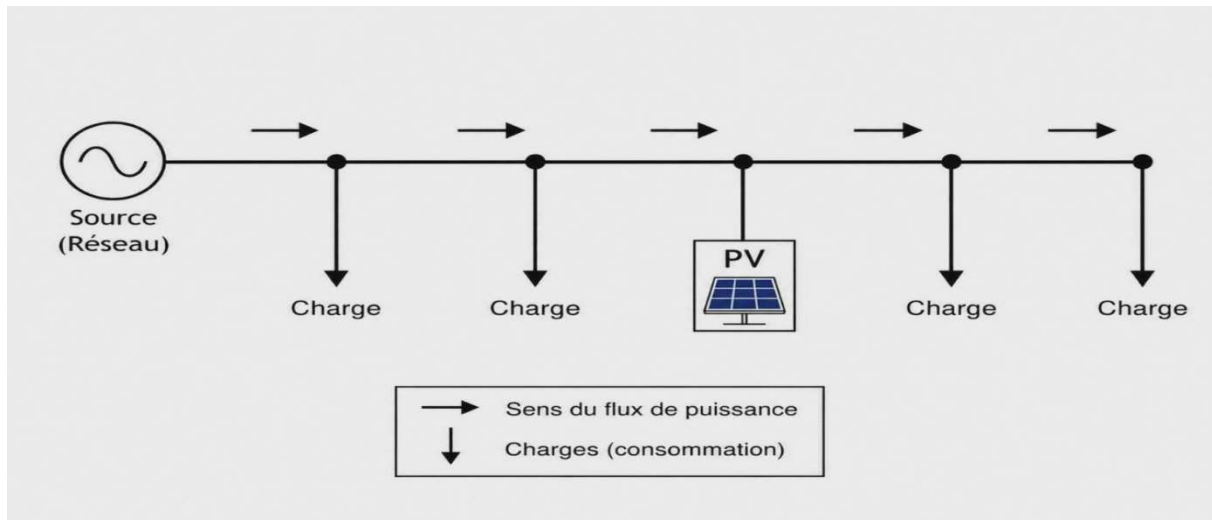


Figure1.5 : Ecoulement de puissances en présence des systèmes PV.

Dans le cas où il y a présence d'un système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau de distribution, mais celui-ci produit une puissance supérieure à la puissance consommée par les charges. Après l'alimentation des charges, l'excédent de puissance est injecté vers le réseau de distribution, ce qui entraîne une inversion du sens du flux de puissance. Le flux de puissance ne reste plus unidirectionnel comme dans le cas traditionnel, mais devient bidirectionnel en raison du transfert d'une partie de la puissance du système photovoltaïque vers le réseau principal. Ce flux inverse peut provoquer certains effets sur le réseau, notamment l'élévation de la tension ainsi que des problèmes de protection et de qualité de l'énergie électrique.

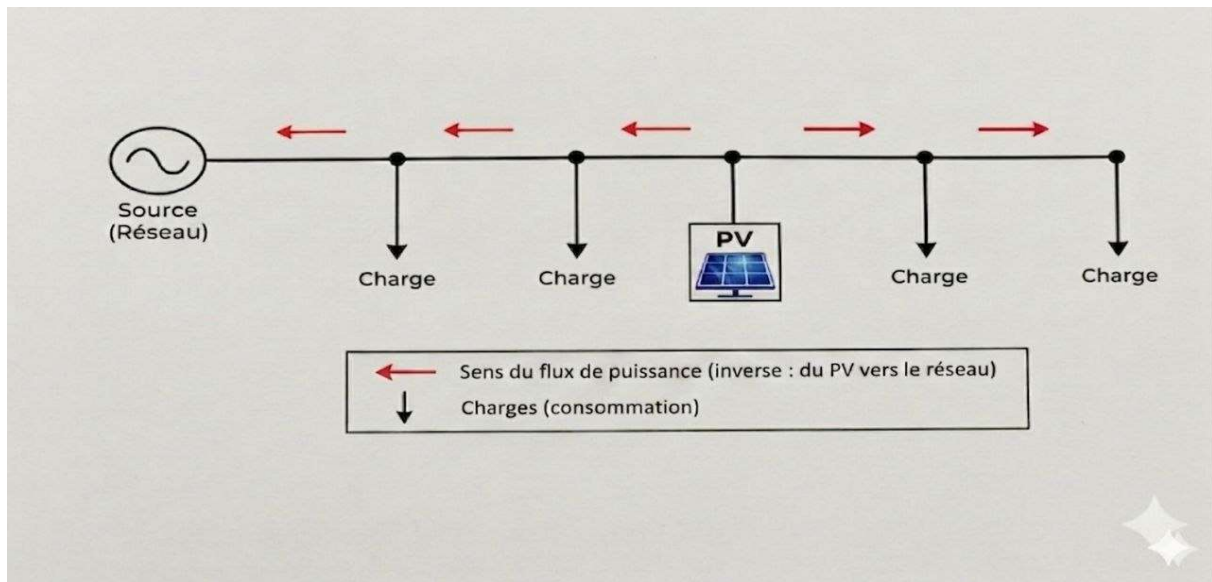


Figure1.6 : Inversion du flux de puissance en présence de forte production PV.

1.5. Conclusion

Le réseau de distribution électrique a connu une grande évolution, passant d'un système traditionnel à des réseaux intelligents (Smart Grids).

Aujourd'hui, grâce aux nouvelles technologies et à l'intégration des énergies renouvelables, il est possible de mieux gérer l'énergie et d'améliorer la qualité de distribution.

Même s'il existe encore quelques défis, le Smart Grid reste une solution importante pour un avenir énergétique plus efficace, fiable et durable.

CHAPITRE 2

Chaine de production à base de système photovoltaïque

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les différentes sources d'énergies renouvelables, qui sont des énergies propres, durables et respectueuses de l'environnement, comme l'énergie solaire.

L'énergie solaire se divise en trois types : photovoltaïque, thermique et thermodynamique.

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable qui convertit la lumière du soleil en électricité grâce à des panneaux solaires.

Enfin, nous décrirons les principaux éléments d'un système photovoltaïque, tels que les panneaux, les régulateurs et les batteries, afin de comprendre comment transformer la lumière en énergie électrique.

2.2. Les ressources d'énergie renouvelable

À travers le développement que connaît le monde ces derniers temps, où l'exploitation des énergies renouvelables inépuisables connaît une croissance rapide et forte. Dans les années à venir, jusqu'à 20 - 30 ans, on s'appuiera sur une utilisation rationnelle des sources conventionnelles avec un recours croissant à l'usage des énergies renouvelables [11].

Les énergies renouvelables représentent 13% de l'énergie primaire dans le monde. Le terme « énergie renouvelable » est utilisé pour désigner les énergies disponibles en grandes quantités, du moins à l'échelle humaine. Ces énergies sont classées en cinq types principaux : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Ces énergies se caractérisent par un trait commun : l'absence ou la faible émission de polluants lors de la phase d'exploitation. Par conséquent, elles contribuent à la lutte contre le réchauffement climatique et le changement climatique. On dit qu'elles sont renouvelables car elles compensent les combustibles fossiles, dont nous considérons les réserves comme limitées [12].

De plus, le mode de production décentralisé de l'électricité via ces sources renouvelables offre une plus grande sécurité pour répondre aux besoins des consommateurs, tout en respectant l'environnement simultanément [11].



Figure2.1 : Les cinq grands types d'énergie renouvelables.

2.2.1. Définition d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se caractérisent par une haute capacité à renouveler leur stock naturel avec une rapidité suffisante. Nous considérons ces énergies comme inépuisables et réutilisables. Ces énergies sont issues de la nature, telles que le soleil, le vent, les chutes d'eau (cascades), les marées, la chaleur de la terre, etc. De plus, elles ne génèrent pas de déchets ou d'émissions polluantes, si ce n'est dans des proportions très faibles ; elles sont donc respectueuses de l'environnement. Ce qui fait qu'elles sont classées mondialement comme les énergies de l'avenir [13].



Figure 2.2 : Les énergies renouvelables.

2.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire est considérée comme une source d'énergie illimitée, car elle est devenue synonyme de protection de l'environnement, avec le développement des technologies permettant d'exploiter les rayons du soleil pour générer une énergie massive ces dernières années. Ces rayons sont simplement captés par des panneaux solaires ou photovoltaïques [14].

On peut compter sur le soleil comme source d'énergie, car il est considéré comme une matière première faisant partie des énergies renouvelables.

L'énergie solaire est une énergie 100% verte car elle ne produit pas d'émissions polluantes comme le dioxyde de carbone CO₂.

L'énergie solaire peut être convertie en électricité par des panneaux solaires et des centrales thermiques qui absorbent les rayons et les transforment en électricité. La lumière porte des photons qui peuvent être convertis en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, générant un courant continu (DC) qui est converti en courant alternatif (AC) avec le raccordement d'un compteur électrique pour calculer la quantité de courant produite et distribuée [14].



Figure 2.3 : Energie solaire.

2.3.1. Les types d'énergie solaire

A. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue grâce au rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques collectent ce rayonnement sur leur surface ; ils sont orientés de la manière la plus optimale possible afin d'exposer les panneaux à la plus grande quantité de lumière solaire pour capter les photons et les convertir en électricité [14].

Ces panneaux fonctionnent comme une source d'énergie similaire à une batterie. Ils sont composés de couches positives et négatives, produisant une tension électrique lorsqu'un photon les traverse. Un fil est connecté à la borne positive et un autre à la borne négative, ce qui peut être comparé au fonctionnement d'une pile [14].

B. L'énergie solaire thermique

Les panneaux solaires thermiques chauffent l'eau grâce à la chaleur du soleil. Cette technologie est utilisée pour produire de la chaleur plutôt que de l'électricité de manière directe. Les panneaux contiennent des tubes où circulent des fluides caloporteurs qui, à leur tour, transfèrent la chaleur vers des ballons d'eau (réservoirs). Elle est généralement utilisée dans les systèmes de chauffage, les chauffe-eau, etc. [14].

C. L'énergie solaire thermodynamique

Elle combine la chaleur et la mécanique pour produire de l'électricité. Des réseaux de miroirs réfléchissants sont installés pour concentrer les rayons du soleil sur un point précis contenant des fluides. Cela augmente leur température à des valeurs allant de 250°C à 800°C, ce qui est bien supérieur aux températures obtenues précédemment. Cette chaleur est ensuite transformée en électricité via des turbines à vapeur qui génèrent de grandes quantités d'énergie, elle est calculée par [14] :

$$E = m \cdot PCI \quad (2.1)$$

m : La masse de la matière biomasse utilisée (kg).

PCI : Le Pouvoir Calorifique Inférieur spécifique à chaque type de combustible (MJ/kg).

2.4. Le Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire est défini comme l'ensemble des particules à haute vitesse et à haute énergie émises par le Soleil vers l'espace. Il émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. La source de cette énergie est le cœur du Soleil, qui tire sa puissance des réactions de fusion nucléaire continues ; c'est la source primaire de la vie sur Terre. Cette énergie se mesure en Watts par mètre carré (W/m^2) [15].

Parmi les caractéristiques de la réception de ce rayonnement, sa valeur commence à zéro au lever du soleil pour atteindre son apogée à midi, sachant qu'il met environ 8 minutes pour nous parvenir [15].

2.4.1. Les types de rayonnement solaire

A. Rayonnement direct

Ce sont les rayons solaires qui traversent l'atmosphère et atteignent directement la surface de la Terre sans subir de diffusion. L'intensité du rayonnement direct est déterminée par la distance parcourue par les rayons à l'intérieur de l'atmosphère et par l'angle d'incidence par rapport à la surface de la Terre. Il est mesuré à l'aide d'un Pyrhéliomètre, équipé d'un système de suivi (tracker) pour être constamment orienté vers le soleil [15].

B. Rayonnement diffusé

C'est le rayonnement qui atteint la Terre après avoir été soumis à l'absorption et à la diffusion par l'atmosphère, ainsi qu'à la réflexion par les nuages. Il provient de l'ensemble de la voûte céleste [15].

C. Rayonnement réfléchi

Il est exprimé par l'Albédo, qui est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière du soleil. Sa valeur varie entre [15] :

- 0 : pour une surface qui absorbe totalement le rayonnement.
- 1 : pour une surface qui réfléchit le rayonnement à 100 %.

D. Rayonnement global

C'est la résultante de tous les rayonnements reçus, y compris ceux réfléchis par la Terre et les objets à sa surface. Il est mesuré par un Pyranomètre et englobe les rayonnements directs, diffus et réfléchis [16].

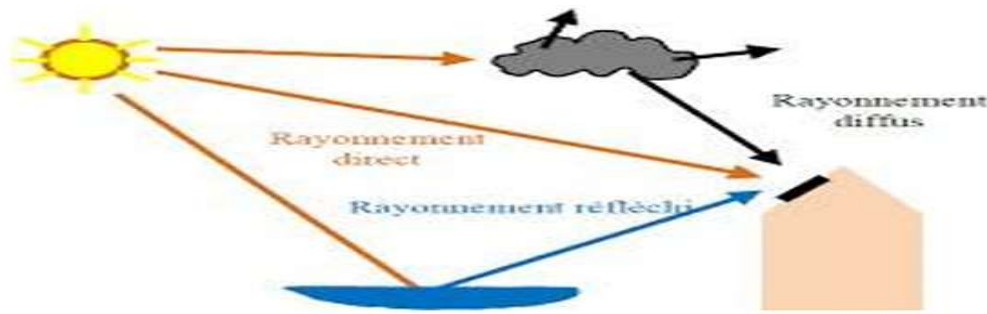


Figure2.4 : Les types de rayonnement solaire reçu au sol.

2.4.2. Spectre solaire

Il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu au sol pour quantifier l'énergie développée par un générateur photovoltaïque dans une application donnée [13].

2.5. Le module photovoltaïque

Un système photovoltaïque nécessite plusieurs cellules car une cellule individuelle ne produit qu'une faible puissance, variant entre 1 et 3 W, et une tension inférieure à 1V (0,6V). Il est donc nécessaire de regrouper les cellules pour obtenir une puissance plus élevée [18].

- **Le couplage en série** : plusieurs cellules sont connectées en série pour augmenter la tension tout en conservant le même courant.
- **Le couplage en parallèle** : plusieurs cellules sont connectées en parallèle pour augmenter le courant tout en conservant la même tension.
- **Chaîne de cellules (String)** : plusieurs cellules sont reliées en série pour obtenir une chaîne afin d'atteindre une tension électrique utilisable.

Parmi les avantages du groupement : l'obtention d'une tension suffisante, la protection des cellules et des points de connexion contre les agents atmosphériques, et la fourniture d'une protection mécanique des cellules contre les chocs.

Les panneaux se composent généralement de plusieurs couches :

- Un cadre de support et d'étanchéité (1et2).
- Une plaque de verre extra-clair pour faciliter la pénétration de la lumière (3).
- Deux couches de matériau EVA (éthylène-acétate de vinyle) qui enveloppent les cellules pour leur assurer une protection contre les intempéries (4).
- Les chaînes de cellules (5).
- Une couche arrière en Tedlar : ce polymère se caractérise par une haute résistance aux rayons UV et aux températures, et offre également une résistance mécanique contre les chocs (6) [17].

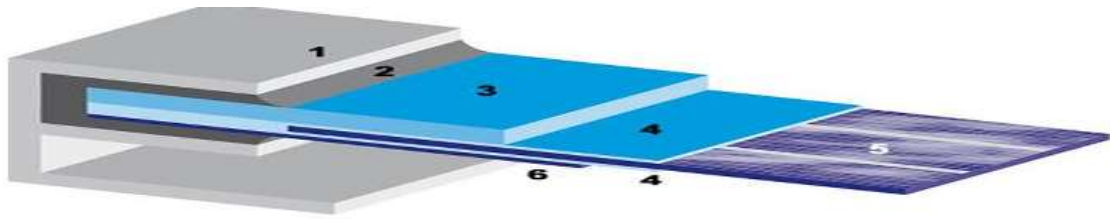


Figure2.5 : Constitution du module photovoltaïque.

2.5.1. Caractéristiques du module photovoltaïque

Le module photovoltaïque se caractérise par une forme de parallélépipède fin et rigide, et il est défini par les caractéristiques suivantes [11] :

- **Puissance crête (P_c)** : la puissance maximale que le module peut fournir (à une température de 25°C et un rayonnement de 1000 W/m^2).
- **Tension à vide (V_{co})** : la tension maximale atteinte par le panneau sous un plein ensoleillement.
- **Courant de court-circuit (I_{cc})** : le courant produit par le module lors d'un court-circuit.
- **Point de fonctionnement optimum, P_m (V_m , I_m)**: la crête

$$P_m = V_m \times I_m. \quad (2.2)$$

- **Le rendement** : le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance du rayonnement incident.
- **Le facteur de forme** : le rapport entre la puissance maximale et le produit de la tension et du courant ($V_{co} * I_{cc}$).

2.6. Description des éléments d'un système photovoltaïque

2.6.1. Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839, lorsque le physicien français Alexandre Edmond Becquerel a mis au jour la possibilité de générer de l'électricité à partir de la lumière et de certains matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Les premières cellules photovoltaïques ont vu le jour après 1913, cependant, en 1916, Robert Millikan a réussi à produire un courant continu [19].

En 1954, les chercheurs des laboratoires Bell ont développé le premier véritable panneau solaire qui avait un rendement de 6 %. Les panneaux solaires ont été développés, mais leur coût était encore très élevé. C'est pourquoi le domaine spatial s'y est intéressé pour alimenter les satellites qui ont besoin d'une source d'énergie durable. Après les travaux des laboratoires Bell, qui avaient obtenu un rendement de 6 %, les recherches ont continué et le rendement des cellules photovoltaïques a atteint environ 9 %. En 1958, les premières cellules photovoltaïques ont été utilisées dans le satellite Vanguard 1. Ensuite, en 1959, les premiers panneaux solaires ont été installés sur le satellite Explorer 6 [19].

La recherche poursuit ses efforts pour adapter les panneaux solaires à un usage terrestre. En 1973, l'université du Delaware a conçu la première maison dotée de cellules photovoltaïques pour sa production d'énergie. L'énergie solaire devient de plus en plus populaire pour diverses raisons : l'augmentation des prix des énergies fossiles et la sensibilisation à l'épuisement des ressources naturelles sont deux facteurs clés. L'utilisation domestique des panneaux solaires connaît une croissance constante d'année en année. D'après l'ADEME, en 2017, près de 20 000 ménages ont installé un système d'autoconsommation solaire [19].

2.6.2. Cellule solaire photovoltaïque

La cellule solaire est le petit élément d'une installation photovoltaïque, elle transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce au phénomène photovoltaïque.

A. Constitution de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont composées de plusieurs parties [20] :

- **Une fine couche semi-conductrice** : c'est généralement du silicium. Cette couche a une propriété spéciale : elle peut laisser passer les électrons seulement si elle reçoit de l'énergie, comme celle de la lumière du soleil. Elle aide à transformer la lumière en électricité.
- **Une couche antireflet** : elle empêche la lumière de se réfléchir et permet à un maximum de rayons solaires de pénétrer dans la cellule.
- **Des conducteurs électriques** : une grille sur le dessus (cathode) et un métal en dessous (anode) qui permettent de transporter le courant électrique produit.

Certaines cellules modernes ont aussi des couches réfléchissantes supplémentaires sous le semi-conducteur. Cela fait rebondir la lumière à l'intérieur, ce qui augmente l'efficacité de la cellule [20].

B. Les types de cellule photovoltaïque

➤ Cellule monocristalline

La cellule monocristalline qui se rapproche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement constituée d'un unique cristal séparé en deux strates. Les cellules solaires monocristallines permettent d'atteindre des rendements élevés, se situant entre 15 et 22 % [20].

Toutefois, il existe des désavantages [21] :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- L'obtention d'un cristal pur nécessite une quantité considérable d'énergie.

- Un temps d'amortissement de l'investissement en énergie pouvant aller jusqu'à 7 ans.

Figure2.6 :

Cellule
monocristalline.

➤ Cellule



**poly
cristalline**

Lors du refroidissement du silicium dans un moule, plusieurs cristaux se forment. La cellule photovoltaïque a une couleur bleu clair, mais elle n'est pas uniforme : on peut voir des motifs formés par les différents cristaux. Ces cellules présentent les caractéristiques suivantes [21] :

- Coût de production plus faible que les cellules monocristallines.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

**Figure2.7 :** cellule poly cristalline.

➤ Cellule amorphe

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, contrairement au silicium cristallin.

Même s'il n'est pas parfaitement cristallisé, il absorbe la lumière plus facilement que le silicium cristallin. Cependant, cette capacité à absorber plus de lumière réduit la mobilité des charges électriques, (rendement de conversion faible).

- Production moins chère.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Peut produire de l'électricité sous un faible éclairement [21].



Figure2.8 : cellule amorphe.

C. Principe de fonctionnement d'une cellule

La cellule photovoltaïque est l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Cette cellule est composée de deux couches de silicium (semi-conducteur) [22] :

- Une couche dopée au bore : le nombre d'électrons y est inférieur à celui du silicium pur, elle est donc dopée positivement (zone P). Elle est recouverte d'une plaque servant de pôle positif (anode).
- Une couche dopée au phosphore : elle contient plus d'électrons que le silicium, elle est donc dopée négativement (zone N). Elle est recouverte d'une plaque jouant le rôle de pôle négatif (cathode).

Pour obtenir la jonction PN (la diode), les deux couches sont assemblées. Cette union crée un champ électrique interne, indispensable au processus de conversion de l'énergie [22].

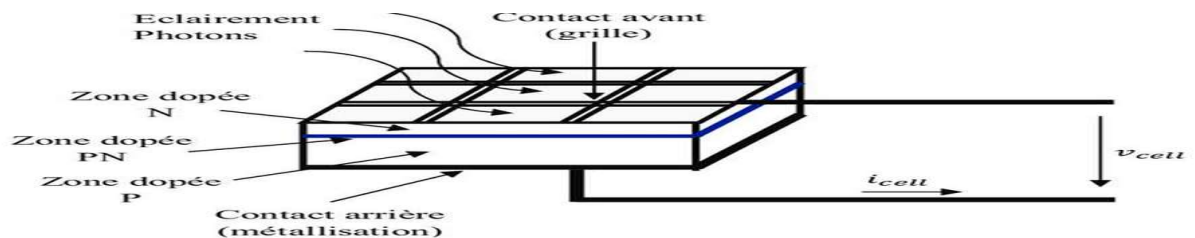


Figure2.9 : La jonction PN.

i_{cell} : le courant de la cellule.

v_{cell} : la tension de la cellule.

2.6.3 L'effet photovoltaïque

Le mot photovoltaïque est un terme d'origine grecque signifiant "lumière". Il se compose de deux parties [18] :

La partie "photo" signifie la lumière, tandis que l'autre partie a été attribuée par le scientifique Alessandro

Volta, inventeur de la pile en 1800, en référence à son nom. L'unité de tension électrique, le volt, a également été nommée ainsi en son hommage.

L'effet photovoltaïque est appliqué dans les cellules solaires pour générer de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire. Il résulte de la collision des photons de lumière avec un matériau semi-conducteur, ce qui entraîne le transfert de leur énergie aux électrons, produisant ainsi une tension électrique [18].

L'effet photovoltaïque est obtenu par l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur, ce qui provoque la création de paires (électron-trou). Cela correspond à l'excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi une tension et un courant électrique. Sur ce principe, plusieurs types de composants peuvent être conçus, appelés photodiodes ou phototransistors, que nous utilisons dans les panneaux solaires [18].

2.6.4 Générateur PV

Le générateur photovoltaïque (GPV) est un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques (PV) en série ou en parallèle. En général, la plupart des panneaux photovoltaïques se composent de sous-réseaux de cellules connectées en série, qui sont à leur tour constitués d'un groupe de cellules connectées en série [23].

Le choix du nombre de cellules dans chaque sous-réseau est soumis à un compromis économique visant à concilier la nécessité de protection et l'évitement de la perte d'une grande partie de la puissance du générateur en cas de défaut partiel. La caractéristique électrique $I(V)$ du générateur photovoltaïque est non linéaire et se caractérise par un point de puissance maximale (PPM).

Ce point est déterminé par deux valeurs : V_{opt} et I_{opt} . Le point de fonctionnement du générateur dépend de l'impédance de la charge qu'il alimente, et dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque lors d'une connexion directe [23].

2.7. Système de Régulation

Dans un système photovoltaïque (PV) autonome, un dispositif de régulation est intégré pour contrôler l'intensité du courant. Sa fonction est de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes afin de prolonger sa durée de vie. Ce régulateur permet un transfert optimal de l'énergie du champ photovoltaïque vers l'utilisation. Il existe quatre types principaux de régulateurs.

2.7.1. Régulateur de décharge

Il fonctionne selon un système de distribution par comparateur. Il compare la tension de la batterie à une tension minimale prédéfinie et transmet l'information à l'unité de contrôle. Le processus de décharge s'arrête dès que le seuil de tension critique est atteint (pour éviter la dégradation de la batterie) [24].

2.7.2. Régulateur de charge

Le système de charge fonctionne en réduisant le courant à mesure que la batterie se charge. Il existe plusieurs configurations de régulation de charge pour les batteries au plomb [24] :

- **Régulateur Parallèle (Shunt) :**

Le régulateur détecte la tension de la batterie à la sortie. Lorsque cette tension atteint un certain seuil, il dévie le courant des panneaux solaires vers une résistance de faible valeur (court-circuit). Ce type est particulièrement adapté aux petites installations [25].

- **Régulateur Série :**

Au démarrage, il mesure la tension aux bornes de la batterie. Si le seuil maximal est atteint, le circuit déconnecte la batterie du système de charge (circuit ouvert). Cela permet d'éviter la surchauffe du régulateur solaire [25].

- **Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM Pulse Width Modulation)**

La tension est mesurée aux bornes de la batterie et des impulsions sont envoyées pour la charger. Ces impulsions à haute fréquence sont plus larges lorsque la batterie est vide et deviennent très fines (étroites) lorsqu'elle approche de la pleine charge. Ce mode de fonctionnement est proche du système série et peut être utilisé pour diverses configurations [25].



Figure2.10 : Régulateur PWM.

- **Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)**

Ce régulateur suit en temps réel le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire (le panneau PV).

La tension et le courant des panneaux sont mesurés en continu pour extraire l'énergie au point optimal. Cela garantit la récupération du maximum de puissance, quelles que soient les variations de température ou d'ensoleillement. Ces régulateurs agissent comme des convertisseurs (abaisseurs ou éleveurs de tension) [26] :

- Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale du champ de panneaux.
- Un second circuit convertit le courant et la tension pour les adapter spécifiquement aux caractéristiques de la batterie.

2.8. Système de stockage

Il est nécessaire d'utiliser des batteries dans les installations autonomes pour stocker l'énergie, car l'énergie solaire n'est pas disponible pendant toute la période de fonctionnement du système à alimenter. Dans les systèmes solaires autonomes, deux types de batteries sont généralement utilisés [27] :

- **Les batteries au plomb**

La batterie au plomb est la plus courante pour le stockage de l'énergie en raison de son faible coût et de sa grande disponibilité.

- **Les batteries au Nickel-Cadmium**

Ce sont des batteries très résistantes aux surcharges et aux décharges profondes. Elles fonctionnent bien à basse température, mais leur coût est élevé par rapport aux batteries au plomb.

2.9. L'influence de la température et de l'éclairement

La cellule photovoltaïque possède des caractéristiques qui dépendent directement du niveau de rayonnement et de la température.

2.9.1. Influence de température

Le courant fourni par la cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule photovoltaïque. On peut étudier l'influence de la température si l'on considère l'augmentation de la température du module photovoltaïque de 10°C à 75°C, en supposant que la température de la face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN. Les graphiques suivants représentent les courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à un rayonnement constant. On remarque que la tension en circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, et de ce fait, on perd une partie de la puissance aux bornes du module photovoltaïque [28].

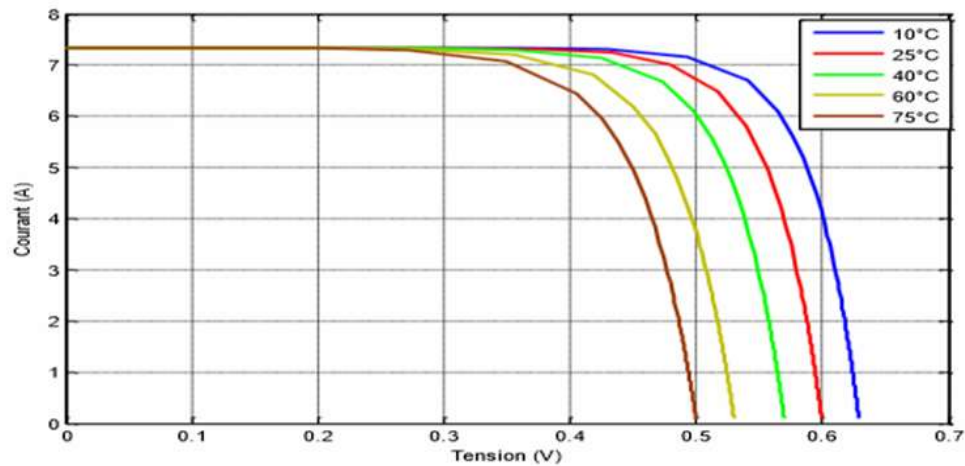


Figure 2.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température [28].

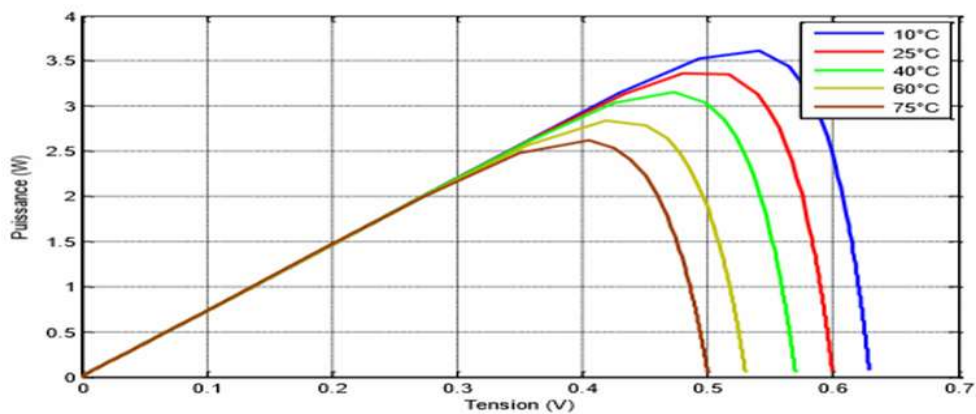


Figure 2.12 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température [28].

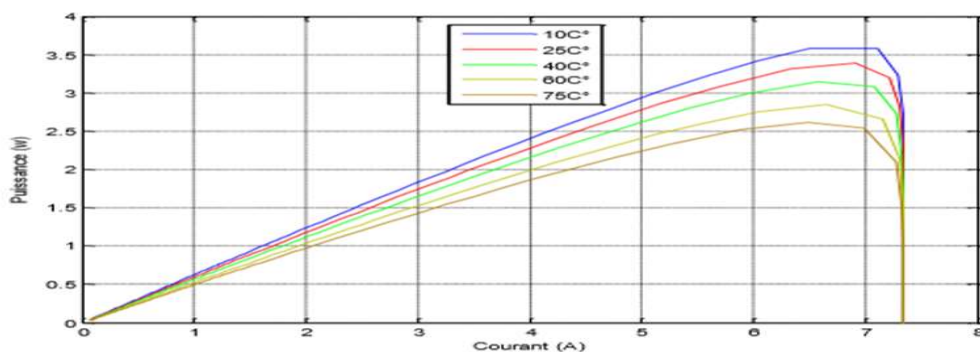


Figure 2.13 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température [28].

2.9.2. L'influence de l'éclairement

La cellule photovoltaïque dépend de l'intensité du rayonnement pour la production de l'énergie électrique. Les courbes de la figure représentent la caractéristique courant-tension

d'une cellule photovoltaïque en fonction du rayonnement, à une température et une vitesse de flux d'air constantes. Le courant varie proportionnellement au rayonnement, contrairement à la tension qui ne change qu'avec une proportion très infime en fonction du rayonnement [11].

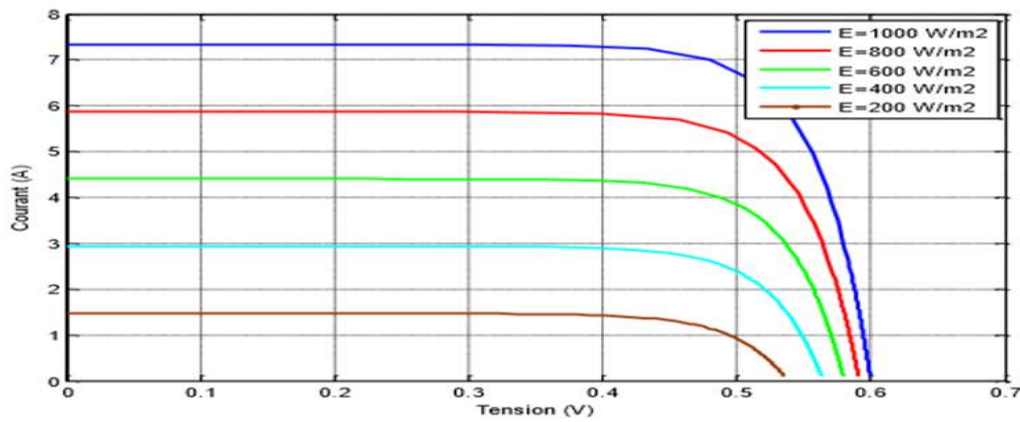


Figure2.14 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [11].

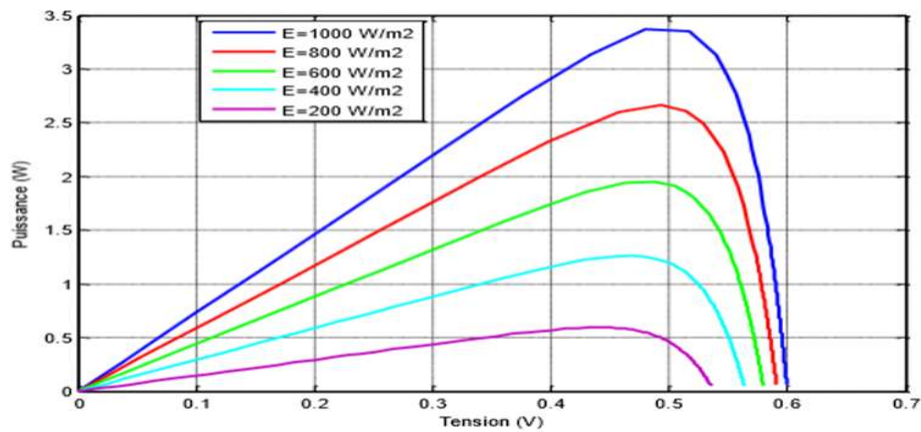


Figure2.15 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [11].

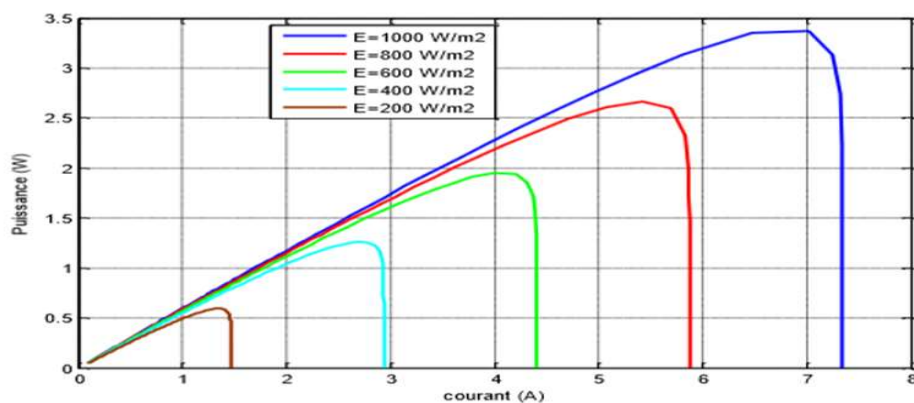


Figure2.16 : Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement [11].

2.9.3. Influence de la résistance série

Les courbes représentent l'influence de la résistance série sur les caractéristiques Courant-Tension $I(V)$ et Puissance-Tension $P(V)$ de la cellule photovoltaïque. La résistance série affecte l'inclinaison de la courbe dans la zone où la photodiode fonctionne comme un générateur de tension. Son augmentation ne modifie pas la tension en circuit ouvert V_{oc} , mais elle entraîne une diminution de la pente de la valeur du courant I_{cc} . L'augmentation de la résistance série entraîne également une diminution de l'inclinaison de la courbe de puissance [29].

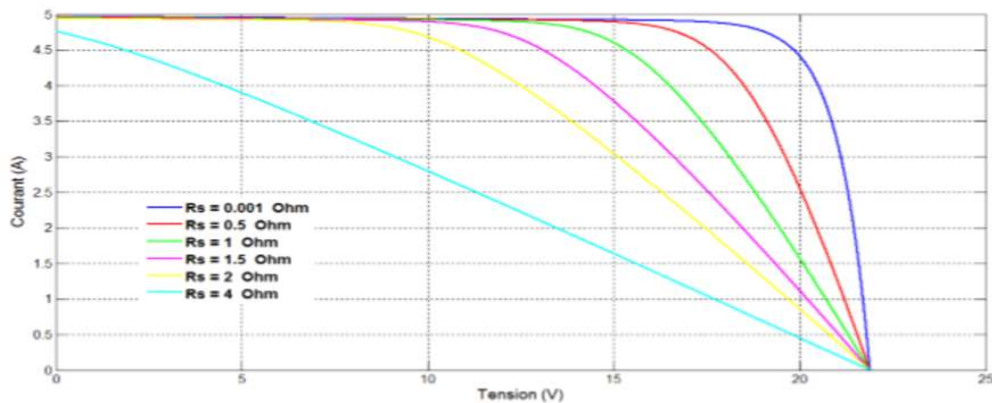


Figure 2.17 : Influence de résistance série sur la caractéristique courant-tension [29].

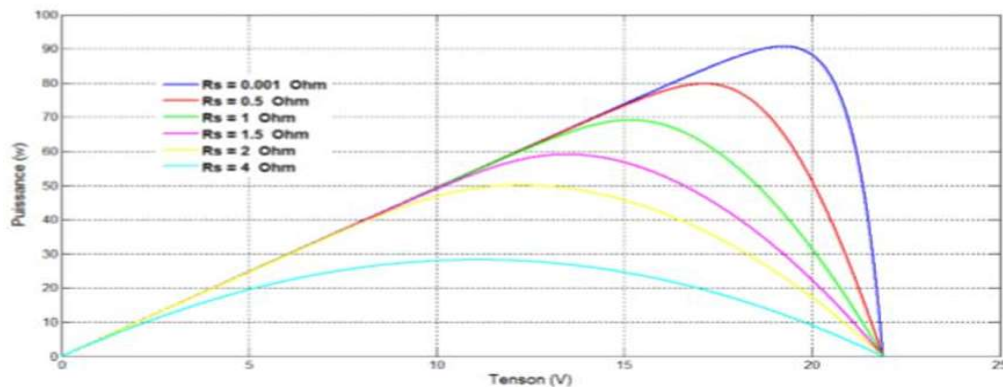


Figure 2.18 : Influence de résistance série sur la caractéristique puissance-tension [29].

2.9.4. Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec

sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante [29].

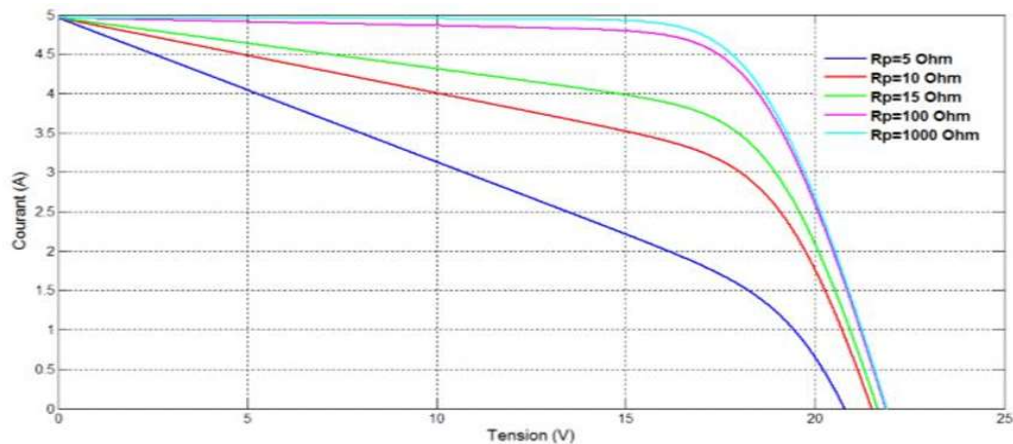


Figure 2.19 : Influence de résistance parallèle sur la caractéristique courant-tension [29].

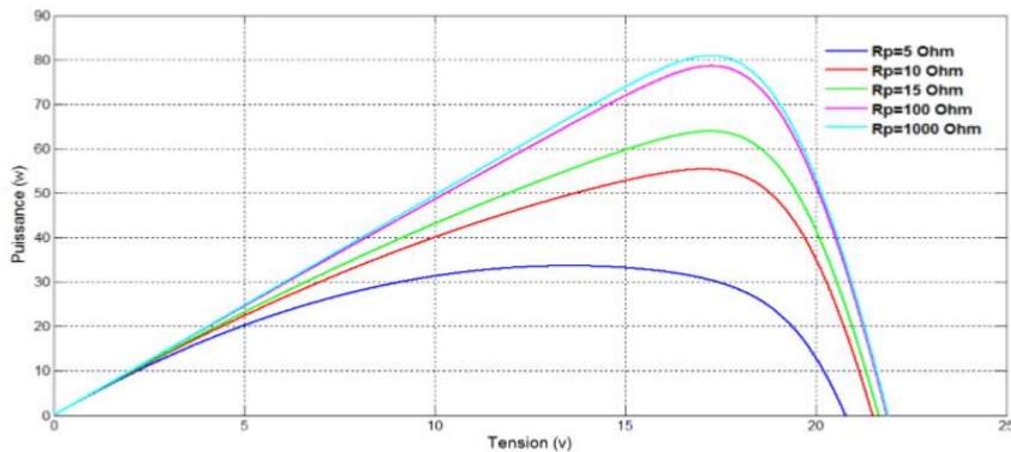


Figure 2.20 : Influence de résistance parallèle sur la caractéristique puissance-tension [29].

2.10. Les composants d'une centrale photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque est un ensemble de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Ces panneaux sont regroupés pour former une centrale ou un système. Le système comprend également d'autres composants tels que le Régulateur, l'Onduleur et la Batterie... [30].

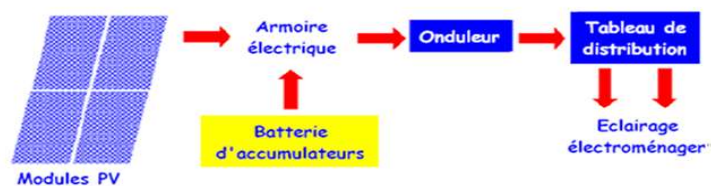


Figure 2.21 : Schéma général d'une installation photovoltaïque.

2.10.1. Les panneaux solaires (capteurs)

Le champ solaire est composé d'unités photovoltaïques connectées entre elles en série et/ou en parallèle. Elles sont montées sur une structure métallique afin de produire la puissance requise [30].



Figure2.22 : Panneau solaire.

Si le nombre de sorties est égal au nombre d'unités, nous avons besoin d'une boîte de dérivation qui regroupe l'ensemble. Son rôle est d'effectuer les connexions entre les modules (panneaux) pour obtenir une puissance de sortie optimale.



Figure2.23 : Boîte de dérivation.

La boîte de dérivation : Elle se compose d'un circuit imprimé et contient [30] :

- Diodes Schottky : Connectées en série et placées sur un dissipateur thermique à chaque entrée. Elles empêchent la batterie de se décharger dans les panneaux.
- Fusible de protection : En cas de défaillance des diodes connectées en parallèle inverse, il empêche les batteries de se décharger dans les panneaux.
- LEDs : Connectées en parallèle avec le fusible de protection. Elles servent à surveiller chaque branche de panneaux individuellement.
- Parafoudre : De type Transil ou (VDR). Cette boîte permet d'obtenir une sortie de tension de 12, 24, 36 ou 48 volts selon les panneaux.

Facteurs influençant la production d'électricité :

- La quantité d'électricité produite par l'ensemble des composants du champ solaire dépend de :
- La saison d'utilisation et le niveau de rayonnement solaire sur le lieu d'installation.
- La taille du panneau et les besoins en électricité.

Pendant les heures de pointe, la puissance fournie par le panneau est importante, ce qui nécessite la connexion d'éléments de stockage (batteries).

2.10.2 Les types de panneaux photovoltaïques

A. Les panneaux orientables

Ces panneaux permettent de modifier l'angle d'inclinaison chaque mois. Ils sont faciles à utiliser, ce qui nous permet de choisir l'angle d'inclinaison optimal pour l'été et pour l'hiver. Ces structures sont utilisées dans les installations au sol ou sur des surfaces planes. Il existe un angle d'inclinaison spécifique qui permet de maximiser la production d'électricité chaque mois [30].

B. Les panneaux fixes

Ces panneaux sont fixés pour toute l'année. Le rendement optimal est obtenu avec une orientation vers le Sud et un angle d'inclinaison de 35° . Dans ces conditions, le système produit une puissance de 8 kW et environ 900 kWh par an. En cas d'écart par rapport à cette position, le rendement diminue ; il est alors calculé en multipliant le rendement optimal par un coefficient de correction lié à l'orientation et à l'inclinaison choisie [30].

C. Les panneaux mobiles (Le suiveur solaire)

Ce système de panneaux mobiles suit la course du soleil tout au long de la journée. La structure possède deux degrés de liberté Rotation horizontale pour régler l'azimut et rotation verticale pour régler l'inclinaison. Cette structure permet d'augmenter la production d'électricité d'environ 25% par rapport aux panneaux fixes [30].

2.11. Système PV

Le panneau photovoltaïque contient plusieurs cellules photovoltaïques connectées entre elles. En regroupant ces unités, on forme un système photovoltaïque complet. Dans les sites isolés : ce système comprend d'autres composants tels que le régulateur de charge, la batterie et l'onduleur. Lors de la connexion au réseau électrique : la batterie devient inutile, car le réseau peut fournir de l'énergie directement en cas de besoin [31].

2.11.1. Les types des systèmes PV

Il existe 3 types de systèmes photovoltaïques [32] :

A. Système PV autonome

Ce système est conçu spécifiquement pour fournir de l'énergie dans les sites isolés qui ne disposent pas d'un réseau de distribution. Les panneaux PV produisent de l'énergie en courant continu (DC), mais la plupart des appareils fonctionnent en courant alternatif (AC). Par conséquent, le processus de conversion devient nécessaire. L'énergie est stockée dans la batterie pour être extraite par l'utilisateur en cas d'absence de soleil. Le processus de charge et de décharge est contrôlé par un régulateur de charge. Inconvénients du système autonome : Ils résident principalement dans le coût élevé des batteries et leur entretien périodique.

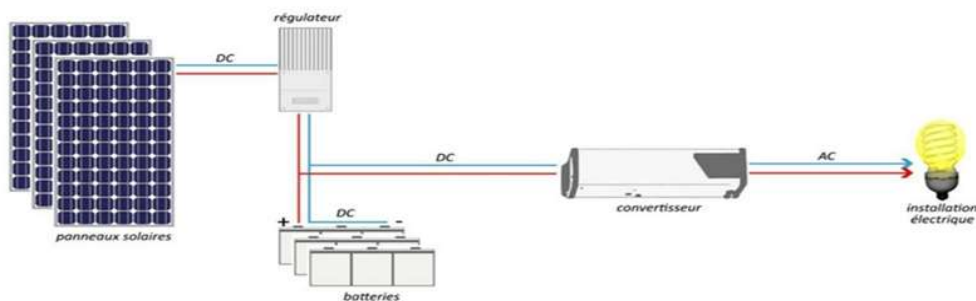


Figure2.24 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome.

B. Le système PV connecté au réseau de distribution

Ce système photovoltaïque est utilisé en le reliant au réseau public de distribution d'électricité. L'énergie produite par les panneaux est convertie du courant continu (DC) au courant alternatif (AC) par un onduleur. La consommation de cette électricité entraîne une réduction de la facture électrique, et en cas de surplus, il peut être revendu à la société d'électricité. Avantages : Ce type de configuration nécessite moins d'entretien et ses coûts sont très faibles.

C. Les systèmes hybrides (Les systèmes hybrides)

Les systèmes hybrides combinent plusieurs sources différentes, telles que les éoliennes, les champs solaires ou une centrale thermique au diesel, avec les panneaux photovoltaïques. L'objectif :

Assurer la continuité de l'énergie et optimiser le système.

Ces systèmes permettent de diversifier les sources d'énergie, ce qui améliore la fiabilité du système, réduit les coûts d'exploitation et prolonge la durée de vie des composants (comme le générateur diesel).

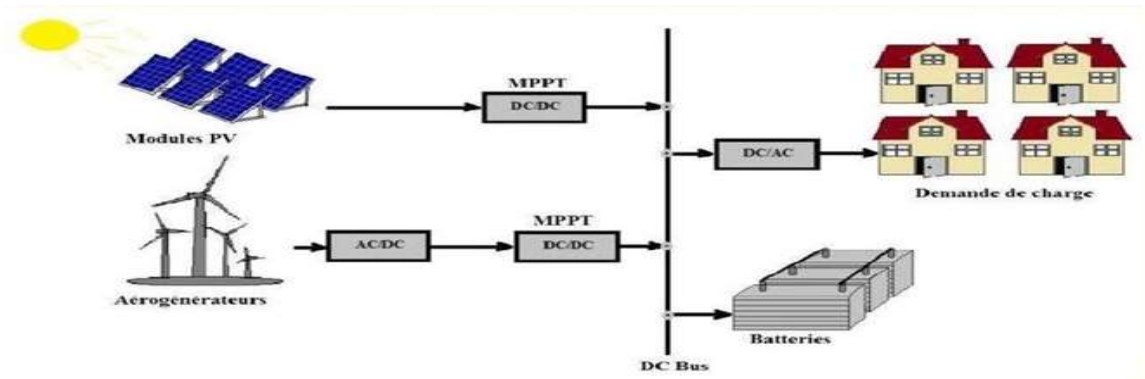


Figure 2.25 : Système hybride.

2.12. Les convertisseurs

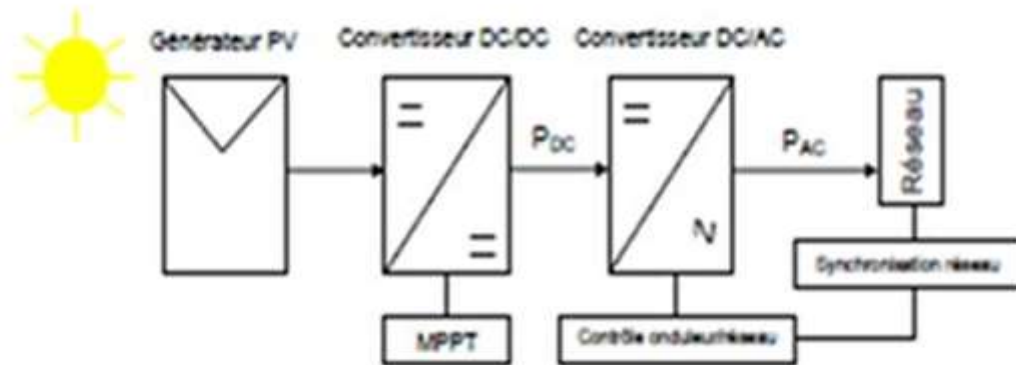


Figure 2.26 : Chaîne de conversion PV raccordée au réseau.

Les convertisseurs statiques ont pour rôle d'assurer plusieurs fonctions :

- L'adaptation du niveau de tension entre le générateur PV et la charge.
- L'introduction d'une isolation galvanique pour la sécurité des biens et des personnes.

2.12.1. Les convertisseurs DC/DC

La hacheur est considéré comme un convertisseur continu-continu. Il convertit une énergie continue d'un niveau de tension V et d'un courant donné en une énergie continue à un autre niveau de tension et de courant. La nécessité de son utilisation réside dans le stockage de l'énergie photovoltaïque dans les batteries ou pour alimenter une charge continue.

2.12.2 Le convertisseur Boost

Le convertisseur Boost, également appelé élévateur de tension, est un convertisseur direct (DC/DC). La source d'entrée est de type courant continu, avec une bobine d'inductance connectée en série avec la source de tension. La charge de sortie est de type tension continue

(un condensateur est connecté en parallèle avec la charge résistive R). L'interrupteur $K1$ peut être remplacé par un transistor [33].

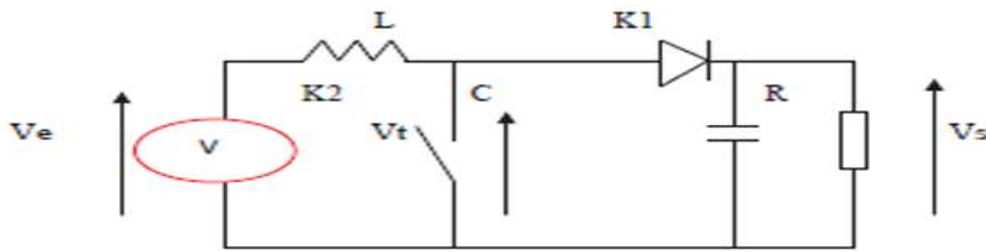


Figure2.27 : Le convertisseur boost.

2.12.3. Le convertisseur Buck

Le convertisseur Buck, ou ce que l'on appelle le hacheur série, convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure. Il est considéré comme un convertisseur direct (DC/DC) où la source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue est de type source de courant. L'interrupteur $K1$ peut être remplacé par un transistor.

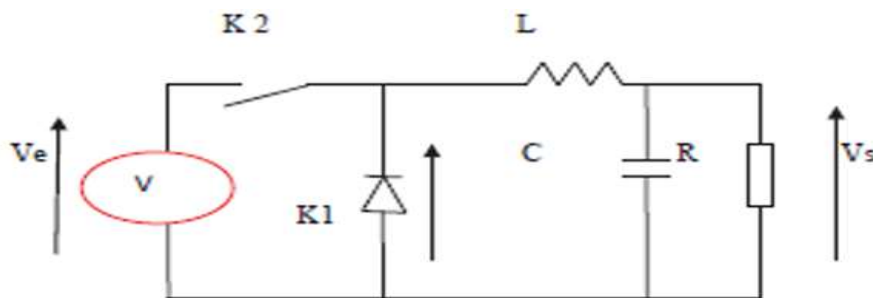


Figure2.28 : Convertisseur Buck.

2.12.4. MPPT (Maximum Power Point Tracking)

C'est une technique qui permet de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique ayant des caractéristiques dynamiques, afin d'extraire le maximum de puissance possible. Son principe de fonctionnement repose sur le déplacement du point de fonctionnement en augmentant la tension V lorsque la dérivée $\Delta P / \Delta V$ est positive, ou en la diminuant dans le cas inverse. Les algorithmes MPPT se divisent en deux catégories :

- Algorithmes en temps réel (Real-time).
- Algorithmes hors ligne (Off- line).

Les méthodes en temps réel utilisent des algorithmes qui calculent la puissance délivrée par la cellule en temps réel et suivent ses variations. Les méthodes hors ligne utilisent des algorithmes basés sur une connaissance préalable des caractéristiques du panneau.

2.12.5. Le convertisseur DC-AC (Onduleur)

L'onduleur est un élément essentiel dans la conversion de l'énergie continue produite par les panneaux photovoltaïques en énergie alternative afin de l'injecter dans le réseau. Avec le développement de l'électronique de puissance, des efforts ont été déployés pour améliorer les performances techniques et la fiabilité des onduleurs, ainsi que la qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

A. Principes de fonctionnement

L'onduleur est un appareil qui permet de transformer l'énergie électrique du continu vers l'alternatif. Les onduleurs sont utilisés pour fournir des tensions et/ou des courants alternatifs à fréquence et amplitude variables. Les onduleurs de tension sont considérés comme les plus sophistiqués et les plus répandus dans les systèmes industriels. On distingue les onduleurs de tension des onduleurs de courant selon la nature de la source d'entrée continue.

B. Caractéristiques d'un onduleur pour système PV

Le courant continu produit par le générateur photovoltaïque est converti en courant alternatif par l'onduleur raccordé au réseau, que nous considérons comme un convertisseur de puissance utilisant des circuits de puissance, de commande et de protection. Il doit être capable de supporter le courant ou la tension maximale du champ photovoltaïque. Pour éviter une éventuelle défaillance de l'isolation, l'onduleur contient un contrôleur d'isolement du côté continu. Ses caractéristiques incluent :

- L'onduleur est équipé de toutes ses protections spécifiques.
- Temps de démarrage automatique très rapide lors de la baisse du rayonnement solaire.
- Possibilité de limiter la puissance injectée dans le réseau selon les instructions de l'opérateur.
- Taux de distorsion harmonique (TDH) du courant injecté inférieur à 3%.
- Haute qualité et précision du MPPT.
- Fonctionnement sécurisé dans une plage de température adaptée à la zone d'installation.
- Déconnexion automatique du réseau.

Le rendement énergétique (η) de l'onduleur, mesure son efficacité é le courant continu (DC) en alternatif (AC)

$$\eta = \left(\frac{P_{ac}}{P_{dc}} \right) * 100\% \quad (2.3)$$

P_{ac} : Puissance alternative de sortie.

P_{dc} : Puissance continue d'entrée.

η : Rendement de l'onduleur.

C. Architecture des onduleurs

Il existe trois types de structures :

C.1. Onduleur central

L'onduleur central est considéré comme la structure la plus ancienne. Il utilise un seul onduleur qui convertit la puissance continue totale (DC) en une puissance alternative totale (AC) injectée dans le réseau. Il est caractérisé par un faible coût, une surveillance facile et une maintenance simple et rapide. Son inconvénient réside dans la présence d'un seul dispositif MPPT pour tout le champ solaire, ce qui limite l'extraction optimale de la puissance du champ. Cette configuration présente plusieurs inconvénients :

- Pertes dans la conversion solaire.
- Pertes et risques électriques.
- Manque de flexibilité dans l'évolution (extension).
- Absence de continuité de service.

Malgré tous ces inconvénients, cette solution reste largement utilisée dans les centrales photovoltaïques au sol de grande puissance.

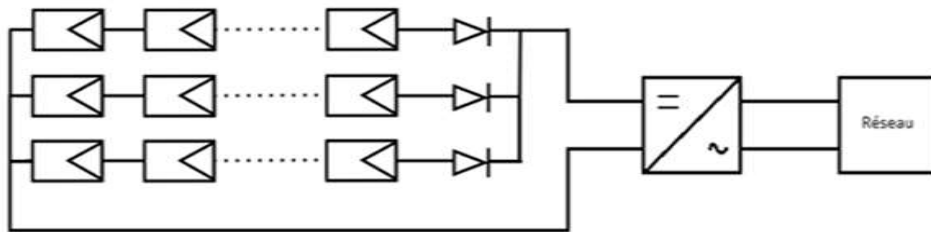


Figure2.29 : Topologie onduleur central raccordée au réseau [34].

C.2. Onduleur de chaîne (String)

Un onduleur est placé à l'extrémité de chaque chaîne, ce qui augmente le nombre de convertisseurs (DC/DC), nous permettant ainsi d'extraire le maximum de puissance possible. En cas de panne de l'un des onduleurs, cela ne provoque pas l'arrêt total du système. Chaque chaîne est indépendante des autres, ce qui la rend évolutive structurellement.

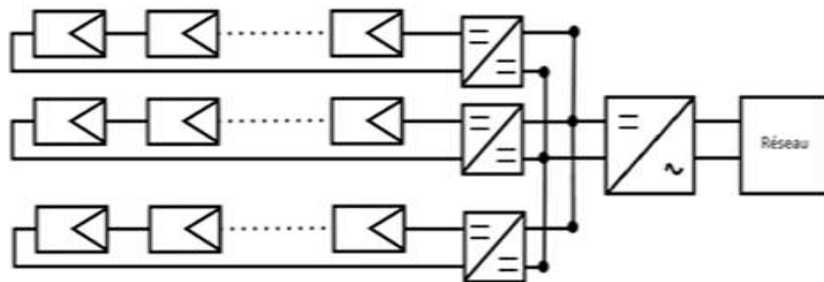


Figure2.30 : Topologie onduleur chaîne raccordée au réseau [33].

C.3. Onduleur multi-chaîne (Multi-string)

Dans cette structure, on utilise un seul onduleur avec un dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour chaque chaîne séparément, en utilisant un hacheur afin de réduire le nombre d'interactions entre le réseau et le système photovoltaïque. Parmi ses avantages : la réduction du coût par rapport à la structure précédente, car le hacheur n'a pas besoin d'intégrer les fonctions de mesure et de surveillance des données du réseau électrique. Le coût peut également être réduit grâce au hacheur qui intègre le système de commande dans la partie alternative. Toutefois, en cas de panne de l'onduleur, la continuité de service n'est pas garantie et le système peut s'arrêter complètement.

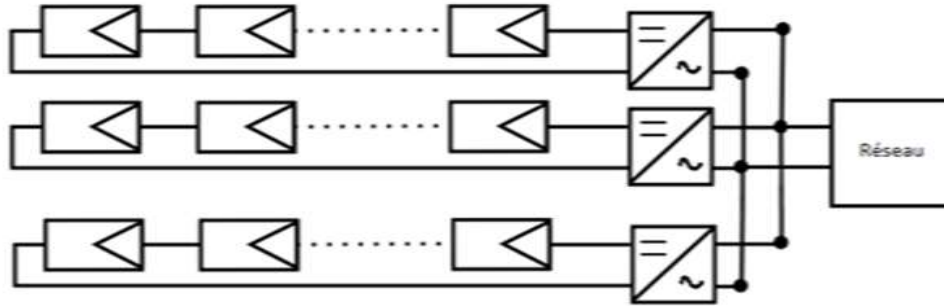


Figure2.31 : Topologie onduleur multi-chaîne raccordée au réseau [34].

2.13. Classification des centrales PV raccordées au réseau (CPCR)

La classification des centrales PV raccordées au réseau (CPCR) selon leur puissance est présentée dans le tableau 2.1

Tableau 2.1 : Classification des centrales PV raccordées au réseau [35].

Type de centrale PV	Puissance P_w	Applications	Raccordement au réseau
Centrale de petite taille	1 à 10 kW	Toits des maisons et des institutions (écoles, parkings, etc.)	Basse tension(BT)
Centrale de taille moyenne	10 à 100 kW	Toits ou façades des bâtiments	Basse tension(BT) ou Moyenne tension (MT)
Centrale de grande taille	> 500 kW	Systèmes centralisés (compagnies d'électricité)	Réseau de distribution ou de transport

2.14. Coût d'installation d'une centrale PV

Le coût total pour l'installation d'une centrale photovoltaïque (PV) non raccordée au réseau est donné par la relation suivante [36] :

$$Ct = APc + BCs + Ct0 \quad (2.4)$$

C_t : Coût total du projet.

A : Coefficient représentant le prix unitaire de la puissance installée des panneaux.

P_c : Puissance de crête du champ (générateur).

B : Coefficient représentant le prix unitaire de la capacité de stockage.

C_s : Capacité totale de stockage.

C_{f0} : Coûts fixes qui ne dépendent pas de la taille du système.

2.15. Avantages et inconvénients d'une installation PV

2.15.1. Avantages

- Haute fiabilité.
- Nature modulaire : Installation simple conçue pour des puissances allant du mW au MW.
- Coût d'exploitation très bas : Maintenance simple, pas besoin de carburant.
- Respectueuse de l'environnement et durabilité environnementale : Applications silencieuses et sans émissions de carbone. Le seul défi est la grande surface occupée par les centrales géantes [18].

2.15.2. Inconvénients

- Coût de fabrication : Nécessite des investissements coûteux.
- Efficacité limitée : Le rendement réel de conversion varie entre 10% et 15%, avec une limite théorique estimée à 28.3% pour une seule cellule.
- Dilemme du stockage : Le coût augmente considérablement lorsqu'il est nécessaire de stocker l'énergie dans des batteries chimiques [18].
- Concurrence avec le diesel : Les générateurs photovoltaïques ne sont pas considérés comme compétitifs par rapport aux générateurs diesel, sauf dans les cas de faible demande d'énergie dans les zones isolées.
- Dépendance à la météo : Le système dépend principalement des conditions météorologiques.

2.16. Conclusion

En conclusion, nous avons pu comprendre le mécanisme de fonctionnement d'une chaîne de production photovoltaïque raccordée au réseau électrique. L'étude théorique nous a permis d'appréhender son impact sur les performances des réseaux. Au-delà de la simple production, nous avons abordé des aspects de commande qui ont démontré la précision et l'importance de la régulation de la distribution d'énergie pour garantir l'efficacité des systèmes électriques en général. En fin, il nous a été permis, ainsi, d'évaluer la qualité de la tension des réseaux notamment de distribution radiale.

CHAPITRE 3

Qualité d'énergie électrique et les réseaux de distribution modernes

3.1. Introduction

La qualité de l'énergie électrique constitue un élément essentiel dans les réseaux électriques modernes, notamment avec le développement rapide des équipements électroniques et l'intégration des systèmes photovoltaïques. Il est essentiel de conserver une tension et un courant stables, tout autant que des courbes sinusoïdales pour assurer le bon fonctionnement des équipements électriques et la fiabilité du réseau.

Cependant, les équipements à charge non linéaire et les convertisseurs électroniques causent différents problèmes comme les harmoniques, les déséquilibres et une augmentation du taux de distorsion harmonique totale (TDH), ce qui dégrade la qualité du courant électrique. Dans ce chapitre, nous présentons une étude générale sur la qualité de l'énergie électrique en analysant ses définitions, ses principaux phénomènes ainsi que les caractéristiques des déformations de l'onde. Une attention particulière est accordée aux harmoniques, à leurs sources et à leurs effets sur le réseau électrique.

Ce chapitre traite également des normes internationales relatives à la qualité de l'énergie électrique, ainsi que du rôle des onduleurs photovoltaïques et des charges non linéaires dans la génération des harmoniques.

Enfin, l'influence des harmoniques sur la qualité de l'énergie électrique et sur le taux de distorsion harmonique totale (TDH) est analysée afin de mettre en évidence leur effet sur l'efficacité et la stabilité des réseaux électriques modernes.

3.2. Définition générale de la QEE

Tout problème se manifestant aux niveaux des tensions, des courants ou de la fréquence occasionnant des dysfonctionnements ou préjudices aux équipements consommateurs [37].

3.3. Définitions alternatives

- La QEE est perçue comme étant une alimentation parfaitement disponible, des niveaux de tensions et de fréquences dans des limites tolérables et des formes d'ondes de tensions et de courants parfaitement sinusoïdales [37].
 - La QEE est, principalement, liée à l'estimation des variations temporelles ou brusques de l'amplitude de la tension.
 - Propriétés des tensions et courants qui responsabilisent les fournisseurs et les consommateurs quant au bon ou mauvais profil d'usage de l'énergie électrique.
- L'aptitude des systèmes électriques à exploiter les charges sans les perturber ou les endommager. C'est une propriété qui est, principalement, attribuée à la qualité de la tension aux points de couplage de desserte d'énergie électrique.
- L'aptitude des charges à fonctionner sans perturbation ou réduction du rendement du système électrique. C'est une propriété qui est, principalement, attribuée à la qualité de la forme d'onde du courant.

- Aptitude d'un système, dispositif ou équipement à fonctionner convenablement dans son environnement électromagnétique sans y introduire de perturbations électromagnétiques intolérables. Ces dernières sont classées selon un mode conduit ou rayonné [37].

Remarque : La QEE est souvent réduite à la qualité de la tension. C'est l'hypothèse qui est, presque, adoptée par l'ensemble des spécialistes de la QEE. Le terme qualité du courant est rarement utilisé.

3.4. Phénomènes de la QEE

3.4.1. Asymétrie (déséquilibre) »

L'aspect symétrique consiste à l'égalité de l'amplitude des grandeurs triphasées ainsi que celle du module des impédances des phases. Le décalage angulaire entre deux vecteurs consécutifs de tension ou de courant doit être égal en valeur absolue à $2\pi/3$. Toute déviation caractérisant les trois conditions citées représente l'aspect asymétrique. Il est l'un des principaux indicateurs de la QEE [37].

3.4.2. Distorsion harmonique

Les formes d'ondes de tension et de courant peuvent s'éloigner de la forme sinusoïdale pure. Les propriétés électriques et les effets nuisibles qu'elles occasionnent dans les réseaux, représentent l'aspect de la pollution harmonique ou de la distorsion harmonique [37]. La théorie de Fourier est la base d'analyse et de mesure de la pollution harmonique. La pollution harmonique doit subir des traitements coercitifs pour son élimination ou du moins son atténuation [38].

A. Concept non linéaire

Les dispositifs non-linéaires qu'on qualifie de sources harmoniques disposent d'un courant qui n'est pas proportionnel à la tension appliquée [38].

La Figure 1.5 montre la courbe $V = f(I)$. La tension appliquée à la résistance non-linéaire est parfaitement sinusoïdale tandis que le courant subit une déviation de la forme sinusoïdale [38].

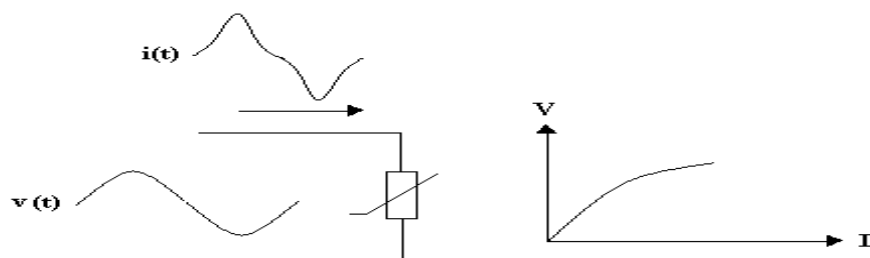


Figure3.1. La distorsion du courant causée par la résistance non-linéaire.

L'augmentation de la tension par de faibles pourcentages provoque des accroissements plus importants du courant. Cette relation entre la tension et le courant représente l'essentiel du concept de la distorsion harmonique dans les systèmes électriques [38].

Remarque : Si la résistance est constante quel que soit la tension ou le courant, nous parlons de résistance linéaire, sinon elle est non linéaire.

B. Sources harmoniques

Les sources classiques d'harmoniques sont [38] :

- Les dispositifs électromagnétiques fonctionnant dans un régime saturé tels que les transformateurs et les moteurs à induction,
- Les charges fluctuantes telles que les fours à arc à courant alternatif,
- Les décharges lumineuses appliquées dans l'éclairage fluorescent utilisé dans les circuits d'éclairage d'ensemble tel que les grandes surfaces ou l'éclairage de route.
- Les sources modernes sont surtout celles qui utilisent les commutations électroniques telles que les convertisseurs statiques et leurs différentes cascades nécessaires à l'exploitation des réseaux électriques. De nouveaux systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant l'électronique de puissance et la microélectronique de commande, désignés sous l'acronyme **FACTS** (Flexible Alternative Current Transmission System) ont aussi des comportements non-linéaires.

3.4.3. Fluctuations de tension

La fluctuation de la tension déviant de -10% à $+10\%$ de la valeur nominale est divisée en 2 catégories [37].

- Changements graduels des tensions
- Changements aléatoires ou cycliques de tension

3.4.4. Phénomène de papillotement (Flicker)

C'est l'impression d'une fluctuation de luminance ou de couleur que l'œil humain perçoit.

3.4.5. Variation de la fréquence

La fréquence est l'expression électrique de la vitesse de rotation des alternateurs. Ces derniers tournent tous à la même vitesse. Il y a, alors, égalité entre le couple moteur fourni par la turbine, et le couple résistant égal au couple électrique opposé par le réseau (l'égalité entre la production et la consommation de la puissance active). Tout déséquilibre de ce bilan entraînera une déviation de vitesse donc de fréquence [37].

3.4.6. Creux de tension

Un creux de tension est une diminution de l'amplitude de la tension de 10% à 90% de la valeur nominale pendant une durée allant de 10 [ms] à 1 [mn] [37].

Remarque : Une coupure brève représente une amplitude de tension atteignant jusqu'à 10% de la valeur nominale pendant une durée allant de 10 [ms] à 1 [min] .

3.4.7. Surtensions

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de $1,1\text{ [pu]}$ à généralement plus que $1,8\text{ [pu]}$. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension [37].

3.5. Classification des phénomènes de la QEE

La caractérisation multiforme des phénomènes de la QEE peut être, aussi, établie selon que les phénomènes se produisent tout au long des régimes permanents, ou selon que les grandeurs d'état caractérisent des processus transitoires ou en subissent leurs conséquences. Le tableau ci-dessous montre une caractérisation catégorielle des phénomènes de la QEE en spécifiant les limites tolérables des amplitudes de tension et leurs caractéristiques temporelles. Il est extrait de la norme IEEE ANSI 1159 -1995[37].

Tableau 3.1 : Classification des divers phénomènes de la QEE

No.	Catégories		Durée	Amplitude de tension en [pu]
I	Variations de courte durée			
(a)	Creux	Instantané	0.5 - 30 cycles	0.1 - 0.9
		Momentané	30 cycles-3 [s]	0.1 - 0.9
		Temporaire	3 [s]-1[mn]	0.1 - 0.9
(b)	Surtension	Instantanée	0.5 - 30 cycle.	1.1 - 1.8
		Momentanée	30 cycles - 3 [s]	1.1 - 1.4
		Temporaire	3 [s] - 1[mn]	1.1 - 1.2
(c)	Coupure	Momentanée	0.5 cycles - 3 [s]	< 0.1
		Temporaire	3 [s] - 1 [mn]	< 0.1
II	Variations de longue durée			
(a)	Coupure.		> 1[mn]	0.0
(b)	Baisse de tension		> 1[mn]	0.8 - 0.9
(c)	Surtension		> 1[mn]	1.1 - 1.2
III	Variations transitoires			
(a)	Impulsionnelles		< 50 [nsec]	-
			50 - 1 [msec]	-
			> 1 [msec]	-
(b)	Oscillatoires	basse fréquence	0.3 – 50 [msec]	0 - 4
		Moyenne fréquence	20 [µsec]	0 - 8
		Haute fréquence	5 [µsec]	0 - 4
IV	Déséquilibre de tension		Régime permanent	–
V	Déformation de la forme d’onde			
(a)	Harmoniques		Régime permanent	–
(b)	Encoches de commutation		Régime permanent	–
(c)	Bruits		Régime permanent	–
VI	Papillotement		Intermittent < 25 [Hz]	0.1 – 7[%]
VII	Variation de fréquence		< 10 [s]	–

Remarque : La norme révisée 1459 – 2019 propose une classification plus détaillée.

3.6. Dégradation de l'onde de tension et de courant

La qualité de l'énergie est considérée comme une combinaison entre la qualité de la tension et la qualité du courant [39].

3.6.1. Qualité de la tension

Scientifiquement, l'électricité est fournie via un système triphasé alternatif et nous exprimons sa qualité à travers quatre caractéristiques principales qui sont l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie [39].

A. Amplitude

L'amplitude de la tension ou la force du courant électrique est le critère de base auquel le fournisseur s'engage envers le consommateur, où il s'engage à ce que la valeur de la tension reste stable dans les limites de 10% de la valeur convenue. Dans l'état idéal, les valeurs de tension dans les trois phases sont identiques et parfaitement constantes. La réalité témoigne de deux types de perturbations, la première étant les perturbations aiguës résultant de court-circuit, représentées par des baisses soudaines ou de fortes augmentations de tension qui entraînent des dommages aux appareils. Le second est constitué de légères variations de moins de 10% résultant de la fluctuation des charges dans le réseau ou d'un changement dans leurs paramètres de distribution [40].

B. Fréquence

Dans l'état idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales avec une fréquence constante de 50 Hz ou 60 Hz selon le pays. Cette fréquence peut être perturbée à la suite d'un déficit de production, d'une déconnexion des centrales de production du réseau, ou à cause de pannes entraînant une baisse soudaine des charges. Cependant, ces changements sont considérés comme mineurs, inférieurs à 1%, et n'affectent pas les appareils sensibles. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 stipule que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit être dans la plage de 50 Hz $\pm 1\%$ pendant 99.5% de l'année et dans une plage de +4% à -6% pendant 100% du temps. Les variations de fréquence peuvent être plus importantes dans les réseaux indépendants isolés [39].

C. Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions composant le système triphasé doit être aussi proche que possible de la courbe sinusoïdale. Lorsque des perturbations se produisent dans la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et elle est considérée comme une onde fondamentale à une fréquence de 50 Hz liée à des ondes de fréquences supérieures et inférieures à 50 Hz appelées harmoniques, de même que ces tensions peuvent contenir des signaux permanents mais non périodiques appelés alors bruit [39].

D. Symétrie

La symétrie signifie que les trois tensions sont égales en valeur et séparées par des angles de déphasage précis et réguliers, et tout défaut dans cet équilibre est appelé déséquilibre ce qui affecte négativement l'efficacité du système [41].

3.6.2. Qualité de courant

La qualité du courant est liée à l'écart par rapport à sa forme idéale et se caractérise de la même manière que la tension à travers quatre facteurs : l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie. Dans l'état idéal, les trois courants ont une amplitude et une fréquence constantes, avec un déphasage de $2\pi/3$ entre eux et une forme sinusoïdale pure. Le terme "qualité du courant" est rarement utilisé car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et à la nature des charges. Pour cette raison, le terme "qualité de l'énergie électrique" est souvent réduit à la "qualité de la tension" [42].

3.7. Caractéristiques des déformations de l'onde

3.7. 1. Caractérisation du contenu harmonique

Le concept des harmoniques qui vient du développement mathématique de la série de Fourier permet de définir la déformation du signal mesuré quantitativement et avec précision. L'onde est décomposée en un groupe d'ondes sinusoïdales avec des fréquences différentes liées à une onde sinusoïdale de fréquence industrielle 50Hz appelée fondamentale. La fréquence de chacune est un multiple de la fréquence du signal fondamental, et donc le rang de l'harmonique est le rapport de sa fréquence à la fréquence du fondamental [39].

$$n = \frac{fn}{f1} \quad (3.1)$$

fn : Fréquence de l'harmonique

$f1$: Fréquence du fondamental

A. Série trigonométrique

Les séries de Fourier permettent la représentation de tout signal périodique $x(t)$ (de tension ou de courant) par une somme infinie de signaux sinusoïdaux. Chaque signal de la somme se caractérise par une fréquence multiple de la fréquence fondamentale. Elle est donnée pour $x(t)$ par l'expression :

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)) \quad (3.2)$$

Où $\omega = 2\pi f$ avec f la fréquence de la composante d'ordre 1 qu'on appelle fondamentale ($f = 50$ Hz ou 60 Hz), et h représente l'ordre harmonique (n ou h). Les coefficients de Fourier A_n et B_n (ou a_h et b_h) sont définis par :

$$A_0 = \frac{1}{T} \int x(t) dt \quad (3.3)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (3.4)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3.5)$$

A_0 : Amplitude de la composante continue, souvent nulle.

A_n Et B_n : amplitudes de l'harmonique de rang n .

On néglige les harmoniques qui dépassent le rang 25.

B. Propriétés de symétrie

Si on observe l'égalité : $x(t + T/2) = -x(t)$; alors : rangs pairs nuls.

Si on observe l'égalité : $x(-t) = x(t)$; alors : $B_n = 0$ (ou $b_h = 0$).

Si on observe l'égalité : $x(-t) = -x(t)$; alors : $A_n = 0$ (ou $a_h = 0$).

C. Forme sinusoïdale (polaire)

La forme sinusoïdale (polaire) est donnée par :

$$x(t) = X_0 + \sum_{h=1}^{\infty} X_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (3.6)$$

D. Valeur efficace d'une grandeur déformée

La valeur efficace d'un signal $x(t)$ déformé et périodique de période T est donnée par la relation quadratique :

$$X_{eff} = \sqrt{X^2 + \sum_{h=1}^{\infty} X_h^2} \quad (3.7)$$

E. Représentation spectrale

On représente souvent le signal déformé sous la forme d'un spectre. En abscisse on a la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent). Donc à chaque fréquence harmonique f_h , on fait correspondre la valeur d_h .

3.7.2. Taux de distorsion harmonique individuel et global TDH

C'est la mesure la plus importante pour juger la qualité du signal. Plus le taux de TDH augmente, plus la dégradation de la qualité de l'énergie augmente et l'efficacité du système diminue [39].

Formule du TDH :

$$TDH = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \quad (3.8)$$

Les harmoniques sont un bruit électrique qui cause le chauffage des équipements et la diminution de l'efficacité de l'énergie et la baisse du facteur de puissance, et on exprime la taille du problème par la valeur du TDH.

3.7.3. Analyse cinétique en présence des harmoniques

A. Cas monophasé non sinusoïdal

Les expressions instantanées de tensions et de courants harmoniques (monophasé ou une phase du triphasé) sont données, respectivement, par :

$$v(t) = V_1(t) + V_H(t) = \hat{V} \sin(\omega t + \beta_1) + \sum_{h \neq 1}^{+\infty} \hat{V} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (3.9)$$

$$i(t) = i_1(t) + i_H(t) = \hat{I} \sin(\omega t + \beta_1) + \sum_{h \neq 1}^{+\infty} \hat{I} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (3.10)$$

3.8. Normalisation de la QEE

Les normes, d'après la définition de l'ISO, sont « des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques pour s'assurer que des matériaux, produits, processus et services sont aptes à l'emploi ». En ce qui concerne la qualité de l'énergie, les normes ont un double objectif [43] :

- Etablir la définition des caractéristiques nominales de la fourniture, c'est-à-dire les valeurs nominales comme les déviations admissibles de la tension et de la fréquence.
- Définir les perturbations qui peuvent agir sur le réseau (par exemple le seuil qui sépare un creux de tension d'une interruption etc.), comme la quantité ou l'intensité maximum de perturbations pouvant avoir lieu dans un réseau particulier.

Les normes de manière générale donnent une définition assez précise des caractéristiques de la fourniture (tension et fréquences nominales, déviations admissibles etc.), mais les limites des perturbations restent assez floues. D'ailleurs, les différents organismes de normalisation n'ont pas toujours la même vision sur la notion de qualité.

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont :

- **La Commission Electrotechnique Internationale (CEI)** : est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle avec plus de 377.000 membres appartenant à 150 pays, partagée en différentes régions et sections. 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 critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [44].
- **L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)** : est un organisme qui a deux sociétés travaillant dans des domaines liés à la qualité de l'énergie : IAS (Industrial Applications Society) et PES (Power Engineering Society). Leurs activités de normalisation sont gérées par le comité SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Les deux normes de qualité principales de l'IEEE sont [45] :

1. IEEE 519 : 1992, (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems) : Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau [45].

2. IEEE 1159 : 1995, (IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality) : Cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude [45].

Néanmoins, la CEI (tout comme l'organisme de normalisation européen CENELEC) n'utilise le terme de qualité de l'énergie dans aucune de ces normes. En revanche, elle utilise le concept de « Compatibilité Electromagnétique ». Ce concept est défini comme « la capacité d'un dispositif, équipement ou système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour les autres ». Par environnement électromagnétique d'un dispositif, on entend le niveau de perturbation auquel il est soumis, en tenant compte des perturbations rayonnées et conduites indépendamment de l'origine. A partir de l'environnement électromagnétique d'un dispositif, on peut définir les caractéristiques d'immunité (niveau minimum de perturbations électromagnétiques que doit supporter l'équipement) et d'émission (niveau maximum de perturbations qui peut être produit par l'équipement). Finalement, le niveau de compatibilité peut être introduit : il s'agit d'un niveau de référence qui se trouve entre les limites d'émission et d'immunité et qui permet le fonctionnement correct des dispositifs durant la plupart du temps [45].

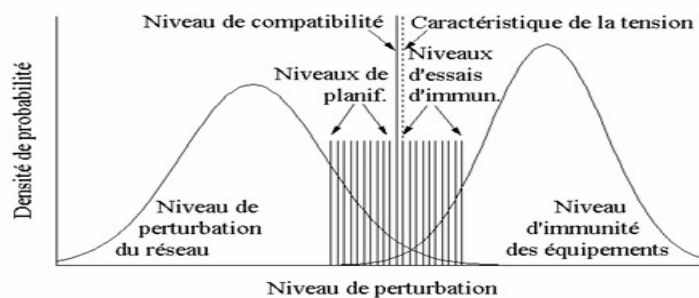


Figure3.2 : Illustration des concepts de base de la normalisation en matière de qualité de l'électricité, à l'aide de statistiques temps/lieu concernant le système entier.

Les normes d'EMC de la CEI sont regroupées dans la publication CEI-61000. Cette publication est divisée en 6 parties :

- Partie 1** : Généralités. Considération générales, définitions, terminologie etc.
- Partie 2** : Description et classification de l'environnement et des niveaux de compatibilité.
- Partie 3** : Limites d'émission et d'immunité.
- Partie 4** : Techniques d'essai et de mesure.
- Partie 5** : Guide d'installation et d'atténuation des perturbations.
- Partie 6** : Normes génériques.

La plupart de normes de cette publication sont consacrées aux limites d'émission et à la susceptibilité des appareils dans des conditions environnementales données. Comme on peut le constater, les deux termes qualité et CEM expriment des concepts différents, car le domaine d'étude de

la CEM est plus vaste que celui de la qualité de l'énergie et comprend également plus de phénomènes (comme par exemple les perturbations rayonnées). Cependant, on pourrait considérer la qualité de l'énergie comme une partie de la CEM, car la qualité de l'énergie peut être considérée comme « l'environnement électromagnétique pour les perturbations venant du réseau électrique ou transmise à travers ce dernier » [45].

A part, les normes CEI et IEEE, il existe une autre norme de qualité qui mérite une attention spéciale : la norme européenne EN 50160 du CENELEC. Le traitement par cet organisme des aspects liés à la qualité est très similaire à celui de la CEI, c'est-à-dire à travers des normes de CEM. Cependant, la norme EN 50160 n'est pas incluse dans le catalogue des normes CEM et se rapproche plus du type IEEE.

Cette norme définit les caractéristiques de la tension (B.T. et M.T.) sur les réseaux de distribution publics. La norme présente les niveaux maximum et minimum des valeurs et variations qui peuvent être attendues dans les réseaux en conditions normales, et la façon de les mesurer (en faisant une moyenne hebdomadaire des valeurs prises toutes les 10 minutes).

Les caractéristiques limites sont fixées pour 95% du temps, tandis que pour le reste du temps, il n'y a aucune limite. Cette norme est seulement valable en conditions normales ; elle présente également une liste des situations pour lesquelles elle ne doit pas être appliquée (après court-circuit, opérations etc.) [45].

3.9. L'onduleur photovoltaïque

Un onduleur photovoltaïque est un composant électronique qui permet de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif pouvant être injecté dans le réseau électrique. Il est constitué d'un système de commande MPPT (Maximum Power Point Tracker) qui recherche le point de fonctionnement optimal des panneaux, ainsi que d'un circuit de conversion assurant la transformation du courant continu en courant alternatif à une fréquence déterminée (50 Hz ou 60 Hz) [46].

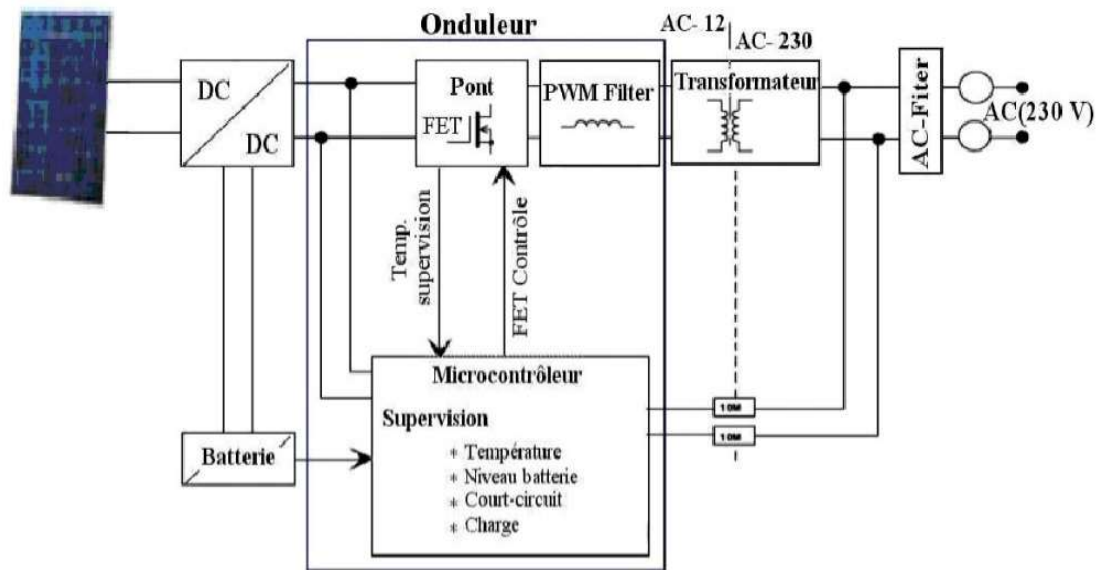


Figure3.3 : Schéma fonctionnel de l'onduleur photovoltaïque.

L'onduleur connecté au réseau peut fonctionner avec ou sans transformateur selon les normes utilisées. Les onduleurs sans transformateur présentent généralement un meilleur rendement grâce à la réduction des pertes. Les onduleurs photovoltaïques peuvent être classés selon plusieurs configurations : avec ou sans convertisseur DC-DC, et avec ou sans transformateur [47].

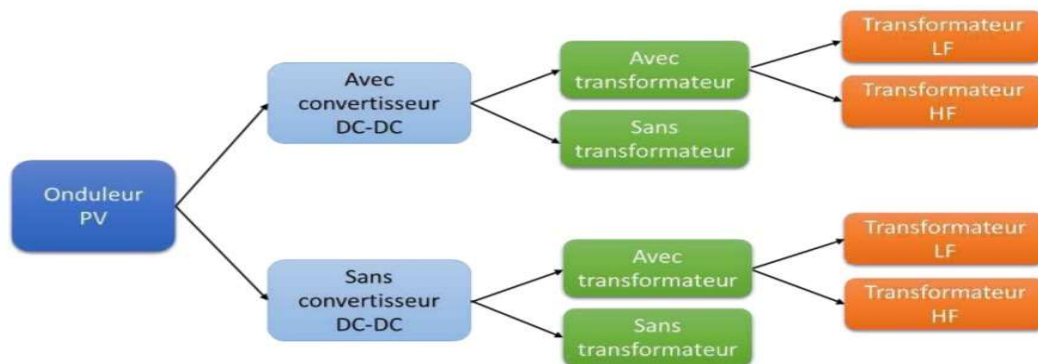


Figure3.4 : Classement des onduleurs photovoltaïques.

3.10. Charge non linéaire

Une charge non linéaire désigne toute charge qui appelle un courant non sinusoïdal malgré son alimentation par une tension sinusoïdale régulée. Ce type de récepteurs génère des harmoniques. Cette catégorie comprend les dispositifs d'électronique de puissance, les appareils électromagnétiques en cas de saturation, et autres. [39].

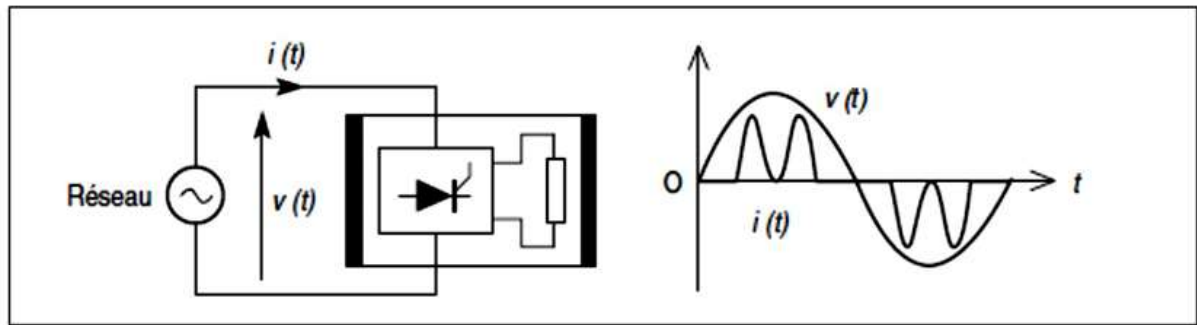


Figure3.5 : Signaux relatifs à une charge non linéaire.

Puissance

- La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée durant une seule période, consommée par la charge [39].

$$P = \frac{1}{T} \int v(t) \cdot i(t) dt \quad (3.11)$$

$$P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 + V_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots$$

$V_1 I_1 \cos \varphi_1$: contribution de la composante fondamentale.

$V_2 I_2 \cos \varphi_2$: contribution des harmoniques de rang 2.

$V_3 I_3 \cos \varphi_3$: contribution des harmoniques de rang 3.

- La puissance réactive consommée par la charge est égale à [39] :

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 + \sum V_n I_n \sin \varphi_n \quad (3.12)$$

- La puissance apparente S : $S = V I$ (3.13)

- La puissance déformante D : $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ (3.14)

$$\text{En cas de présence d'harmoniques : } S^2 \neq P^2 + Q^2 \quad (3.15)$$

En milieu sinusoïdal : $\text{FP} = \cos \varphi$

En milieu harmonique : $\text{FP} \neq \cos \varphi$

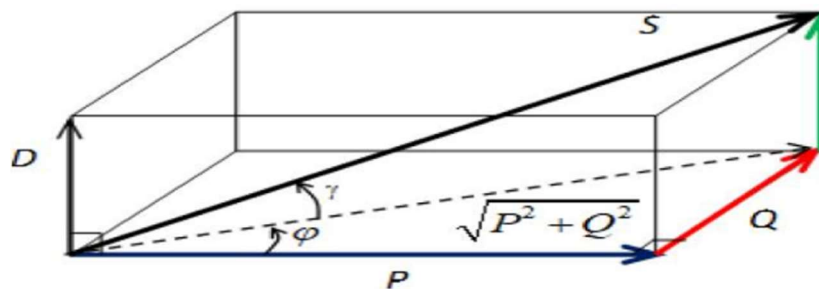


Figure3.6 : Diagramme de puissances avec une charge non linéaire.

Facteur de puissance

Le concept de $\cos \varphi$ ne peut pas être utilisé seul lors du traitement de signaux déformés, c'est pourquoi nous utilisons le facteur de puissance FP ou PF (abréviation de Power factor) dans les références anglaises. La puissance déformante D exprime les effets négatifs de la distorsion harmonique sur le réseau électrique. La dégradation de la valeur du facteur de puissance dans cette installation est beaucoup plus importante par rapport aux charges linéaires, en raison de la pollution harmonique résultant des charges non linéaires. Pour éviter la confusion entre le $\cos \varphi$ et le facteur de puissance FP, les appareils de mesure et d'analyse d'énergie adoptent le terme DPF ou facteur de puissance de déplacement (Displacement Power factor) pour désigner le $\cos \varphi$ dans un système perturbé. Étant donné que la compensation de l'énergie réactive dans l'installation ne se fait pas sur les harmoniques, c'est le facteur DPF qui est pris en compte mathématiquement. Le DPF est égal au facteur de puissance uniquement dans le cas de signaux non déformés. De même, le DPF représente le cosinus du déphasage entre les composantes fondamentales de la tension et du courant [39].

3.11. Le réseau classique et la nature des charges

Dans le réseau traditionnel classique, l'énergie électrique transite de manière unidirectionnelle, du réseau principal vers les charges. Lorsqu'il y a des charges non linéaires dans le système (comme les équipements électroniques, les variateurs et les moteurs), elles consomment des courants qui ne sont pas sinusoïdaux, créant ainsi une distorsion harmonique représentée par la puissance harmonique (PH). La présence des harmoniques déforme les formes d'onde de la tension et du courant, ce qui provoque une dégradation de la qualité de l'énergie électrique. Cette distorsion engendre des perturbations de la qualité de l'énergie, comme : l'émergence de creux de tension (creux de tension) ou des surtensions électriques locales (surtensions locales).

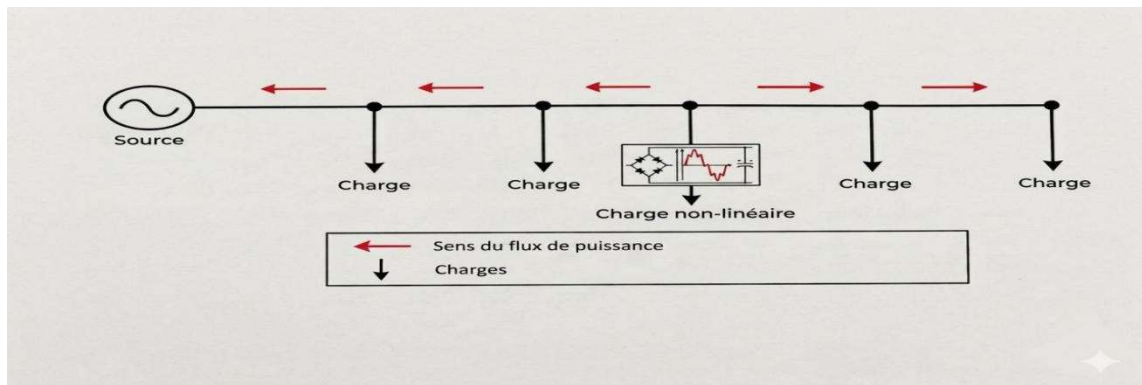


Figure3.7 : Impact d'une charge non-linéaire sur le flux de puissance harmonique dans un réseau de distribution.

3.12. Le réseau moderne et l'intégration du PV

Lors de la transition vers le cas moderne et l'introduction des sources d'énergie renouvelable distribuée, précisément les panneaux photovoltaïques, la nature du fonctionnement du réseau change complètement et les caractéristiques suivantes apparaissent :

-Transit bilatéral de la puissance (P, Q) : Dans le réseau moderne, l'énergie ne circule plus dans un seul sens. Les panneaux photovoltaïques connectés au réseau génèrent de l'énergie et répondent localement aux besoins de la charge. En cas d'excédent de production, cette énergie est réinjectée vers le réseau principal.

Cette intégration entraîne également une modification des valeurs de puissance active et réactive :

- Puissance active (P) : Lorsque de l'énergie est générée par les panneaux PV et injectée, la puissance active soutirée depuis le réseau principal diminue et sa valeur varie.
- Puissance réactive (Q) : En raison de la nature des onduleurs solaires et des charges, les exigences en puissance réactive dans le réseau peuvent changer (à la hausse ou à la baisse) pour maintenir la stabilité de la tension, ce qui nécessite une surveillance rigoureuse du facteur de puissance (Power Factor).

3.13. Étude de l'influence des harmoniques sur la qualité de l'énergie électrique

Lorsqu'une distorsion harmonique se produit dans le réseau, la tension ne se résume plus à la seule onde sinusoïdale pure fondamentale. La tension totale efficace (RMS) se divise en deux composantes principales selon la loi de la somme quadratique (RMS) : Relation mathématique :

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_H^2} \quad (3.16)$$

Où :

V : Représente la tension totale efficace du réseau.

V₁ : Représente la tension de la composante fondamentale propre.

V_H : Représente la tension harmonique totale déformée.

Les harmoniques ont une influence directe sur la qualité de l'énergie électrique. Leur présence dans le réseau provoque des distorsions de la tension et du courant, ce qui entraîne une augmentation du taux de distorsion harmonique totale (TDH).

Plusieurs cas peuvent apparaître :

1. Si V₁ augmente et V_H reste constant :

La valeur totale V augmente normalement et la qualité de l'énergie reste bonne, car la composante fondamentale est dominante.

2. Si V_H augmente et V₁ reste constant :

La tension totale V augmente aussi, mais cette augmentation est due aux harmoniques. Dans ce cas, le TDH augmente et la qualité de l'énergie se dégrade.

3. Si V_1 et V_H augmentent ensemble :

La valeur efficace totale V augmente davantage. Cependant, la qualité dépend du niveau des harmoniques. Si V_H reste faible par rapport à V_1 , la qualité reste acceptable. Sinon, le TDH devient important.

4. Si V_1 diminue et V_H augmente :

Les harmoniques deviennent plus influentes par rapport à la fondamentale, ce qui provoque une forte augmentation du TDH et une mauvaise qualité de l'énergie.

5. Si $V_H = 0$:

Il n'existe aucune harmonique et la tension devient purement sinusoïdale : $V = V_1$ Dans ce cas, la qualité de l'énergie est excellente.

L'augmentation de la tension harmonique V_H provoque une augmentation du taux de distorsion harmonique totale (TDH). En revanche, lorsque la tension fondamentale V_1 augmente tandis que V_H reste constante, le TDH diminue car la composante fondamentale devient dominante. Un faible TDH, généralement inférieur ou égal à 5 %, indique une bonne qualité de l'énergie électrique. Par contre, un TDH élevé traduit la présence importante des harmoniques, ce qui peut entraîner des perturbations dans le réseau, des pertes supplémentaires ainsi qu'un échauffement des équipements électrique

3.14. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la qualité de l'énergie électrique ainsi que les principaux phénomènes pouvant perturber les réseaux électriques. Nous avons démontré que les harmoniques, créés surtout par les équipements non linéaires et les onduleurs photovoltaïques, causent des distorsions des tensions et des courants, ce qui entraîne une augmentation du taux de distorsion harmonique totale (TDH), des pertes additionnelles et une diminution du facteur de puissance. Cette étude a également mis en évidence l'impact de l'intégration des systèmes photovoltaïques sur le fonctionnement des réseaux modernes, ainsi que l'importance des normes internationales telles que IEEE et CEI pour limiter les perturbations électriques. La réduction des harmoniques et du taux de TDH reste essentielle pour améliorer la qualité de l'énergie électrique et assurer la stabilité et l'efficacité des réseaux électriques modernes.

CHAPITRE 4

**Simulation Et
Validation sur
un Réseau de
distribution
radial**

4.1. Introduction

L'optimisation des réseaux de distribution électrique intégrant des générateurs photovoltaïques (PV) constitue aujourd'hui un enjeu majeur de l'ingénierie électrique moderne. En effet, la production photovoltaïque se caractérise par son caractère variable et décentralisé, ce qui peut influencer le fonctionnement du réseau en modifiant les profils de tension et la qualité de l'énergie. L'intégration croissante de ces sources renouvelables nécessite donc une analyse approfondie afin d'assurer un fonctionnement fiable et performant du système électrique.

L'objectif de ce chapitre est de rechercher un meilleur profil qualitatif du réseau de distribution à travers l'intégration optimale d'un générateur photovoltaïque. Pour cela, une étude de simulation est réalisée sur un réseau radial à 10 nœuds afin d'évaluer l'impact du photovoltaïque sur le comportement du réseau et sur la qualité de l'énergie.

Ce chapitre est organisé en trois parties. La première partie est consacrée à l'étude de l'influence de l'injection photovoltaïque sur le profil de tension du réseau. La deuxième partie porte sur l'analyse harmonique du réseau à travers l'évaluation des tensions harmoniques et du taux de distorsion harmonique totale (TDH) en présence de charges non linéaires et du système photovoltaïque. Enfin, la troisième partie est dédiée à l'optimisation du réseau afin de déterminer l'emplacement et la puissance optimaux du générateur photovoltaïque permettant d'améliorer la qualité de l'énergie et de réduire les perturbations harmoniques.

Les résultats obtenus permettront ainsi d'identifier la configuration la plus adaptée pour assurer un fonctionnement efficace du réseau tout en garantissant un meilleur profil qualitatif.

4.2. Réseau d'étude

Dans cette étude, nous nous appuyons sur le réseau présenté dans la figure 4.1.

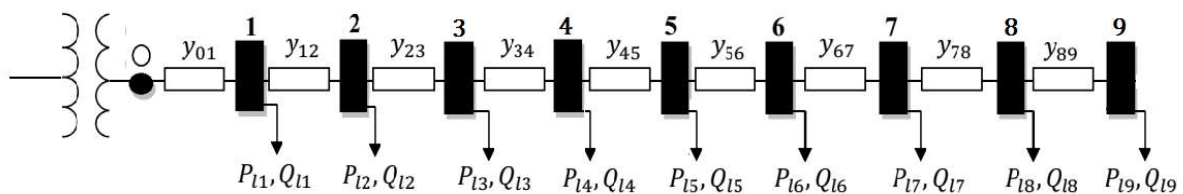


Figure 4.1 : Schéma unifilaire du réseau de distribution radial étudié à la fréquence fondamentale [48].

4.3. Données de réseau

Les puissances des charges linéaires du réseau d'étude et les paramètres des lignes en unités absolues sont aux tableaux 4.1 et 4.2, respectivement.

Tableau 4.1 : Puissances en unités absolues.

Chapitre 4 Simulation et Validation sur un Réseau de distribution radial

Nœuds	P [KW]	Q [KVAR]	S [KVA]
1	1840	460	1897
2	980	340	1037
3	1790	446	1845
4	1598	1840	2437
5	1610	600	1718
6	780	110	788
7	1150	60	1152
8	980	130	989
9	1040	200	1652
Total	11768	8200	13515

Tableau 4.2 : Résistances et réactances des lignes en unités absolues.

Nœud (de)	Nœud (à)	R [Ω]	X [Ω]
0	1	0.1233	0.4127
1	2	0.0140	0.6051
2	3	0.7463	1.2050
3	4	0.6984	0.6084
4	5	1.9831	1.7276
5	6	1.9831	0.7886
6	7	1.9831	1.1640
7	8	4.7953	2.7160
8	9	5.3434	3.0264

Pour simplifier les calculs de l'écoulement de puissance, nous avons converti toutes les données du réseau en valeurs relatives (pu) comme montré aux tableaux 4.3 et 4.4.

En adoptant les formulations : $P_* = \frac{P}{S_{base}}$ $Q_* = \frac{Q}{S_{base}}$ (4.1)

sachant $S_{base} = 21.15 \text{ MVA}$

Tableau 4.3 : Puissances en unités relatives.

Nœuds	P_* (pu)	Q_* (pu)
1	0.0870	0.0217
2	0.0463	0.0161
3	0.0846	0.0211
4	0.0755	0.0870
5	0.0760	0.0283
6	0.0367	0.0052
7	0.0543	0.0028
8	0.0463	0.0061
9	0.0775	0.0094

Tableau 4.4 : Résistances et réactances des lignes en unités relatives.

Nœud (de)	Nœud (à)	R_* (pu)	X_* (Pu)
0	1	0.0049	0.0165
1	2	0.00056	0.0242
2	3	0.0299	0.0482
3	4	0.0279	0.0243
4	5	0.0793	0.0691
5	6	0.0362	0.0315
6	7	0.0822	0.0466
7	8	0.1918	0.1086
8	9	0.2137	0.1210

Il est à noter que les paramètres en unités relatives (pu) sont données par les formulations suivantes : $R_* = \frac{R}{Z_{base}}$ et $X_* = \frac{X}{Z_{base}}$ sachant $Z_{base} = \frac{U_n^2}{S_{base}}$ (4.2)

$$, U_n = 23 \text{ KV et } Z_{base} = 25 \Omega$$

4.4. Partie1 : Etude de l'influence du générateur photovoltaïque sur le profil de tension

Dans cette partie, nous avons utilisé un programme développé sous MATLAB qui modélise un réseau électrique radial à 10 nœuds, afin d'analyser l'impact de l'intégration de la production photovoltaïque sur le profil des tensions en utilisant la méthode de balayage arrière-avant (Backward-Forward Sweep).

4.4.1. Méthode d'écoulement de puissance (Backward-Forward Sweep)

Il s'agit d'une méthode itérative utilisée pour l'analyse d'écoulement de puissance (Load Flow) dans les réseaux de distribution radiales, car elle tire profit de leur structure spécifiquement radiale [49].

Cette méthode repose sur deux étapes principales : le balayage arrière (Backward Sweep) et le balayage avant (Forward Sweep). Le balayage arrière permet de déterminer les courants et/ou les transits de puissance dans les branches, en transitant des nœuds du réseau (les extrémités) vers la source, tandis que d'autre part, le balayage avant est utilisé pour mettre à jour les tensions des nœuds, en allant de la source vers les extrémités du réseau [49].

Pour illustrer cette approche, si l'on se réfère au schéma du réseau de distribution radial à 6 nœuds (Figure 4.2), le calcul des courants de charge s'effectue par la formule [50]

$$I_j^{(k)} = \left(\frac{PL_j + jQL_j}{V_j} \right)^* \quad (4.3)$$

Pour $j = 2, 3, 4, 5, 6$.

Avec $I_j^{(k)}$: Le courant de charge au nœud j à l'itération k .

PL_j : La puissance active de la charge au nœud j.

QL_j : La puissance réactive de la charge au nœud j.

V_j : La tension du nœud j.

À partir de là, l'étape du balayage arrière (Backward Sweep) est définie par les équations [50]

$$I_{45} = I_5 \quad (4.4)$$

$$I_{34} = I_{45} + I_4 \quad (4.5)$$

$$I_{36} = I_6 \quad (4.6)$$

$$I_{23} = I_{34} + I_{36} + I_3 \quad (4.7)$$

$$I_{12} = I_{23} + I_2 \quad (4.8)$$

Suivie par l'étape du balayage avant (Forward Sweep) qui détermine les tensions [50]

$$V_2 = V_1 - Z_{12} I_{12} \quad (4.9)$$

$$V_3 = V_2 - Z_{23} I_{23} \quad (4.10)$$

$$V_4 = V_3 - Z_{34} I_{34} \quad (4.11)$$

$$V_5 = V_4 - Z_{45} I_{45} \quad (4.12)$$

$$V_6 = V_3 - Z_{36} I_{36} \quad (4.13)$$

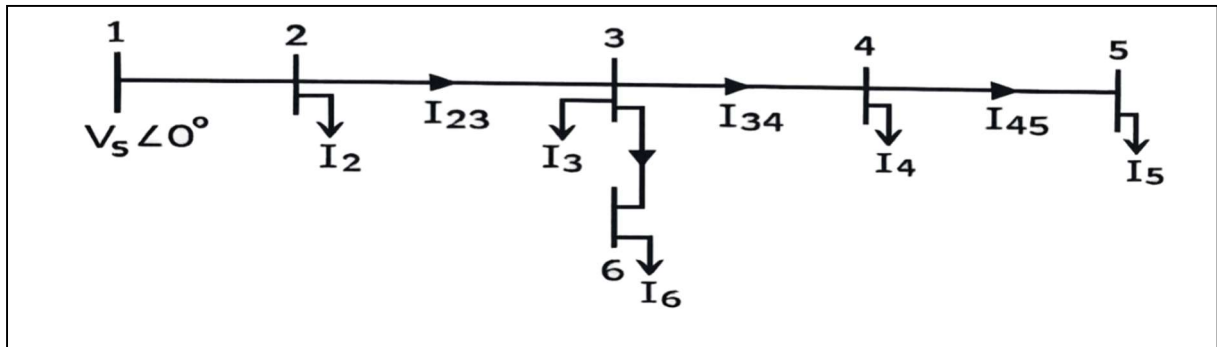


Figure 4.2 : Schéma du réseau de distribution radiale à 6 nœuds [50].

4.4.2. Résultats de simulation

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes qui montrent l'évolution du profil de tension du réseau sous l'effet de l'augmentation progressive de la puissance injectés P_{pv} .

Scénario 01

Dans ce scénario, nous montrons comment change la tension dans les différents nœuds du réseau (du JdB1 au JdB10). Nous avons placé le système PV dans trois points différents 2,5 et 10, le but est d'avoir l'effet de l'énergie solaire sur les valeurs de la tension. Pour cela, nous avons varié la puissance active P_{pv} entre 0.01 pu et 0.1 pu avec une puissance réactive fixe $Q_{pv} = 0.02 \text{ pu}$. La simulation suivante est faite sans utiliser de charges non linéaires et pour étudier uniquement la qualité de la tension au sens de déformation de forme.

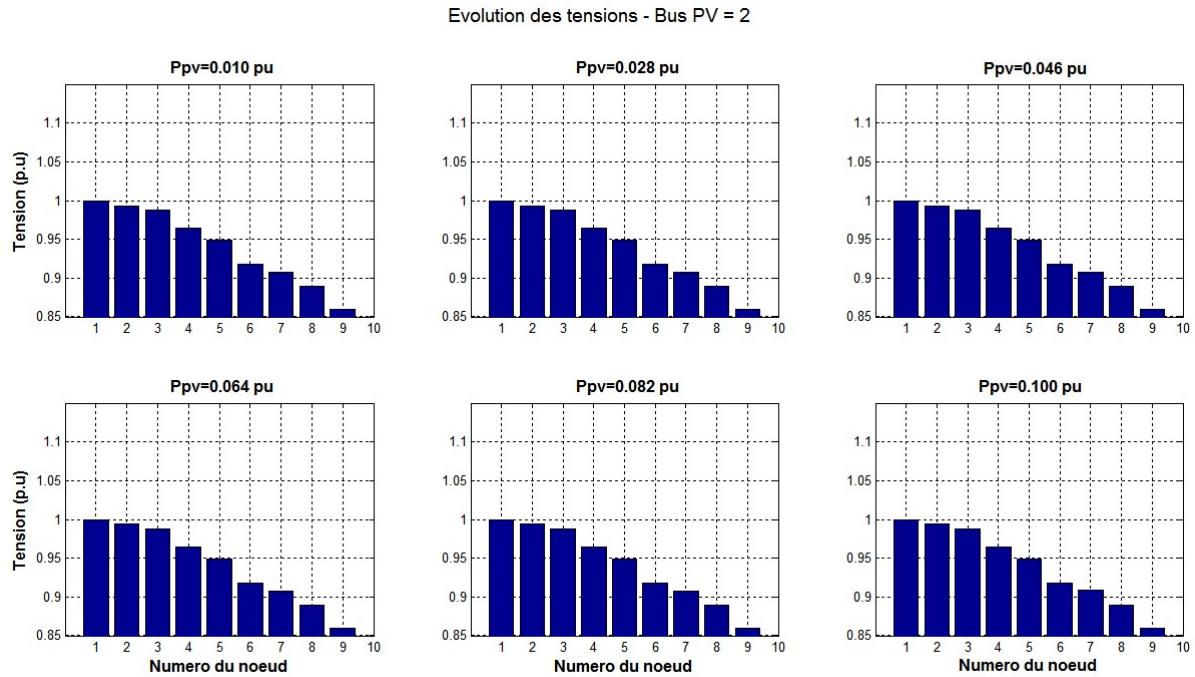


Figure 4.3 : Evolution des tensions - nœud PV = 2 (pour P_{pv} allant de 0.010 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.02 \text{ pu}$).

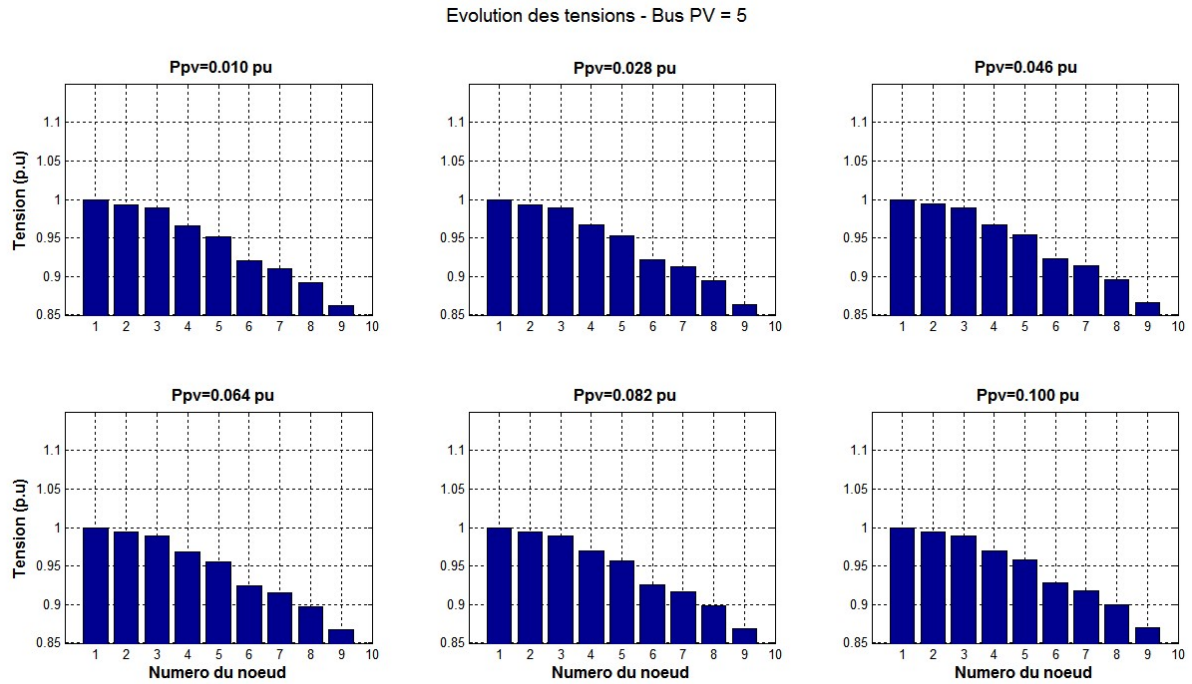


Figure 4.4 : Evolution des tensions - nœud PV = 5 (pour P_{pv} allant de 0.010 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.02$ pu).

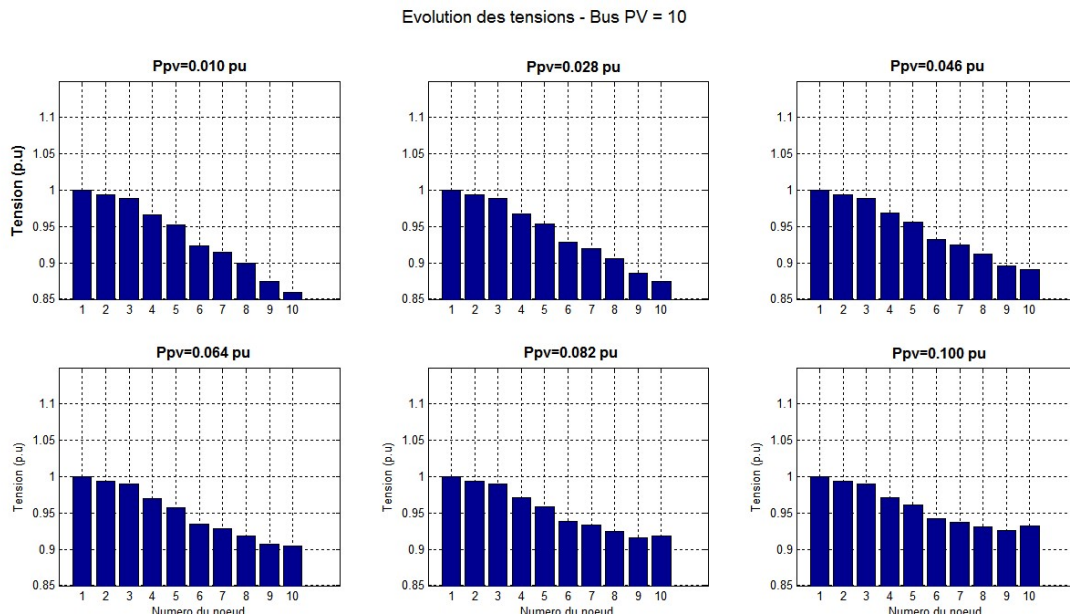


Figure 4.5 : Evolution des tensions - nœud PV = 10 (pour P_{pv} allant de 0.010 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv} = 0.02$ pu).

Scénario 02

Dans ce scénario, nous montrons comment change la tension dans les différents nœuds du réseau (du JdB1 au JdB10). Nous avons placé le système PV dans trois points différents 2,5 et 10, le but est d'avoir l'effet de l'énergie solaire sur les valeurs de la tension. Pour cela, nous avons varié la puissance active P_{pv} entre 0.06 pu et 0.1 pu avec une puissance réactive fixe

$Q_{pv} = 0.05 \text{ pu}$. La simulation suivante est faite sans utiliser de charges non linéaires et pour étudier uniquement la qualité de la tension au sens de déformation de forme.

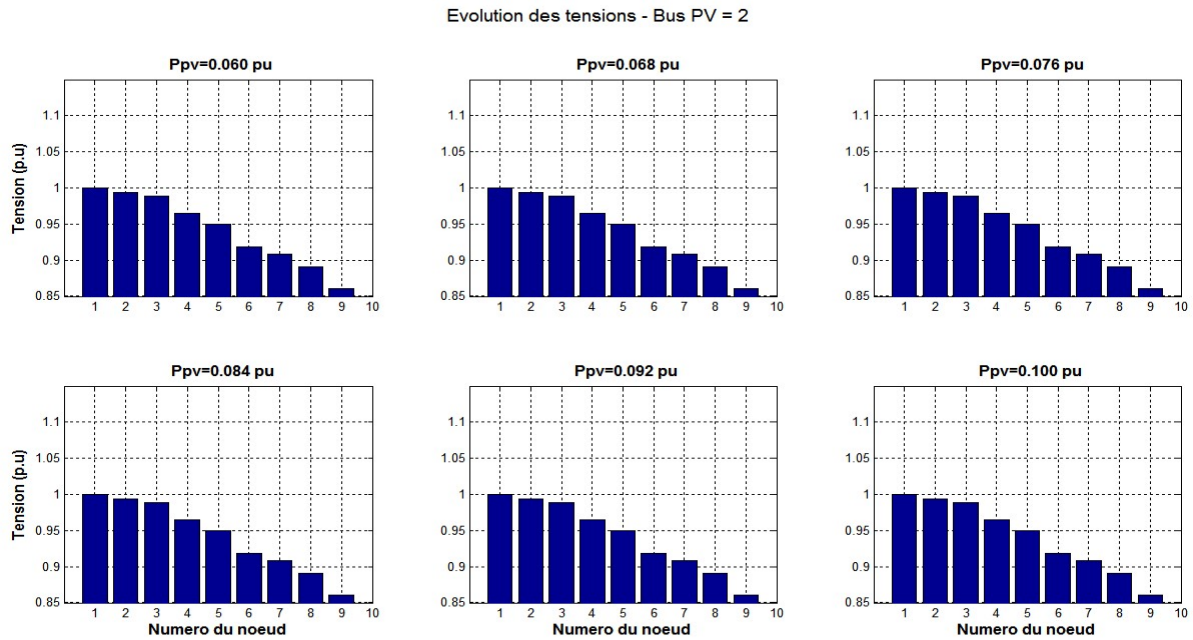


Figure 4.6: Evolution des tensions - nœud PV = 2 (pour P_{pv} allant de 0.060 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv}=0.05\text{pu}$).

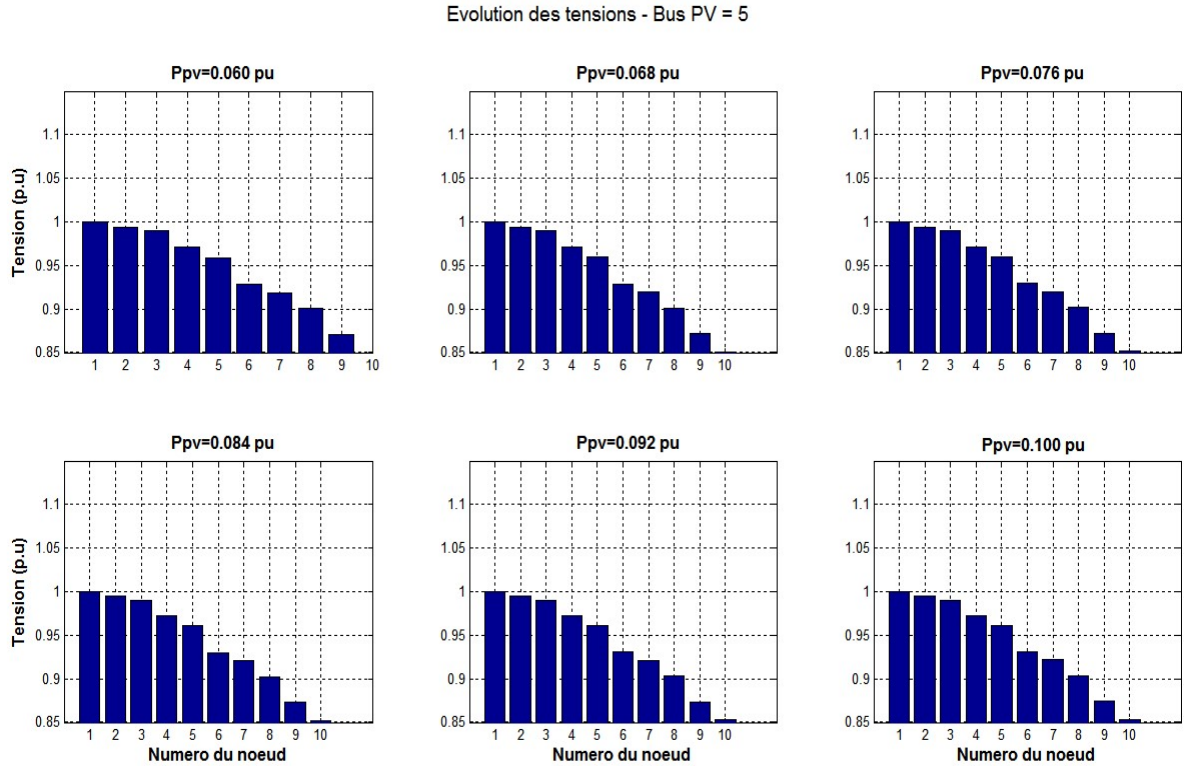


Figure 4.7: Evolution des tensions - nœud PV = 5 (pour P_{pv} allant de 0.060 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv}=0.05\text{pu}$).

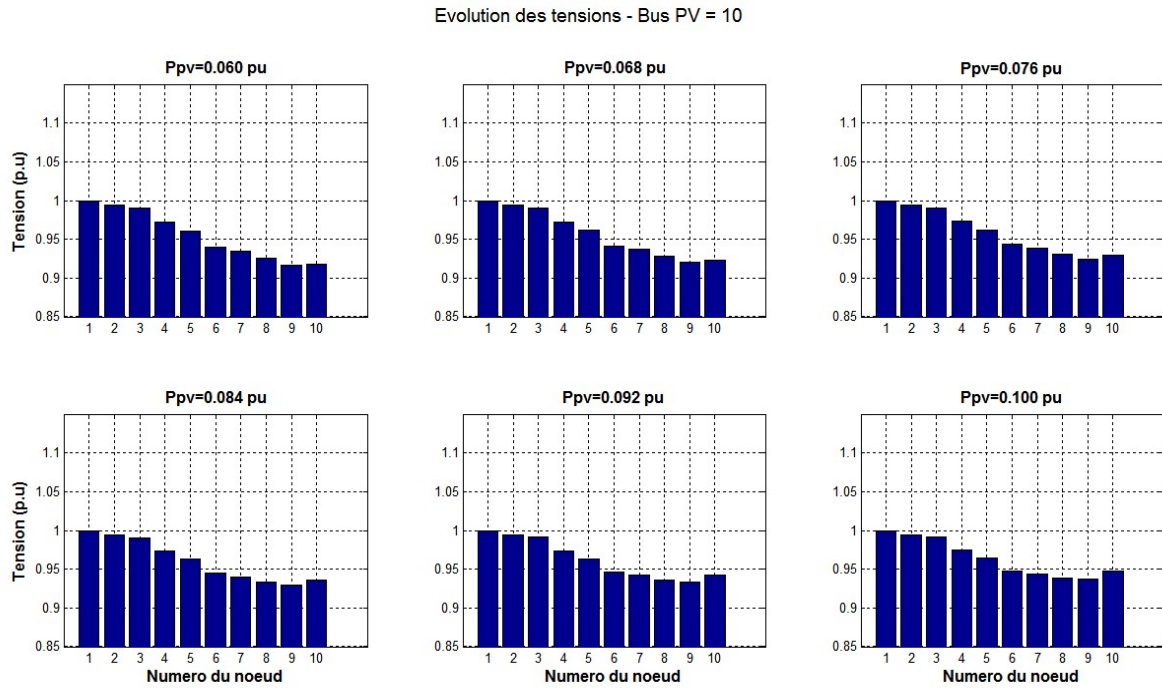


Figure 4.8: Evolution des tensions - nœud PV = 10 (pour P_{pv} allant de 0.060 pu à 0.100 pu, avec $Q_{pv}= 0.05pu$).

Scénario 03

Dans ce scénario, nous montrons comment change la tension dans les différents nœuds du réseau (du JdB1 au JdB10). Nous avons placé le système PV dans trois points différents 2,5 et 10, le but est d'avoir l'effet de l'énergie solaire sur les valeurs de la tension. Pour cela, nous avons varié la puissance active P_{pv} entre 0.09 pu et 0.2 pu avec une puissance réactive fixe $Q_{pv} = 0.05 pu$. La simulation suivante est faite sans utiliser de charges non linéaires et pour étudier uniquement la qualité de la tension au sens de déformation de forme.

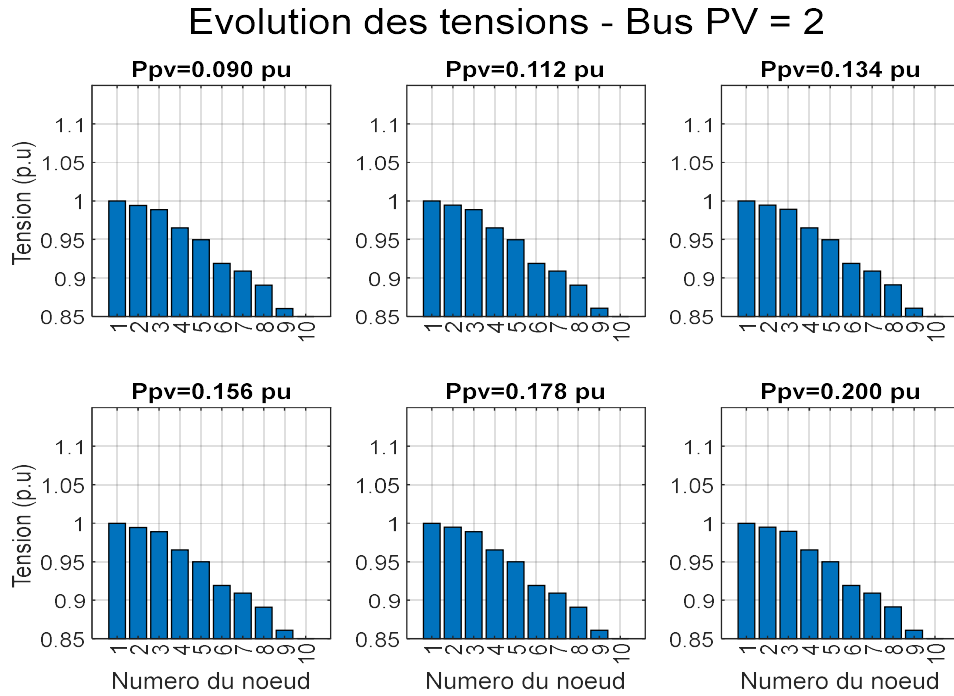


Figure 4.9: Evolution des tensions - nœud PV = 2 (pour P_{pv} allant de 0.090 pu à 0.200 pu, avec $Q_{pv} = 0.05$ pu).

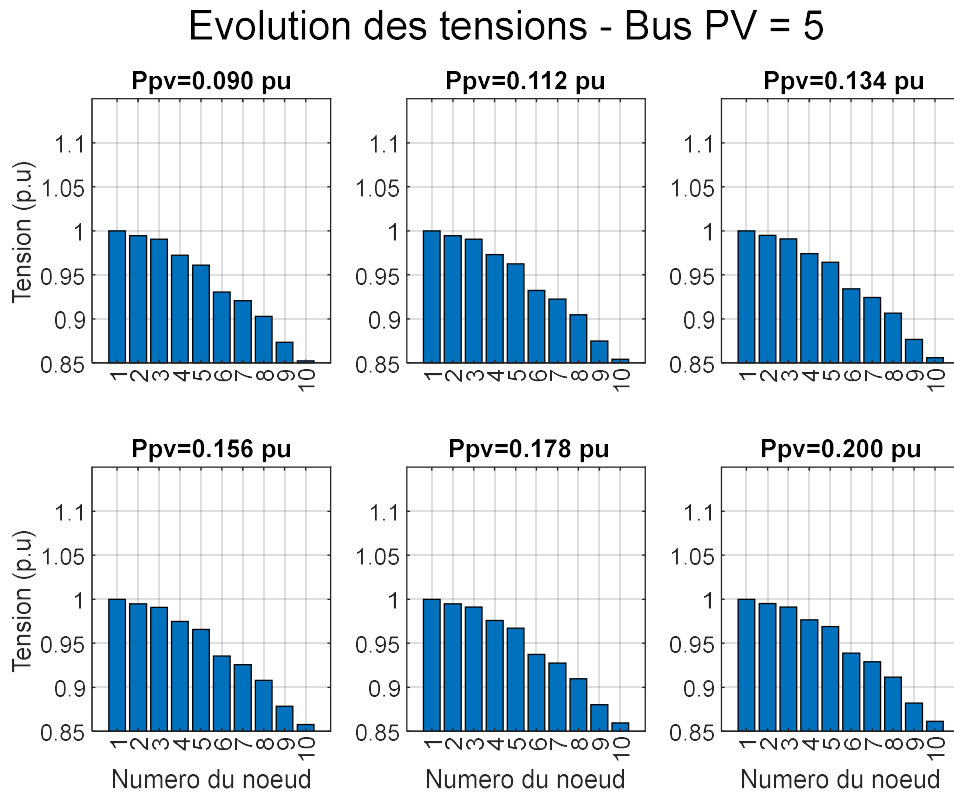


Figure 4.10: Evolution des tensions - nœud PV = 5 (pour P_{pv} allant de 0.090 pu à 0.200 pu, avec $Q_{pv} = 0.05$ pu).

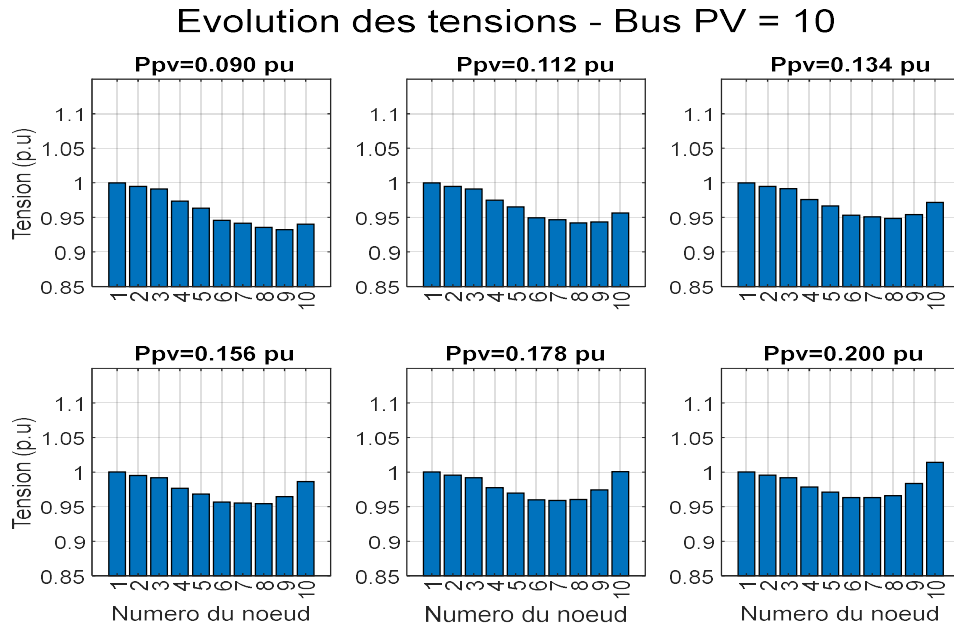


Figure 4.11 : Evolution des tensions - nœud PV = 10 (pour P_{pv} allant de 0.090 pu à 0.200pu, avec $Q_{pv} = 0.05$ pu).

4.4.3. Interprétation des résultats

L'intégration d'un système photovoltaïque (PV) améliore le profil de tension du réseau de distribution, surtout lorsque le générateur est placé à l'extrémité de la ligne (nœud 10), qui représente la zone la plus critique.

En effet, plus la puissance active injectée (P_{pv}) augmente, plus la tension globale du réseau s'élève et se rapproche de sa valeur nominale (1.0pu), ce qui compense efficacement les chutes de tension habituelles. Cependant, l'emplacement au début de la ligne (nœud 2) reste inefficace pour soutenir les bus en aval.

De plus, une injection trop massive de puissance en bout de ligne (comme le cas critique de 0.200 pu) inverse le flux d'énergie et provoque des surtensions indésirables, ce qui démontre qu'un contrôle ou une régulation de la puissance injectée est indispensable pour préserver la stabilité du réseau.

4.5. Partie2 : Analyse harmonique du réseau

Cette partie se concentre sur l'étude de la propagation des tensions harmoniques dans le réseau étudié, où l'objectif est de mesurer l'effet combiné de l'intégration de la production photovoltaïque et de la présence de charges non linéaires sur la qualité de l'onde électrique.

4.5.1. Méthodologie d'analyse harmonique

La modélisation et le calcul de ce phénomène ont été réalisés en trois étapes essentielles, à commencer par la modélisation fondamentale et résolution nodale où les sources polluantes (charges non linéaires et panneaux photovoltaïques) sont représentées comme des injections de

courants harmoniques aux nœuds (sources de courant harmonique). Ainsi, pour chacune des harmoniques h (où h fait partie de 5, 7, 11, 13), la loi d'Ohm généralisée est appliquée pour établir le vecteur des tensions harmoniques V_h grâce à l'équation matricielle [51] .

$$[I_h] = [Y_h] \times [V_h] \Rightarrow [V_h] = [Y_h]^{-1} \times [I_h] \quad (4.14)$$

Où $[I_h]$: représente le vecteur des courants harmoniques nodaux introduits par les charges non linéaires et le photovoltaïque pour l'harmonique h .

$[Y_h]$: Désigne la matrice d'admittance nodale du réseau, réajustée pour chaque harmonique en prenant en compte les impédances des lignes et des charges (modèle admittance) à la fréquence $h \times f_0$.

Ensuite, vient le calcul de la distorsion harmonique individuelle où, pour déterminer l'apport de chaque harmonique individuelle à la dégradation du signal de tension à chaque nœud, le taux de distorsion individuel $\tau h(\%)$ est calculé en fonction de la tension fondamentale V_1 (obtenue via le calcul de Load Flow) selon la formule [51] .

$$\tau h(\%) = (V_h / V_1) \times 100 \quad (4.15)$$

Ces résultats numériques étant présentés dans la première section des résultats pour chaque nœud et chaque harmonique ($h = 5, 7, 11, 13$).

Enfin, la dernière étape concerne l'évaluation de la Distorsion Harmonique Totale (TDH) ; pour évaluer la qualité de l'énergie électrique et identifier le nœud le plus critique dans le réseau, le Taux de Distorsion Harmonique Totale en tension ($TDHv$) est déterminé pour chaque nœud en se basant sur la somme quadratique des harmoniques analysées selon l'expression [51] :

$$THDv(\%) = THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} |V^{(h)}|^2}}{|V^{(1)}|} \times 100 \quad (4.16)$$

4.5.2. Résultats de simulation

Tableau 4.5 : Les valeurs des tensions harmoniques de chaque nœud du réseau

PV	Nœuds	h=5	h=7	h=11	h=13
1	1	0.0334	0.0135	0.0046	0.0075
	2	0.0334	0.0135	0.0046	0.0075
	3	0.0356	0.0158	0.0053	0.0059
	4	0.0391	0.0198	0.0085	0.0046
	5	0.0404	0.0213	0.0101	0.0057
	6	0.0376	0.0188	0.0086	0.0081
	7	0.0355	0.0169	0.0084	0.0096
	8	0.0324	0.0142	0.0103	0.0124
	9	0.0270	0.0114	0.0198	0.0210
	10	0.0254	0.0165	0.0310	0.0293
2	1	0.0362	0.0162	0.0056	0.0064
	2	0.0362	0.0162	0.0056	0.0064
	3	0.0357	0.0158	0.0053	0.0059

Chapitre 4 Simulation et Validation sur un Réseau de distribution radial

	4	0.0392	0.0198	0.0085	0.0046
	5	0.0405	0.0213	0.0101	0.0058
	6	0.0377	0.0189	0.0087	0.0082
	7	0.0356	0.0169	0.0084	0.0096
	8	0.0325	0.0142	0.0103	0.0124
	9	0.0271	0.0114	0.0197	0.0209
	10	0.0254	0.0165	0.0310	0.0292
3	1	0.0415	0.0218	0.0109	0.0071
	2	0.0415	0.0218	0.0109	0.0071
	3	0.0410	0.0213	0.0102	0.0064
	4	0.0393	0.0194	0.0080	0.0044
	5	0.0406	0.0209	0.0093	0.0051
	6	0.0379	0.0186	0.0083	0.0083
	7	0.0358	0.0167	0.0086	0.0100
	8	0.0329	0.0141	0.0111	0.0131
	9	0.0277	0.0118	0.0208	0.0217
	10	0.0260	0.0171	0.0319	0.0298
4	1	0.0440	0.0244	0.0139	0.0090
	2	0.0440	0.0244	0.0139	0.0090
	3	0.0434	0.0238	0.0130	0.0082
	4	0.0416	0.0217	0.0101	0.0056
	5	0.0403	0.0203	0.0082	0.0040
	6	0.0378	0.0181	0.0081	0.0084
	7	0.0358	0.0163	0.0091	0.0106
	8	0.0330	0.0141	0.0122	0.0142
	9	0.0281	0.0125	0.0223	0.0231
	10	0.0268	0.0180	0.0332	0.0310
5	1	0.0453	0.0259	0.0160	0.0114
	2	0.0453	0.0259	0.0160	0.0114
	3	0.0447	0.0252	0.0150	0.0104
	4	0.0428	0.0230	0.0117	0.0071
	5	0.0415	0.0215	0.0094	0.0051
	6	0.0324	0.0121	0.0072	0.0080
	7	0.0309	0.0115	0.0118	0.0126
	8	0.0291	0.0118	0.0182	0.0190
	9	0.0274	0.0170	0.0327	0.0330
	10	0.0299	0.0259	0.0457	0.0438
6	1	0.0450	0.0257	0.0162	0.0121
	2	0.0450	0.0257	0.0162	0.0121
	3	0.0444	0.0250	0.0152	0.0110
	4	0.0426	0.0228	0.0118	0.0076
	5	0.0413	0.0213	0.0095	0.0054
	6	0.0322	0.0120	0.0073	0.0085
	7	0.0283	0.0099	0.0128	0.0129
	8	0.0272	0.0119	0.0199	0.0200
	9	0.0273	0.0196	0.0360	0.0363
	10	0.0318	0.0296	0.0504	0.0493
7	1	0.0445	0.0252	0.0164	0.0134
	2	0.0445	0.0252	0.0164	0.0134
	3	0.0439	0.0246	0.0154	0.0122
	4	0.0421	0.0225	0.0120	0.0083
	5	0.0409	0.0210	0.0097	0.0059
	6	0.0318	0.0118	0.0074	0.0094
	7	0.0280	0.0097	0.0129	0.0142
	8	0.0255	0.0136	0.0218	0.0212

	9	0.0287	0.0237	0.0398	0.0408
	10	0.0357	0.0347	0.0562	0.0573
8	1	0.0433	0.0240	0.0156	0.0144
	2	0.0433	0.0240	0.0156	0.0144
	3	0.0427	0.0234	0.0146	0.0131
	4	0.0409	0.0214	0.0114	0.0090
	5	0.0397	0.0200	0.0092	0.0064
	6	0.0310	0.0113	0.0070	0.0101
	7	0.0272	0.0093	0.0123	0.0153
	8	0.0248	0.0129	0.0207	0.0228
	9	0.0341	0.0315	0.0405	0.0401
	10	0.0450	0.0441	0.0596	0.0620
9	1	0.0275	0.0153	0.0089	0.0078
	2	0.0275	0.0153	0.0089	0.0078
	3	0.0271	0.0149	0.0084	0.0071
	4	0.0260	0.0136	0.0065	0.0049
	5	0.0252	0.0127	0.0053	0.0035
	6	0.0197	0.0072	0.0040	0.0055
	7	0.0173	0.0059	0.0070	0.0083
	8	0.0158	0.0082	0.0118	0.0124
	9	0.0216	0.0200	0.0231	0.0217
	10	0.0358	0.0342	0.0340	0.0298

Tableau 4.6 : Les valeurs de distorsion harmonique totale pour chaque nœud du réseau.

Nœuds	THD (%)
1	3.3608
2	3.3802
3	3.3164
4	3.1345
5	3.0131
6	2.3358
7	2.2673
8	2.6546
9	4.6787
10	7.1884
Valeur maximale de TDH	7.1884

4.5.3. Interprétation des résultats

Le tableau présente les valeurs des tensions harmoniques V_h aux différents nœuds du réseau pour plusieurs emplacements d'installation du générateur photovoltaïque (PV). Les résultats indiquent aussi que la distribution des tensions harmoniques varie en fonction de la position du générateur PV. Quand le PV est positionné près des nœuds éloignés de la source, les variations des tensions harmoniques augmentent, surtout aux derniers nœuds du réseau.

En général, les harmoniques de rang élevé ($h = 11$ et $h = 13$) affichent des amplitudes réduites par rapport aux harmoniques de rang inférieur ($h = 5$ et $h = 7$). Cela indique que l'effet

des charges non linéaires est principalement localisé au niveau des premiers ordres harmoniques.

En somme, l'analyse des résultats montre que dans un réseau radial, les tensions harmoniques et le taux de TDH s'amplifient progressivement en s'éloignant du nœud source (Nœud 1) vers les extrémités de la ligne. Le Nœud 10 s'avère être le plus critique, enregistrant la valeur maximale de TDH = 7.1884%. Cette valeur, bien qu'elle respecte encore la limite stricte de 8% fixée par les normes internationales (telles que l'IEEE 519 ou l'EN 50160), témoigne d'une dégradation de la qualité de l'énergie. Cette hausse s'explique par l'effet cumulatif des impédances des lignes radiales et l'injection simultanée des courants harmoniques par le système photovoltaïque et les charges non linéaires situées en bout de ligne.

4.6. Partie3 : Optimisation de l'intégration photovoltaïque

Cette partie vise à étudier la qualité de l'énergie dans le réseau étudié. Le but est de trouver le meilleur endroit et la taille idéale pour injecter l'énergie solaire (PV), afin de réduire le taux de distorsion harmonique totale (TDH) causé par les charges non linéaires.

4.6.1. Principe de l'optimisation

Pour cela, le programme commence d'abord par calculer l'écoulement de puissance à la fréquence fondamentale (50 Hz) avec la méthode Backward/ForwardSweep pour mettre à jour les tensions à chaque nœud. Le courant net de la charge est calculé en soustrayant la puissance du PV de la puissance de la charge selon l'équation [52] :

$$I_{load} = \left(\frac{S_{load} - S_{pv}}{V} \right)^* \quad (4.17)$$

Ensuite, le programme passe aux calculs des harmoniques pour les hautes fréquences. À ce stade, l'impédance harmonique de la ligne change selon le rang de l'harmonique (h) et se calcule par l'équation : $Z^{(h)} = R + j \cdot h \cdot X$ (4.18)

Les courants harmoniques injectés par le PV et les charges non linéaires (NL) sont alors calculés comme un pourcentage du courant fondamental avec la formule [52]:

$$I^{(h)} = \% Ratio \cdot I^{(1)} \quad (4.19)$$

Les tensions harmoniques sont ensuite trouvées à l'aide de la matrice d'admittance harmonique par la relation [52] :

$$V^{(h)} = [Y_{bus}^{(h)}]^{-1} \cdot I^{(h)} \quad (4.20)$$

Cette partie sert, donc, à choisir automatiquement la meilleure puissance photovoltaïque (P_{pv}) qui donne la meilleure qualité d'énergie, mesurée ici par le TDH.

À chaque simulation :

- Le programme teste une valeur de puissance PV (P_{pv}).

- Il calcule le TDH global du réseau.
- Puis il compare ce résultat avec le meilleur déjà trouvé.

En finalité, cette optimisation signifie pour chaque combinaison :

(Nœud PV – nœud de charge non linéaire)

On procède à :

- Une recherche à réduire les harmoniques dans le réseau
- Un ajustement de la puissance injectée par le PV

Notre simulation trouve donc automatiquement la valeur de PV qui minimise la pollution harmonique du réseau. Elle suit les étapes suivantes :

1. Initialisation

Best THD = inf;

best P_{pv} = 0;

- Best THD = inf : on part d'une valeur très grande pour un objectif de le réduire progressivement
- Best P_{pv} stocke la puissance optimale

2. Test de chaque solution PV (en boucle)

Le programme teste plusieurs valeurs de PV (0.01 → 0.10 pu).

3. Calcul du critère (TDH)

- Après simulation du réseau : on prend le pire TDH du réseau (critère de performance)

Computed THD = max(THD);

4. Comparaison et sélection

if Computed THD < best THD

Si la nouvelle solution est meilleure (TDH plus faible) :

- On met à jour la meilleure performance :

Best THD = Computed THD ; on garde la puissance correspondante (best P_{pv} = P_{pv}).

4.6.2. Résultats de l'optimisation

Pour évaluer cette étude, des simulations 3D ont été réalisées en changeant la position de la charge non linéaire et du point d'injection PV.

La Figure 4.12 montre la puissance PV optimale à injecter. On remarque que cette puissance augmente jusqu'à sa valeur maximale (0.10pu) au niveau des nœuds éloignés (comme

le nœud 9), surtout quand la charge non linéaire y est placée, alors qu'elle diminue près de la source principale.

En contrepartie, la Figure 4.13 présente le taux de distorsion harmonique (TDH) minimal après optimisation. Ce graphique montre que le TDH augmente progressivement lorsque la charge non linéaire s'éloigne vers les extrémités faibles du réseau, mais il diminue fortement grâce à l'injection de puissance PV près de ces charges.

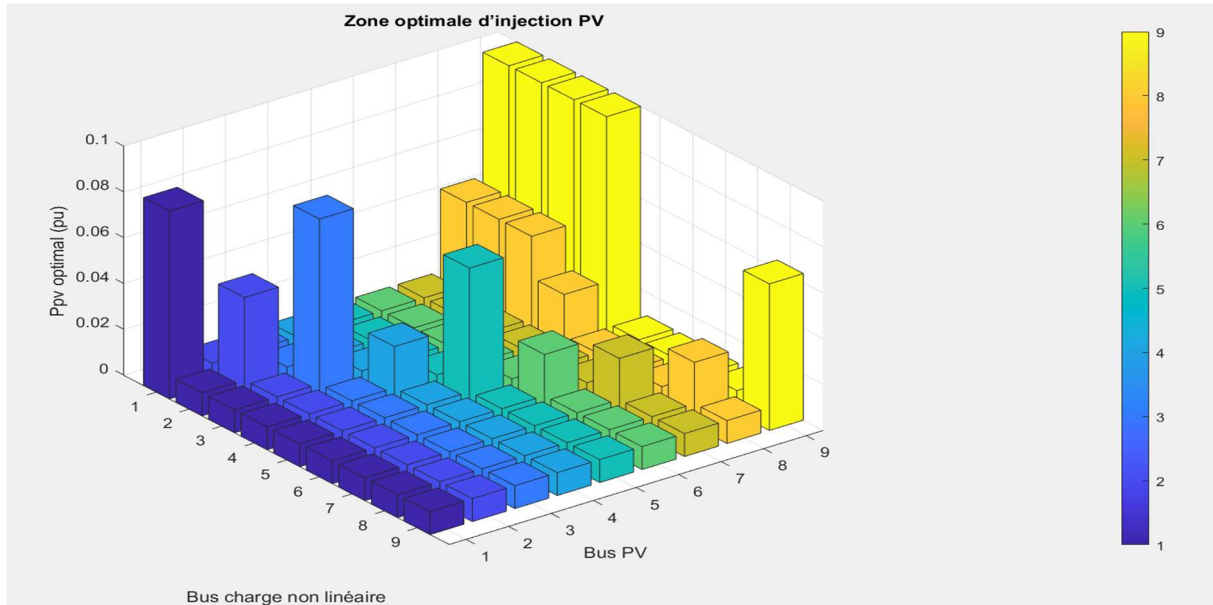


Figure 4.12 : Zone optimale d'injection de la puissance photovoltaïque (PV) en fonction de l'emplacement de la charge non linéaire et du bus d'injection.

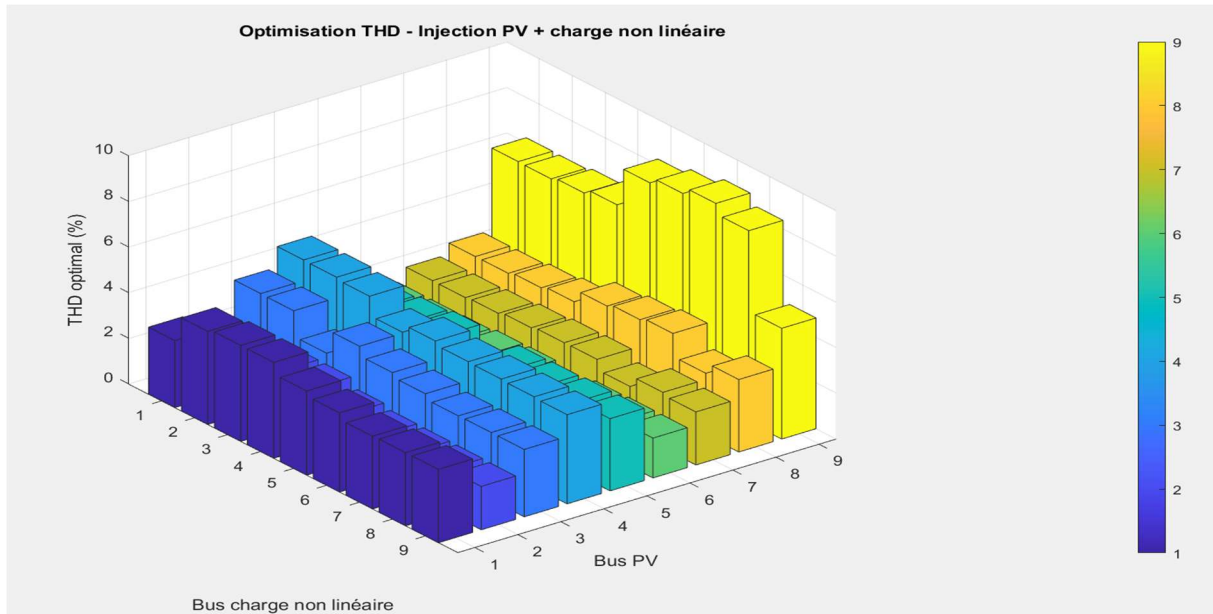


Figure 4.13 : Taux de distorsion harmonique totale optimal (TDH) de la tension lors de l'injection PV en présence d'une charge non linéaire.

4.6.3. Interprétation des résultats

L'analyse des résultats montre que l'emplacement de la charge non linéaire (Bus NL) influence directement la qualité de l'énergie dans le réseau. En effet, plus la charge s'éloigne de la source principale et s'approche des nœuds terminaux (comme le nœud 10), plus la distorsion harmonique augmente fortement pour atteindre 6.23%, dépassant ainsi la limite internationale autorisée de 5%, à cause de la faiblesse du réseau et de l'impédance élevée aux extrémités.

Pour corriger cette distorsion, le programme choisit une taille idéale d'injection de PV qui atteint sa valeur maximale de 0.10 pu aux extrémités, dans le but de produire l'énergie localement et de réduire le passage des courants pollués à travers les longues lignes.

On en conclut que l'injection de l'énergie solaire près des charges non linéaires aide efficacement à améliorer la qualité de l'énergie et à baisser le TDH, ce qui rend l'opération d'optimisation très importante pour fixer la taille exacte de l'injection et éviter les harmoniques supplémentaires que peuvent produire les onduleurs (invertis) des systèmes solaires eux-mêmes.

4.7. Conclusion

Chapitre 4 Simulation et Validation sur un Réseau de distribution radial

Ce chapitre nous a permis d'étudier l'effet de l'intégration d'un générateur photovoltaïque (PV) dans un réseau de distribution radial à 10 nœuds.

Les résultats obtenus ont montré que :

- Le profil de tension : l'injection de l'énergie photovoltaïque contribue à améliorer les tensions du réseau et à réduire les chutes de tension.
- L'analyse harmonique : la présence des charges non linéaires entraîne une augmentation du taux de distorsion harmonique totale (TDH), ce qui peut affecter la qualité de l'énergie.
- L'optimisation : le choix du meilleur emplacement et de la puissance appropriée du générateur PV permet de diminuer le TDH et d'améliorer les performances du réseau.

En résumé, une intégration adaptée du système photovoltaïque permet d'améliorer la qualité de l'énergie et d'assurer un meilleur fonctionnement du réseau électrique.

Conclusion Générale Et Perspectives

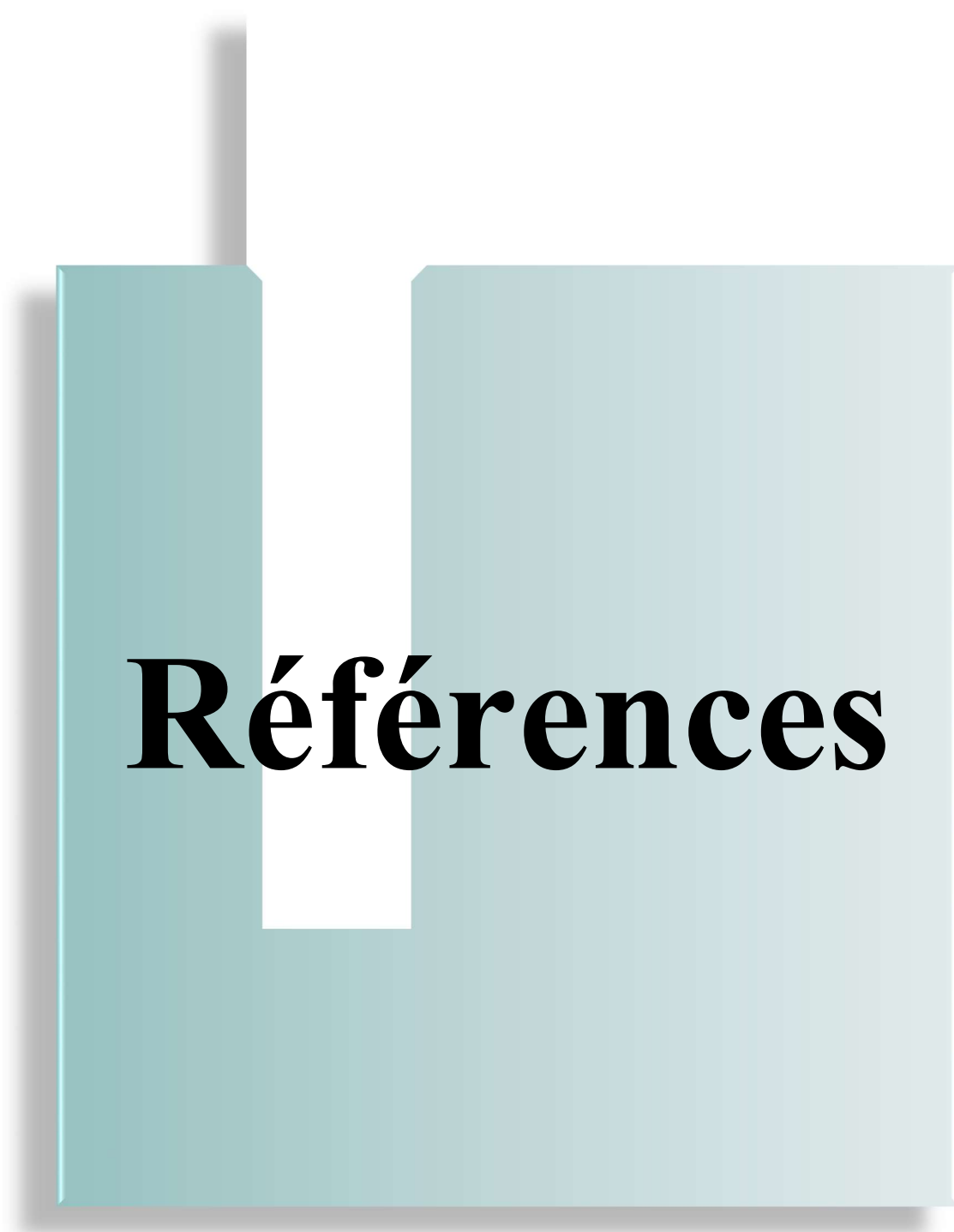
Conclusion générale Et Perspectives

Au terme de ce travail de fin d'études, nous avons procédé à une étude approfondie de l'impact de l'intégration de la production photovoltaïque décentralisée sur le profil de tension et la qualité de l'énergie électrique (QEE) au sein des réseaux de distribution radiaux modernes. Le passage d'un modèle de réseau traditionnel, caractérisé par un flux de puissance vertical et unidirectionnel, vers des structures dynamiques et bidirectionnelles de type Smart Grids, soulève des défis techniques majeurs. À travers cette recherche, nous avons mis en évidence la dualité de l'impact photovoltaïque : d'une part, une opportunité remarquable pour le soutien du plan de tension en bout de ligne, et d'autre part, un risque d'amplification des perturbations harmoniques en présence de charges non linéaires.

Les simulations numériques, réalisées via un algorithme d'écoulement de puissance par balayage arrière-avant (Backward-ForwardSweep) codé sous MATLAB et appliqué à un réseau test à 10 nœuds, nous ont permis de tirer des conclusions fondamentales. Concernant l'amélioration du profil de tension, l'injection locale de puissance active (P_{pv}) s'avère particulièrement efficace pour compenser les chutes de tension systémiques, surtout lorsque le générateur est implanté au niveau des nœuds les plus éloignés (Nœud 10). Toutefois, une injection massive non contrôlée (scénario critique à 0.2pu) engendre des surtensions indésirables, prouvant qu'une régulation stricte est indispensable.

Quant à la propagation de la distorsion harmonique, l'interaction entre les convertisseurs statiques (onduleurs) et les charges non linéaires dégrade la forme d'onde. Le Taux de Distorsion Harmonique Totale en tension (TDH_v) s'accroît en s'éloignant du poste source, atteignant sa valeur maximale critique de 7.18% au Nœud 10. Bien que conforme à la limite réglementaire de 8%, ce seuil nécessite une attention particulière. Pour ce qui est de l'optimisation de l'emplacement et de la capacité, la dernière phase a démontré de manière irréfutable que le couplage optimal entre la taille de l'injection PV et la proximité immédiate des foyers de pollution harmonique (charges non linéaires) permet de confiner les courants harmoniques, réduisant ainsi le TDH global à des proportions optimales.

En guise de perspectives, ce travail ouvre des horizons prometteurs quant à l'étude de l'intégration de systèmes de stockage actif et le déploiement de filtres harmoniques dynamiques. Ces solutions permettraient de réguler en temps réel les fluctuations de puissance et de garantir un fonctionnement sûr, stable et hautement qualitatif des réseaux électriques de demain.



Références

Références

- [1] Kersting, W.H, Distribution System Modelling and Analysis, CRC Press, 2012.
- [2] T.Gonen, Electric Power Distribution Engineering, 3^{ème} édition, CRC Press, 2014.
- [3] FERGANIS, « Optimisation du réseau d'un tertiaire alimenté par une source solaire », Thèse de doctorat, USTO-MB, 2017.
- [4] Aissaoui Ahmed, planification des réseaux électriques de distribution pour une présence massive de la génération d'énergie dispersée », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2016.
- [5] T. Mishami, « Modélisation et calcul des courants de défaut dans un réseau multi machine », mémoire d'Ingénieur civil électricien, Université de Kinshasa, 2011
- [6] N.Bakhta, « La production décentralisée », 2016, 50p.
- [7] MAHAFENO HASINA Virginie Lara, « intégration d'une puissance moyenne solaire photovoltaïque sans stockage au réseau : application au réseau électrique de tular », Mémoire de Master 2, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2016.
- [8] DIXON, R., ECKHART, M., HALES, D., et al. « Rapport mondial 2012 sur les énergies renouvelables 2012 ». Renewable Energy Pollicy Network for the 21st Century, 2012, p.120.
- [9] Connaissance des Énergies, "Fiche Pédagogique : Réseau intelligent (smart grid)," Connaissance des Énergies. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>. [Accédé le: 21-févr-2026].
- [10] B. M. Buchholz and Z. A. Styczynski, Smart Grids: Fundamentals and Technologies in Electric Power Systems of the Future, 2nd ed. Erlangem, Germany: Springer, 2020.
- [11] T. Nacer Eddine et G. Slimane, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [12] Paul. Mathis, « Les énergies, Comprendre les enjeux. » Edition Quae, 2011.
- [13] M. Slama Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif UFAS (ALGERIE), Mémoire de Magister, 2011.
- [14] <https://opera-energie.com/energie-solaire/>, 2021.
- [15] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy, " Le pompage photovoltaïque, Mémoire de magister en Automatique "Université d'Ottawa, 1998.

- [16] Julien LABBÉ, " l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés ", thèse de doctorat de l'école des mines de paris, Spécialité "Énergétique" le 21 décembre 2006.
- [17] <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaïque3/modules-photovoltaïques/>, 2010.
- [18] H.A. Mohammed El Amine, « Etude et réalisation d'un système de production d'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques. » Mémoire de Master, Centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.
- [19] Europe Énergie. (2019, 14 août). Petite histoire du photovoltaïque. Récupéré de <https://www.europe-energie.com/blog/petite-histoire-du-photovoltaïque/>
- [20] N. Hamid, « Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque et de l'onduleur. » Mémoire de Master, Université de Bouira, 2015.
- [21] Mezine, O., &Slamani, N. « Evaluation des performances d'un système photovoltaïque dans un environnement critique. » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie,2024.
- [22] D. Mbaye, « Etude du fonctionnement et commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau. » Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2018.
- [23] M. Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. » INSA de Toulouse, 2006.
- [24] OWEIS EL MELKI Marielle, SALHAB Miled, SOUEID Tania, "Système de contrôle d'alimentation : EDL-Générateur- Photovoltaïque pour application domotique", Mémoire de magister en Génie Electrique, université Libanaise, 2012/2013.
- [25] LABOURET Anne et Michel VILLOZ, "ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE" 4eme édition, Edition LE MONITEUR, DUNOD 2009.
- [26] M. Petibon Stéphane, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ", Thèse de Doctorat, Université ToulouseIII Paul Sabatier, 2009.
- [27] Fatith DJALOU, "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système optimisation", Mémoire de master en automatique, université KASDI MERBAH-OUARGLA, 2011/2012.
- [28] B. Mhenna, « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [29] T. Aziz et A. Rachid, « Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système Photovoltaïque adapté par une commande MPPT. » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2014.

- [30] ALI SLIMANE, M. et TIGRINE, B., « Etude Théorique et simulation de la centrale photovoltaïque de GHARDAÏA », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (U.M.M.T.O), 2017.
- [31] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). Photovoltaic Systems Engineering (3rd ed.). CRC Press.
- [32] MARK HANKINS. « Installations solaires photovoltaïques autonomes Technique et Ingénierie » Paris, édition Dunod 2012.
- [33] R.M. Dell and D.A.J. Rand, Understanding batteries, The Royal Society of Chemistry, 2001.
- [34] : M.Belhadj, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome », mémoire de magister de l'université de Bechar, 2007-2008.
- [35] Bouchtouche cherfa « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT ». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [36] B. CHIKH-BLED, I. SARI-ALI, B. BENYOUCEF, "Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque", Revue internationale d'héliotechnique, N°41 (2010) 25-30.
- [37] BOUDEBBOUZ, Omar. (2026). Introduction aux notions de la qualité de l'énergie électrique (QEE) [Support de cours].
- [38] BOUDEBBOUZ, Omar. (2026). Dégradation de la (QEE) [Support de cours].
- [39] M. BEDOUI, "Qualité de l'énergie électrique (QEE)", Support de cours, Master 1 : Réseaux Électriques, Université Ibn Khaldoun - Tiaret.
- [40] M. H. Bollen, "Understanding power quality problems," in Voltage sags and Interruptions, ed: IEEE press Piscataway, NJ, USA, 2000.
- [41] IEEE, "Definitions of Voltage Unbalance," IEEE Power Engineering Review, vol. 21, no. 5, pp. 49-51, 2001.
- [42] Y.-W. Liu, S.-H. Rau, C.-J. Wu, and W.-J. Lee, "Improvement of power quality by using advanced reactive power compensation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, pp. 18-24, 2017.
- [43] I. Exteberria-Otadui, Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie, thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [44] Philippe FERRACCI. « La qualité de l'énergie électrique ». Cahier technique n° 199. Shneider Electric : Collection technique, octobre 2001.

- [45] S. HADDAD, "Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission," Thèse de Doctorat, Option : Electromécanique, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie 2010.
- [46] LARONDE. Remi, « Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédiée aux énergies renouvelables-Application a un système photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, L'Université d'Angers, 2011.
- [47] NGUYEN.Van.Linh, «Couplage des systèmes photovoltaïques et des véhicules électriques au réseau problèmes et solutions» .Thèses de Doctorat, Université de Grenoble, 2014.
- [48] Y. Baghzouz and S. Ertem, "Shunt Capacitor Sizing for Radial Distribution Feeders with Distorted Substation Voltages," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 650–657, Apr. 1990.
- [49] Eminoglu U. and Hocaoglu M. H. Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study, Electric Power Components and Systems, 2008.
- [50] T. Gangwar, «Backward/Forward Sweep Load Flow Guide », Scribd, 2021.
- [51] HAL Open Science, « Modélisation fondamentale pour chaque rang harmonique dans les réseaux de distribution radiaux », [En ligne]. Disponible: URL.
- [52] J. Arrillaga and N. R. Watson, Power System Harmonics, 2nd ed. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2003.