الجممورية الجزائرية الديمتراطية الشعبية

وزارة التعليو العالبي والبدش العلمي

**UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA** BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – غنابـــة

Faculté : TECHNOLOGIE Département : ELECTROTECHNIQUE Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES Filière : ELECTROTECHNIQUE Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

**Thème:** 

Effet de l'Intégration des Energies Renouvelables sur un des Indices de la Qualité de l'Energie Electrique.

Présenté par : ZOUAR Haitem

Encadrant : *MESBAH Tarek* 

Professeur

Université Badji Mokhtar -ANNABA

#### Jury de Soutenance :

	Uni	Jury de So	utenance :	
BENALIA	Nadia 🗸 🗸	M.C.A	U.B.M.A.	Président
MESBAH	Tarek	Prof.	U.B.M.A.	Encadrant
MELLOUKI	Hamza	M.A.B	U.B.M.A.	Examinateur
CHIHEB	Sofiane	M.C.B	E.N.S.T.I. (Ex ESTI)	Membre invité

Année Universitaire : 2023/2024

## Résumé

Avec l'évolution vers des sources d'énergie plus durables, telles que l'éolien et le solaire PV, il devient essentiel de comprendre les répercussions de ces sources sur la qualité de l'énergie électrique. Ce travail se concentre sur l'effet de l'intégration croissante des énergies renouvelables sur un indice spécifique de qualité de l'énergie électrique dans un réseau isolé composé de sept nœuds. Une simulation a été effectuée sous environnement ETAP pour analyser l'impact des énergies renouvelables, en focalisant l'étude sur les harmoniques au niveau de 30 kV.

Dans sa configuration actuelle, le taux de distorsion harmonique dépasse les limites tolérables. Pour corriger ce problème, nous avons utilisé un filtre passif. Pour répondre aux besoins du programme national d'intégration des énergies renouvelables, nous augmentons la puissance générée par les sources PV jusqu'à 50 MW dans chaque nœud, afin d'évaluer l'impact de l'augmentation de puissance sur la qualité d'énergie du réseau étudié. Une dernière évaluation a été faite pour vérifier l'impédance harmonique du réseau. Les résultats montrent que des pics de résonances peuvent apparaître en présence des filtres passifs

**Mots clés :** Qualité de l'énergie électrique, énergies renouvelables, pollution harmonique, THD, filtre passif.

## Abstract

With the evolution towards more sustainable energy sources, such as wind and solar PV, it becomes essential to understand the impact of these sources on the power quality. This work focuses on the effect of the increasing integration of renewable energies on a specific power quality index in an isolated grid composed of seven nodes. A simulation was performed under ETAP environment to analyze the impact of renewable energies, focusing the study on harmonics at 30 kV.

In its current configuration, the harmonic distortion rate exceeds tolerable limits. To correct this problem, we used a passive filter. To meet the needs of the national renewable energy integration program, we increase the power generated by PV sources up to 50 MW in each node, to assess the impact of the power increase on the energy quality of the studied network. A final evaluation was made to check the harmonic impedance of the network. The results show that resonances peaks may appear in the presence of passive filters.

Keywords : Power quality, renewable energies, harmonic pollution, THD, passive filter.

### ملخص

مع التحول نحو مصادر طاقة أكثر استدامة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية، يصبح من الضروري فهم تأثير هذه المصادر على جودة الطاقة الكهربائية. يركز هذا العمل على تأثير التكامل المتزايد للطاقة المتجددة على مؤشر معين لجودة الطاقة الكهربائية في شبكة معزولة تتكون من سبع عقد. تم إجراء محاكاة في ظل بيئة ETAP لتحليل تأثير الطاقات المتجددة، مع تركيز الدراسة على التوافقيات عند 30 كيلو فولت.

في تكوينه الحالي، يتجاوز معدل التشوه التوافقي الحدود المقبولة. لتصحيح هذه المشكلة، استخدمنا مرشحًا سلبيًا. لتلبية احتياجات برنامج تكامل الطاقة المتجددة الوطني، نزيد الطاقة التي تولدها مصادر الطاقة الكهروضوئية حتى 50 ميجاوات في كل عقدة، لتقييم تأثير زيادة الطاقة على جودة الطاقة للشبكة المدروسة. وأجري تقييم نهائي للتحقق من العوائق التوافقية للشبكة. تظهر النتائج أن قمم الرنين قد تظهر في وجود مرشحات سلبية .

كلمات مفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية، الطاقات المتجددة، تلوث توافقى، THD، المرشح السلبي.

### **Dédicace**

## Je dédié ce travail :

À tous ceux qui ont été une source de soutien et d'inspiration tout au long de mon parcours.

À ma mère, pour son amour inconditionnel et ses encouragements constants. Ta sagesse et ta persévérance m'ont guidé chaque jour.

À mon père, pour sa confiance en moi et ses précieux conseils.

À ma sœur, pour sa complicité et son soutien sans faille.

À toute ma famille, pour leur amour et leur soutien indéfectible. Vos encouragements et votre présence ont été essentiels à ma réussite.

À tous mes amis surtout Sid Ahmed, Abdelatif et Bilel, pour leur soutien moral. Vos mots de réconfort et votre positivité ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de cette aventure.

## Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Allah, tout puissant pour la volonté, la santé et de m'avoir donné la patience d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Tarek MESBAH, qui m'a encadré tout au long de ce mémoire et qui m'a fait partager ses brillantes idées.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Sofiane CHIHEB, pour sa gentillesse, son ouverture d'esprit aux échanges d'idées, et son encouragement pendant toutes les étapes de la réalisation de ce projet de fin d'études.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les enseignants de spécialité Réseaux électriques pour leurs efforts durant toutes mes années d'étude ainsi que les membres jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce modeste travail.

## Table des matières

Résumé	I
Table des matières	VI
Table des figures	IX
Liste des tableaux	XVII
Liste des abréviations	XVIII
Introduction Générale	1

Cł	apitr	e I : Production de l'énergie électrique	
	I.1	Introduction	
	I.2	Production d'énergie électrique	
	I.2	1 Production électrique par énergie conventionnelle	I
	I.2.	2 Production électrique par énergie renouvelables7	
	I.2.	3 Production électrique par des énergies renouvelables en Algérie	
	I.3 La	a production d'énergie électrique par les éoliennes13	
	I.3.	1 Principe de fonctionnement	
	I.3.	2 Les différents types des turbines éoliennes13	
	I.3.	3 Les composants d'une éolienne à axe horizontal16	
	I.3.	4 Les différents types des générateurs17	
	I.4	L'énergie solaire photovoltaïque19	
	I.4	.1 L'effet photovoltaïque	
	I.4	2 Différentes structures des cellules PV	
	I.4	.3 Modélisation et paramètres d'une cellule photovoltaïque	
	I.4.	4 Association des cellules PV (le module PV)25	
	I.4	.5 Influence des paramètres externes et internes sur une cellule	
	I.4	6 L'influence des conditions environnementales sur l'efficacité des PV	
	I.4	7 Manières de connecter les systèmes photovoltaïques	

I.5	Conclusion	30
Chapitr	re II : La qualité de l'énergie électrique	
<b>II.</b> 1	Introduction	31
II.2	La qualité de l'énergie dans les réseaux	31
II.3	Identification des caractéristiques de l'énergie électrique	32
II.3	3.1 Qualité de tension	32
II.4	Classification des perturbations électriques	34
II.4	4.1 Creux et coupures de tension	35
II.4	4.2 Les surtensions	36
II.5	Fluctuations de tension (flicker)	37
II.6	Déséquilibres de tension	38
II.7	Variation de fréquence	39
II.8	Harmoniques et inter-harmoniques	39
II.9	Conséquences des phénomènes perturbateurs	45
II.10	Conclusion	46
Chapitr	re III : Description du réseau isolé étudié47	
III.1	Introduction	47
III.2	Caractéristique du réseau	47
III.3	La topologie et la configuration des réseaux électriques dans le système	48
III	.3.1 Sources conventionnelles dans le réseau	48
III	.3.2 Sources renouvelables dans le système	49
III.4	Impact de l'environnement et de la température sur la puissance des systèmes	
photo	ovoltaïques dans la région désertique	51
III.5	Conclusion	53
Chapitr	re IV : Simulation du réseau isolé54	
IV.1	Introduction	54
IV.2	Présentation du logiciel ETAP	54
IV.3	Modes d'étude du logiciel ETAP	55

IV.4 Simulation de système sous environnement ETAP	56
IV.5 Etude d'écoulement de puissance dans le système	.56
IV.5.1 Écoulement de puissance en régime nominal	.57
IV.6 Impact des harmoniques sur le réseau	.59
IV.6.1 Méthodes d'analyse harmonique sous environnement ETAP	.60
IV.6.2 Détermination des harmoniques dans le réseau	.61
IV.7 Conclusion	.67
Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif68	
V.1 Introduction	.68
V.2 Correction de THD dans le réseau étudié	.68
V.2.1 Filtrage passif	.68
V.2.2 Simulation de réseau en présence des filtres passifs	.70
V.3 L'impact d'augmentation de l'énergie produite par les sources PV	.75
V.3.1 Impact d'augmentation de production PV par 10 MW	.75
V.4 Impédance d'harmonique	.85
V.4.1 Etude d'impédance d'harmonique	.85
V.5 Conclusion1	10
Conclusion Générale111	
Bibliographie113	

# Table des figures

Figure I.1	Voies de production de l'énergie électrique [3] 4
Figure I.2	Schéma de principe d'une centrale nucléaire [5]5
Figure I.3	Schéma de centrale combustibles fossiles (Charbon) [5]6
Figure I.4	le principe de centrale à gaz naturel classique [7]6
Figure I.5	Fonctionnement d'une centrale à gaz à cycle combiné CCGT [7]7
Figure I.6	Représentation graphique d'une centrale Biomasse [10]8
Figure I.7	Représentation graphique d'une centrale géothermique [11]9
FigureI.8 R	eprésentation graphique d'une centrale solaire cylindro-paraboliques [44]10
Figure I.9 F	Représentation graphique d'une centrale cogénération11
Figure I.10	Objectifs du programme algérien des ENR à l'horizon 2030 [9]12
Figure I.11	Représentation graphique des différents types d'éolienne Darrieus [18]14
Figure I.12	Représentation graphique de l'éolienne verticales Savonius [16]15
Figure I.13	Représentation graphique de l'éolienne à axe horizontale15
Figure I.14	Les composants principaux d'une éolienne à axe horizontale [7]16
Figure I.15	Générateur à induction à vitesse fixe [20]17
Figure I.16	Générateur asynchrone à double alimentation [20]18
Figure I.17	Générateur synchrone avec un convertisseur électronique de puissance à pleine échelle
(i un conve	
Figure I.18	Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairements [21]19
Figure I.19	Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [22]20
Figure I.20	Deux modules de cellule (monocristallin et polycristallin) [23]21

Figure I.21	Modules de cellule amorphe [21]	.22
Figure I.22	Cellule solaire tout organique [45]	.23
Figure I.23	Le modèle d'une cellule photovoltaïque [6]	.23
Figure I.24	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'une association en série [48]	25
Figure I.25	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement en parallèle [48]	.26
Figure I.26	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'une variation d'éclairement [48]	.26
Figure I.27	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'une variation de température [48]	.27
Figure I.28	: Modèle d'une cellule pour un circuit-ouvert[6]	27
Figure I.29	: Modèle d'une cellule pour un court-circuit [6]	28
Figure I.30	Schéma unifilaire d'une centrale PV raccordée au réseau	.30

Figure II.1	Amplitude de tension [27]33
Figure II.2	Système triphasé symétrie [29]34
Figure II.3	Creux de tension [31]36
Figure II.4	Coupure de tension [31]36
Figure II.5	Différents types de surtension [35]37
Figure II.6	Variations rapides de tension [33]
Figure II.7	Déséquilibre de tension [33]
Figure II.8	Les harmoniques et les inter-harmoniques [35]39
Figure II.9 [46]	La tension d'alimentation et le courant consommé par une charge non linéaire 
Figure II.10	Représentation spectral d'un signal périodique [35]42

Figure III.1 Carte géographique du réseau [6]47
FigureIII.2 : Implantation ferme éolienne de Kabertine [37]51
Figure III.3 : Variation de température du milieu et température du module PV durant une journée de production [6]51
Figure III.4 : Puissances générées en considérant la température du milieu et du module PV pour Kabertine
Figure III.5 : Puissances générées en considérant la température du milieu et du module PV pour Adrar52

Figure IV.1	l'interface du logiciel ETAP55
Figure IV.2	Modes d'étude de simulation ETAP55
Figure IV.3	Schéma du réseau implanté sous environnement ETAP56
Figure IV.4	Simulation du réseau dans le mode Load flow57
Figure IV.5	Simulation de réseau actuel sans filtrage61
Figure IV.6	Spectre d'harmonique de système sans filtrage62
Figure IV.7 spectre harm	Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) nonique
Figure IV.8 spectre harm	Résultats obtenues au niveau du noeud d'Aoulef sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) 1000 aonique
Figure IV.9 (b) spectre h	Résultats obtenues au niveau du nœud d'Ain Saleh sans filtrage : (a) Forme d'onde, armonique
Figure IV.10 (b) spectre ha	) Résultats obtenues au niveau du noeud de Regane sans filtrage : (a) Forme d'onde, armonique
Figure IV.11 d'onde, (b) sp	Résultats obtenues au niveau du noeud de Timimoune sans filtrage : (a) Forme bectre harmonique

Figure IV.12 Résultats obtenues au niveau du noeud de Kabertine sans filtrage : (a) Forme
d'onde, (b) spectre harmonique65
Figure IV.13 Résultats obtenues au niveau du noeud de Zaouite Kounta sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique
Figure V.1 Éditeur de filtre harmonique sous environnement ETAP69
Figure V.2Les différents types de filtre passif sur ETAP69
Figure V.3 Simulation de réseau avec filtrage70
Figure V.4 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre : (a) Forme d'onde, (b)
spectre harmonique71
Figure V.5 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Aoulef avec filtre : (a) Forme d'onde, (b)
spectre harmonique72
Figure V.6 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Ainn Saleh avec filtre : (a) Forme d'onde,
(b) spectre harmonique72
Figure V.7 Résultats obtenues au niveau du nœud de Kabertine avec filtre : (a) Forme d'onde,
(b) spectre harmonique73
Figure V.8 Résultats obtenues au niveau du nœud de Regane avec filtre : (a) Forme d'onde, (b)
spectre harmonique73
Figure V.9 Résultats obtenues au niveau du nœud de Zaouite Kounta avec filtre : (a) Forme
d'onde, (b) spectre harmonique74
Figure V.10 Résultats obtenues au niveau du nœud de Timimoune avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique74
Figure V.11 Simulation de réseau sans filtrage avec des centrales de 10MW76
Figure V.12 Simulation de réseau avec filtrage avec des centrales de 10MW76
Figure V.13 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 10MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique
Figure V.14 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 10MW : (a) Forme
d'onde,(b) spectre harmonique

Figure V.15 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 20MW : (a) Forme
d'onde, (b) spectre harmonique
Figure V.16 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 20MW : (a) Forme
d'onde, (b) spectre harmonique79
Figure V.17 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 30MW : (a) Forme
d'onde (b) spectre harmonique
a onac, (5) speciale na monique.
Figure V.18 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 30MW : (a) Forme
d'onde,(b) spectre harmonique
Figure V.19 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 40MW : (a) Forme
d'onde, (b) spectre harmonique
Figure V 20 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 40MW $\cdot$ (a) Forme
d'onde (h) spectre harmonique
u onde,(b) speetre narmonique
Figure V.21 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 50MW : (a) Forme
d'onde, (b) spectre harmonique
Figure V.22 Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 50MW : (a) Forme
d'onde,(b) spectre harmonique
Figure V 23 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau d'Adrar · (a) Impédance sans
filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.24 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau d'Aoulef : (a) Impédance sans
filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.25 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau d'Ain Saleh : (a) Impédance sans
filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.26 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Kabertine · (a) Impédance sans
filtre et (h) Impédance avec filtre
inde et (6) impedance avec inde
Figure V.27 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Regane : (a) Impédance sans
filtre et (b) Impédance avec filtre

Figure V.28 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Timimoune : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.29 Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Zaouite Kounta : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.30 Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.31 Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.32 Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre91
Figure V.33 Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.34 Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.35 Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.36 Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.37 Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.38 Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.39 Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre
Figure V.40 Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre

Figure V.41	Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 20MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre96
Figure V.42	Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 20MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre96
Figure V.43	Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 20MW : (a) Impédance
sans filtre et (	(b) Impédance avec filtre97
Figure V.44	Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et
(b) Impédanc	e avec filtre
Figure V.45	Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et
(b) Impédanc	e avec filtre98
Figure V.46	Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 30MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre99
Figure V.47	Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 30MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre
Figure V.48	Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 30MW : (a) Impédance sans filtre
et (b) Impéda	nce avec filtre
Figure V.49	Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 30MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre100
Figure V.50	Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 30MW : (a) Impédance
sans filtre et	(b) Impédance avec filtre101
Figure V.51	Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et
(b) Impédanc	e avec filtre102
Figure V.52	Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et
(b) Impédanc	e avec filtre102
Figure V.53	Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 40MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre103

Figure V.54	Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 40MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre103
Figure V.55	Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 40MW : (a) Impédance sans filtre
et (b) Impéda	nce avec filtre104
Figure V.56	Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 40MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre104
Figure V.57	Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 40MW : (a) Impédance
sans filtre et (	(b) Impédance avec filtre105
Figure V.58	Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et
(b) Impédanc	e avec filtre106
Figure V.59	Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et
(b) Impédanc	e avec filtre106
Figure V.60	Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 50MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre107
Figure V.61	Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 50MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre107
Figure V.62	Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 50MW : (a) Impédance sans filtre
et (b) Impéda	nce avec filtre108
Figure V.63	Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 50MW : (a) Impédance sans
filtre et (b) In	npédance avec filtre108
Figure V.64	Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 50MW : (a) Impédance
sans filtre et	(b) Impédance avec filtre109

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Programme des ENR à réaliser pour le marché national [9]12
Tableau II.1 : Limites de distorsion de tension selon la norme IEEE-519
Tableau II.2 : Principaux conséquence des phénomènes perturbateurs [35]45
Tableau III.1 : Production conventionnel du réseau [37]48
Tableau III.2 : Paramètres de centrale éolienne et centrales photovoltaïques installées [37]49
Tableau III.3 : Données techniques de la centrale d'Adrar [37]50
Tableau III.4 : Production éolienne [37] 50
Tableau IV.1 : Rapport de simulation Load Flow pour le système étudié
Tableau IV.2 : Les puissances générées par les centrales PV
Tableau IV.3 : THD des tensions dans le niveau de tension 30 kV reportées par ETAP62
Tableau IV.4 : Amplitude des harmoniques des nœuds66
Tableau V.1 : THD obtenu par ETAP au niveau de tension 30 kV avec filtres passifs70
Tableau V.2 : THD obtenu par ETAP avec des centrales de 10MW77
Tableau V.3: THD obtenu par ETAP avec des centrales de 20MW
Tableau V.4: THD obtenu par ETAP avec des centrales de 30MW80
Tableau V.5: THD obtenu par ETAP avec des centrales de 40MW81
Tableau V.6: THD obtenu par ETAP avec des centrales de 50MW

## Liste des abréviations

<b>PV</b> Photovoltaïque
ENR Energies Renouvelables
<b>QEE</b> Qualité d'Énergie Electrique
VAWT Vertical Axis Wind Turbine
GADA Générateur Asynchrone à Double Alimentations
GPV Générateur photovoltaïque
<b>MPP</b> Point de la puissance maximale
<b>PN</b> Tension de jonction
$\pmb{N_s}$ Nombre de cellules connectées en série
$R_s$ Résistance série
<b>R</b> <sub>SH</sub> Résistance shunt
<b>Voc</b> Tension de circuit ouvert (V)
<i>I<sub>cc</sub></i> Courant de court-circuit
Iop Courant optimal
<b>V</b> <sub>op</sub> Tension optimale
MT Moyen Tension
<b>THT</b> Très Haute Tension
<b>CCGT</b> Centrale à Gaz à Cycle combiné
<b>CSP</b> Concentrating Solar Power
<b>TG</b> Turbine à Gaz
ETAP Electrical Transient and Analysis Program
AC Alternative current
<b>DC</b> Direct current

 ${\bf GIS}$  Geographic Information System

 $\ensuremath{\textbf{FMSR}}$  Fault Management and Service Restoration

**THD** Taux de Distorsion Harmonique (%)

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**kV** kiloVolts

MW Maga watt

MVAR Mega Volt-Ampère Réactif

MVA Mega Volt-Ampère

## **Introduction Générale**

L'importance de l'énergie électrique pour l'humanité est indéniable, devenant même essentielle à notre mode de vie. Face à une multitude de sources énergétiques disponibles, la gestion efficace du mix énergétique est devenue une priorité, d'autant plus avec les avancées en matière de contrôle et de télécommunication. La particularité de cette forme d'énergie réside dans sa nécessité d'adaptation constante pour répondre à la demande, ce qui requiert une anticipation des moyens de production pour couvrir les pics de consommation.

En Algérie, et en raison de leur disponibilité, le pays dépend principalement des énergies fossiles, comme le pétrole et le gaz. Toutefois, la prise de conscience croissante des enjeux climatiques pousse à envisager un avenir énergétique plus durable, en limitant la consommation et en intégrant les énergies renouvelables.

Ainsi, l'Algérie s'est lancée dans un programme national visant à développer les énergies renouvelables jusqu'en 2030, ce programme vise à renforcer le réseau sud avec une production électrique de 1000 MW par les ENR. Cependant, l'irrégularité de ces sources représente un défi majeur, tant sur le plan économique que sécuritaire, comparé aux sources conventionnelles.

Dans le grand sud caractérisé par sa nature désertique, plusieurs zones isolées existent dont ils sont alimentés par des groupes diesels ou petites centrales à gaz. Et plusieurs centrales fonctionnant en énergies renouvelables ont été installées en marchant avec la démarche de conversion vers les sources renouvelables.

Le réseau isolé à étudie est alimenté par diverses sources, y compris des turbines à gaz mobiles, des centrales photovoltaïques et une ferme éolienne. Dans ce contexte, une étude a été menée pour analyser le système et évaluer l'impact de pollution harmonique sur le réseau, dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie fournie.

Cette étude se concentre sur l'analyse de la qualité de l'énergie du système. À travers des simulations réalisées dans l'environnement ETAP, l'objectif est de comprendre les aspects tels que la stabilité de la tension, les harmoniques, et comprendre. Le travail est structuré en cinq chapitres :

 Le premier chapitre de cette étude offre un aperçu général de la production d'énergie électrique, en explorant ses divers types. Une attention particulière est accordée aux principes de fonctionnement des centrales à turbine à gaz, des installations photovoltaïques et des éoliennes.

- Dans le deuxième chapitre, nous abordons la description et la caractérisation des indices liés à la qualité de l'énergie électrique, tout en examinant les méthodes de contrôle associées.
- Nous présentons dans le troisième chapitre le réseau électrique étudié : la configuration, les composants, les puissances des nœuds ainsi que les caractéristiques de ces charges et nous étudions aussi l'impact de considération de température ambiante au lieu de considérer la température de cellule sur la puissance générée par la centrale PV
- Nous simulons le réseau sous environnement ETAP dans le quatrième chapitre, et cela en régime normal pour vérifier si le plan de tension respecte les limites tolérables, puis on détermine les harmoniques au niveau 30kV dans chaque nœud de réseau (MT) pour voir leurs impacts sur le système.
- Le dernier chapitre vise à améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau actuel en intégrant des filtres à chaque nœud afin d'évaluer leurs impacts. Dans le cadre du programme national, nous étudierons l'impact de l'augmentation de l'intégration de la puissance photovoltaïque (PV) dans chaque nœud et analyserons également la variation de l'impédance harmonique dans tous les cas étudiés.

A la fin, une conclusion englobe les principaux résultats obtenus à partir des simulations effectuées dans le mémoire, ainsi que des perspectives des futurs travaux dans la continuité de ce travail.

## **Chapitre I**

## Production de l'énergie électrique

#### I.1 Introduction

La production d'énergie électrique revêt une importance cruciale pour les composants des réseaux électriques, étant donné que c'est à ce niveau que la tension et la fréquence peuvent être ajustées. Le présent chapitre illustre les différents modes de génération de l'énergie électrique ainsi que de programme des énergies renouvelables en Algérie.

#### I.2 Production d'énergie électrique

Les centrales de production d'énergie électrique font souvent usage d'alternateurs triphasés synchrones de grandes dimensions, lesquels sont entraînés par divers types de turbines telles que les turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ces alternateurs convertissent l'énergie mécanique fournie par les turbines en énergie électrique [1].

La production d'énergie électrique consiste à transformer des sources d'énergie primaires telles que les énergies fossiles (charbon, fioul, gaz) ainsi que les énergies renouvelables (solaires, éoliens...) en énergie électrique, disponible sous forme d'électrons. L'énergie électrique est une énergie secondaire, nécessitant toujours une autre énergie primaire pour être produite [2]. Les modes de production d'électricité sont regroupés en grandes catégories en fonction de la manière dont l'énergie primaire est convertie en électricité. Les principales catégories sont brièvement expliquées dans le schéma ci-dessous Figure I.1.



Fig I.1 : Voies de production de l'énergie électrique [3].

#### I.2.1 Production électrique par énergie conventionnelle

Les centrales conventionnelles sont souvent employées pour satisfaire les demandes énergétiques à grande échelle. Elles tirent leur énergie principalement de deux sources : le nucléaire ou les combustibles fossiles, sous forme thermique.

#### **Centrale nucléaire**

Une centrale nucléaire (Figure I.2) est une centrale électrique thermique, c'est-à-dire que sa production d'électricité provient d'une source de chaleur dégagée par une réaction de fission nucléaire pour chauffer de l'eau et générer de la vapeur. Cette dernière actionne une turbine qui est couplée à un alternateur générant de l'électricité [4].



Fig I.2 : Schéma de principe d'une centrale nucléaire [5].

#### **Centrale combustibles fossiles**

Une centrale thermique à combustible fossile (gaz naturel, pétrole, charbon) exploite l'énergie générée par la combustion d'un combustible. Cette réaction se déroule dans une chaudière, produisant une quantité importante de chaleur utilisée pour élever la température de l'eau dans le générateur de vapeur. La vapeur d'eau sous pression ainsi créée est dirigée vers une turbine qui, en tournant à grande vitesse, alimente un alternateur produisant une tension alternative sinusoïdale. Après avoir traversé la turbine, la vapeur est refroidie, retrouvant son état liquide, puis renvoyée dans la chaudière. Le processus de refroidissement de la vapeur provenant de la turbine peut être assuré par une source d'eau telle qu'un cours d'eau ou, plus rarement, par une tour de refroidissement similaire à celle utilisée dans les centrales nucléaires [5].



Fig I.3 : Schéma de centrale combustibles fossiles (Charbon) [5].

Le processus est un peu différent dans les centrales au gaz naturel. Les centrales au gaz naturel utilisent des turbines à gaz au lieu de turbines à vapeur. Il existe deux types de centrales à gaz sont :

#### Centrale à gaz naturel classique

Le principe de fonctionnement de cette turbine à combustion repose sur l'utilisation de la chaleur générée par la combustion de combustibles fossiles pour produire de l'électricité via la rotation d'une turbine connectée à un alternateur [7]. Le schéma ci-dessous présente le principe de centrale à gaz naturel classique.



Fig I.4 : le principe de centrale à gaz naturel classique [7].

#### Centrale à cycle combiné (CCGT)

Les centrales à cycle combiné permettent de mettre à profit l'énergie résiduelle de ces gaz chauds qui vont céder leur chaleur dans un échangeur pour faire bouillir le fluide d'un second cycle thermodynamique. La vapeur ainsi obtenue entrainera à son tour une deuxième turbine génératrice d'électricité [7]. Le schéma ci-dessous présente le fonctionnement d'une centrale à gaz à cycle combiné CCGT.



Fig I.5 : Fonctionnement d'une centrale à gaz à cycle combiné CCGT [7].

#### I.2.2 Production électrique par énergie renouvelables

Les énergies renouvelables, grâce à leur caractère inépuisable, émergent désormais comme des ressources cruciales pour la production d'électricité. Leur utilisation présente un avantage majeur : elles sont peu, voire non polluantes, produisant des quantités moindres de gaz polluants par rapport aux centrales conventionnelles.

Les énergies renouvelables ont démontré leur résilience et leur capacité à atténuer efficacement la plupart des enjeux environnementaux, pourvu que l'on accepte leurs variations naturelles parfois imprévisibles.

#### **Energie Biomasse**

La biomasse fait référence à toute la matière organique d'origine végétale ou animale présente sur la surface terrestre. Typiquement, cela inclut également les sous-produits et les déchets. On distingue différents types de biomasse, tels que le bois-énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois-énergie représente une ressource extrêmement répandue et est actuellement la source d'énergie la plus largement exploitée à l'échelle mondiale [10].



Fig I.6 : Représentation graphique d'une centrale Biomasse [10].

#### Energie Géothermique

L'énergie géothermique est issue principalement de la désintégration des éléments radioactifs présents naturellement dans les roches du sous-sol. La température des roches augmente généralement d'environ 1°C pour chaque descente de 30 mètres de profondeur. Pour exploiter cette source d'énergie, il est nécessaire d'étudier le gisement géothermique ainsi que le fluide géothermique existant. Pour récupérer l'énergie, l'eau pompée traverse des échangeurs de chaleur afin de produire de la vapeur, comme illustré dans la figure I.7. Cette forme d'énergie est donc exploitable uniquement dans des zones spécifiques où la chaleur s'est accumulée [11].

De manière générale, on distingue trois catégories de géothermie en fonction du niveau de température disponible pour l'exploitation [12] :

- La géothermie à haute énergie.
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie.



Fig I.7 : Représentation graphique d'une centrale géothermique [11].

#### Energie solaire à concentration thermodynamique (CSP)

La technologie solaire concentrée (CSP- Concentrating Solar Power), également connue sous le nom de solaire thermodynamique, est conçue pour produire de l'électricité à grande échelle sans émissions de carbone. Elle est idéalement adaptée aux régions bénéficiant d'un fort ensoleillement, mesuré en rayonnement direct-normal (DNI), d'au moins 2 000 kWh par mètre carré par an. L'Algérie dispose d'une excellente ressource solaire, avec un rayonnement global annuel de plus de 2000 kWh/m<sup>2</sup>.

La technologie solaire à concentration thermodynamique utilise des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur. Ce fluide chauffe jusqu'à des températures pouvant atteindre 500°C. Ensuite, la chaleur est transférée à un circuit d'eau, où la vapeur ainsi produite actionne une turbine couplée à un alternateur pour générer de l'électricité. L'un des principaux avantages de cette technologie réside dans sa capacité à stocker la chaleur, permettant ainsi aux centrales solaires de fonctionner et de produire de l'électricité même pendant la nuit. [13].

IL existe quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire thermodynamique [13]:

-Les centrales solaires cylindro-paraboliques.

-Les centrales solaires à miroirs de Fresnel.

-Les centrales solaires à tour.

-Les paraboles solaires Dish-Stirling.



Fig I.8 : Représentation graphique d'une centrale solaire cylindro-paraboliques [44].

#### L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque exploite la lumière du soleil comme source d'énergie en convertissant l'énergie des photons atteignant la surface de la Terre en électricité.

L'effet photovoltaïque se produit lorsque les photons sont absorbés par un matériau semiconducteur, générant ainsi une tension électrique. Les cellules photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en courant continu, pouvant être utilisé pour alimenter des appareils ou recharger des batteries. Les panneaux photovoltaïques, composés de ces cellules à base de silicium, ont la capacité de convertir les photons en électrons [12]. Puisque cette forme d'énergie domine toutes les énergies renouvelables en Algérie, nous allons expliquer en détail son principe de fonctionnement et sa composition.

#### **Energie Cogénération**

La cogénération implique la production simultanée d'énergie thermique et mécanique dans une même installation. La chaleur générée est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude via un échangeur, tandis que l'énergie mécanique est convertie en électricité par un alternateur. Ces installations peuvent fonctionner avec diverses sources d'énergie telles que le gaz, le fioul, la géothermie, la biomasse ou même la valorisation des déchets, comme l'incinération des ordures

ménagères. Elles offrent un rendement énergétique élevé mais doivent être situées près des zones de consommation pour minimiser les pertes de chaleur pendant le transport [14].

La classification de la cogénération comme énergie renouvelable dépend donc de la source de combustible utilisée dans le processus.



Fig I.9 : Représentation graphique d'une centrale cogénération.

#### L'énergie éolienne

L'énergie éolienne se manifeste par la cinétique de l'air en mouvement, c'est-à-dire le vent. Cette énergie est convertie en énergie mécanique ou électrique par le biais d'éoliennes, des dispositifs conçus spécifiquement pour cette transformation. Contrairement aux énergies fossiles, qui sont des sources d'énergie stockée, l'énergie éolienne est considérée comme une forme d'énergie flux [15]. Comme l'énergie éolienne est la principale forme d'énergie renouvelable en Algérie, nous allons fournir une explication détaillée de son fonctionnement et de sa composition.

#### I.2.3 Production électrique par des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie a pris l'engagement de promouvoir le développement des énergies renouvelables dans le dessein d'aboutir à une solution complète et pérenne, tout en anticipant l'épuisement des ressources fossiles et en préservant l'environnement [8].

La stratégie de l'Algérie dans ce domaine est orientée vers l'établissement d'une véritable industrie énergies renouvelables (ENR), combinée à un programme de formation et de transfert de connaissances. Cette approche vise à mobiliser le talent local algérien, notamment dans les domaines de l'ingénierie et de la gestion de projets. Le programme des énergies renouvelables, axé sur la satisfaction des besoins électriques nationaux, devrait générer plusieurs milliers d'emplois directs et indirects [9]. Dans cette perspective, l'Algérie est en train de mettre en œuvre un programme national ambitieux pour les énergies renouvelables qui s'étend jusqu'à l'horizon 2030 le tableau (Tableau I.1) et la Figure ci-dessous (Figure I.10) illustre tout ça.



Fig I.10 : Objectifs du programme algérien des ENR à l'horizon 2030 [9].

	1ére Phase	2éme Phase	TOTAL
Type d'énergie	(2015-2020)	(2021-2030)	en MW
	N // XX7	NANA	
	en IVI W	en Mw	
Photovoltaïque	3000	10575	13575
<b>`</b>			
Eolien	1010	4000	5010
CSP	/	2000	2000
~			
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	900
Geothermie	5	10	15
ТОТАЦ	4525	17475	22000
	1020	11110	22000

Tableau I.1 : Programme des ENR à réaliser pour le marché national [9].

#### I.3 La production d'énergie électrique par les éoliennes

#### I.3.1 Principe de fonctionnement

L'éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes [16] :

- La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent de translation en énergie mécanique de rotation, cette conversion se fait au niveau de la turbine éolienne.
- La conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique. Selon la technologie de l'éolienne utilisée, la transmission de l'énergie électrique au réseau soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface de l'électronique de puissance.

#### I.3.2 Les différents types des turbines éoliennes

Les éoliennes sont initialement classées en fonction de l'orientation de leur axe de rotation, ce qui permet de les diviser en deux catégories distinctes :

#### Eolienne à axe verticale

Les pales de l'éolienne verticale, également nommée VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Cette solution est moins répandue que l'éolienne horizontale mais tend progressivement à la remplacer [17].

Son principal atout est sa capacité à capter des vents faibles :

- L'éolienne verticale n'a donc pas besoin de rafales ou de vents puissants, voire violents, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent.
- De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent.

Il existe deux types d'éolienne à axe verticale sont :

 Les éoliennes verticales Darrieus : L'éolienne verticale de type Darrieus -comme montre la figure I.11- produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différent type (hélicoïdale, H, cylindrique), qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes [16,18].



**Eolienne Darrieus** 

Fig I.11 : Représentation graphique des différents types d'éolienne Darrieus [18].

 Les éoliennes verticales Savonius : L'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre (Figure I.12).

Le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres et le pousse. Les demi-cylindres n'étant pas rattachés en un même point, mais légèrement désaxés, le vent continue sa course dans l'autre demi-cylindre, qu'il pousse à son tour [16].



Fig I.12 : Représentation graphique de l'éolienne verticales Savonius [16].

#### Eolienne à axe horizontale

L'éolienne horizontale, également appelée HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, et situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement est plus important [19].



Fig I.13 : Représentation graphique de l'éolienne à axe horizontale.

#### I.3.3 Les composants d'une éolienne à axe horizontal

Les composants principaux d'une éolienne sont représentés dans la Figure I.14.



Fig I.14 : Les composants principaux d'une éolienne à axe horizontale [7].

Les pales : Semblables à des ailes d'avion, sont propulsées par le vent, et leur mouvement entraîne le générateur.

Le moyeu (rotor) : Rassemble les pales de l'éolienne. Il est connecté mécaniquement au générateur via un multiplicateur de vitesse.

Le multiplicateur : Le multiplicateur est un élément clé de l'éolienne, agissant comme une liaison entre le rotor et la génératrice. Il augmente la vitesse de transmission pour adapter aux exigences de la génératrice, permettant ainsi de convertir efficacement l'énergie éolienne en électricité.

La nacelle : Abrite le cœur de l'éolienne, notamment la génératrice électrique permettant de transformer l'énergie cinétique créée par la rotation du rotor de l'éolienne en électricité et le système de freins.

**Système d'orientation :** Utilise des moteurs électriques pour faire pivoter la nacelle avec le rotor, alignant ainsi les pales avec la direction du vent afin de capturer le maximum d'énergie. Ce système est piloté par un système de contrôle-commande.
Le mât : Permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement, ou à une hauteur où le vent souffle de façon plus forte et plus régulière qu'au niveau du sol.

La base : Une base en béton armé qui assure la stabilité de l'ensemble de la structure.

#### I.3.4 Les différents types des générateurs

On peut également classifier les éoliennes en fonction des ensembles de machines et convertisseurs utilisés dans le générateur. Cela nous permet de distinguer 3 types de générateurs :

#### Générateur à induction à vitesse fixe

Le premier type de turbine éolienne utilise un générateur asynchrone à cage d'écureuil (Figure I.15) pour convertir l'énergie mécanique en électricité. Bien que la vitesse du générateur puisse varier légèrement, cette turbine est généralement appelée "à vitesse fixe" en raison de variations d'ordre de 1%. Ce design simple et économique, bien qu'robuste, présente des contraintes mécaniques dans la chaîne cinématique. En raison de l'absence d'électronique de puissance, cette turbine ne peut pas assurer une sortie constante au réseau ni contribuer à la puissance réactive essentielle pour la stabilité de la tension [20].



Fig I.15 : Générateur à induction à vitesse fixe [20].

#### Générateur asynchrone à double alimentation

Le deuxième type de turbine utilise un générateur asynchrone à double alimentation (DFIG) au lieu d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil (Figure I.16). Il est également équipé d'une boîte de vitesses. Le stator du générateur est connecté au réseau, tandis que le rotor est connecté à un convertisseur électronique de puissance, généralement back to back convertisseur source de tension.

Ces turbines peuvent contribuer à la stabilité de l'angle de rotor et au contrôle de la fréquence grâce au contrôle de la puissance active. De plus, elles peuvent améliorer la stabilité de l'angle de rotor et de la tension en contrôlant la puissance réactive [20].



Fig I.16 : Générateur asynchrone à double alimentation [20].

#### Générateur synchrone à aimants permanents

Le troisième type des turbines sont basées sur des convertisseurs connectés au stator du générateur (Figure I.17) qui sont considérés à pleine puissance de turbine. On les appelle turbines de conversion à pleine grandeur (Full Size Converter FSC). Différents types de générateurs sont communs, les générateurs synchrones à rotor enroulé, les générateurs synchrones à aimants permanents et les générateurs d'induction à cage d'écureuil. Selon le type de générateur, une boîte de vitesses peut ou non ne pas être utilisée [22].



Fig I.17 : Générateur synchrone avec un convertisseur électronique de puissance à pleine échelle (Full converter) [20].

#### I.4 L'énergie solaire photovoltaïque

#### I.4.1 L'effet photovoltaïque

#### Comportement de La jonction PN utilisée comme capteur PV

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairement solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles représentées par la figure (I.18).

Sans éclairement, le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau Eg. La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction [21].



Fig I.18 : Caractéristiques d'une jonction PN polarisée sous différents éclairements [21].

#### Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans les matériaux semi-conducteurs.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semiconducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la FigureI.19 [22].



Fig I.19 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [22].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les pairs électron/ trou créées par les photons incidents sont dit souciés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo-courant de génération.

### I.4.2 Différentes structures des cellules PV

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique de type semi-conducteur absorbant une partie de l'énergie lumineuse et la transformant directement en énergie électrique.

Il y a divers types de cellules solaires qui se différencient selon les technologies de silicium qu'elles emploient pour produire de l'énergie photovoltaïque

#### • Le silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin sont constituées d'un seul cristal de silicium, ce sont des cellules avec un grand rendement, il est de 12 à 18 % Leur coût ne permet pas de les utiliser dans des applications domestiques (FigI.20) [23].

#### • Le silicium polycristallin

Les cellules en silicium polycristallin sont constituées de plusieurs cristaux de silicium, leur rendement est 11 à 15 %, légèrement inférieur au rendement des monocristallins du point de vue du prix, elles sont les mieux adaptées aux applications domestiques (FigI.20) [23].



Fig I.20 : Deux modules de cellule (monocristallin et polycristallin) [23].

#### • Le silicium amorphe

Les cellules en silicium amorphe sont réalisées avec du silicium amorphe, non cristallisé, étalé sur une plaque de verre. Il a un processus d'absorption des photons plus important que celui du silicium cristallin, ce qui permet la fabrication sous forme de couche mince, mais son rendement est plus faible, compris entre 6 et 8 %. Il est par contre compensé par un coût plus bas, il est principalement utilisé dans les appareils électroniques (Figure I.21) [21].



Fig I.21 : Modules de cellule amorphe [21].

#### • Cellules organiques et plastiques

Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, conformément aux prédictions de Merritt en 1978, la cellule composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques » (Fig I.22).

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures [22]).



Fig I.22 : Cellule solaire tout organique [45].

### I.4.3 Modélisation et paramètres d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque peut être modélisée par un circuit équivalent comme présenté sur la figure I.23 :



Fig I.23 : Le modèle d'une cellule photovoltaïque [6].

D'après cette figure, l'équation mathématique  $I_{pv}(V_{pv})$  de la cellule s'écrit comme suit :

$$I_{\rm pv} = I_{\rm p} - I_{\rm D} - I_{\rm SH} = I_{\rm p} - I_{\rm s} \left( e^{Q \frac{(Vpv + Rs \times Ipv)}{NkT} - 1} \right) - \frac{Vpv + Rs \times Ipv}{RsH}$$
(I.1)

Ip:photo-courant [A]

Vpv : tension aux bornes de la cellule [V]

ID: courant direct de la diode [A]

l : courant de saturation de la jonction [A]

Isн : courant shunt [A]

- N : facteur d'idéalité, prend une valeur entre (1 et 2).
- Q : charge d'un électron [C]
- K : constante de Boltzmann (1.38110-23Joule/Kelvin)
- T : température de la cellule [K]
- Rs : résistance série  $\lceil \Omega \rceil$
- RsH : résistance shunt [Ω]

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

• Le courant de court-circuit (Icc) qui fournit chaque cellule est :

$$Icc(cellule) = \frac{Icc}{N_{\rm p}}$$
 (I.2)

• La tension du circuit ouvert (Vco) de chaque cellule est :

$$Vco(cellule) = \frac{Vco}{Ns}$$
 (I.3)

• Le courant maximal de chaque cellule est :

$$Imp(cellule) = \frac{Imp}{N_{\rm p}}$$
(I.4)

• La tension maximale de chaque cellule est :

$$Vmp(cellule) = \frac{Vmp}{Ns}$$
 (I.5)

• La puissance maximale de chaque cellule est :

$$Pmax(cellule) = Vmp(cellule) \times Imp(cellule)$$
 (I.6)

• La résistance série de chaque cellule est :

$$Rs(\text{cellule}) = \frac{N_{\text{p}}}{Ns} \times Rs(module) \qquad (I.7)$$

• La résistance shunt de chaque cellule est :

$$Rsh(cellule) = \frac{N_p}{Ns} \times Rsh(module)$$
(I.8)

#### I.4.4 Association des cellules PV (le module PV)

#### • Association des cellules en série

Dans un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs cellules connectées en série, la tension totale est la somme des tensions de chaque cellule individuelle, tandis que le courant est identique à celui traversant chaque cellule. Ainsi, la puissance du panneau augmente également, comme illustré dans la figure I.24 [48].



Fig I.24 : Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'une association en série [48].

#### • Association des cellules en parallèle

La tension de sortie du générateur est identique à celle traversant chaque cellule, tandis que le courant total est la somme des courants traversant chacune des cellules composant le générateur, comme illustré dans la figure I.25 [48].



Fig I.25 : Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement en parallèle [48].

#### I.4.5 Influence des paramètres externes et internes sur une cellule

#### • Influence de l'éclairement

Certainement, la production électrique d'un panneau photovoltaïque est directement liée à l'intensité lumineuse qu'il reçoit, puisque c'est sa source d'énergie primaire. La Figure I.26 illustre comment les caractéristiques électriques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque varient en fonction de différents niveaux d'ensoleillement, tout en maintenant une température constante [24].



Fig I.26 : Caractéristiques I(V) et P(V)résultantes d'une variation d'éclairement [48].

Lorsque l'intensité lumineuse varie, le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque augmente proportionnellement à l'éclairement, tandis que la tension de circuit ouvert reste stable. Cette variation de l'éclairement influence également la puissance maximale délivrée par le module photovoltaïque, entraînant une augmentation significative de celle-ci.

#### • Influence de la température

La température exerce une influence significative sur le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que sur son rendement [24].

La Figure I.27 illustre les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) pour un éclairement constant, mais à des températures variables.



Fig I.27 : Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'une variation de température [48].

• Tension en circuit-ouvert Vco : La tension aux bornes d'une cellule photovoltaïque, lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie, peut être décrite par la figure I.28 et des équations suivantes :

$$I_{p} - l \left( e^{Q \frac{V co}{NkT}} - 1 \right) = 0 \qquad (I.9)$$
$$V co = \frac{NkT}{Q} \ln \left( \frac{I_{p} + l}{l} \right) \qquad (I.10)$$
$$R_{s} \qquad Ipr=0$$



Fig I.28 : Modèle d'une cellule pour un circuit-ouvert [6]

• Le courant de court-circuit Isc : Le courant de CC d'une cellule photovoltaïque correspond au courant qui circule lorsque aucun potentiel n'est appliqué à la cellule. C'est le courant maximal que la cellule peut fournir. Pour une cellule solaire de qualité supérieure(faible Rs et IO, et grande R5H), le courant de CC Isc est représenté par la figure I.29 et mathématiquement par l'équation I.11 [24]:

$$Isc = I_{p} \tag{I.11}$$



Fig I.29 : Modèle d'une cellule pour un court-circuit [6].

• Point de la puissance maximale (MPP) : Ce terme est fréquemment employé pour décrire la performance d'une cellule ou d'un module photovoltaïque. Lorsqu'ils sont exposés à un éclairement constant et à une température spécifique, le point de fonctionnement d'un système photovoltaïque est défini par l'intersection de la courbe Ipv-Vpv et la courbe de charge [6].

#### I.4.6 L'influence des conditions environnementales sur l'efficacité des PV

Le bon fonctionnement continu d'un système photovoltaïque tout au long de sa durée de vie dépend de l'utilisation adéquate de tous les équipements, ce qui peut améliorer la productivité de la centrale. Les facteurs qui ont le plus d'impact sur la productivité sont les suivants :

#### • L'ombrage

La précision du calcul de la distance entre les rangées de modules photovoltaïques est essentielle, même si aucune source d'ombrage n'est présente lors de l'installation initiale du système. L'ombrage d'une cellule peut la rendre équivalente à une résistance et absorber l'énergie produite par les cellules voisines non ombragées [25].

#### • Salissure et neige

Les dépôts de poussière, neige et autres particules sur la surface du module peuvent réduire l'éclairement et donc la production d'électricité [25].

#### • Durée de vie et productivité du panneau

Ces deux facteurs sont essentiels pour son efficacité. Un panneau solaire bien entretenu peut durer plus de 30 ans, mais sa performance diminue progressivement. Sa productivité dépend de la technologie utilisée, de l'installation et des conditions environnementales. Une longue durée de vie et une haute productivité maximisent le retour sur investissement des panneaux solaires.

#### I.4.7 Manières de connecter les systèmes photovoltaïques

Il existe trois manières différentes d'utiliser un système photovoltaïque :

#### • Installations électriques photovoltaïques autonomes

Il s'agit d'installations qui ne sont pas raccordées au réseau électrique, l'électricité qu'elles produisent est soit directement consommée sur le site par l'utilisateur, soit stockée afin d'y être utilisée ultérieurement. Elles sont constituées de panneaux photovoltaïques, d'un parc de batteries et d'un système de régulation.

#### • Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau

Un système lié au réseau électrique qui génère sa propre électricité et redistribue tout surplus d'énergie vers le réseau auquel il est connecté, tout en tirant de l'énergie du réseau en cas de besoin. Une centrale PV est constituée de divers équipements mis en place pour garantir une conversion efficace et sécurisée de l'énergie solaire en énergie électrique (Fig I.30). Pour transformer l'énergie produite en courant alternatif, un élément essentiel est nécessaire : un onduleur, un dispositif de conversion de puissance électronique. Dans le contexte des grandes centrales photovoltaïques, où le stockage complet de l'énergie dans des batteries n'est pas possible, l'onduleur optimise le fonctionnement du système en utilisant des techniques de commande spécifiques définies par le fabricant [6].



Fig I.30 : Schéma unifilaire d'une centrale PV raccordée au réseau.

#### • Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride

Il s'agit des systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes, telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération, en plus un générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

### I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les différentes méthodes de production d'électricité, qu'elles soient issues des sources conventionnelles ou des sources renouvelables. Notre attention s'est portée sur deux sources en particulier : l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Nous avons exploré en détail les différents types de ces technologies ainsi que leurs applications respectives. Le prochain chapitre concentre sur la qualité d'énergie électrique en identifiant quelques perturbations apparaissant dans les réseaux électriques

# **Chapitre II**

# La qualité de l'énergie électrique

#### **II.1** Introduction

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournit aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous une forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies.

Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus agressif, et par conséquent il doit faire face à de nombreux types de perturbations qui être peuvent d'origine interne comme l'évolution et la complexité du réseau et des charges qui lui sont connectées, ou externe liées aux phénomènes des changements climatiques. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voir la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Ce chapitre présente les différents phénomènes perturbateurs qui peuvent détériorées la qualité de l'énergie électrique et évidemment leurs origines, caractéristiques et conséquences.

#### II.2 La qualité de l'énergie dans les réseaux

La qualité de l'énergie électrique (QEE) est un terme très répandu dans le domaine scientifique et industriel. Ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité en conditions normales, en termes de continuité de la fourniture qui recouvre les coupures ou interruptions du réseau et des caractéristiques de la tension qui désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager.

Cette vision a pour but de déterminer les caractéristiques de la fourniture électrique afin de limiter son influence sur les différentes charges connectées au réseau, les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences.

### II.3 Identification des caractéristiques de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant.

Cependant, tous les phénomènes qui affectent la qualité de l'énergie électrique affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. C'est pourquoi on dit que la qualité de l'énergie électrique est liée à la qualité de la tension.

Si l'utilisateur n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. Donc le terme qualité de courant est rarement utilisé car il se caractérise par les mêmes paramètres de tension (amplitude, fréquence, symétrie et la forme d'onde), généralement on parle de la qualité de la tension [26].

#### II.3.1 Qualité de tension

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Les paramètres caractéristiques de ce réseau sont l'amplitude, la fréquence, la symétrie du système triphasé et la forme d'onde de la tension.

#### L'amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur très important pour la qualité d'énergie électrique. Dans le cas idéal trois tensions ont la même amplitude qui est en générale doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  (réseau de transport) et  $\pm 5\%$  (réseau de distribution) autour de la valeur nominale. Dans un réseau électrique, l'amplitude de la tension d'alimentation dépend des caractéristiques de conception du réseau, des variations de charge et des changements d'état auxquels il est soumis. Donc plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude de tension, on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions.
- Les variations de l'amplitude de la tension.

En pratique, il est d'usage de corriger l'amplitude de la tension à différents points du réseau, par exemple, au moyen des changeurs de prises automatiques dans les postes de transformation, ou par l'utilisation d'équipements de compensation réactive [27].



Fig II.1 : Amplitude de tension [27].

#### La fréquence

Dans des conditions idéales, la fréquence nominale du courant alternatif fourni par le réseau reste constante à 50/60 Hz, selon le pays.

Cette stabilité dépend de l'équilibre entre la charge et la capacité de production des centrales électriques, mais des écarts de fréquence peuvent survenir en raison de variations dans cet équilibre. De plus, le réseau peut subir des variations plus importantes de fréquence temporaires en cas de courts-circuits ou de fluctuations importantes de la charge ou de la production, dont l'amplitude et la durée dépendent de la gravité de l'événement perturbateur.

#### La forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à « 50 Hz » appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non périodiques (bruits) [28].

#### La symétrie du système triphasé

Le système est symétrique si les amplitudes des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut  $120^{\circ} \left(\frac{2\pi}{3}\right)$ . Le déséquilibre de tension sert à caractériser les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions d'alimentation triphasées. Le taux de déséquilibre de tension est défini, suivant la méthode des composantes symétriques de Fortescue. Le déséquilibre de tension qui s'applique aux tensions triphasées a deux causes principales, soient les asymétries d'impédance de réseau et les déséquilibres de charge (ou de courant) [29].



Fig II.2 : Système triphasé symétrie [29].

#### **II.4** Classification des perturbations électriques

Les perturbations électriques sont classifiées selon plusieurs critères [30] :

#### • Selon les paramètres caractérisant de tension

Elles peuvent être groupées en quatre catégories qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension :

- variations de l'amplitude.
- modifications de la forme de l'onde de tension.
- dissymétrie du système triphasé (déséquilibre).
- variations de la fréquence fondamentale à 50 Hz.
- Selon leurs duré on distingue

- perturbations transitoires (moins d'une demi-période fondamentale).
- perturbations de courte durée (quelques minutes).
- perturbation permanant.

#### • Selon les critères de compatibilité électromagnétique

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées [35] :

- basse fréquence (< 9 kHz).
- haute fréquence ( $\geq$  9 kHz).
- de décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) :

- Creux de tension.
- Coupures.
- Surtensions.
- Harmoniques et inter-harmoniques.
- Fluctuations de tension (flicker).
- Déséquilibres de tension.

#### II.4.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc...) [31].

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La Figure (II.3) et la Figure (II.4) montrent un exemple de creux et de coupure de tension.



Fig II.3 : Creux de tension [31].



Fig II.4 : Coupure de tension [31].

#### **II.4.2** Les surtensions

Une surtension est une tension supplémentaire qui vient se superposer à la tension normale [32]. Une surtension est dite de mode différentiel si elle apparaît entre conducteurs de phase ou entre circuits différents. Elle est dite de mode commun si elle apparaît entre un conducteur de phase et la masse ou la terre.

Les surtensions classifiées comme suite [32] :

- 1. Temporaires à fréquence industrielle dues notamment à un défaut d'isolement en régime de neutre ou au phénomène de Ferro-résonance.
- Transitoires : On distingue de manœuvre dues à la commutation d'appareillages électriques (onde oscillatoire amortie) et d'origine atmosphérique due à la foudre (onde impulsionnelle apériodique).



Fig II.5 : Différents types de surtension [35].

#### **II.5** Fluctuations de tension (flicker)

Les fluctuations de la tension désignent une variation systématique de 1'enveloppe de la tension ou une série d'évolutions aléatoires de la tension, dont 1'amplitude reste généralement entre 90% et 10% de la valeur nominale. Les charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc et les éoliennes représentent les sources les plus communes de ces fluctuations dans les réseaux de transport et de distribution [33].

Généralement les fluctuations de la tension n'ont pas un grand impact, on cite des fluctuations de la luminosité des lampes, dénommé effet de flicker ou papillotement.



Fig II.6 : Variations rapides de tension [33].

### II.6 Déséquilibres de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [33,27].



Fig II.7 : Déséquilibre de tension [33].

#### **II.7** Variation de fréquence

La périodicité de la sinusoïde n'est plus constante. Les variations de fréquence sont très faibles (< 1%) au sein des grands réseaux interconnectés et une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectes ou alimentées par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz $\pm$ 1%, qui ne causent aucun préjudice aux équipements électriques ou électroniques [33].

#### **II.8** Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La Figure II.8 montre la superposition de l'harmonique d'ordre 5 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance [34].

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.



Fig II.8 : Les harmoniques et les inter-harmoniques [35].

#### Origine des harmoniques

La principale cause de la génération des harmoniques c'est l'existence des charges déformantes (non linéaires).

Une charge est dite non linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs...), les circuits magnétiques saturés.



Fig II.9 : La tension d'alimentation et le courant consommé par une charge non linéaire [46].

#### Principales perturbations provoquées par les harmoniques

Les harmoniques peuvent provoquer :

• L'échauffement des transformateurs, câbles, moteurs, générateurs. Il en va de même pour les condensateurs raccordés à la même alimentation que les dispositifs générateurs d'harmoniques [27].

#### Les effets d'harmoniques

Les effets qu'ils génèrent se combinent et se manifestent de manière distincte en fonction des récepteurs. On peut identifier deux catégories d'effets observables [35] :

#### 1. Les Effets Instantanés :

Altérer le bon fonctionnement de systèmes comportant des composants électroniques du fait de la distorsion en tension qu'ils occasionnent.

#### 2. Les Effets à terme :

- Échauffement des condensateurs.
- Échauffement des machines tournantes et des transformateurs.
- Échauffement des câbles.
- Augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée.

#### 3. L'impact économique :

- Le vieillissement prématuré du matériel conduit à le remplacer plus tôt, à moins de l'avoir initialement surdimensionné.
- Les surcharges du réseau obligent à augmenter la puissance souscrite, et impliquent, à moins d'un surdimensionnement des installations des pertes supplémentaires.

• Les déformations du courant provoquant des déclenchements intempestifs et l'arrêt des installations de production.

#### La décomposition des harmoniques

La décomposition harmonique sous la forme d'une somme de fonction composée (Fig II.10). D'un terme sinusoïdal à la fréquence ( $\mathbf{f}$ ) de valeur efficace (Y1). Ce terme est appelé fondamental [35].

Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à (n) fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces (Yn). Ces fréquences multiples du fondamental sont appelées harmoniques. D'une éventuelle composante continue d'amplitude (Y<sub>o</sub>).

- Inters harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.
- Infra harmoniques : Ces sont des composantes des fréquences inférieures à celle du fondamental.



Fig II.10 : Représentation spectral d'un signal périodique [35].

#### Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déforme. Le taux global de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

#### 1. Le taux de distorsion harmoniques (THD) :

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques [31,34]. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déforme. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} I_{ci}^2}}{I_{c1}}$$
(II.1)

Avec  $I_{c1}$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_{ci}$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

#### 2. Le facteur de puissance :

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P, réactive Q et déformante D. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$
 (II.2)

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec  $D = 3V\sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2}$ , où  $I_c$  est la valeur efficace du courant de la charge).

Le facteur de puissance  $F_P$  est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$
 (II.3)

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

En posant :

$$P = 3VI_{c1}cos\emptyset \tag{II.4}$$

On aura :

$$F_{P=\frac{I_{c1}}{I_c}\cos\emptyset=F_{dis}\cos\emptyset} \tag{II.5}$$

Où  $F_{dis}$  représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accentue.

Ø Représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs.

#### Les solutions pour atténuer les harmoniques

- 1. Adaptations de l'installation.
- 2. Utilisation de dispositifs particuliers dans l'alimentation.
- 3. Filtrage:
  - Le filtre passif.
  - Le filtre actif.
  - Le filtre hybride.

#### La norme IEEE-519

Cette norme établie par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) qui traite les harmoniques est communément appelée IEEE-519 ou IEEE-519-2022 (versions précédentes IEEE 519-1992 et IEEE 519-2014). Elle définit des limites d'harmoniques pour différents types de réseaux électriques, propose des méthodes de mesure et d'évaluation des impacts, ainsi que des recommandations pour réduire les harmoniques et maintenir la qualité de l'alimentation électrique. Le tableau ci-dessous est extrait de la norme IEEE-519 sur les limites de distorsion de tension, comme indiqué [36].

Tension	Distorsion individuelle de	Distorsion totale de tension	
	tension %	%	
$V \le 1 \ kV$	5	8	
$1 \text{ kV} < \text{V} \le 69 \text{ kV}$	3	5	
$69 \text{ kV} < \text{V} \le 161 \text{ kV}$	1,5	2,5	
161 kV < V	1	1,5	

Tableau II.1 : Limites de distorsion de tension selon la norme IEEE-519.

Dans notre cas (1 kV < V  $\leq$  69 kV) (Tableau II-1), l'amplitude de chaque harmonique de tension ne doit pas dépasser 3% de celle de la fondamentale, et les THD sont limitées à 5 %. Des niveaux d'harmoniques supérieurs à ces limites peuvent entraîner un mauvais fonctionnement de l'équipement. Les limites sont plus strictes (moins de 3%) pour le THD car un fonctionnement erroné peut avoir de graves conséquences [36].

## II.9 Conséquences des phénomènes perturbateurs

Parmi les principaux effets instantanés existants, en regroupés dans le tableau II-2 :

Types de perturbation	Conséquences	
Creux et coupures de tension	Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.	
Fluctuation (flicker)	Papillotement de l'éclairage.	
Harmonique	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre), diélectriques (vieillissement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes).	
Inter-harmoniques	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes.	
Surtension	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels.	
Déséquilibre	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections.	

Tableau II-2 : Principaux conséquence des phénomènes perturbateurs [35].

### **II.10** Conclusion

Les principales perturbations électriques et leurs caractéristiques ont été présentées dans ce chapitre, tel que les creux et coupures de tension, les surtensions, le flicker, le non symétrie, la variation de fréquence et les harmoniques.

Les perturbations peuvent avoir des conséquences variables selon le contexte économique et le domaine d'application, allant de l'inconfort à la mise en danger des personnes. Cela peut inclure la perte de l'outil de production, la dégradation du fonctionnement, voire la destruction totale des équipements.

Notre attention s'est portée sur les harmoniques. Nous avons exploré en détail les différentes caractéristiques de ce phénomène ainsi que leur solution pour les atténuer suivant la norme IEEE-519. Le prochain chapitre présente le réseau étudié ainsi que ses caractéristiques et composants.

# **Chapitre III**

# Description du réseau isolé étudié

### **III.1** Introduction

Ce réseau est un système électrique conçu pour connecter les villes de la région d'Adrar en Algérie. Son objectif principal est de répondre à la demande croissante en énergie dans cette zone et d'assurer une alimentation électrique plus stable.

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents paramètres de ce réseau isolé.

### III.2 Caractéristique du réseau

Ce réseau illustre efficacement l'intégration des énergies renouvelables à grande échelle dans le réseau électrique. Ceci est principalement attribuable aux installations de centrales solaires et éoliennes dans la région, complétées par plusieurs centrales électriques conventionnelles [37]. La figure III.1 offre une représentation géographique du réseau :



Fig III.1 : Carte géographique du réseau [6].

### III.3 La topologie et la configuration des réseaux électriques dans le système

La consistante électrique du système, peut se décomposer :

- Unités thermiques de production (Conventionnelle).
- Installations de production renouvelables (photovoltaïques et éolienne).
- Lignes de transport.
- Postes de transformations THT/MT.
- Les selfs de compensation.

Ce réseau assure la connexion Timimoune à Aoulef par des lignes 220 kV, et une ligne de 400 kV exploitée en 220 kV (Aoulef – In Salah).

#### III.3.1 Sources conventionnelles dans le réseau

Les centrales conventionnelles situées dans la région d'Adrar sont des centrales thermiques utilisant principalement du gaz naturel comme combustible. Dans des circonstances exceptionnelles, telles que des problèmes d'approvisionnement en gaz, du gasoil peut être utilisé pour alimenter les turbines [6]. Le tableau III.1 répertorie toutes les centrales conventionnelles en exploitation dans le réseau.

Centrale	Constructeur	Puissance (MW)	N° Groupe
ADRAR	Nouvopignone GE	25	10
	Asea stal	15	11
	John Brown	20	17
	TG mobile (PWPS)	22.891	21
TIMIMOUNE	TG mobile (PWPS)	22.891	3
	TG mobile (GE)	25	7
ZAOUIAT KOUNTA	TG mobile (PWPS)	22.891	10
	TG mobile (GE)	25	26
AIN SALEH	TG mobile (PWPS)	22.891	10
	Thomassen (GE)	24.75	11
KABERTINE	TG mobile (PWPS)	22.891	3

Tableau III.1 : Production conventionnel du réseau [37].

#### III.3.2 Sources renouvelables dans le système

Ce réseau contient 7 centrales photovoltaïques et une ferme éolienne sont installés dont les paramètres sont illustrés sur le tableau ci-dessous respectivement. La capacité de production est de 63,2 MW, soit 11% de l'énergie totale produite.

Type de centrale	Localisation de la	Surface (Hectare)	Puissance produite
	centrale		(MW)
	KABERTINE	6	3
	ADRAR	40	20
Centrale PV	ZAOUIAT KOUNTA	12	6
	REGANE	10	5
	TIMIMOUNE	18	9
	AIN SALEH	10	5
	AOULEF	10	5
Centrale éolienne	KABERTINE	33	10.2
	TOTAL (MW)		63.2

Tableau III.2 : Paramètres de centrale éolienne et centrales photovoltaïques installées [37].

A titre d'exemple, nous donnons quelques détails pour la centrale d'ADRAR [37, 38] :

- La centrale a été mise en service le 12 octobre 2015, elle est connectée à un réseau de distribution électrique de tension 30kV.
- La centrale photovoltaïque d'Adrar contient 20 Sous-champs (chaque sous-champs 1MWc : 93 Matrices, chaque matrice 44 panneaux), nombre des modules d'un Sous champs 4092(panneaux) et donc le nombre des panneaux totale 81840.
- Les panneaux photovoltaïques utilisés dans la centrale d'ADRAR sont de type polycristalline de fabrication chinoise de marque YINGLI SOLAR. Les spécifications techniques des panneaux constituant cette centrale sont données dans le tableau (III.3).

Type de module	YL245P-29b
Type de cellule	Silicium polycristallin
Classe d'application	А
Pmax(W)	245
Vmp (V)	29.6
Imp (A) 8.28	8.28
I cc (A)	37.5
Vco (V)	8.83

Tableau III.3 : Données techniques de la centrale d'Adrar [37].

A titre d'exemple, nous donnons quelques détails pour la centrale de KABERTINE [37, 38] :

 La ferme éolienne de KABERTINE, est composée de 12 aérogénérateurs de 850 kW de puissance chacune soit une puissance Totale de la Ferme de 10,2 MW. La technologie utilisée est Générateur Asynchrone à Double Alimentations (GADA).

Tableau III.4 : Production éolienne [37].

Centrale	Technologie	N° Eolienne	Tension	Puissance
			injection	installée
KABERTENE	Générateur	12	30 kV	10.2
	Asynchrone à Double			
	Alimentations (GADA)			



Fig III.2 : Implantation ferme éolienne de Kabertine [37].

# III.4 Impact de l'environnement et de la température sur la puissance des systèmes photovoltaïques dans la région désertique

Il est à noter que durant la simulation de système PV, il faut prendre en considération la différence entre la température de l'environnement et la température du module PV (Figure III.3), où cette dernière est la plus correcte pour simuler un système PV.



Fig III.3 : Variation de température du milieu et température du module PV durant une journée de production [6].

Une simulation a été faite, la première en tenant en compte la température du milieu, et l'autre en tenant en compte la température du module. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures III.4 et III.5 respectivement.



Fig III.4 : Puissances générées en considérant la température du milieu et du module PV pour Kabertine.



Fig III.5 : Puissances générées en considérant la température du milieu et du module PV pour Adrar.

Nous observons que la différence entre la puissance générée en tenant compte de la température du module est inférieure à celle obtenue en considérant la température du milieu. Cela s'explique par les caractéristiques des semi-conducteurs, qui génèrent un courant dépendant de la température du module, comme mentionné dans la relation I-1.
# **III.5** Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du réseau étudié, en mettant en lumière sa localisation géographique. Ce réseau composé de 7 nœuds qui possèdent des sources renouvelables (centrales PV et une ferme éolienne) a été détaillé en précisant les capacités de production (63,2 MW en énergies renouvelable et le reste en turbines à gaz) ainsi que les puissances de charge.

Nous avons aussi constaté, l'impact de considération de température du module et de température ambiante sur la production d'énergie PV.

Le prochain chapitre présente la simulation de ce réseau afin d'analyser l'écoulement de puissance ainsi que l'impact des sources ENR au réseau électrique.

# **Chapitre IV**

# Simulation du réseau isolé

# **IV.1 Introduction**

La simulation intervient après la phase de modélisation et précède la mise en œuvre effective. Son objectif est d'éviter les pertes de temps et d'argent en permettant d'évaluer les résultats de différentes manipulations. C'est particulièrement crucial dans le cas des réseaux électriques, où les infrastructures sont vastes et les coûts élevés.

Dans notre étude nous avons utilisé le logiciel de simulation ETAP pour simuler le réseau à cause des paramètre professionnelles que le logiciel possède facilitant plusieurs études (écoulement de puissance dans un instant précis, dans un intervalle de temps, étude des harmoniques, des protections, ...).

# IV.2 Présentation du logiciel ETAP

ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) est un logiciel d'analyse des systèmes électriques conçu et développé par des ingénieurs qui offre une solution intégrée qui regroupe différentes vues d'interface, telles que les réseaux AC et DC, les chemins de câbles, les systèmes de mise à la terre, GIS (Geographic Information system Schematics), la coordination/sélectivité des dispositifs de protection et les diagrammes de système de commande AC et DC. Cette solution permet aux ingénieurs d'avoir une vue d'ensemble complète et cohérente des différents aspects d'un système électrique, pour une meilleure efficacité et qualité d'analyse [39]. La figure IV.1 présente l'interface du logiciel ETAP.

🕈 ETA	P 19.0.1 - [OLV1 (Edit Mode)]								- o ×
/ Fi	le Edit View Project Defaults Re	vControl Library Warel	nouse Rules Real-Time	DataX Tools Window He	slp				- 8×
1 A F	1 🔲 😂 🕼 🔛 🖻 🗛 🖲		- N N N N N	2 M M M	FTAP (Default)	* Phase	· II / N	Impedance Diagram	
i ata a		0 -0 -0 0 0 00 -7							
B	ase • 10 OLV1	• 0(01	<ul> <li>Normal</li> </ul>	• • • • •	La 2: 60 00 1	NV 🔹 🕮 🛤	CT (2) 🕴 💊 🗞		
/	😌 🗲 🛦 狮	~~ Mr \_	6) ±P ±≯	👗 🛅 🤩	🏅 🕹 为	💛 🖙 🗶	🗲 🚣 🏸 N-2	2 🥔 🚺 🕺	
θ.,	System Manager 🔷 🕈 🗙								
Tia	One-Line Components								œ.
9	🗄 😑 Components 🔷	1							
8+	🖶 🔛 AC Composite CSD								00
N.A	- AC CSD Contact								00
6	III 🚞 AC CSD Contact, Mac								
6	III 🔛 AC CSD Control Cable								@ @
<b>U</b>	AC CSD Devices								0.0
	AC CSD Wires								(b)ess
	Battery								n 3
	🖶 🚞 Bus								m Ì
· · ·	🖶 🔛 Bus Duct	1							
100	🕀 🔛 Cable								00
-	E Capacitor								はは
$(\Box)$	Charger     Creatil Breaker LW								💽 🚍
$\sim$	Circuit Breaker, HV								0 Q
21	Composite CSD								2.99
+ 17	🖶 🚞 Composite, Motor								E2 E2
158	🗄 🔛 Composite, Network								120 120
200	Contactor								0,3 ***
2	- CSD Contact								+ +
	III CSD Contact, Macro-C								E.
5+1	CSD Control Cable								<b>6</b> 0
63	CSD Push Button								•••
9	🖬 🤐 CSD Wires								
-	🕀 🧰 DC Bus								
	DC Circuit Breaker								
	DC Converter								
-	III 🛄 UC Huse 🗸 🗸								
		-							
-	Distribution Components								
	Multi-Dimensional Database								×
	W Rules & Libraries	<							>
X: 1417	5 Y: 3075 (Zoom Level: 21)							-	Base

Fig IV.1 : l'interface du logiciel ETAP.

# IV.3 Modes d'étude du logiciel ETAP

ETAP propose différents modes d'étude qui peuvent être directement accessibles depuis le schéma unifilaire. Ces modes comprennent l'analyse de flux de charge, l'analyse de court-circuit, l'analyse de l'arc électrique, l'analyse de l'accélération du moteur, l'analyse harmonique, l'analyse de la stabilité transitoire, la coordination des dispositifs de protection, l'analyse de flux de charge DC, l'analyse de court-circuit DC, l'analyse de l'arc électrique DC, le dimensionnement de batteries et les calculs de décharge, l'analyse de flux de charge déséquilibré, l'analyse de flux de charge en domaine temporel, l'analyse de court-circuit déséquilibré, l'analyse de la stabilité de la tension, l'analyse de la puissance optimale, l'évaluation de la fiabilité, le placement optimal des condensateurs, l'optimisation de la commutation, l'analyse FMSR (Fault Management and Service Restoration), la gestion des séquences de commutation, l'analyse de contingence, l'alimentation électrique des chemins de fer, les systèmes étoilés, les systèmes de canalisation souterrains, les systèmes de grille de mise à la terre et les systèmes de tirage de câbles. La figure ci-dessous présente l'interface Mode d'étude.



Fig IV.2 : Modes d'étude de simulation ETAP.

### IV.4 Simulation de système sous environnement ETAP

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les paramètres de réseau. Vu que nous avons trouvé le logiciel ETAP utile et efficace pour simuler notre système (Figure IV.3). Deux modes d'analyses seront utilisés : Load Flow (pour l'étude d'écoulement de puissances) et Harmonic Analysis (Pour étudier l'impact des harmoniques sur le réseau). La figure ci-dessous illustre le schéma du réseau implanté sous environnement ETAP.

La section des câbles utilisée par SONELGAZ dans les réseaux de transport de 220 et 400 kV est de 570  $mm^2$ . Ces câbles sont en ALMELEC. Nous avons utilisé un câble dans la bibliothèque de ETAP de section proche à celle utilisée par SONELGAZ.



Fig IV.3 : Schéma du réseau implanté sous environnement ETAP.

### IV.5 Etude d'écoulement de puissance dans le système

L'étude de l'écoulement de puissance (Load Flow) est une étape impérative de toute analyse sérieuse d'un réseau électrique. L'étude d'écoulement de puissance est une analyse du réseau électrique en régime permanent. Cette étude implique de déterminer, dans un premier temps, pour chaque jeu de barres, l'amplitude et la phase de la tension, ainsi que les puissances active et réactive injectées. En utilisant ces données, telles que les tensions (amplitude et phase) aux jeux de barres et les puissances injectées (active et réactive), nous pouvons ensuite calculer les courants et les puissances dans les lignes, ainsi que ceux fournis par les sources [40].

## IV.5.1 Écoulement de puissance en régime nominal

Les résultats de l'écoulement de puissance (Load Flow) sont présentés sur la Figure IV.4 ainsi que dans le Tableau IV.1 établit par le logiciel ETAP contenant les tensions dans les nœuds, les puissances générées dans chaque nœud, les puissances des charges, ainsi que les puissances et les courants circulant dans chaque ligne. Le logiciel utilise l'algorithme de Newton-Raphson adaptatif pour calculer l'écoulement de puissance.



Fig IV.4 : Simulation du réseau dans le mode Load flow.

Pour plus de détails, ETAP établit un rapport qui présente les tensions dans les nœuds, les puissances générées dans chaque nœud, les puissances de charges et l'écoulement de puissance entre les nœuds. Ce rapport est présenté dans le Tableau IV.1 :

Tableau IV.1 : Rapport de simulation Load Flow pour le système étudié.

BUS		Tension		Généi	ration	Cha	rge	Ecoulem	ient de puiss	ance
	kV	Amp	Ang	MW	MVAR	MW	MVAR	BUS	MM	MVAR
ADE Ain Saleh	220	99.76	-0.3	0	0	9.554	7.166	Ain Saleh	-9.554	-7.166
Adrar	220	101	6	84.304	16.722	27.840	15.064	Zaouite k	23.562	-9.598
								Kabertine	-1.454	-13.311
								Adrar CM	52.389	29.183
Adrar CM	220	100.641	1.7	0	0	52.334	30.358	Adrar	-52.334	-30.358
Ain Saleh	220	100	0	53.646	1.521	41.418	22.434	Aoulef	7.100	-18.268
								ADE	9.564	-2.885
Aoulef	220	100.597	-0.4	0	0	18.783	10.169	Ain Saleh	-7.090	-2.853
								Regane	-7.270	-7.558
Kabertine	220	101.5	2	12.904	2.063	13.579	7.355	Adrar	1.462	4.349
								Timimoune	0.514	-9.761
Regane	220	100.629	0.1	0	0	27.725	15.010	Aoulef	7.279	-9.351
								Zaouite k	-30.588	5.899
Timimoune	220	101	$\mathcal{Q}$	21.444	0.067	29.767	15.505	Kabertine	-0.511	-15.855
Zaouite	220	101	1	32.725	12.791	30.888	16.730	Adrar	-23.494	-1.848
Kounta								Regane	30.649	-2.382

Outre que l'écoulement de puissance dans les lignes, les puissances générées par centrales PV sont présentées dans le Tableau I dans le tableau ci-dessous :

Centrale PV	Puissance active générée (MW)
Adrar	18.1
Timimoune	7.84
Zaouite Kounta	5.34
Kabertine	2.66
Regane	4.46
Ain Saleh	4.46
Aoulef	4.44

Tableau IV.2 : Les puissances générées par les centrales PV

Nous remarquons dans cette simulation que lorsque le réseau fonctionne à régime complet, toutes les tensions des nœuds restent dans les limites acceptables (+/- 10%). Cependant, les postes tels qu'Adrar, Ain Saleh, Kabertine, Timimoune et Zaouite Kounta montrent des niveaux significatifs de génération, tandis que des postes comme Adrar CM, Ain Saleh, Adrar et Timimoune présentent des charges notables. L'écoulement de puissance entre les nœuds révèlent les échanges d'énergie critiques pour la stabilité du réseau. Cette analyse est essentielle pour comprendre les dynamiques du réseau électrique et planifier des améliorations pour une distribution énergétique optimisée.

### IV.6 Impact des harmoniques sur le réseau

Les harmoniques électriques, qui sont des distorsions de la forme d'onde de tension ou de courant électrique, ont plusieurs impacts négatifs sur le réseau électrique et les équipements connectés. Elles entraînent une surchauffe des transformateurs et des moteurs, ce qui réduit leur durée de vie et leur efficacité. Les harmoniques peuvent provoquer des surtensions et des sous-tensions, dégradant la qualité de l'alimentation électrique et perturbant les équipements sensibles. Elles augmentent les courants circulant dans les conducteurs, causant des surcharges et des pertes supplémentaires dans les lignes de transmission. Les dispositifs de protection peuvent être compromis, affectant la sécurité du réseau. De plus, les harmoniques peuvent induire des résonances, amplifiant certaines fréquences et potentiellement endommageant gravement les équipements. La notion d'harmonique est issue du développement mathématique en série de Fourier comme suit :

On détermine les coefficients de Fourier d'un signal périodique f par [42] :

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \qquad (\text{IV. 1})$$

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(n\theta) \, d\theta \quad , \qquad B_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(n\theta) \, d\theta \qquad (\text{IV. 2})$$

$$D'ou \ le \ signal : f(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)]$$
(IV.3)

$$ou: f(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \sqrt{2} \sin(n\theta - \phi_n)$$
(IV. 4)

On désigne par :

- *n*: le rang harmonique.
- $\theta$ : angle électrique.
- $A_0$ : amplitude de la composante continue.
- $A_n$ : amplitude de la composante harmonique de rang n.
- $\phi_n$ : déphasage relatif du fondamental de la composante harmonique de rang n.

#### IV.6.1 Méthodes d'analyse harmonique sous environnement ETAP

L'analyse harmonique des systèmes électriques implique de modéliser les caractéristiques fréquentielles des différents composants des systèmes électriques, de calculer des indices harmoniques aux jeux de barres et aux branches donnés, d'identifier les problèmes associés aux harmoniques existantes, et de fournir un environnement pour simuler et tester des méthodes de migration éventuelles. Cette section aborde brièvement ces sujets et nous prépare à utiliser le module d'analyse harmonique ETAP pour mener à bien nos projets ou analyser nos systèmes de la manière la plus efficace possible [41].

Le module d'analyse harmonique ETAP est entièrement conforme à la version de la norme IEEE-519 où la version appliquée est IEEE-519-2014, cette norme détaille les pratiques recommandées et les exigences concernant le contrôle des harmoniques dans les systèmes d'alimentation électrique.

#### IV.6.2 Détermination des harmoniques dans le réseau

Dans la présente partie, nous simulons le réseau en considérant les paramètres nominaux des charges, des sources et des paramètres de la ligne. Nous allons étudier les harmoniques de ce réseau dans les différents nœuds en utilisant l'outil « Harmonic analysis ».

Les centrales PV pour notre réseau sont connectées au réseau MT de tension nominale 30 kV. Les résultats illustrant le THD ainsi que l'amplitude de l'harmonique de tension dans chaque nœud étudié sont présentés sur la figure IV.5. La totalité des résultats est englobée dans le tableau suivant.



Fig IV.5 : Simulation de réseau actuel sans filtrage.

BUS		
ID	kV	THD (%)
Adrar	30	7.70
Aoulef	30	6.72
Ain Saleh	30	6.64
Kabertine	30	7.03
Regane	30	7.61
Timimoune	30	5.55
Zaouite K	30	7.54

Tableau IV.3 : THD des tensions dans le niveau de tension 30 kV reportées par ETAP.

Le rapport établi par la simulation de ETAP montre un THD de tension importante au niveau de tension 30 kV dans tous les nœuds (Adrar, Aoulef, Ain Saleh, Kabertine, Regane, Timimoune, Zaouite Kounta) avec un taux de distorsion harmonique (THD) varie entre 7,70 % et 5,55%. Il est notable que la région d'Adrar possède le THD le plus élevé par rapport aux autres régions. Ceci peut être justifié par sa capacité de production PV élevée (20 MW) dont l'amplitude des courants harmoniques sera plus élevée par rapport aux autres nœuds. Ces courants harmoniques vont créer des chutes de tensions harmoniques engendrant des déformations au niveau de la tension du réseau. Le spectre harmonique des tensions au niveau de 30 kV est illustré sur la figure IV.6. Les courbes des tensions déformées pour chaque nœud seront présentés respectivement sur les figures IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, IV.12 et IV.13.



Fig IV.6 : Spectre d'harmonique de système sans filtrage.



Fig IV.7 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig IV.8 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Aoulef sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig IV.9 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Ain Saleh sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig IV.10 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Regane sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig IV.11 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Timimoune sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig IV.12 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Kabertine sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig IV.13 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Zaouite Kounta sans filtrage : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

BUS	ORDRE	FREQ	Mag	ORDRE	FREQ	Mag
		(Hz)	(%)		(Hz)	(%)
KABERTINE	47	2350	5	49	2450	4.94
ZAOUITE KOUNTA	47	2350	5.38	49	2450	5.28
TIMIMOUNE	47	2350	3.97	49	2450	3.88
REGANE	47	2350	5.43	49	2450	5.33
AIN SALEH	47	2350	4.74	49	2450	4.65
AOULEF	47	2350	4.79	49	2450	4.71
ADRAR	47	2350	5.54	49	2450	5.36

Tableau IV.4 : Amplitude des harmoniques.

Les formes d'ondes et les spectres harmoniques présentées illustrent une déformation similaire dans tous les nœuds, cela peut être justifié par la présence de deux harmoniques seulement de fréquences 2350Hz et 2450Hz (d'ordres 47<sup>e</sup> et 49<sup>e</sup> respectivement) surtout au niveau d'Adrar, Regane et Zaouite Kounta ce qu'a été confirmé par les valeurs de THD et les amplitudes (Mag) affichées dans les tableaux précédents. Ces harmoniques indiquent la présence d'équipements non linéaires connectés au réseau, générant des distorsions et perturbant la qualité de l'énergie électrique surtout pour les critères de norme IEEE 519 qui exigent un THD ne dépasse pas 5% dans un réseau de 30 kV.

Ces harmoniques peuvent créer des problèmes supplémentaires comme la perturbation de stabilité de réseau qui réduit la fiabilité de ce dernier. Ces observations soulignent la nécessité d'une étude pour résoudre ce problème. Pour notre logiciel, la seule mesure correctives pour le problème d'harmoniques est l'installation de filtres harmoniques passifs.

## **IV.7** Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé une simulation du réseau étudié sous environnement ETAP pour étudier l'écoulement de puissance et l'impact des harmoniques sur le réseau actuel.

Nous avons accordé une attention particulière à l'impact des harmoniques sur le réseau, et nous allons poursuivre cette étude en recherchant une solution appropriée qui répondra aux besoins de notre réseau. Dans le prochain chapitre, nous explorerons l'amélioration de la simulation du réseau en intégrant l'utilisation de filtres.

# **Chapitre V**

# Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

## V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler le réseau sous l'environnement ETAP en utilisant des filtres afin d'améliorer la qualité d'énergie de réseau.

Pour continuer dans ce contexte, nous avons aussi étudié d'abord le filtrage des harmoniques générées par les systèmes PV. En vue de plan de développement de réseau dans le cadre de programme national des ENR, nous avons étudié l'impact d'augmentation de l'énergie PV dans chaque nœud sur la qualité d'énergie électrique et le comportement du réseau.

### V.2 Correction de THD dans le réseau étudié

Un filtre harmonique est conçu pour éliminer toute harmonique présent dans le réseau pour garder uniquement la composante fondamentale. Il existe deux types de filtres : le filtrage actif et le filtrage passif. Pour notre cas nous nous limitons au filtre passif seulement.

### V.2.1 Filtrage passif

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire, car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser.

ETAP propose actuellement six des filtres les plus populaires utilisés dans l'industrie électrique. Un programme de dimensionnement de filtre est également disponible dans l'éditeur harmonique pour le type de filtre "Single Tuned", avec lequel les utilisateurs peuvent optimiser les paramètres du filtre en fonction de différents critères d'installation ou d'exploitation [43].

Les filtres disponibles dans ETAP sont les suivants :

- By-Pass Filter.
- High-Pass Filter (Damped).
- High-Pass (Undamped).
- Single Tuned Filter.
- 3 rd Order damped Filter.
- 3 rd Order C-Type Filter.

Harmonic Filter Editor - HF5   ×					
fo Parameter Reliability R	emarks Comment				
Filter Type	Capacitor C 1		Inductor L 1		
Single-Tuned V	kvar 0	1-Ph	× <sub>L1</sub> 0		
	μF 0	1-Ph	Q Factor 0		
	Rated kV 0	7	Max. I 0		
<sup>−</sup> <sup>c</sup> 1	Max. kV 0				
3 L1	Capacitor C 2		Inductor L 2		
R	kvar 0	1-Ph	x <sub>L2</sub> 0		
	μ <b>F</b> 0	1-Ph	Q Factor 0		
	Rated kV 0		Max. I 0		
Single-Tuned	Max. kV 0				
Loading					
Operating Load:		_	Size Filter		
kW 0 +j kvar	0 R 0				
🖹 🛍 🔽 🔇 HF5		~ >	M ? OK Cand		

Fig V.1: Éditeur de filtre harmonique sous environnement ETAP.



Fig V.2 : Les différents types de filtre passif sur ETAP.

# V.2.2 Simulation de réseau en présence des filtres passifs

Cette fois-ci, nous allons simuler l'application du filtrage passif dans le réseau avec présence des énergies renouvelables. Les filtres installés sont illustrés la figure suivante.



Fig V.3 : Simulation de réseau avec filtrage.

Tableau V.1 : THD obtenu	par ETAP au	niveau de	tension 30 !	kV avec filtres	passifs.
--------------------------	-------------	-----------	--------------	-----------------	----------

BUS		
ID	kV	THD (%)
Adrar	30	0
Aoulef	30	0
Ain Saleh	30	0.02
Kabertine	30	0.01
Regane	30	0.01
Timimoune	30	0
Zaouite K	30	0

Nous observons que l'utilisation de filtres passifs a réduit significativement les THD au niveau des postes de 30 kV (Adrar, Aoulef, Ain Saleh, Kabertine, Regane, Timimoune, Zaouite Kounta), où un THD nul est obtenu dans la majorité des nœuds. Le cas actuel montre que la tension dans le réseau étudié respecte effectivement les limites prescrites par la norme IEEE 519.

Pour une meilleure illustration des effets du filtrage appliqué dans le réseau, les courbes et les spectres correspondants pour chaque nœud seront présentés sur les figures V.4 à V.10 :



Fig V.4 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.5 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Aoulef avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig V.6 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Ain Saleh avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.7: Résultats obtenues au niveau du nœud de Kabertine avec filtre : (a) Forme d'onde, (b)



Fig V.8 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Regane avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.9 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Zaouite Kounta avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig V.10 : Résultats obtenues au niveau du nœud de Timimoune avec filtre : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

Les tensions illustrées sur les figures V.4 à V.10 révèle des ajustements significatifs dans la forme d'onde, où les déformations précédemment observées (tel que les crêtes irrégulières) ont été considérablement atténuées.

Dans le spectre harmonique, les amplitudes des harmoniques ont été efficacement filtrées pour respecter les limites spécifiées par la norme IEEE 519, garantissant ainsi un fonctionnement du système électrique en conformité avec les critères de qualité de l'énergie électrique.

Ces résultats montrent l'efficacité du filtre passif dans le contrôle des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau.

## V.3 L'impact d'augmentation de l'énergie produite par les sources PV

Le programme national d'intégration des énergies renouvelables vise à renforcer le réseau sud avec une production électrique de 1000 MW par les ENR.

Dans la partie précédente, nous avons étudié l'impact des centrales PV actuellement installées sur le THD. Donc nous simulons l'impact d'augmentation de la puissance PV produite dans le réseau isolé.

Comme l'installation d'une centrale PV n'est un projet facile et qui dure une période considérable, nous allons étudier une augmentation progressive de de 10 MW jusqu'à atteindre 50 MW dans chaque nœud du réseau.

Il est à noter que chaque augmentation de puissance sera accompagnée d'un renforcement de la capacité des transformateurs de chaque nœud. Cette étude sera réalisée d'abord sans filtrage et avec filtrage, selon les paramètres de travail précédemment établis. L'analyse se concentrera sur le THD avant et après l'ajout des filtres, afin de vérifier l'efficacité de filtrage utilisé précédemment et de déterminer la nécessité d'une adaptation pour répondre aux besoins futurs du réseau.

#### V.3.1 Impact d'augmentation de production PV par 10 MW

La simulation d'augmentation de production par 10 MW est affiché sur la figure V.11. La simulation avec implantation des filtres passifs est affichée sur la figure V.12. Il est à noter que pour ce cas que la puissance PV générée dans ce cas est devenue 123 MW (53 actuellement installée et 70 MW prévue).

Comme pour le cas précédent, nous nous limitons aux harmoniques présents dans le réseau 30 kV où les THD avant et après filtrage sont affichés dans le tableau suivant.



Fig V.11 : Simulation de réseau sans filtrage avec des centrales de 10MW.



Fig V.12 : Simulation de réseau avec filtrage avec des centrales de 10MW.

BUS	THD (%) Sans Filtre	THD (%) Avec Filtre
Adrar	6.5	0
Aoulef	6.35	0
Ain Saleh	6.91	0.05
Kabertine	6.06	0.01
Regane	3.87	0
Timimoune	6.46	0
Zaouite K	4.19	0

Tableau V.2 : THD obtenu par ETAP avec des centrales de 10MW.

A titre d'exemple, pour mieux montrer l'impact de filtre choisi et dimensionné en cas d'augmentation de puissance par 10 MW, la tension avant et après filtrage dans le nœud de Adrar est illustrée sur la figure V.13, et les spectres harmoniques sont affichés sur la figure V.14.



Fig V.13 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 10MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig V.14 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 10MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

Nous observons que nos filtres qui ont été dimensionnés sont efficaces pour réduire le THD même avec une augmentation qui dépasse 100% de la puissance PV installée.

Maintenant nous simulons le même réseau avec une augmentation de 20 MW dans chaque nœud, où la puissance PV injectée devient 193 MW.

Le THD avant et après filtrage est affiché dans le Tableau suivant. Les tensions ainsi que les spectres harmoniques sont affichées sur le figures suivantes.

BUS	THD (%) Sans Filtre	THD (%) Avec Filtre
Adrar	6.73	0.05
Aoulef	5.40	0.05
Ain Saleh	6.81	0.13
Kabertine	5.85	0.07
Regane	2.32	0
Timimoune	6.35	0.07
Zaouite K	4.22	0.08

Tableau V.3: THD obtenu par ETAP avec des centrales de 20MW.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.15 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 20MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig V.16 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 20MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

Nous observons que les filtres choisis sont efficaces même avec une augmentation de puissance de 140 MW.

Nous continuons l'augmentation de 10 MW dans chaque nœud, Nous affichons le THD, la forme d'onde de tension et les spectres harmoniques sur le tableau et les figures ci-dessous.

BUS	THD (%) Sans Filtre	THD (%) Avec Filtre
Adrar	6.99	0.07
Aoulef	4.70	0.02
Ain Saleh	6.96	0.22
Kabertine	5.94	0.13
Regane	1.41	0
Timimoune	6.51	0.13
Zaouite K	2.83	0.12

Tableau V.4 : THD obtenu par ETAP avec des centrales de 30MW.



Fig V.17 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 30MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.18 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 30MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

Nous observons que les filtres choisis sont efficaces même avec une augmentation de puissance de 210 MW.

Nous poursuivons l'incrément de 10 MW dans chaque nœud, et nous présentons les résultats concernant le THD, la forme d'onde de tension, ainsi que les spectres harmoniques dans le tableau et les figures ci-dessous.

BUS	THD (%) Sans Filtre	THD (%) Avec Filtre
Adrar	6.19	0.1
Aoulef	3.78	0.08
Ain Saleh	6.98	0.39
Kabertine	5.96	0.24
Regane	1.26	0
Timimoune	6.51	0.22
Zaouite K	2.98	0.19

Tableau V.5: THD obtenu par ETAP avec des centrales de 40MW.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.19 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 40MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Fig V.20 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 40MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

Nous constatons que les filtres sélectionnés demeurent efficaces même lors d'une augmentation de puissance de 280 MW.

Nous augmentons l'incrément de 10 MW dans chaque nœud, et présentons les résultats de THD, la forme d'onde de tension, ainsi qu'aux spectres harmoniques dans le tableau et les figures suivants.

BUS	THD (%) Sans Filtre	THD (%) Avec Filtre
Adrar	5.06	0.17
Aoulef	0.57	0.10
Ain Saleh	6.79	0.71
Kabertine	5.84	0.43
Regane	0.80	0.05
Timimoune	6.27	0.39
Zaouite K	2.73	0.30

Tableau V.6 : THD obtenu par ETAP avec des centrales de 50MW.



Fig V.21 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar sans filtre pour 50MW : (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.22 : Résultats obtenues au niveau du nœud d'Adrar avec filtre pour 50MW: (a) Forme d'onde, (b) spectre harmonique.

Nous observons que les filtres choisis conservent leur efficacité même dans le cas d'augmentation de puissance de 350 MW.

Pour une capacité d'énergie PV injectée dans le réseau de 123 MW, 193 MW, 263 MW, 333 MW et 403 MW, nous observons une variation du THD dans la plage de 3.87 et 6.91 %, 2.32 et 6.81 %, 1.41 et 6.99 %, 1.26 et 6.98 %, 0.8 et 6.79 % respectivement.

Il est important de noter quand dans le cas actuel le nœud le plus perturbé était Adrar où les THD étaient remarquables, mais avec l'augmentation de 10 MW dans chaque nœud, les puissances sont devenues proches, alors le nœud de Ain Saleh est devenu le plus perturbé, comparativement à Adrar qui a une puissance élevée par rapport aux autres nœuds ce qui confirme la non-linéarité du réseau avec l'augmentation de la puissance PV injectée.

Cependant, l'utilisation de filtres a considérablement réduit le THD dans les limites définies par la norme IEEE-519, suggérant leur efficacité pour atténuer la distorsion harmonique et maintenir la qualité du réseau. Pour illustrer cette efficacité, nous prenons l'exemple des figures d'Adrar audessous dans chaque cas d'élévation de puissance.

### V.4 Impédance d'harmonique

La généralisation de la loi d'Ohm de u = Ri vers u = Zi a permis d'étudier l'impédance présentée par circuit quelconque en impliquant le paramètre de la fréquence.

Pour le cas des harmoniques, où la fréquence est le paramètre de caractérisation, nous pouvons définir en tout point d'un réseau une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend de la fréquence du rang harmonique h considéré. Les courants harmoniques émis par une charge non linéaire se propagent entre les différentes branches connectées au nœud d'injection, où chaque branche est considérée comme une impédance différente [47].

En résultat, le produit des courants harmoniques provenant de ces charges non linéaires par l'impédance harmonique du réseau dans le point d'étude crée des tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h I_h \tag{V.1}$$

Ces tensions peuvent être supérieures à la tension de fonctionnement, et donc peuvent provoquer le risque de créer des surtensions dans le réseau surtout en cas de résonance. Pour cela, il faut étudier l'impédance harmonique, et vérifier laquelle des harmoniques qui possède un pic d'impédance et voir s'il y a des harmoniques générées de fréquences proches à celles des pics d'impédance.

#### V.4.1 Etude d'impédance d'harmonique

Vu que notre réseau isolé possède des composants non linéaires, nous allons étudier l'impédance harmonique de ce réseau dans les différents nœuds en utilisant l'outil « Harmonic analysis-Frequency Scan ».

Cela nous permet de visualiser l'évolution des impédances en fonction de la fréquence d'harmonique et de la comparer entre les nœuds avant et après l'emplacement des filtres harmoniques. Les impédances en fonction d'ordre harmonique dans les nœuds Adrar, Aoulef, In Salah, Kabertine, Regane, Timimoune et Zaouite Kounta sont présentés sur les figures V.23, V.24, V.25, V.26, V.27, V.28 et V.29 respectivement avec et sans filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.23 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau du nœud Adrar : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.24 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau d'Aoulef : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.25 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau d'Ain Saleh : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.26 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Kabertine : : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.27 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Regane : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.28 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Timimoune : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.


Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.29 : Amplitude d'impédance de réseau actuel au niveau de Zaouite Kounta : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.

Nous observons pour les cas de réseau sans filtre, l'évolution de l'impédance est linéaire, et que l'amplitude augmente avec l'augmentation de fréquence. Cette évolution linéaire peut être justifiée par la relation proportionnelle entre la valeur de l'impédance et la fréquence où le réseau est de caractère inductif prédominant.

Pour le cas dans la présence des filtres passifs, on remarque une présence des pics d'impédance de 240  $\Omega$  jusqu'à 480  $\Omega$  dans l'intervalle de 6<sup>e</sup> à 8<sup>e</sup> ordre. Cette élévation est suivie d'une diminution brève jusqu'à atteindre une valeur nulle dans l'intervalle de 41<sup>e</sup> à 51<sup>e</sup> d'ordre harmonique. Cela peut confirmer l'efficacité des filtres installés pour la 47<sup>e</sup> et 49<sup>e</sup> harmoniques générés par les récepteurs non linéaires, mais aussi le risque d'avoir une surtension en cas de présence d'harmoniques entre 5<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> ordres.

Nous continuons notre simulation suivie par l'augmentation de 10 MW dans chaque nœud. Les figures présentées ci-dessous illustrent les résultats obtenus.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.30 : Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.31 : Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.32 : Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.33 : Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.34 : Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.35 : Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



#### Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.36 : Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 10MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.

Les figures V.30 à V.36 illustrent l'amplitude d'impédance de réseau en fonction de l'ordre harmonique. Dans l'absence de filtres passifs, on constate une augmentation quasiment linéaire de l'impédance à chaque ordre harmonique ce qui montre le comportement inductif de chaque impédance.

La présence des filtres passifs a entraîné des pics significatifs d'impédance, allant de 75  $\Omega$  à 250  $\Omega$ , sont observés dans la plage du 6<sup>e</sup> au 17<sup>e</sup> ordre harmonique. Cette augmentation est suivie d'une brève diminution jusqu'à une valeur nulle entre le 46<sup>e</sup> et le 51<sup>e</sup> ordre harmonique. Cela peut corrobore l'efficacité des filtres installés pour la 47<sup>e</sup> et 49<sup>e</sup> harmonique.

Poursuivant notre simulation, nous avons augmenté l'injection de puissance de 10 à 20 MW dans chaque nœud. Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.37 : Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.38 : Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.39 : Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.40 : Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.41 : Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.42 : Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.43 : Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 20MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.

Les figures V.37 à V.43 illustrent l'amplitude d'impédance de réseau en fonction de l'ordre harmonique. En l'absence de filtres passifs le comportement de l'impédance du réseau est inductif, mais il faut noter que quelques déformations commencent à apparaître avec des harmoniques de faibles ordres, où ces déformations sont dues aux variations de l'impédance du réseau avec la variation de l'impédance des transformateurs liant les centrales PV avec le réseau.

Dans le cas de présence des filtres, des pics significatifs d'impédance allant de 70  $\Omega$  à 240  $\Omega$  sont observés dans la plage du 16<sup>e</sup> au 21<sup>e</sup> ordre harmonique dans la plupart des nœuds. Le cas particulier de Kabertine et Aoulef présente une nette augmentation d'impédance en présence des filtres. Cette augmentation est reliée à l'accroissement de la puissance PV dans ces nœuds et par conséquence le changement des impédances des transformateurs. Suivant cette montée, une diminution rapide de l'impédance est observée, atteignant une valeur nulle entre le 46<sup>e</sup> et le 51<sup>e</sup> ordre harmonique. Cela peut corrobore l'efficacité des filtres installés pour atténuer spécifiquement la 47<sup>e</sup> et 49<sup>e</sup> harmonique.

Poursuivant notre simulation, nous avons augmenté l'injection de puissance de 20 à 30 MW dans chaque nœud. Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.44 : Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.45 : Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.46 : Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.47 : Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.48 : Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.49 : Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.50 : Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 30MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.

Les figures V.44 à V.50 illustrent l'amplitude d'impédance de réseau en fonction de l'ordre harmonique. On observe une augmentation progressive de l'impédance avec chaque ordre harmonique, en l'absence de filtres passifs. A Kabertine, l'impédance atteint 100  $\Omega$ , tandis qu'à Adrar elle s'élève à 70  $\Omega$ . Ces valeurs confirment la relation de proportionnalité observée précédemment entre l'impédance et la puissance.

Des pics d'impédance importants, allant de 140  $\Omega$  à 70  $\Omega$ , sont observés dans la plage de 16 à 31<sup>e</sup> harmoniques pour la plupart des nœuds, en présence des filtres. Le cas de particularité de Kabertine et Aoulef reste le même comme mentionner précédemment. À la suite de cette montée, une baisse rapide de l'impédance est observée, atteignant une valeur nulle entre le 46<sup>e</sup> et le 51<sup>e</sup> ordre harmonique. Ceci suggère l'efficacité des filtres en place pour spécifiquement atténuer les 47<sup>e</sup> et 49<sup>e</sup> harmoniques.

En comparant les valeurs d'impédance obtenues avec les valeurs précédentes, on remarque une tendance inverse : plus la puissance augmente, plus la valeur d'impédance diminue. Poursuivant notre simulation, nous avons augmenté l'injection de puissance de 30 à 40 MW dans chaque nœud. Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus.



Fig V.51 : Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.52 : Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.53 : Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.54 : Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.55 : Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.56 : Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.57: Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 40MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.

Les figures V.51 à V.57 montrent que les déformations deviennent de plus en plus considérables dans le cas sans filtre, mais le caractère inductif est pondérant sur l'impédance du réseau.

Des pics d'impédance importants de fréquences distinguées allant de 75  $\Omega$  à 40  $\Omega$ . Mais il est à noter que cette fois ci la plage de présence de ces pics est augmentée (21<sup>e</sup> à 41<sup>e</sup> harmoniques).

Poursuivant notre simulation, nous avons augmenté l'injection de puissance des centrales PV à 50 MW dans chaque nœud. Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.58 : Amplitude d'impédance au niveau d'Adrar pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.59 : Amplitude d'impédance au niveau d'Aoulef pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.60 : Amplitude d'impédance au niveau d'Ain Saleh pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.61 : Amplitude d'impédance au niveau de Kabertine pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Chapitre V : Comportement du réseau avec l'intégration du filtre passif

Fig V.62 : Amplitude d'impédance au niveau de Regane pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.63 : Amplitude d'impédance au niveau de Timimoune pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.



Fig V.64 : Amplitude d'impédance au niveau de Zaouite Kounta pour 50MW : (a) Impédance sans filtre et (b) Impédance avec filtre.

Les figures V.58 à V.64 montrent que les pics apparaissant dans l'impédance harmonique commencent à être significatifs, et que la dominance inductive n'est présente que pour les hautes fréquences. Pour les faibles fréquences, les impédances des transformateurs ainsi que les capacitances des lignes provoquent des pics de résonance dans les faibles fréquences.

Lors de branchement des filtres, des pics d'impédance importants (deux et des fois trois pics) allant de 38  $\Omega$  à 40  $\Omega$  sont observés dans la plage de 21<sup>e</sup> à 41<sup>e</sup> harmoniques pour la plupart des nœuds.

#### Discussion

Nous observons que l'augmentation de la puissance PV produite qui oblige à un changement de l'impédance de transformateur provoque l'apparition des pics de résonance, et ces pics deviennent considérables avec l'augmentation de la puissance PV et lors de présence des filtres passifs. Et avec l'augmentation de la puissance, l'ordre correspondant à ces pics d'harmoniques de plus en plus élevé. Il est à noter que l'impédance reste toujours négligeable pour les harmoniques d'ordres 47 et 49 générées par les onduleurs de la centrale PV.

### V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'amélioration de la qualité d'énergie du réseau actuel et du réseau injecté par des sources PV de 10 à 50 MW, en comparant leurs performances en l'absence et en présence de filtres au niveau de 30 kV. Nous avons proposé l'utilisation d'un filtre passif pour résoudre les problèmes d'harmoniques dans les deux cas. Les simulations ont montré que le filtre utilisé a efficacement éliminé les harmoniques, réduit le THD et amélioré la forme d'onde.

Pour vérifier l'absence d'impacts négatifs sur le réseau, une analyse de la variation de l'impédance harmonique a été réalisée. Cette analyse a révélé un comportement linéaire du réseau actuel, confirmant la relation entre l'impédance et la fréquence, avec un caractère inductif. Les filtres se sont avérés efficaces pour cibler les harmoniques de  $47^{e}$  et  $49^{e}$  ordres, mais peuvent également entraîner un risque de surtension en présence d'harmoniques de faible ordre.

Nous avons également observé que des pics de résonance commencent à apparaître avec l'augmentation de la puissance PV dans le système, provoquant une modification de l'impédance du transformateur. Ces pics deviennent considérables avec l'augmentation de la puissance PV en présence des filtres.

# **Conclusion Générale**

La qualité de l'énergie électrique dans les réseaux est essentielle pour le bon fonctionnement des équipements électriques, primordial, surtout dans les zones rurales ou éloignées. Dans le cas de réseau indépendant du réseau national, utilisant diverses sources telles que des turbines à gaz, des centrales solaires et des éoliennes, l'étude de ce paramètre est indispensable. La stabilité de la tension et de la fréquence, ainsi que la gestion des fluctuations et des harmoniques, sont des facteurs clés. Maintenir une bonne qualité d'énergie, malgré les ressources limitées, est vital pour éviter les pannes et assurer l'efficacité et la durabilité de l'alimentation électrique.

Dans le cas de notre réseau étudié, l'intégration de sources renouvelables a été faite avec de grandes puissances, tirant parti du gisement solaire et éolien. Actuellement, il est alimenté par des centrales photovoltaïques de 53 MW et une ferme éolienne de 10 MW réparties sur tous les nœuds, tandis que les centrales conventionnelles sont limitées à quelques nœuds. Ce système offre une opportunité idéale pour étudier l'impact des énergies renouvelables sur la qualité de l'énergie dans un réseau électrique. Il est à noter que notre étude se concentre spécifiquement sur la qualité de l'énergie au niveau MT de 30 kV.

Dans ce mémoire nous avons étudié et simulé le réseau en focalisant sur les ENR et leur impact sur le réseau MT, pour la simulation, nous avons choisi de simuler notre système sous environnement ETAP.

La première étape était de présenter un aperçu sur les modes de la production d'énergie électrique : par énergies conventionnelles ou par énergies renouvelables. Nous nous sommes intéressés sur l'énergie éolienne et l'énergie solaire en détaillant ses différents types de ces technologies ainsi que leurs domaines d'application.

Ensuite, nous avons abordé les perturbations électriques et leurs différentes caractéristiques, lesquelles peuvent engendrer divers impacts selon le contexte économique et le domaine d'application. Une attention particulière a été portée sur les harmoniques, en détaillant leurs caractéristiques et les solutions pour les atténuer suivant la norme IEEE-519.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une description générale du réseau étudié : il s'agit d'un réseau caractérisé par son mix énergétique avec les énergies renouvelables ( solaire PV et éolienne), une étude a été faite à propos l'impact de la température du module et de la température ambiante sur la production d'énergie photovoltaïque.

# **Conclusion générale**

Premièrement - après avoir introduit notre réseau dans le logiciel ETAP - nous avons simulé le flux de puissance (Load Flow) du réseau actuel, la simulation a montré que notre réseau est exploitable car toutes les tensions des nœuds sont dans les limites admissibles. Dans une deuxième étape, nous avons analysé les harmoniques (en utilisant l'outil Harmonic analysis) générés dans le réseau actuel. La simulation montre un THD important qui dépasse 7% dans certains nœuds portant que les harmoniques générés sont d'un ordre élevé.

Pour corriger ce problème, des filtres ont été dimensionnés et installées sur le réseau existant qui ont participé à la réduction du THD pour le remettre dans les limites tolérables. L'augmentation de la puissance photovoltaïque injectée dans le réseau a été étudiée. Selon les résultats obtenus, le filtre utilisé a réussi à éliminer les harmoniques et à réduire le THD dans le cas actuel et avec l'augmentation de la puissance produite. Pour assurer que le réseau n'a pas eu d'impacts négatifs, une analyse de la variation de l'impédance harmonique a été faite, et les résultats ont montré que :

- Cas de réseau actuel : un comportement linéaire a été observé justifié par la relation proportionnelle entre la valeur de l'impédance et la fréquence où le réseau est de caractère inductif prédominant, les filtres montres leurs efficacités dans les harmoniques étudiés (47<sup>e</sup> et 49<sup>e</sup> ordres) et aussi peut nous génère le risque d'avoir une surtension en cas de présence d'harmoniques de faibles ordres.
- Cas de l'augmentation de puissance PV dans le système : Avec le changement de l'impédance de transformateur des pics de résonance commencent à apparaitre, et ces pics deviennent considérables avec l'augmentation de la puissance PV et lors de présence des filtres passifs.

### [1] https://www.techno-science.net

[2] https://www.climamaison.com

[3] J.C. Sabonnadaiére, N. Hadjsaïd, "Lignes et réseaux électriques 1(lignes d'énergie électrique)", Livre, Paris, Lavoisier 2007.

[4] Comment une centrale nucléaire produit-elle de l'électricité ? - Sfen

[5] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari, Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque, Université 8 Mai 1945 – Guelma

[6] A. HEMISSI " ÉTUDE D'UN RÉSEAU ISOLÉ DE TRANSPORT 220 kV : APPLICATION SUR LE RÉSEAU PIAT ", Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État, ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES - ANNABA – 2022.

[7]https://www.connaissancedesenergies.org/s

[8] F. Laib, F. Amraoui, Élaboration d'outils de planification en vue de l'optimisation des investissements dans les réseaux électriques en Algérie, Mémoire De Master, Université Abderahmane Mira, BEJAIA, 2017

[9] <u>https://www.energy.gov.dz</u>

[10] J. jacques, Beziane « L'énergie solaire. Wood energy barometer. Systèmes solaires » n°158. Décembre 2003. EurObserv'ER.

[11] S. Ouali, Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie, thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2015.

[12] A. AZIZI, Thèse de Doctorat « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride », Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2019

[13] https://fr.linkedin.com/pulse/lénergie-solaire-thermodynamique-mohamed-aziz

[14] <u>https://www.edf.fr</u>

[15] NAWA Hacenna, MEMOIRE de MASTER Académique « Intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique », Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019.

[16] "Installation d'éolienne", <u>https://www.quelleenergie.fr/questions/difference-eolienne</u> <u>verticale-horizontale</u>

[17] https://eolienne.pagesjaunes.fr/comprendre/eolienne-verticale

[18] "Les différents types d'éoliennes", https://eolienne.ooreka.fr/comprendre

[19] ZERARI Naziha, "Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d''un système de production éolien isolé de petite taille", Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015

[20] The Dynamic Impact of Large Wind Farms on Power System Stability, KATHERINE ELKINGTON Doctoral Thesis Stockholm, Sweden 2012

[21] Alonso Corinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

[22] Dang Minh Trung, Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugues, études des systèmes reticulables, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2009

[23] Helali Kamelia, Modelisation d'une cellule photovoltaique .Etude comparative, These de doctorat Université de Tizi Ouzou, Algeria, 2012

[24] Chapitre 2, Modelisation et protection des modules photovoltaïques, université de Mohamed Khider Biskra.

[25] Etude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance, THESE DE DOCTORAT, Ababacar NDIAYE. Année : 2012-2013.

[26] MESSALLEM Soufiane, MEDAOUI Bachir, HAMMADI Zoubir, En vue de l'obtention du diplôme de MASTER « Validation de technique de commande d'un filtre actif parallèle », Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2021.

[27] Boudellioua Fouad, thème Caractérisation des perturbations affectant la qualité d'énergie électrique : cas des creux de tension. Master en Électrotechnique Option : Réseaux Électriques.

[28] Haddad Salim. « Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission », Thèse de doctorat de Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.

[29] Hydro-Québec. « Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension d'Hydro », Hydro-Québec -Québec -, février 2008

[30] Himeur abdanneur. « Analyse des harmoniques des appareils électriques sur le réseau électrique », Mémoire de fin d'études de l'Université de Jijel, 2019.

[31] DJAFFAR OULD ABDESLAM, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat de l'université de Haute-Alsace 08 décembre 2005

[32] A. Funken. « Outils et analyse des perturbations affectant le réseau électrique », Organisation Européen pour la recherche nucléaire, Echenevex, France, janvier 2002.

[33] Ouachida Faida et Zebiri Manel. « Qualité de l'énergie électrique et norme IEEE519 », Mémoire de fin d'études de l'Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2009.

[34] SEDDIK BACHA, " commandes avancées des systèmes dédies à l'amélioration de sa qualité de l'énergie : de la basse tension a la montée en tension" Thèse de doctorat INPG, 2006

[35] Les perturbations dans les réseaux électriques, chapitre 1, université de Mohamed Khider Biskra.

[36] IEEE STD 519-2014, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. – IEEE 519 working Group2014.

[37] A.Temouz, A. Mouedden "Etude d'évaluation du projet national Des centrales PV connectée au Réseau (PIAT) Adrar" Mémoire Master, université d'Adrar 2021

[38] H. Baza et A. Kasmi, Contribution à la stabilisation d'un réseau électrique industriel - Réseau ADRAR –, mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITÉ d'ADRAR,2020

[39] Guide pour utilisation du logiciel ETAP" ETAP® 14.0.0 Demo Getting Started " Operation Technology, Inc.

[40] F. Saad " Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des dispositifs FACTS" Mémoire Master, université DE M'SILA 2013.

[41] Document de Help de Logiciel ETAP.

[42] DALIL PARAISO, étude et caractérisation des courants harmoniques produits par des concentrations de charges non linéaires monophasées, mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières.

[43] Dr. Mohamed Darwish (2011) Power Electronics and FACTS [Lecture presented to MSc Sustainable Power, Brunel University]. 21 March.

[44] https://newheat.com/fonctionnement-energie-solaire-thermique/

[45] https://mrmondialisation.org

[46] Imed Laouini ING. PhD. Conseiller technique CMEQ, Conference\_Harmoniques\_IL-avril\_2021.pdf.

[47] ALLAG Zoubir & YAHIAOUI Hillal, 'Influence des harmoniques et des déséquilibres sur la compensation de l'énergie réactive des réseaux électriques de distribution'. Mémoire de master, Département de génie électrique, Université Abderrahmane MIRA, Bejaia, Algérie, Juin 2012.

[48] A. Dekhane, cours commande des ENR 5ème année ingénieur en Electrotechnique. ESTI Annaba,2021.

Les résultats obtenus dans le chapitre III ont fait l'objet d'une participation à un congrès International : The GAP 12<sup>th</sup> INTERNATIONAL SUMMIT SCIENTIFIC RESEARCH CONGRESS. 29-31 May 2024.

Sous le thème: « Environment and solar panel temperatures impact on the power generated by PV system in desert region ».

