



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Hani Haythem et Abdelhak Meghazi

Le: mercredi 4 juin 2025

Impacts des perturbations et des défauts sur la performance des réseaux électriques

Jury :

Dr	BOUCETTA Abir	MCB	Université de Biskra	Président
Dr	BOUCETTA Ikram	MCB	Université de Biskra	Encadreur
Dr	NECIRA Abdelouahab	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024 / 2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Impacts des perturbations et des défauts sur la performance des réseaux électriques

Le : mercredi 4 juin 2025

Présenté par :

- HANI Haythem
- MEGHAZI Abdelhak

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. BOUCETTA Ikram

Signature Avis favorable du Président du Jury

Dr. BOUCETTA Abir

Cachet et signature

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الملخص

على مدى العقود القليلة الماضية، جعل التطور التكنولوجي السريع، والتصنيع، والنمو السكاني، ومتطلبات مستهلكي الطاقة الكهربائية التي تزداد يوماً بعد يوم، الشبكة الكهربائية معقدة للغاية. علاوة على ذلك، فإن هذه الشبكات الكهربائية عرضة لمختلف الحوادث التي يمكن أن تسبب خللاً جزئياً أو كلياً. تتميز الدراسة بنهجها المبتكر الذي يقدم إطاراً تحليلياً ونظرياً صارماً بطريقة متسلسلة لمكونات الشبكة الكهربائية الأساسية، مع التركيز على عدة أنواع من العيوب من خلال فحص أصولها وتأثيراتها على أداء النظام الكهربائي. أخيراً، يتناول هذا البحث أجهزة الحماية والكشف التقليدية والمبتكرة، مع تسليط الضوء على الأهمية الحاسمة للحماية المتقدمة لأداء الشبكة وتعميق المعرفة الأكاديمية حول أنظمة المراقبة الحديثة التي تعد ضرورية للتصنيف الدقيق، والتحديد السريع والمبكر للأعطال في النظام الكهربائي.

الكلمات المفتاحية:

الشبكة الكهربائية، الأعطال، أجهزة الحماية، أجهزة التعقب، أنظمة المراقبة الحديثة

Résumé

Au cours des dernières décennies, le développement technologique rapide, l'industrialisation, la croissance démographique et les exigences des consommateurs de l'énergie électrique qui s'accroissent de jour en jour ont rendu le réseau électrique très complexe. Par ailleurs, ces réseaux électriques sont vulnérables à divers incidents pouvant causer un dysfonctionnement partiel ou total. L'étude se distingue par sa démarche novatrice qui offre un cadre analytique et théorique rigoureux de manière séquentielle des composantes essentielles du réseau électrique, en mettant l'accent sur plusieurs types de défauts en examinant sur leurs origines, effets et influences sur la performance du système électrique. Enfin, ce mémoire aborde les dispositifs de protection et de détection traditionnels et innovants, en mettant en lumière l'importance cruciale de la protection avancée des performances du réseau et d'approfondir les connaissances académiques sur les systèmes de surveillances modernes (SCADA, PMU, WAMS) qui sont essentiels pour l'identification précoce, la classification précise et la localisation rapide des anomalies sur le système électrique.

Mots clés :

Réseau électrique, Défauts, Dispositifs de protection, Dispositifs de détection, Systèmes de surveillances modernes

Abstract

Over the past few decades, rapid technological development, industrialization, population growth, and the increasing demands of electricity consumers have made the electrical grid very complex. Moreover, these electrical networks are vulnerable to various incidents that can cause partial or total malfunctions. The study stands out for its innovative approach, offering a rigorous analytical and theoretical framework in a sequenced manner of the essential components of the electrical network, focusing on various types of faults by examining their origins, effects, and influences on the performance of the electrical system. Finally, this thesis addresses traditional and innovative protection and detection devices, highlighting the crucial importance of advanced network performance protection and deepening academic knowledge on modern monitoring systems (SCADA, PMU, WAMS) that are essential for early identification, precise classification, and rapid localization of anomalies in the electrical system.

Keywords :

Electrical network, Faults, Protection devices, Detection devices, Modern surveillance systems.

Remerciements

Avant tous, nous tenons à exprimer notre gratitude envers 'Dieu' le tout puissant pour le courage, la santé et la force et toutes les bénédictions accordées tout au long de la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, nous remercions sincèrement notre directrice de mémoire Docteur BOUCETTA Ikram, maitre de conférences au département de génie électrique à l'université de Biskra, pour la confiance qu'elle nous a accordée en acceptant d'encadrer ce mémoire, pour ses précieux conseils, ses remarques judicieuses, ses encouragements et sa disponibilité sans limites, nous aimerons également lui dire à quel point nous avons apprécié ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux Docteur BOUCETTA Abir et NECRA Abdelouahab, maitre de conférences au département de génie électrique à l'université de Biskra pour l'honneur qu'ils nous ont fait pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants du département d'électrotechnique pour leurs efforts

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos parents et à toute notre famille « HANI et MEGHAZI » pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur patience tout au long de notre parcours académique

Nous tenons à remercier chaleureusement nos amis pour leur soutien et les moments de partage qui ont rendu ce parcours plus léger et enrichissant.

*Hani Haythem
Meghazi Abdelhak*

Table de matière

Résumé	I
Remerciements	III
Dédicace	IV
Table de matière	VII
Liste des Tableaux	X
Liste des figures	XII
Liste des abréviations	XIV
Introduction générale	I
Chapitre I: Généralités sur les réseaux électriques	4
I. Introduction	5
I.1. Historique	5
I.2. Définition du réseau électrique	5
I.3. Hiérarchisation du réseau électrique	6
I.3.1. Centrales de production	6
I.3.2. Réseaux de transport	8
I.3.3. Réseaux de répartition	9
I.3.4. Réseaux de distribution	9
I.4. Structure topologique des réseaux électriques	10
I.4.1. Réseau maillé	11
I.4.2. Réseau radial	11
I.4.3. Réseau bouclé	12
I.5. Classification des niveaux de tension	12
I.6. Postes électriques	14
I.6.1. Postes à fonction d'interconnexion	14
I.6.2. Postes de transformation	14
I.6.3. Postes mixtes	15
I.7. Lignes électriques	16
I.7.1. Ligne aérienne	16
I.7.2. Cable souterrain	16
I.7.3. Types des lignes électrique	18
I.8. Qualité de l'énergie électrique (QEE)	18

Table de matière

I.8.1. Principaux aspects de la qualité de l'énergie	19
I.8.2. Intérêt de la qualité de l'énergie.....	20
I.8.3. Importance de la continuité de services	21
I.9. Conclusion.....	21
Chapitre II : Les défauts dans les réseaux électriques.....	22
II Introduction.....	23
II.1. Différentes perturbations dans le réseau électrique.....	23
II.1.1. Définition d'une perturbation	23
II.2. Types de défauts électriques	23
II.2.1. Défauts liés au courant	23
II.2.2. Défauts liés à la tension	27
II.2.3. Défauts dus aux intempéries.....	33
II.3. Nature des défauts électriques – Selon la durée et l'évolution	37
II.3.1. Défaut Fugitif	37
II.3.2. Défaut Permanent	38
II.3.3. Défaut Semi-Permanent.....	38
II.3.4. Défaut Auto-Extincteur	38
II.3.5. Répartition statistique sur les réseaux de SONELGAZ.....	39
II.4. Blackouts électriques	39
II.4.1. Défauts pouvant entraîner un blackout électrique	40
II.4.2. Étude de cas de blackouts majeurs dans le monde	41
II.4.3. Evénements initiaux	42
II.5. Conclusion	43
Chapitre III : Systèmes de protection et de détection dans le réseau électrique.....	44
III. Introduction	45
III.1. Système de protection	45
III.1.1. Définition	45
III.1.2. Constitution d'un système de protection	45
III.2. Objectifs de la protection	46
III.3. Types de protection	47
III. 3. 1. Protections directionnelles	47
III.3.2. Protection différentielle.....	48
III.4. Qualités principales d'un système de protection	48
III.4.1. Rapidité	48
III.4.2. Sélectivité.....	48
III.4.3. Sensibilité.....	49
III.4.4. Fiabilité.....	49

Table de matière

III.5. Equipement de protection	49
III.5.1. Disjoncteurs	49
III.5.2. Fusible	51
III.5.3. Relais de protection	53
III.5.4. Transformateur de mesure	56
III.5.5. Parafoudre	57
III.5.6. Mise à la terre	59
III.6. Détection classification et la localisation des défauts	64
III.6.1. Détection et isolation de défaut	64
III.6.2. Classification des défauts	65
III.6.3. Localisation des défauts	65
III.7. Systèmes de surveillance moderne dans RE	68
III.7.1. Objectifs	69
III.7.2. Système de contrôle	69
III.8. Conclusion	81
Conclusion générale	86
Références	88

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Principes de fonctionnement des centrales électrique	7
Tableau 1.2. Niveaux de tension	13
Tableau 1.3. Niveaux essentiels de tension en Algérie	13
Tableau 1.4. Types de postes de transformation	15
Tableau 1.5. Comparaison entre les lignes aériennes et les câbles souterrains	17
Tableau 1.6. Principaux aspects de la qualité de l'énergie	19
Tableau 2.1. Origines d'un défaut de courts-circuits	25
Tableau 2.2. Origines d'un défaut de surcharge	26
Tableau 2.3. Origines d'un défaut surtension	27
Tableau 2.4. Origines d'un défaut du creux de tension	29
Tableau 2.5. Origines d'un défaut d'harmoniques	30
Tableau 2.6. Origines d'un défaut d'un déséquilibre de tension	32
Tableau 2.7. Origines de la rupture de phase	33
Tableau 2.8. Effet de la température extreme sur la performance du réseau	36
Tableau 2.9. Effet des défauts dus aux intempéries	36
Tableau 2.10. Nature des défauts électriques	38
Tableau 2.11. Impacts des blackouts électriques.....	41
Tableau 2.12. Cause typique du Blackout	42
Tableau 3.1. Principaux types de disjoncteurs	50
Tableau 3.2. Principaux types de fusible	52
Tableau 3.3. Types de Relais de protection	54
Tableau 3.4. Comparaison entre les relais	55
Tableau 3.4. Types des transformateurs	56
Tableau 3.5. Principaux types de parafoudre	58
Tableau 3.6. Étapes de fonctionnement d'un FTU	71

Liste des Tableaux

Tableau 3.7. Principe de fonctionnement de la FRTU	72
Tableau 3.8. Principe de fonctionnement d'un IDE	73
Tableau 3.9. Comparaison entre les systèmes de surveillance traditionnels et modernes.....	78

Liste des figures

Figure 1.1. Structure générale d'un réseau électrique	6
Figure 1.2. Réseau de transport d'énergie électrique Algérien	9
Figure 1.3. Architecture globale du réseau électrique	10
Figure 1.4. Réseau maillé	11
Figure 1.4. Réseau radial	11
Figure 1.6. Réseau bouclé	12
Figure 1.7. Niveaux de tension normalisés	13
Figure 1.8. Poste d'interconnexion	14
Figure 2.1. Différents types de court-circuit	25
Figure 2.2. Surtension	27
Figure 2.3. Creux de tension	28
Figure 2.4. Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3	30
Figure 2.5. Exemple de Déséquilibre des tensions triphasées	31
Figure 2.6. Vents violents.....	34
Figure 2.7. Foudre	34
Figure 2.8. Précipitations abondantes.....	35
Figure 2.9. Températures extrêmes	35
Figure 2.10. Incendies de forêt	36
Figure 2.11. Répartition des types de défauts dans le réseau électrique	39
Figure 2.12. Les défauts les plus courants et les plus récurrents.....	41
Figure 2.13. Les défaillances les plus graves conduisant à l'effondrement total du réseau électrique	42
Figure 3.1. Chaîne principale de la protection électrique	46
Figure 3.2. Principe des protections directionnelles	47
Figure 3.3. Raccordement d'un Relais de protection	53
Figure 3.4. Schéma bloc de différent type des Relais	54
Figure 3.5. Mise à la terre	60

Liste des figures

Figure 3.6 Mise à la terre « Régime TT »	61
Figure 3.7. Mise à la terre « Régime IT »	62
Figure 3.7. Mise à la terre « Régime TN-S »	63
Figure 3.8. Mise à la terre « Régime TN-C »	63
Figure 3.9. Mise à la terre « Régime TN-C-S »	64
Figure 3.10. Schéma équivalent d'une ligne à la présence d'un défaut	66
Figure 3.11. Organigramme de détection, classification et localisation des défauts	68
Figure 3.12. FTU (Feeder Terminal Unit)	70
Figure 3.13. FRTU (Feeder Remote Terminal Unit)	71
Figure 3.14. IED (Intelligent Electronic Device)	73
Figure 3.15. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)	74
Figure 3.16. WAMS (Wide Area Monitoring Systems)	75
Figure 3.17. PMU (Phasor Measurement Unit)	76
Figure 3.18. RTU (Remote Terminal Unit)	78
Figure 3.19. Système de détection (Local/ supervision)	79
Figure 3.20. Organigramme des étapes de détection des défauts dans le réseau électrique.....	80

Liste des abréviations

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>
BT	Basse Tension
MT	Moyenne Tension
HT	Haute Tension
THT	Très Haute Tension
HTA	Haute Tension A
HTB	Haute Tension B
HVDC	High Voltage Direct Current
QEE	Qualité de l'Énergie Électrique
SF₆	Hexafluorure de soufre (gaz isolant)
GIS	Gas Insulated Substation
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
DMS	Distribution Management System
FTU	Feeder Terminal Unit
FRTU	Feeder Remote Terminal Unit
IED	Intelligent Electronic Device
RTU	Remote Terminal Unit
PMU	Phasor Measurement Unit
WAMS	Wide Area Monitoring Systems
UPS	Uninterruptible Power Supply
CPU	Central Processing Unit
GPS	Global Positioning System
PDC	Phasor Data Concentrator
ROCOF	Rate of Change of Frequency
ADC	Analog to Digital Converter
CPI	Contrôleur Permanent d'Isolément
TC	Transformateur de Courant
CT	Current Transformer
TP	Transformateur de Potentiel
VT	Voltage Transformer
PE	Protection Earth
PEN	Protection Earth and Neutral
TT	Régime de mise à la terre Terre-Terre
IT	Régime Isolé-Terre
TN-S	Régime Terre-Neutre Séparé
TN-C	Régime Terre-Neutre Combiné
TN-C-S	Régime Terre-Neutre Combiné-Séparé
gG	Fusible à usage général
aM	Fusible pour moteurs
UR	Fusible ultra-rapide
AD	Fusible à élément double avec retard
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
IEC 61850	Norme de communication pour postes
AC	Courant Alternatif
DC	Courant Continu
THD	Total Harmonic Distortion

Liste des abréviations

TDR	Time Domain Reflectometry
η (êta)	Rendement
$\cos(\varphi)$	Facteur de puissance
R	Résistance
L	Inductance
C	Capacité
G	Conductance
Z	Impédance
U	Tension
I	Courant
f	Fréquence
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
ΔU	Variation de tension
ΔI	Variation de courant
VS	Tension source
IS	Courant source
Vr	Tension réseau
Ir	Courant réseau

Introduction générale

Introduction générale

Dans une société moderne, qui s'appuie de manière croissante sur l'exploitation de différentes sources d'énergie, l'électricité occupe une place essentielle en tant que pilier indispensable au développement économique, social et technologique. Elle assure l'alimentation en électricité des usines, des hôpitaux, des systèmes de communication, des moyens de transport et des foyers, ce qui signifie que tout problème sur le réseau électrique pourrait entraîner des conséquences critiques dans ces différents secteurs. Avec l'évolution et l'expansion des réseaux, leur niveau de complexité ne cesse d'augmenter, ce qui les expose plus à une diversité de défauts et de perturbations telle que : les ruptures de ligne, les défauts de court-circuit, les surcharges, les impacts de la foudre, les variations soudaines du couple mécanique, et bien d'autres encore.

Ces perturbations, lorsqu'elles ne sont pas rapidement détectées et traitées, peuvent engendrer dans certains cas l'instabilité totale du système (Blackout), provoquant par la suite des pertes économiques importantes et éventuelles atteintes à la sécurité et à la paix sociale. A titre d'exemple, **la panne massive de juillet 2021**, ayant touché l'Espagne et le Portugal, illustre l'ampleur du problème. Une perturbation au sein du réseau de transport a provoqué l'interruption de l'alimentation dans de vastes zones, affectant le fonctionnement des trains, des télécommunications et des services essentiels pour des milliers d'utilisateurs. Ces pertes économiques ont été estimées à plus de 100 millions d'euros en l'espace de quelques heures, un cas qui souligne l'urgence d'optimiser les dispositifs de détection et de réaction rapide.

La demande croissante d'électricité dans divers domaines a rendu le maintien de la stabilité et de la sécurité des réseaux électriques un défi majeur. Le principal problème est de savoir **comment détecter, localiser et classer avec précision les pannes dans les réseaux électriques afin de minimiser les perturbations et d'assurer la continuité du service ?** Cela nécessite une compréhension approfondie des systèmes électriques et de leurs vulnérabilités, ainsi qu'une utilisation efficace des technologies modernes de surveillance et de protection.

L'objectif principal de ce travail est la mise en œuvre de systèmes performants de protection et de surveillance, qui représente une solution indispensable pour assurer la continuité et l'excellence de la fourniture d'énergie. Des systèmes comme le SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) et FTU/RTU (Feeder Remote Terminal Unit) sont essentiels pour l'identification précoce, la détermination précise et la localisation rapide des anomalies sur le réseau. Ces dispositifs favorisent non seulement la réduction des périodes d'arrêt, mais aussi une

Introduction Générale

maintenance préventive visant à empêcher les dommages matériels et les conséquences socio-économiques liées.

Pour traiter ce sujet de manière structurée, ce mémoire est divisé en trois chapitres complémentaires :

- Dans le premier chapitre, nous présentons un bref aperçu sur les réseaux électriques en expliquant leur structure, leur fonctionnement, ainsi que les enjeux liés à la qualité, fiabilité et la continuité de service.
- Dans le deuxième chapitre, nous exposerons les différents types de défauts pouvant survenir dans les réseaux électriques en les classant selon leur origine, en exposant leurs causes, effets et évolutions possibles, une place privilégiée dans ce chapitre sur les défauts qui provoquent l'effondrement total du système (Blackout).
- Dans le troisième chapitre, nous nous concentrons sur les mécanismes de protection et de détection ainsi que les normes de performance pertinentes. En mis l'accent sur les systèmes de supervision et de gestion avancées qui assurent une opération constante, stable et sans interruption du réseau.

Ce contexte devient primordial pour mieux comprendre les mécanismes des défauts électriques, leurs effets sur les infrastructures et les stratégies de protection pour renforcer la résilience des réseaux électriques modernes.

Chapitre I :
Généralités sur les
réseaux électriques

I. Introduction

La demande croissante d'électricité dans divers domaines a rendu le maintien de la stabilité et de la sécurité des réseaux électriques un défi majeur. Le principal problème est de savoir comment détecter, localiser et classer avec précision les pannes dans les réseaux électriques afin de minimiser les perturbations et d'assurer la continuité du service. Cela nécessite une compréhension approfondie des systèmes électriques et de leurs vulnérabilités, ainsi qu'une utilisation efficace des technologies modernes de surveillance et de protection.

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble sur les réseaux électriques, en explorant leur structure, leur fonctionnement et les composants essentielles qui les constituent, ainsi que l'étude des principales structures topologiques. Nous examinerons également les enjeux liés à la qualité de l'énergie, et à la continuité des services afin de mieux comprendre comment ces systèmes complexes répondent aux besoins actuels et futurs de notre société.

I.1. Historique

À l'automne **1882**, le premier réseau électrique apparaît à **New York**. Il est très local et utilise le courant continu. Thomas Edison a joué un rôle déterminant dans le développement de ce réseau. **En 1884** un transformateur de forte puissance utilisant du courant triphasé a été mis au point, ce qui permet de changer facilement le niveau de tension. La même année on met en service **une ligne de 80 km** de long alimenté en courant alternatif **sous 2 000 V**. **En 1891** la première installation triphasée est mise en place entre Francfort et une centrale hydraulique, avec **une ligne de 175 km**. Le courant alternatif triphasé a été imposé universellement comme moyen de transport de l'énergie électrique, mieux adapté à cette époque au transport sur de longues distances. Néanmoins, **à la fin du XXe siècle**, alors que l'interconnexion à échelles pan-continentales se développe, les progrès techniques redonnent un intérêt au courant continu haute tension (CCHT) pour un transport longue distance gaspillant moins d'énergie avec moins de pertes en ligne. [1]

I.2. Définition du réseau électrique

Un réseau électrique désigne l'ensemble des infrastructures électrotechniques interconnectées conçu pour la production, le transport, la distribution et la gestion de l'énergie électrique afin de maintenir la stabilité de la fréquence et de la tension. Ce système complexe repose sur des principes physiques et techniques rigoureux pour assurer une alimentation continue, fiable et efficace en énergie électrique pour répondre aux besoins économiques et sociaux. [1]

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Le réseau joue un rôle clé dans la transition énergétique, en facilitant l'intégration des sources d'énergie renouvelable (solaire, éolien, etc.) et des systèmes de stockage d'électricité. Il constitue l'ensemble des moyens techniques permettant l'acheminement de l'électricité depuis les unités de production jusqu'aux consommateurs. Il garantit la continuité, la stabilité et la qualité de l'alimentation électrique, tout en assurant un équilibre constant entre l'offre et la demande. [2]

1.3. Hiérarchisation du réseau électrique

L'architecture globale d'un réseau électrique est une structure complexe et hiérarchisée, conçue pour transporter l'électricité de manière fiable et efficace depuis les centrales de production jusqu'aux consommateurs finaux. Cette architecture repose sur plusieurs étapes clés, chacune jouant un rôle spécifique dans la gestion des flux d'énergie à différentes échelles géographiques et tensionnelles. [2]

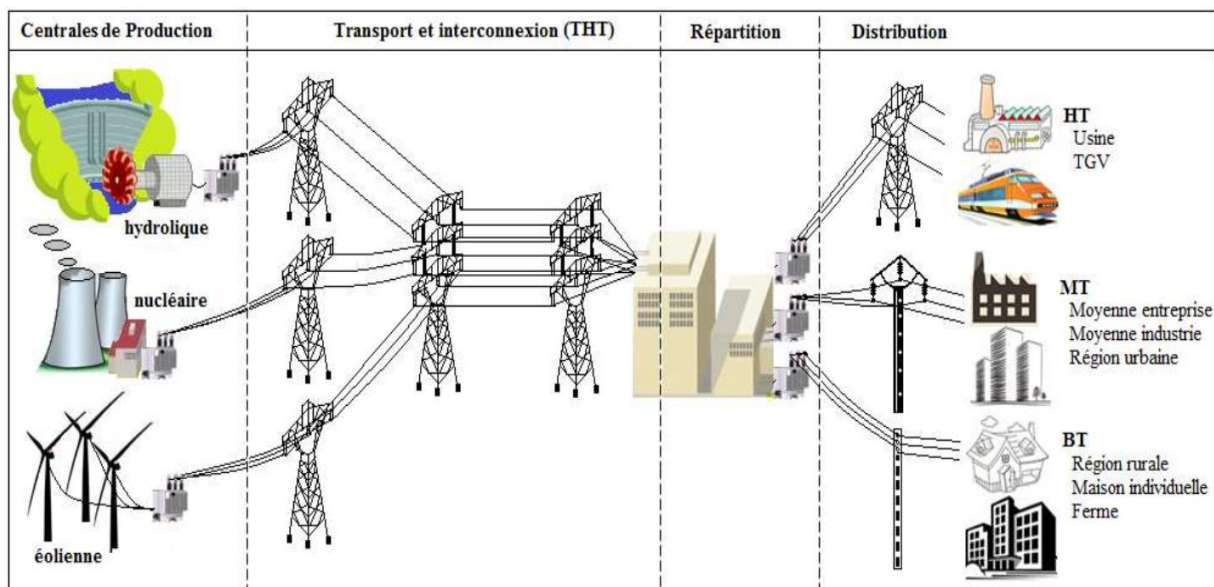


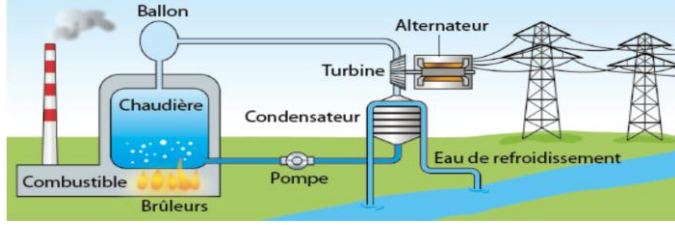
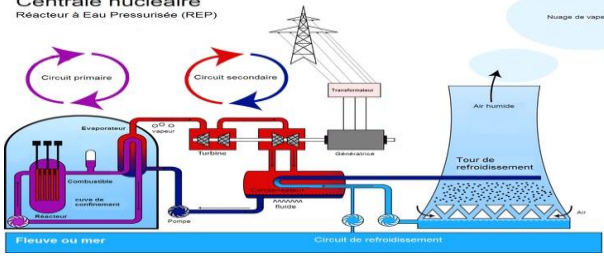
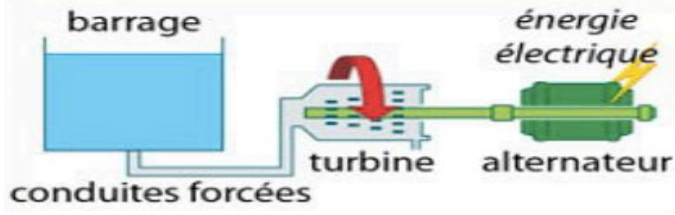
Figure 1.1. Structure générale d'un réseau électrique [2]

1.3.1. Centrales de production

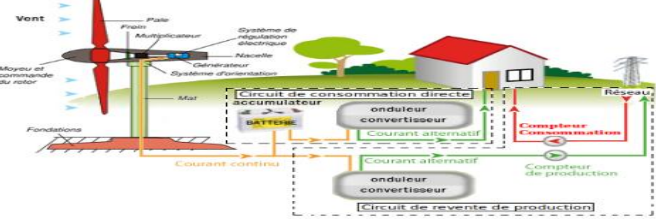
La production d'électricité se déroule dans des centrales électriques ; qui sont des installations industrielles dont le rôle principal est de **produire de l'énergie électrique à partir de diverses sources d'énergie primaire**. Selon la nature de cette source, on distingue plusieurs types de centrales. [3]

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Tableau 1.1. Principes de fonctionnement des centrales électrique [2] [3]

<i>Source d'énergie primaire</i>	<i>Type de centrale électrique</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>
 charbon gaz pétrole naturel	Centrale thermique	 La centrale thermique fonctionne par la combustion d'un combustible, qui produit de la vapeur ; celle-ci fait tourner une turbine couplée à un alternateur, permettant ainsi la production d'électricité.
 uranium	Centrale nucléaire	 Une centrale nucléaire utilise la fission de noyaux d'uranium pour produire la chaleur pour générer la vapeur qui entraîne une turbine reliée à un alternateur, permettant la production d'électricité.
 eau	Centrale hydro-électrique	 Une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de l'eau en mouvement pour faire tourner une turbine, qui entraîne un alternateur et génère de l'électricité.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

 vent	<i>Centrale éolienne</i>	 Une centrale éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique via des pales entraînant un rotor, lequel fait tourner un alternateur pour produire de l'électricité.
 Soleil	<i>Centrale solaires ou photovoltaïque</i>	 Une centrale solaire photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse du soleil en en courant continu grâce à des cellules photovoltaïques regroupées dans des panneaux solaires, ensuite transformé en courant alternatif à l'aide d'un onduleur pour être injecté dans le réseau électrique.

1.3.2. Réseaux de transport

Le réseau de transport constitue la colonne vertébrale du système électrique. Il a pour fonction principale d'acheminer l'énergie électrique produite dans les centrales vers les grands centres de consommation ou vers le réseau de distribution, tout en garantissant la stabilité, la fiabilité et la qualité de l'alimentation électrique. [3]

Le réseau de transport fonctionne à **haute tension (HT)** et **très haute tension (THT)** afin de minimiser les pertes par effet Joule sur les longues distances. Les niveaux de tension varient selon les pays, mais ils se situent généralement entre 220 kV, 400 kV, et peuvent aller jusqu'à 765 kV. L'utilisation de hautes tensions permet de transporter de grandes quantités d'électricité avec une efficacité optimale. La figure (1.2) représente le réseau de transport Algérien. [4]

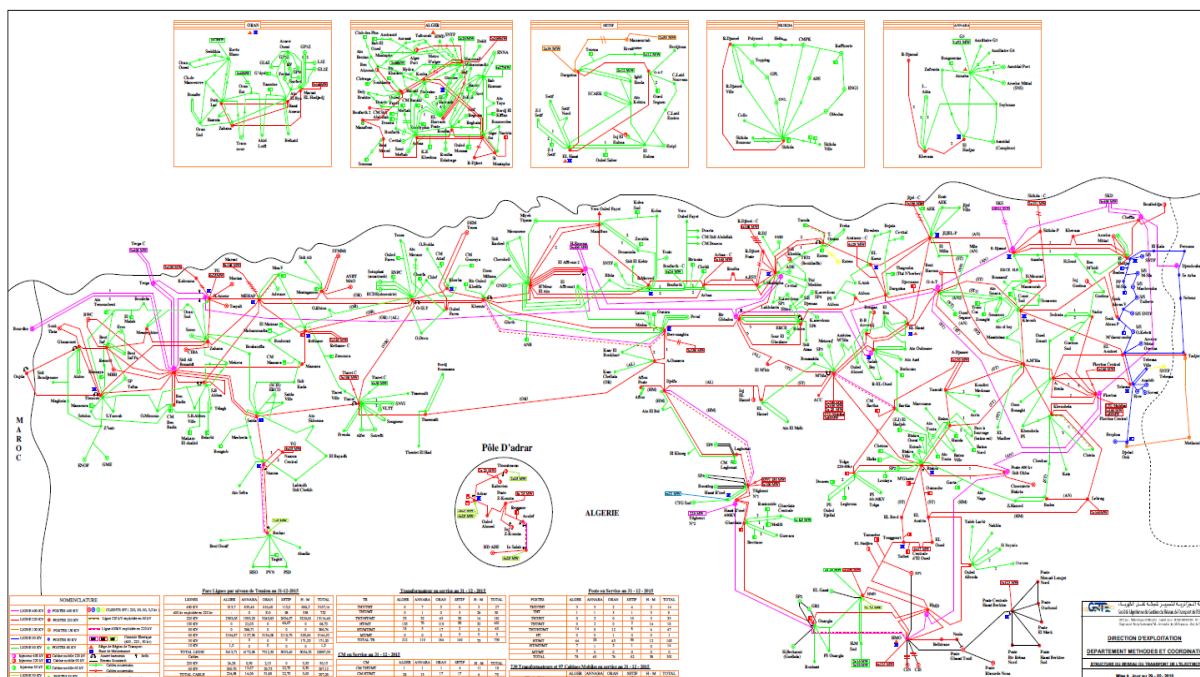


Figure 1.2. Réseau de transport d'énergie électrique Algérien [4]

1.3.3. Réseaux de répartition

Le réseau de répartition constitue un niveau intermédiaire du système électrique, situé entre le réseau de transport (HT/THT) et le réseau de distribution (MT/BT). Il assure l'acheminement de l'énergie électrique à moyenne ou haute tension, généralement comprise entre 60 kV et 90 kV, depuis les postes de transformation HT/MT jusqu'aux postes de distribution primaire. [1] [4]

1.3.4. Réseaux de distribution

Le réseau de distribution constitue le dernier maillon de la chaîne d'acheminement de l'énergie électrique. Sa fonction principale est de distribuer l'électricité depuis les postes de répartition jusqu'aux utilisateurs finaux, qu'ils soient domestiques, commerciaux, ou industriels. Il fonctionne à moyenne tension (MT), généralement entre 1 kV et 33 kV, et à basse tension (BT) pour les consommations usuelles (230/400 V). [2] [4]

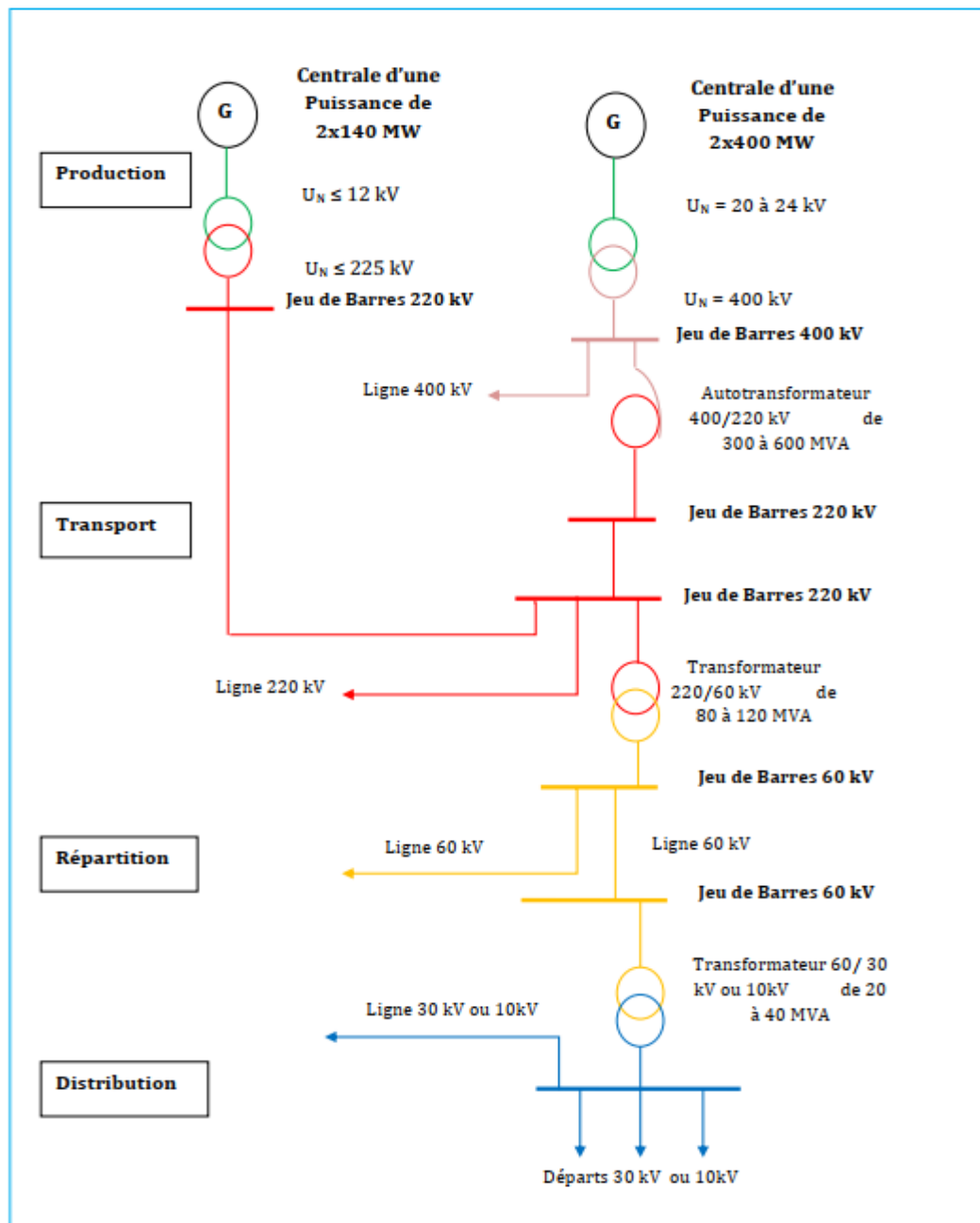


Figure 1.3. Architecture globale du réseau électrique [5]

I.4. Structure topologique des réseaux électriques

La structure topologique d'un réseau électrique définit la manière dont les éléments (centrales, postes, lignes, consommateurs) sont interconnectés. Cette topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les topologies les plus courantes sont : [1] [5]

I.4.1. Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. [6]

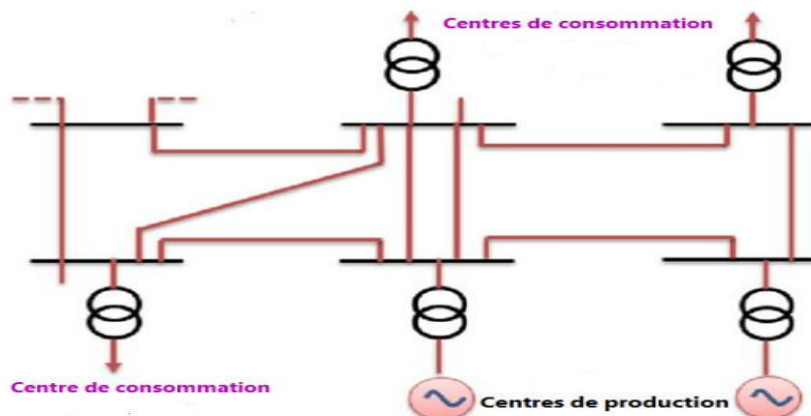


Figure 1.4. Réseau maillé [7]

I.4.2. Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

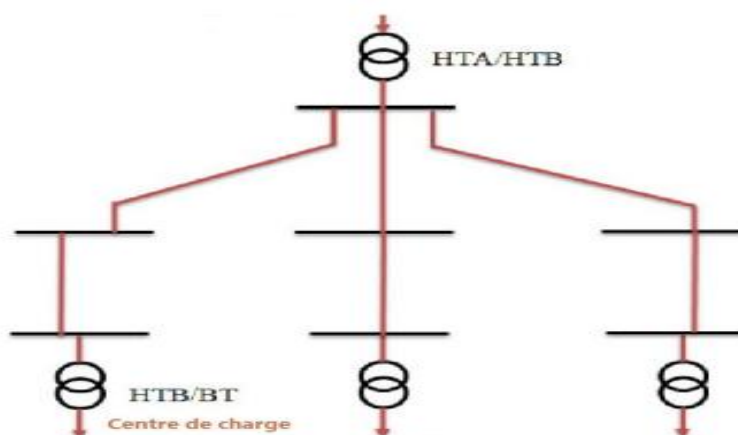


Figure 1.4. Réseau radial [7]

I.4.3. Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

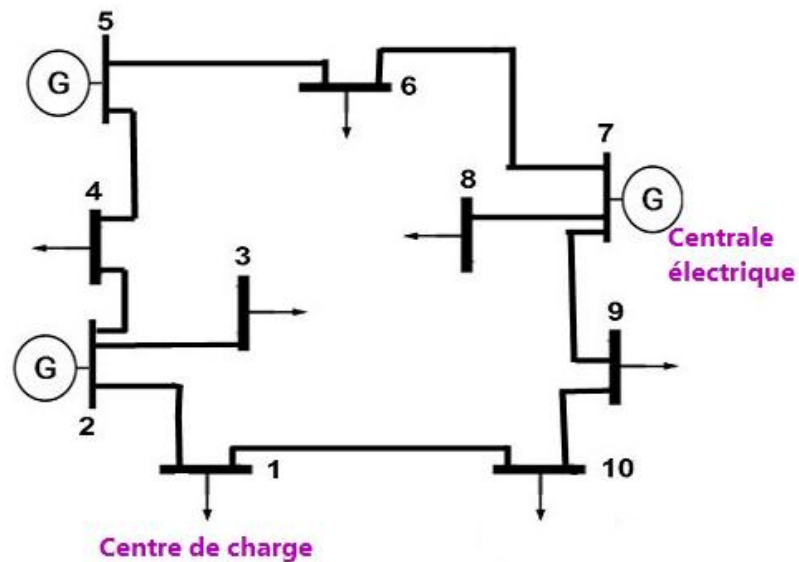


Figure 1.6. Réseau bouclé [7]

I.5. Classification des niveaux de tension

Dans un système électrique, les tensions sont classées selon des plages normalisées qui correspondent aux différentes fonctions du réseau (transport, répartition, distribution, consommation). Cette classification permet d'adapter les équipements, les normes d'isolation, et les dispositifs de protection. [8]

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension en courant alternatif et continu comme suit : [4]

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Tableau 1.2. Niveaux de tension [2]

Domaine de Tension		Valeur de la Tension Nominale (U_n en Volts)	
		Courant Alternatif	Courant Continu
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

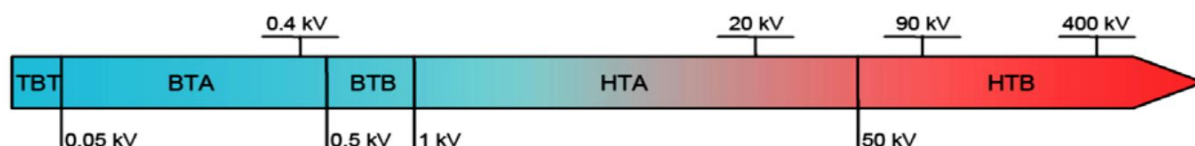


Figure 1.7. Niveaux de tension normalisés [7]

Nous prendrons par convention dans ce qui suit :

- HTB désignera la Haute Tension HT.
- HTA désignera la Moyenne Tension MT.
- BTB et BTA désignerons le domaine de la Basse Tension BT.

Tableau 1.3. Niveaux essentiels de tension en Algérie [4]

<i>Domaines de tension</i>	<i>Valeur de la Tension</i>
<i>HTB</i>	60 kV – 90 kV – 150 kV – 220kV – 400 kV
<i>HTA</i>	5.5 kV – 10 kV – 15 kV – 20 kV – 30 kV
<i>BTA</i>	400 V

1.6. Postes électriques

Les postes électriques sont des infrastructures stratégiques du réseau électrique, servant de points d'interface entre les différents niveaux de tension (THT, HT, MT, BT). Leur rôle principal est d'assurer la transformation de tension, la distribution de l'énergie et la protection du réseau. On distingue plusieurs types de postes selon leur position dans la chaîne d'acheminement : [9]

1.6.1. Postes à fonction d'interconnexion

Les postes à fonction d'interconnexion assurent la liaison électrique entre deux réseaux distincts, qu'ils soient nationaux, régionaux ou transfrontaliers. Ils permettent le transfert contrôlé d'énergie entre systèmes, tout en garantissant la stabilité, la synchronisation et la sécurité des échanges. Ces postes sont essentiels dans les contextes d'interconnexion continentale (ex. : Europe, Afrique du Nord) ou pour intégrer des réseaux isolés. [2]



Figure 1.8. Poste d'interconnexion [3]

1.6.2. Postes de transformation

Les postes de transformation sont des nœuds stratégiques du réseau électrique permettant de modifier le niveau de tension de l'électricité afin de l'adapter aux différentes étapes du transport et de la distribution de manière efficace et sécurisée. [9]

1.6.2.1. Fonctions principales

- Élever ou abaisser la tension selon le besoin du réseau (transport, distribution, consommation).

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

- Répartir l'énergie vers plusieurs lignes ou directions de charge.
- Protéger les équipements grâce à des dispositifs de coupure, de détection de défauts et de mise hors service.
- Servir de point de livraison pour les clients industriels ou les zones de consommation.

Tableau 1.4. Types de postes de transformation [3] [9]

<i>Types de poste</i>	<i>Description et caractéristiques</i>	<i>Rôle</i>	<i>Image représentative</i>
<i>Poste en plein air</i>	Installé à l'extérieur, souvent dans des zones ouvertes. Utilisé pour les réseaux HT et THT.	Transforme la tension pour le transport ou la distribution. Protège contre les surtensions et les courts-circuits.	
<i>Poste en cabine</i>	Installé dans un bâtiment fermé ou une cabine. Utilisé pour les réseaux MT/BT.	Abaisse la tension de moyenne tension (MT) vers basse tension (BT). Distribue l'électricité aux consommateurs finaux.	
<i>Poste sur poteau</i>	Installé sur un poteau électrique. Utilisé pour les zones rurales ou périurbaines.	Réduit la tension de MT vers BT pour alimenter des zones isolées. Facile à installer et à entretenir.	

I.6.3. Postes mixtes

Les postes mixtes sont des installations électriques polyvalentes qui assurent simultanément plusieurs fonctions du réseau, notamment la transformation de tension, la répartition de l'énergie, et parfois même la distribution directe. Ils peuvent abaisser une tension de transport (ex. : 225 kV) vers la moyenne tension (ex. : 20 kV) tout en alimentant directement des clients industriels ou des sous-stations MT/BT. Ces postes sont conçus pour optimiser

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

l'architecture du réseau, réduire les pertes et améliorer la flexibilité d'exploitation, en particulier dans les zones où la densité de consommation est élevée. [1] [5]

La structure d'un poste mixte inclut souvent plusieurs disjoncteurs, sectionneurs, jeux de barres et transformateurs de puissance. Les équipements sont agencés de manière à permettre la souplesse d'exploitation, la redondance et la protection efficace du réseau. Ce type de poste facilite aussi bien la distribution régionale que la gestion des flux entre différents tronçons du réseau.

1.7. Lignes électriques

Les lignes électriques sont des ensembles de conducteurs aériens ou souterrains, conçus pour transporter de l'énergie électrique entre deux points du réseau (poste de transformation, centrale, centre de consommation), en assurant la continuité du service, la sécurité des personnes et la qualité de l'énergie.

Sur le plan électrotechnique, une ligne électrique peut être modélisée comme un quadripôle ou une ligne à paramètres répartis, caractérisée par quatre paramètres principaux par unité de longueur : [8]

R (résistance) : dissipation d'énergie sous forme de chaleur (effet Joule)

L (inductance) : génération de champs magnétiques, influence sur les transitoires

C (capacité) : effet capacitif entre conducteurs et entre conducteur-sol.

G (conductance) : pertes par courant de fuite à travers l'isolant.

1.7.1. Ligne aérienne

Les lignes électriques aériennes sont des réseaux de transport ou de distribution d'électricité où les conducteurs (câbles) sont suspendus à l'air libre à l'aide de poteaux ou de pylônes. Elles sont la forme la plus classique de transport électrique, surtout pour couvrir de longues distances. [10]

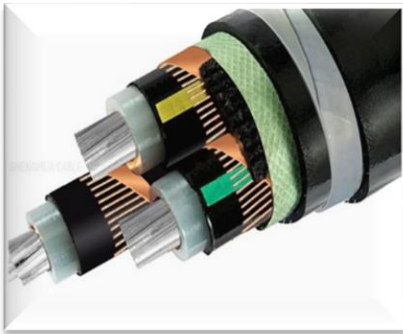
1.7.2. Cable souterrain

Un câble souterrain est un câble électrique conçu pour transporter l'électricité sous la surface du sol. Il est spécialement isolé et protégé pour résister aux conditions souterraines : humidité, pression mécanique, attaques chimiques, etc. Contrairement aux conducteurs aériens,

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

les câbles souterrains sont entièrement enfermés dans des couches d'isolant, d'écran métallique et parfois de gaine extérieure très résistante. [10]

Tableau 1.5. Comparaison entre les lignes aériennes et les câbles souterrains [6]

<i>Critère</i>	<i>Ligne aérienne</i>	<i>Cable souterrain</i>
<i>Niveau de tension</i>	BT: 230 V / 400 V. MT: 15–36 kV. HT: 63–225 kV. THT : 400 kV et plus.	BT : 0 à 1 kV MT : 1 kV à 36 kV HT : 36 kV à 150/225 kV THT : 225 kV à 400 kV et plus
<i>Coût d'installation</i>	Faible	Très élevé (environ 5 à 10 fois plus cher)
<i>Maintenance</i>	Facile (accès direct)	Difficile (nécessite excavation)
<i>Durée de vie</i>	30 à 50 ans	40 à 60 ans (voire plus avec bons matériaux)
<i>Vulnérabilité aux intempéries</i>	Très exposée (vent, glace, foudre)	Protégée (sauf séismes, inondations locales)
<i>Pertes électriques</i>	Moyennes à élevées (effet corona possible en THT)	Faibles (meilleure isolation thermique)
<i>Utilisation typique</i>	Zones rurales, grandes distances	Zones urbaines, zones protégées, traversée de rivières ou d'obstacles
<i>Illustration</i>		

1.7. 3. Types des lignes électrique

Nous distinguons quatre types de ligne : [8] [10]

➤ *Lignes de distribution BT*

Les **lignes de distribution BT** (basse tension) désignent les réseaux électriques qui transportent l'électricité à des tensions inférieures ou égales à **1 000 volts en courant alternatif** (AC) — typiquement **230 V** (monophasé) ou **400 V** (triphasé) pour les usages domestiques, commerciaux et industriels légers.

➤ *Lignes de distribution MT*

Les lignes de distribution MT (moyenne tension) désignent les réseaux électriques qui transportent l'électricité à des tensions comprises entre 1 kV et 50 kV (en général 20 kV en Europe et dans beaucoup de pays). Elles assurent le transport de l'électricité depuis les postes de transformation HT/MT (haute/moyenne tension) jusqu'aux postes de distribution BT.

➤ *Lignes de transport HT*

Les lignes de transport HT (haute tension) sont des lignes électriques qui transportent de grandes quantités d'électricité sur de longues distances à des tensions supérieures à 50 kV.

➤ *Lignes de transport THT*

Les lignes de transport THT (Très Haute Tension) sont les plus grandes artères du réseau électrique. Elles transportent des énormes puissances sur des centaines de kilomètres à des tensions supérieures à 225 kV, souvent 400 kV voire jusqu'à 800 kV ou même plus en courant continu (HVDC). [11]

1.8. Qualité de l'énergie électrique (QEE)

Définitions : La qualité de l'énergie électrique (QEE) fait référence à la conformité des caractéristiques de l'électricité fournie avec les normes et les spécifications requises pour assurer un fonctionnement stable et efficace des équipements électriques. Elle est mesurée par divers paramètres qui évaluent la pureté, la stabilité et la continuité de la tension électrique fournie avec une forme d'onde quasi sinusoïdale des tensions et des courants du bus de distribution d'alimentation à une amplitude et une fréquence nominale.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension, laquelle est caractérisée par les paramètres suivants : [12]

- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale ; pas de distorsions, de pics, de creux et amplitude dans les limites tolérables ;
- Equilibre et symétrie parfaite des phases en amplitude et en phase ;
- Stabilité de la fréquence.

1.8.1. Principaux aspects de la qualité de l'énergie

Plusieurs aspects contribuent à évaluer et garantir la qualité de l'énergie. Voici un tableau récapitulatif des principaux aspects de la qualité de l'énergie, avec leurs définitions, problèmes courants et solutions associées : [11]

Tableau 1.6. Principaux aspects de la qualité de l'énergie [13]

<i>Aspect</i>	<i>Définition</i>	<i>Intervalle acceptable</i>	<i>Problèmes courants</i>	<i>Solution possibles</i>
Stabilité de la tension	Maintien de la tension dans une plage spécifique.	[207 V à 253 V] pour une tension nominale de 230 V ($\pm 10\%$)	Sous-tension, surtension, instabilité des équipements.	Régulateurs de tension, stabilisateurs, transformateurs, onduleurs.
Fréquence du réseau	Stabilité de la fréquence (50 Hz ou 60 Hz).	[49,8 Hz à 50,2 Hz] ($\pm 0,2$ Hz) ou [59,7 Hz à 60,3 Hz] ($\pm 0,3$ Hz) selon le système.	Variations de fréquence, désynchronisation des moteurs et générateurs.	Synchronisation précise des générateurs, gestion équilibrée production-consommation.
Harmoniques	Distorsions de la forme d'onde électrique causées par des charges non linéaires.	THD (distorsion harmonique totale) < 5% pour la tension, < 8% pour le courant.	Surcharge des câbles, pertes énergétiques, dysfonctionnement des équipements sensibles.	Filtres actifs/passifs, transformateurs spéciaux,

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

Déséquilibre des phases	Différence de charge entre les trois phases d'un système triphasé.	Déséquilibre de tension $\leq 2\%$ pour les équipements sensibles, $\leq 4\%$ pour les charges normales.	Surchauffe des moteurs, inefficacité énergétique, vibrations mécaniques.	Répartition équilibrée des charges, utilisation de dispositifs de compensation.
Facteur de puissance	Rapport entre la puissance active (utile) et la puissance apparente totale.	Facteur de puissance $\geq 0,9$ pour les systèmes industriels.	Pertes dans les lignes, inefficacité énergétique, surchauffe des équipements.	Condensateurs, compensateurs statiques, optimisation des charges.
Fiabilité et disponibilité	Capacité du réseau à fournir une alimentation continue sans interruptions majeures.	Temps d'arrêt annuel < 1 heure pour les systèmes critiques.	Temps d'arrêt prolongé, pertes économiques, inefficacité opérationnelle.	Maintenance préventive, redondance des systèmes, surveillance en temps réel.
Pertes énergétiques	Pertes dans les lignes de transport et les transformateurs dues à la résistance des conducteurs.	Pertes dans les transformateurs $< 5\%$, pertes dans les lignes $< 3\%$.	Inefficacité énergétique, surchauffe des équipements, coûts élevés.	Utilisation de matériaux à faible résistivité, optimisation des réseaux, maintenance.

1.8.2. Intérêt de la qualité de l'énergie

La qualité de l'énergie est un concept essentiel dans les systèmes électriques modernes, car elle garantit que l'énergie électrique est distribuée et utilisée de manière fiable, efficace et sécurisée. Voici les principaux intérêts de la qualité de l'énergie : [12]

- Protection des équipements électriques
- Amélioration de la fiabilité et de la disponibilité
- Optimisation de l'efficacité énergétique
- Conformité aux normes et réglementations

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

- Préservation de la stabilité du réseau électrique
- Satisfaction des utilisateurs finaux
- Réduction des coûts globaux
- Impact environnemental positif
- Adaptation aux nouvelles technologies

1.8.3. Importance de la continuité de services

L'importance de la continuité des services de l'énergie électrique réside dans sa capacité à assurer le fonctionnement des infrastructures critiques, maintenir la stabilité économique, garantir la qualité de vie des particuliers, soutenir la transition énergétique et répondre aux exigences réglementaires, tout en renforçant la résilience et l'inclusion sociale. [12] [13]

- Assurer le fonctionnement des infrastructures critiques
- Maintenir la stabilité économique
- Garantir la qualité de vie des particuliers
- Réduire les pertes économiques
- Soutenir la transition énergétique
- Impact sur la compétitivité des entreprises
- Contribuer à la stabilité du réseau électrique

1.9. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons pu établir les bases essentielles pour la compréhension des réseaux électriques. Ces systèmes complexes, indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique, sont constitués de multiples éléments interconnectés, chacun remplissant un rôle spécifique pour assurer un service continu, fiable et sécurisé.

Dans ce chapitre nous avons présenté un survol sur la structure topologique du réseau, la classification des niveaux de tension, l'architecture globale du réseau, ainsi que la qualité d'énergie et la continuité de service qui occupe une place privilégiée.

Chapitre II : Défaits dans les réseaux électriques

II. Introduction

Dans un monde qui dépend fortement de l'énergie électrique, le bon fonctionnement des réseaux électriques constitue un pilier essentiel de la société moderne. Ils distribuent de l'énergie aux foyers, aux industries et aux infrastructures critiques comme les hôpitaux et les transports, tout en assurant les transitions énergétiques vers des modèles durables. Toutefois, ces réseaux peuvent être confrontés à divers incidents et perturbations susceptibles d'affecter leur stabilité et leur fiabilité et la continuité du service. Ces défaillances, lorsqu'elles interagissent de manière complexe, risquent d'entraîner des effondrements massifs du système, connus sous le terme de **blackout**, avec des conséquences économiques, sociales et environnementales majeures.

Ce chapitre a pour objectif d'explorer en détail les différentes natures de défauts rencontrés dans les réseaux électriques, leurs origines, leurs effets sur les infrastructures, ainsi que les mécanismes pouvant conduire à des incidents majeurs comme les blackouts. Une compréhension approfondie de ces phénomènes est indispensable pour concevoir des systèmes de protection fiables et assurer la résilience des réseaux électriques modernes.

II.1. Différentes perturbations dans le réseau électrique

II.1.1. Définition d'une perturbation

Une **perturbation** électrique ou un **défaut** électrique désigne tout phénomène anormal affectant le fonctionnement d'un système ou réseau électrique, entraînant une modification indésirable des grandeurs électriques telles que la tension, le courant ou la fréquence.

- **Perturbation électrique** : C'est une variation temporaire ou permanente des caractéristiques normales du réseau électrique (tension, courant, fréquence), pouvant perturber le fonctionnement des équipements connectés.
- **Défaut électrique** : C'est un événement plus grave, souvent soudain et imprévu, qui compromet gravement le bon fonctionnement d'un appareil ou d'un réseau électrique. Il peut entraîner des dommages matériels ou une interruption de service. [3]

II.2. Types de défauts électriques

II.2.1. Défauts liés au courant

Ces défauts provoquent une circulation anormale et souvent très élevée de courant dans le réseau. Ils sont très fréquents et dangereux pour les équipements et la stabilité du système.

II.2.1.1. Court-circuit

Un court-circuit est un contact accidentel entre deux points d'un circuit électrique ayant des potentiels différents, entraînant une circulation de courant très élevée, bien supérieure au courant nominal.

Le court-circuit est l'un des défauts les plus graves et fréquents représentant des anomalies majeurs dans le fonctionnement des réseaux électriques, entraînant des conséquences néfastes tant sur la stabilité que sur la sécurité de l'ensemble du système. Voici une explication détaillée : [2]

- **Court-circuit monophasé à la terre** : Une seule phase entre accidentellement en contact avec la terre (ou un neutre mis à la terre).
 - **Gravité** : Moins grave au départ, mais dangereux si non détecté.
 - **Cause typique** : Dégradation de l'isolant des câbles, Arbre tombé sur une ligne aérienne, Humidité ou saleté sur les isolateurs, Perforation d'un câble souterrain.
- **Court-circuit biphasé** : Deux phases entrent en contact direct sans passer par la terre.
 - **Gravité** : Moyenne. Le courant de défaut est plus élevé que pour un monophasé.
 - **Causes typiques** : Contact entre câbles mal fixés ; Chute d'un objet conducteur (branche, fil métallique) ; Vent fort rapprochant deux lignes.
- **Court-circuit biphasé à la terre** : Deux phases entrent en contact avec la terre, en même temps ou l'une après l'autre.
 - **Gravité** : Élevée. Le courant est très important, peut provoquer une interruption rapide.
 - **Causes typiques** : Foudre touchant plusieurs conducteurs ; Arbre ou structure métallique touchant deux phases ; Câbles isolés détériorés par l'eau ou l'usure.
- **Court-circuit triphasé** : Les trois phases sont en court-circuit entre elles, sans contact avec la terre.
 - **Gravité** : Très élevée. Courant maximal, déséquilibre total du système.
 - **Causes typiques** : Effondrement d'un pylône ou d'un poste ; Court-circuit dans un transformateur ou moteur ; Faille mécanique grave dans un appareillage.
- **Court-circuit triphasé à la terre** : Les trois phases entrent en contact entre elles et avec la terre.
 - **Gravité** : Extrême. Risque de destruction massive d'équipements.

Chapitre II : Défaits dans les réseaux électriques

- **Causes typiques** : Incendie ou explosion d'un poste électrique ; Foudre ou surtension extrême ; Effondrement total d'un support avec court-circuit généralisé. [1] [11]

Les courts-circuits peuvent être :

- Monophasés : 80 % des cas,
- Biphasés : 15 % des cas. Ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés,
- Triphasés : 5 % seulement [11]

➤ Origines d'un défaut de courts-circuits

Les courts-circuits peuvent avoir diverses origines :

Tableau 2.1. Origines d'un défaut de courts-circuits [1]

Origine	Causes de défauts
<i>Électriques</i>	Vieillessement d'isolant, surcharge, défaut interne, échauffement
<i>Naturelles</i>	Foudre, pluie, vent, verglas, pollution
<i>Mécaniques</i>	Chute d'objets, effondrement de supports, frottements, mouvements de terrain
<i>Humaines</i>	Erreurs de manipulation, mauvais câblage, négligence, sabotage

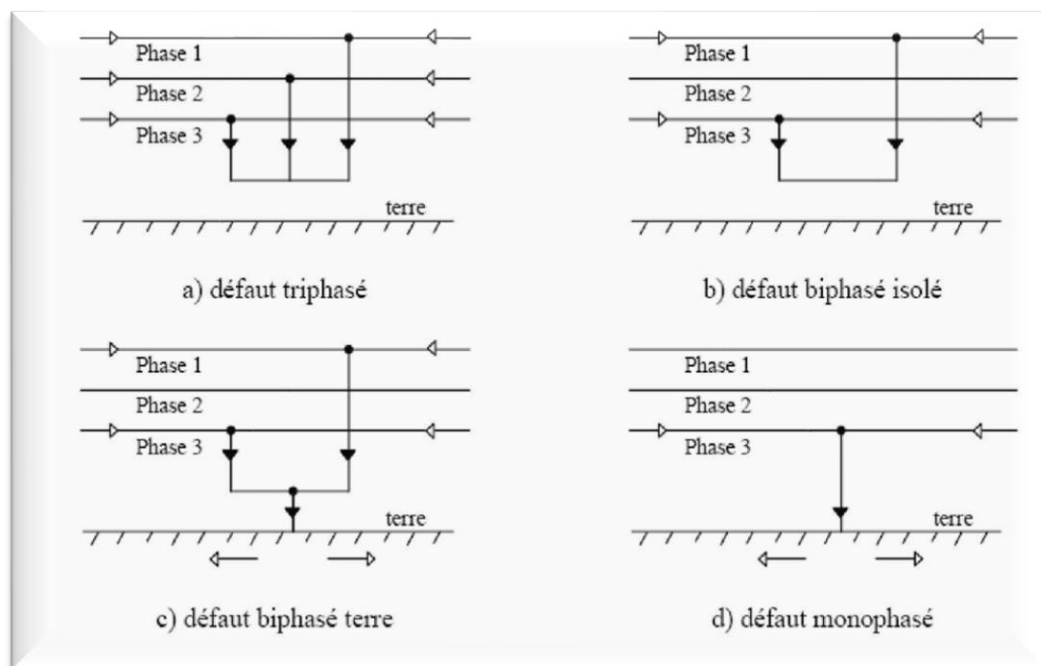


Figure 2.1. Différents types de court-circuit. [3]

Chapitre II : Défaits dans les réseaux électriques

II.2.1.1. Surcharge

La **surcharge** désigne une condition dans laquelle un **courant supérieur à la valeur nominale** circule dans un circuit électrique ou un appareil pendant une durée prolongée, sans qu'il y ait nécessairement de court-circuit. Cela peut entraîner un **échauffement anormal** des équipements et détériorer l'isolation. [13]

➤ *Gravité*

- Peut endommager gravement les équipements électriques (transformateurs, lignes, moteurs, etc.).
- Risque d'incendie, pannes en cascade ou même blackout si elle touche une large portion du réseau.
- Réduction de la durée de vie des équipements.
- Peut provoquer le déclenchement des protections (disjoncteurs, relais thermiques).

➤ *Origines d'un défaut de surcharge*

Tableau 2.2. Origines d'un défaut de surcharge [13]

<i>Origine</i>	<i>Causes de défauts</i>
<i>Électriques</i>	• Court-circuit partiel ou mauvais isolement augmentant le courant dans une partie du circuit. • Déséquilibre de phase dans un système triphasé. • Harmoniques excessives.
<i>Naturelles</i>	• Températures ambiantes élevées réduisant la capacité de dissipation thermique des câbles et transformateurs. • Orages causant des surtensions, obligeant certains équipements à forcer.
<i>Mécaniques</i>	• Blocage partiel de moteurs ou pompes provoquant un appel de courant élevé. • Frottements ou usures mécaniques dans des équipements électromécaniques.
<i>Humaines</i>	• Erreurs de manipulation ou de maintenance. • Mauvaise planification de la distribution ou du dimensionnement. • Détournements ou branchements frauduleux.

II.2.2. Défaits liés à la tension

II.2.2.1. Surtension

La **surtension** est une **élévation anormale de la tension électrique** dans un circuit au-delà de sa valeur nominale. Elle peut être **transitoire** (brève, de forte amplitude) ou **permanente** (dérive prolongée de la tension au-dessus des limites). Elle est particulièrement dangereuse pour les équipements sensibles. [14]

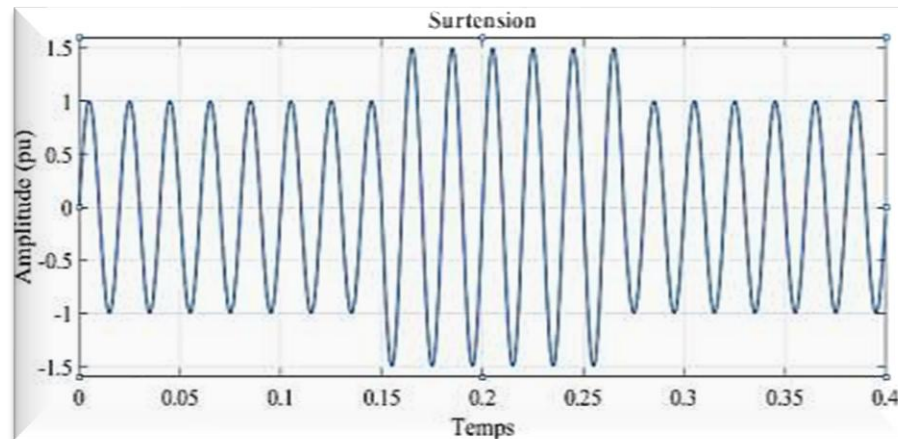


Figure 2.2. Surtension [11]

➤ *Gravité*

- Peut détruire instantanément les équipements électroniques ou isolants.
- Risque d'arc électrique, de chauffe excessive, voire d'incendie.
- Dégradation des composants isolants (câbles, transformateurs, disjoncteurs).
- Peut entraîner des pannes en série et affecter la qualité de l'alimentation.

➤ *Origines d'un défaut surtension*

Tableau 2.3. Origines d'un défaut surtension [14]

Origine	Causes de défauts
Électriques	• Ouverture ou fermeture brusque de circuits inductifs • Mauvaise régulation de tension au niveau des postes HT/MT. • Défaut de mise à la terre.
Atmosphériques	• Foudre tombant directement sur une ligne ou à proximité

Chapitre II : Défaits dans les réseaux électriques

	• Champs électromagnétiques créés par des orages intenses.
Mécaniques	• Dérèglement mécanique dans un régulateur de tension. • Défaut dans les systèmes de compensation
Humaines	• Mauvais réglage des transformateurs de tension ou régulateurs. • Suppression ou absence de protection contre la surtension.

II.2.2.2. Creux de tension

Un creux de tension est une baisse brève mais significative de la tension électrique (généralement de 10 % à 90 % de la tension nominale), durant de quelques millisecondes à quelques secondes. Il ne s'agit pas d'une coupure totale, mais d'une réduction temporaire de la qualité de l'alimentation. [8]

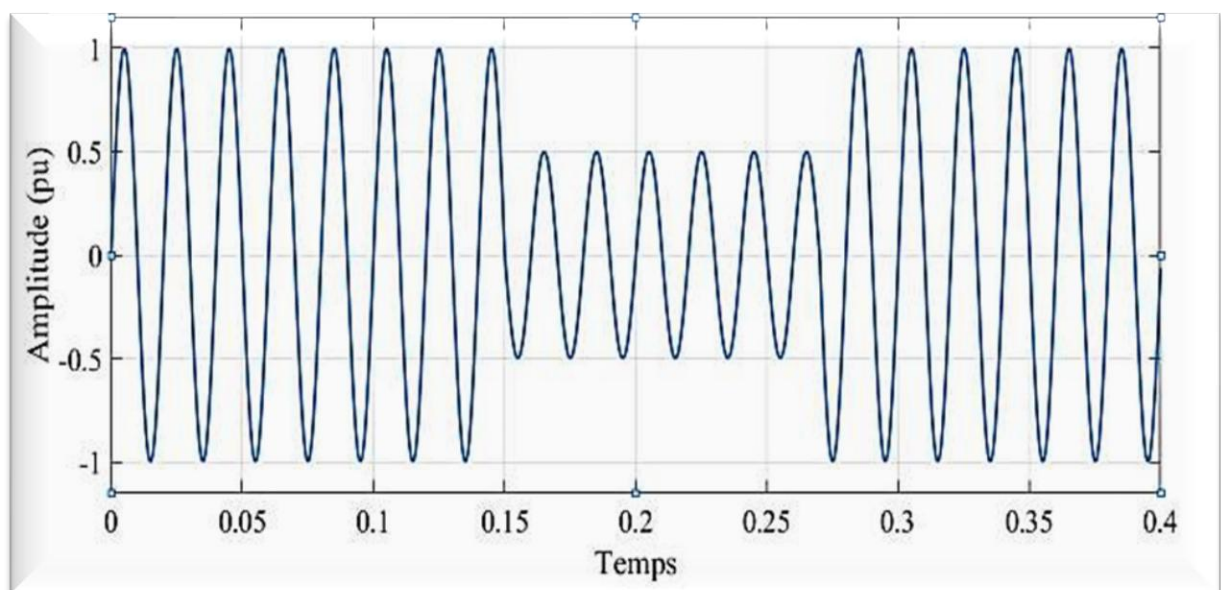


Figure 2.3. Creux de tension [11]

➤ **Gravité**

- Provoque l'arrêt ou le redémarrage intempestif de certains dispositifs
- Perturber le fonctionnement des équipements électroniques sensibles.
- En milieu industriel, il peut entraîner des pertes de production ou des dérèglements de processus critiques.

Chapitre II : Défauts dans les réseaux électriques

➤ Origines d'un défaut du creux de tension

Tableau 2.4. Origines d'un défaut du creux de tension [8]

<i>Origine</i>	<i>Causes typiques de défauts</i>
<i>Électriques</i>	• Courts-circuits locaux ou sur d'autres circuits interconnectés. • Démarrage d'équipements à fort appel de courant. • Chutes de tension sur des lignes longues ou sous-dimensionnées. • Défaut dans un transformateur ou une cellule de distribution.
<i>Atmosphériques</i>	• Foudre entraînant une instabilité temporaire de la tension. • Orages perturbant les lignes aériennes, causant des perturbations transitoires.
<i>Mécaniques</i>	• Défaut dans un alternateur ou une turbine provoquant une baisse momentanée de production. • Blocage ou démarrage brutal de moteurs lourds.
<i>Humaines</i>	• Manœuvres de réseau inadaptées • Délestages mal planifiés. • Ajout de charges importantes sans étude d'impact préalable.

II.2.2.3. Harmoniques

Les harmoniques sont des distorsions du courant ou de la tension électrique par rapport à leur forme sinusoïdale idéale. Elles correspondent à des fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale (généralement 50 Hz ou 60 Hz). Ces distorsions créent des ondulations

parasites qui perturbent le fonctionnement des équipements électriques. [15]

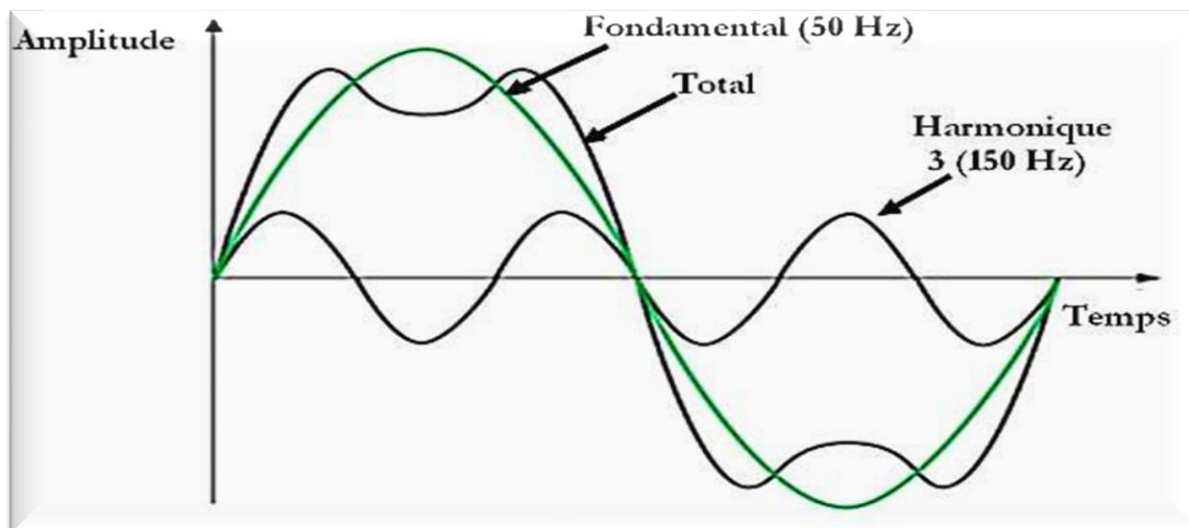


Figure 2.4. Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3 [11]

➤ *Gravité*

- Dégradation de la qualité de l'alimentation électrique.
- Échauffement anormal de transformateurs, moteurs, câbles.
- Défaillance prématurée de certains équipements sensibles (électroniques, relais).
- Peut entraîner ou amplifier des creux de tension dans des réseaux déjà sollicités.
- Problèmes de synchronisation, déclenchements intempestifs de protections.

➤ *Origines d'un défaut d'harmoniques*

Tableau 2.5. Origines d'un défaut d'harmoniques [15]

<i>Origine</i>	<i>Causes de défauts</i>
<i>Électriques</i>	• Variateurs de fréquence, UPS (alimentation sans interruption), redresseurs. • Déséquilibre ou mauvaise distribution des charges sur le réseau. • Résonance entre les harmoniques et l'impédance du réseau.
<i>Atmosphériques</i>	• Bien que rares, certains phénomènes transitoires atmosphériques (foudre) peuvent interférer avec le signal et injecter des distorsions fugitives, perçues comme des harmoniques transitoires.
<i>Mécaniques</i>	• Moteurs mal entretenus ou déséquilibrés provoquant une absorption irrégulière du courant.

	• Machines industrielles à commande variable générant des signaux de courant non sinusoïdaux.
Humaines	• Conception inadaptée du réseau (absence de filtres harmoniques). • Ajout de nombreux équipements électroniques sans prise en compte de leur impact harmonique. • Maintenance insuffisante des systèmes de compensation

II.2.2.4. Déséquilibre de tension

Le déséquilibre de tension (ou asymétrie de tension) désigne une situation où les tensions entre phases dans un réseau triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou en angle. Cela crée des courants déséquilibrés, souvent accompagnés d'échauffements, vibrations, pertes de performance, ou dysfonctionnements d'équipements. Ce déséquilibre est généralement exprimé en pourcentage (%) et calculé comme suit : [14] [16]

$$\text{Déséquilibre (\%)} = \frac{\text{Ecart maximal par rapport à la tension moyenne}}{\text{Tension moyenne}} \times 100 \quad (1)$$

Un déséquilibre supérieur à 2 % est considéré comme critique selon les normes IEEE.

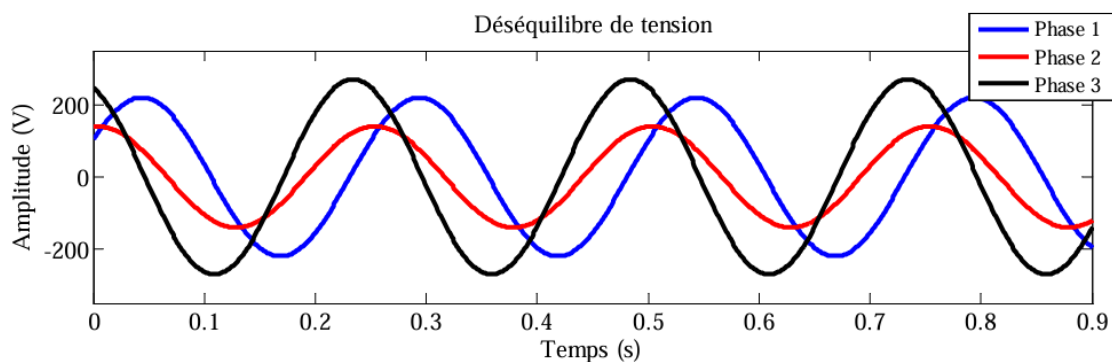


Figure 2.5. Exemple de Déséquilibre des tensions triphasées [11]

➤ **Gravité**

- Surchauffe des moteurs triphasés
- Pertes de puissance (jusqu'à 20–30 % pour un déséquilibre élevé)
- Vibrations mécaniques
- Détérioration prématurée des composants
- Risque de coupure ou blackout dans des cas extrêmes

➤ Origines d'un défaut déséquilibre de tension

Tableau 2.6. Origines d'un défaut d'un déséquilibre de tension [16]

<i>Origine</i>	<i>Causes de défauts</i>
<i>Électriques</i>	• Mauvaise répartition des charges monophasées • Défaut d'isolement ou de court-circuit sur une seule phase. • Défaut sur un transformateur triphasé
<i>Atmosphériques</i>	• Impact de foudre sur une seule phase ou ligne → surcharge ou endommagement partiel. • Phénomènes transitoires causant des perturbations non symétriques sur les lignes aériennes.
<i>Mécaniques</i>	• Moteur triphasé alimenté par tensions déséquilibrées → échauffement anormal, vibrations, baisse de rendement. • Déséquilibre mécanique d'une charge tournante qui entraîne un déséquilibre électrique secondaire.
<i>Humaines</i>	• Branchement non équilibré de nouvelles charges. • Erreurs de câblage ou de raccordement

II.2.2.5. Rupture de phase

La rupture de phase désigne la perte d'une ou plusieurs phases dans un système triphasé, entraînant une alimentation partielle ou déséquilibrée des équipements. Elle peut se produire sur une ligne d'alimentation, un disjoncteur, un fusible grillé, ou un point de raccordement.

➤ Gravité

- Déséquilibre sévère de courant dans les autres phases
- Échauffement excessif des moteurs triphasés
- Risque d'arc électrique au point de coupure
- Perte totale de service dans les équipements alimentés en triphasé [1] [3]

Chapitre II : Défauts dans les réseaux électriques

➤ Origines de la rupture de phase

Tableau 2.7. Origines de la rupture de phase [3]

Origine	Causes de défauts
Électriques	• Fusible ou disjoncteur unipolaire ayant déclenché une seule phase. • Défaut dans un interrupteur triphasé ou une connexion de tableau. • Court-circuit partiel ayant brûlé une phase uniquement.
Atmosphériques	• Foudre ou vent violent causant la chute d'un conducteur d'une ligne aérienne. • Chute d'un arbre sur une seule phase.
Mécaniques	• Usure ou rupture de connecteurs, bornes, ou de câblage sous contrainte. • Vibrations mécaniques dans un coffret ou un bornier mal serré.
Humaines	• Erreur de câblage ou d'installation • Maintenance incorrecte ayant laissé une phase hors service.

II.2.3. Défauts dus aux intempéries

Les conditions météorologiques extrêmes représentent une menace majeure pour la fiabilité des réseaux électriques. Elles peuvent provoquer divers défauts, allant de perturbations mineures à des pannes généralisées. Les principaux phénomènes météorologiques responsables de ces défauts sont détaillés ci-dessous. [11] [16] [15]

II.2.3.1. Vents violents

Les rafales de vent peuvent entraîner la chute d'arbres ou de branches sur les lignes électriques, provoquant des courts-circuits ou des ruptures de conducteurs. De plus, les vibrations induites par le vent peuvent desserrer les connexions, augmentant le risque de défauts à la terre monophasés.



Figure 2.6. Vents violents

II.2.3.2. Foudre

La foudre génère des surtensions transitoires de haute intensité qui peuvent endommager les équipements électriques, notamment les transformateurs et les dispositifs de protection. Les installations non équipées de paratonnerres ou de dispositifs de protection contre les surtensions sont particulièrement vulnérables.



Figure 2.7. Foudre

II.2.3.3. Précipitations abondantes (pluie, neige, verglas)

Les précipitations abondantes, qu'elles soient sous forme de pluie, neige ou verglas, représentent un risque majeur pour le réseau électrique. En effet, l'accumulation de neige ou de glace sur les lignes électriques augmente leur poids, pouvant entraîner leur affaissement ou la chute de pylônes. Le verglas peut

Chapitre II : Défaits dans les réseaux électriques

également bloquer les équipements de protection comme les disjoncteurs, tandis que la pluie peut provoquer des infiltrations d'eau dans les transformateurs ou isolateurs, causant des courts-circuits.



Figure 2.8. Précipitations abondantes

II.2.3.4. Températures extrêmes

Les températures extrêmes (très élevées ou très basses) désignent des conditions climatiques inhabituelles ou extrêmes qui dépassent les seuils de fonctionnement normaux pour les infrastructures. Ces températures ont un impact direct et indirect sur la performance et la fiabilité du réseau électrique.

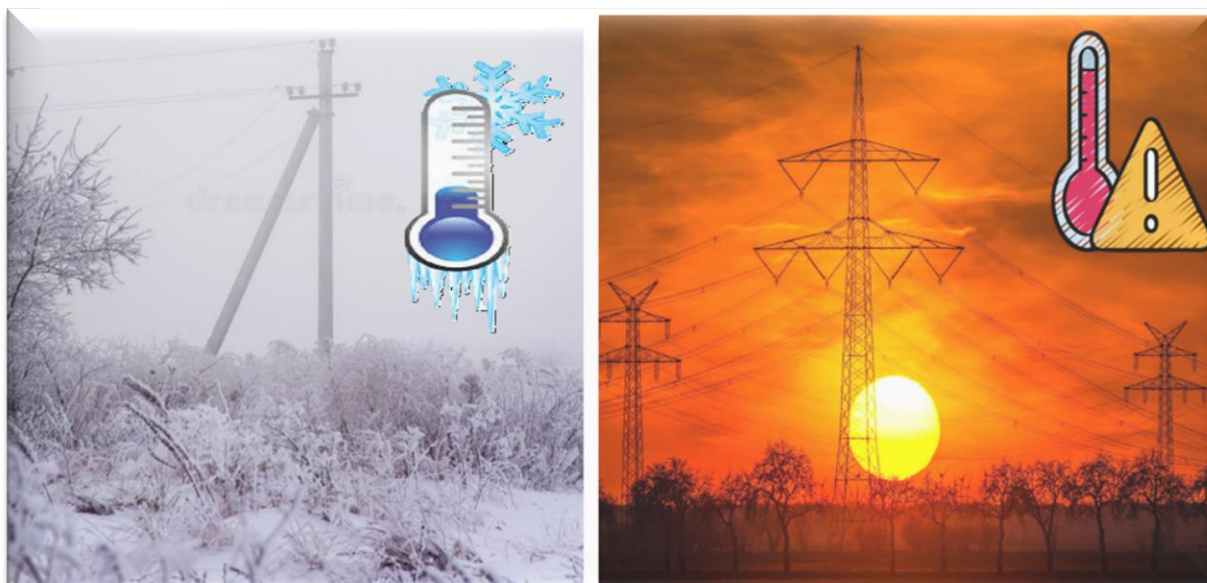


Figure 2.9. Températures extrêmes

Chapitre II : Défauts dans les réseaux électriques

Tableau 2.8. Effet de la température extrême sur la performance du réseau

<i>Températures extrêmes</i>		<i>Effets sur la performance du réseau</i>
<i>Températures élevées</i>		Dilatation des lignes ; Surchauffe des transformateurs ; Hausse de la demande électrique ; Perte de capacité de transport
<i>Températures très basses</i>		Contraction des matériaux ; Formation de givre ou glace sur les lignes ; Augmentation de la consommation ; Pannes d'équipement

II.2.3.5. Incendies de forêt

Les feux de forêt peuvent endommager les infrastructures électriques en brûlant les poteaux, les câbles et les équipements de distribution. La chaleur intense peut également provoquer la défaillance des isolants et des composants électroniques.



Figure 2.10. Incendies de forêt

Tableau 2.9. Effet des défauts dus aux intempéries [17]

<i>Défauts dus aux intempéries</i>	<i>Effets possibles</i>	<i>Défauts typiques</i>
<i>Vents violents</i>	*Chute de câbles ou torsion de conducteurs. *Chute d'arbres ou de branches sur les lignes. *Balancements de conducteurs provoquant des courts-circuits	*Rupture de phase, *Court-circuit à la terre, *Défaut fugitif, *Arcs électriques.

Chapitre II : Défauts dans les réseaux électriques

<i>Foudre</i>	*Surtensions transitoires très élevées pouvant endommager les isolateurs, parafoudres, transformateurs. *Arc électrique entre conducteurs ou à la terre. *Déclenchement des protections.	Surtension, Défaut fugitif, Endommagement permanent, Déséquilibre de tension
<i>Précipitations abondantes</i>	*Humidité sur les isolateurs provoquant des amorçages ou arcs. *Givrage des câbles → surcharge mécanique et risque de rupture. *Inondation de postes ou armoires électriques.	*Courts-circuits à la terre *Défauts d'isolement, (Défauts fugitifs ou semi-permanents.)
<i>Températures extrêmes</i>	*Dilatation excessive des conducteurs → affaissement. *Contraction par grand froid → tension mécanique sur les supports. *Surchauffe des composants par fortes chaleurs. *Gel des systèmes de commande.	*Rupture mécanique. *Déclenchements intempestifs. *Perte d'efficacité des protections thermiques.
<i>Incendies de forêt</i>	*Chaleur intense entraînant la dégradation des câbles isolés ou des isolateurs. *Fumée conductrice pouvant créer des arcs électriques entre lignes. *Risque d'effondrement des poteaux en bois ou pylônes affaiblis.	*Rupture de ligne, *Court-circuit, *Défaut permanent, *Déclenchement préventif.

II.3. Nature des défauts électriques – Selon la durée et l'évolution

II.3.1. Défaut Fugitif

Un défaut **de très courte durée**, souvent provoqué par un phénomène passager (arc électrique, foudre, frottement d'un câble), qui **disparaît de lui-même** sans intervention humaine ni endommagement majeur. [17]

➤ *Caractéristique*

- Souvent non reproductible, difficile à détecter.

Chapitre II : Défaits dans les réseaux électriques

- Déclenchement temporaire, puis reprise du service après réenclenchement automatique.

II.3.2. Défaut Permanent

Un défaut qui persiste tant qu'une intervention n'est pas réalisée. Il provoque une coupure définitive jusqu'à sa réparation.

➤ Caractéristique

- Déclenchement des protections suivi d'un verrouillage.
- Intervention humaine obligatoire pour remettre en service.

II.3.3. Défaut Semi-Permanent

Défaut qui dure plus longtemps qu'un défaut fugitif, mais qui peut disparaître sans intervention physique, souvent après un ou plusieurs déclenchements ou réenclenchements.

➤ Caractéristique

- Peut être éliminé par un réenclenchement automatique différé.
- Potentiellement répétitif : nécessite une surveillance.

II.3.4. Défaut Auto-Extincteur

Défaut qui se résorbe naturellement peu après son apparition, sans causer de coupure permanente. Très proche du défaut fugitif, mais il peut être légèrement plus long ou plus récurrent.

➤ Caractéristique

- Peut disparaître avant même l'action des protections, ou pendant un essai de réenclenchement automatique.

Tableau 2.10. Nature des défauts électriques [16]

<i>Nature du défaut</i>	<i>Durée</i>	<i>Résolution</i>	<i>Intervention humaine</i>	<i>Exemples</i>
<i>Fugitif</i>	Très courte	Disparaît immédiatement	Non	Coup de foudre, arc
<i>Auto-extincteur</i>	Courte	Se résorbe seul	Non	Arc sur isolateur

Chapitre II : Défauts dans les réseaux électriques

<i>Semi-permanent</i>	Moyenne	Disparaît après déclenchement	Parfois nécessaire	Obstacle temporaire
<i>Permanent</i>	Longue	Ne disparaît pas	Oui	Câble coupé

II.3.5. Répartition statistique sur les réseaux de SONEGAS

Les défauts observés dans les réseaux aériens de transport de SONEGAS sont répartis approximativement comme suit : [14]

- 70 à 90 % : défauts fugitifs
- 5 à 15 % : défauts semi-permanents
- 5 à 15 % : défauts permanents

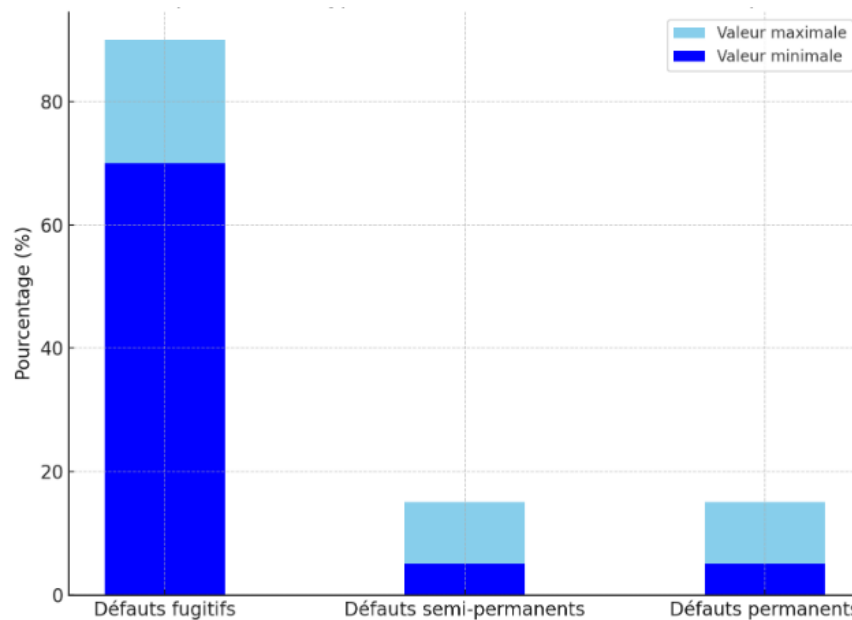


Figure 2.11. Répartition des types de défauts dans le réseau électrique

II.4. Blackouts électriques

Un blackout électrique est une interruption brutale, totale et incontrôlée de l'alimentation électrique affectant une large zone géographique, parfois un pays entier. Sur le plan technique, il s'agit d'un effondrement systémique du réseau causé par un déséquilibre critique entre la production et la consommation d'électricité, souvent déclenché par des événements tels qu'un court-circuit majeur, une surcharge, ou une défaillance en cascade des équipements de protection. Ce phénomène entraîne une chute soudaine de la fréquence du réseau (souvent en dessous de 50 Hz), la désynchronisation des générateurs, ainsi que l'ouverture automatique de lignes de transport

et de centrales dans le but de protéger le système, ce qui aggrave encore la situation. Le rétablissement de l'alimentation après un blackout nécessite une procédure complexe appelée "*black start*", qui repose sur des centrales capables de redémarrer sans alimentation externe. [18]

II.4.1. Défauts pouvant entraîner un blackout électrique

Les coupures générales (blackouts) dans les systèmes électriques sont généralement le résultat d'une combinaison de facteurs techniques, environnementaux et humains. Voici les causes principales résumées dans le tableau (...) de manière structurée : [2] [17]

➤ *Surcharge extrême*

Lorsqu'une partie du réseau est sollicitée au-delà de sa capacité thermique ou mécanique, une surcharge prolongée peut engendrer un déséquilibre généralisé, conduisant à des déclenchements en cascade des dispositifs de protection. Cela peut isoler des zones entières du réseau et entraîner une perte de contrôle du système.

➤ *Court-circuit généralisé*

Un court-circuit affectant plusieurs tronçons critiques du réseau, surtout à proximité des centres de production, peut entraîner une instabilité importante. Ce type de défaut, s'il n'est pas éliminé rapidement, peut désynchroniser les groupes de production et provoquer leur déclenchement automatique.

➤ *Perte de synchronisme*

La perte de synchronisme entre les alternateurs connectés au réseau peut être causée par des perturbations brusques de tension ou de fréquence. Elle compromet la stabilité de l'ensemble du système et mène à une fragmentation ou un arrêt total de l'alimentation.

➤ *Chute de fréquence ou de tension*

Une baisse rapide de la fréquence (souvent due à une perte soudaine de production) ou une chute significative de tension peut déclencher des mécanismes de protection, provoquant une cascade de coupures volontaires ou automatiques dans le but de protéger les équipements. Si cette réaction en chaîne n'est pas maîtrisée, elle peut conduire à un blackout.

➤ *Défaillance en cascade (effet domino)*

Il s'agit d'un enchaînement d'incidents techniques déclenchés par un défaut initial non maîtrisé. Chaque composant du réseau affecté augmente la contrainte sur les autres, jusqu'à ce que l'ensemble du système s'effondre. Ce phénomène est souvent aggravé par l'absence de redondance ou une mauvaise coordination de la protection.

Chapitre II : Défautes dans les réseaux électriques

➤ Facteurs aggravants

Certains éléments extérieurs peuvent aggraver les défauts mentionnés :

- Conditions météorologiques extrêmes (vent violent, foudre, chaleur excessive, etc.) qui détériorent l'infrastructure physique.
- Cyberattaques ciblant les systèmes SCADA ou les relais de protection.
- Erreurs humaines dans l'exploitation ou la maintenance des réseaux haute tension. [18]

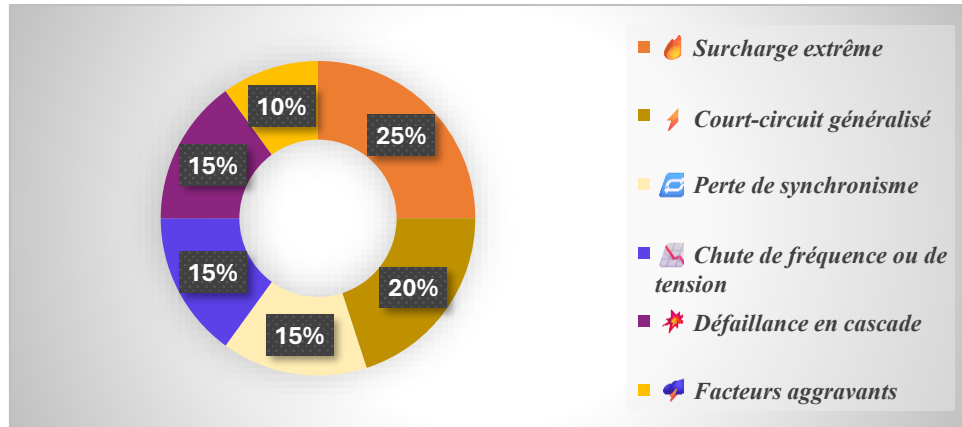


Figure 2.12. Les défauts les plus courants et les plus récurrents

II.4.2. Étude de cas de blackouts majeurs dans le monde

Le tableau ci-dessous fournit un bref aperçu de certaines des principales pannes qui touche le monde depuis les années 2000 pour lesquels nous avons obtenu des informations relativement détaillées. [18]

Tableau 2.11. Impacts des blackouts électriques

Blackout	Année	Population affectée	Charge Perdue
Algérie	03/02/2003	25 millions	4476 MW
Suède/Danemark	23/09/2003	1.6 million in Sweden	4700 MW à la Suède
		2.4 million in Denmark	1850MW en Danemark
Italie	28/09/2003	56 millions	177 GWH
Nord Est États-Unis et canada	14/08/2003	50 millions de personnes	62000MW
Grèce	12/07/2004	5 millions	4500 MW
Réseau interconnecté européen	04/11/2006	15 millions	14GW
Nord et à l'Est de l'Inde	30 et du 31 juillet 2012	620 millions	48000MW
Turquie	31/03/2015	76 millions	33 450 MW

Chapitre II : Défauts dans les réseaux électriques

II.4.3. Evénements initiaux

Les événements initiaux sont divers et variés dans les différents blackouts. Ces événements peuvent provoquer directement le blackout ou aggraver les conditions du réseau qui pourront mener indirectement au blackout. Le court-circuit, la surcharge et la défaillance d'une protection sont des événements initiaux habituels. D'autres événements comme la perte d'un générateur peuvent aussi parfois être les événements initiaux. Les événements initiaux des blackouts analysés dans le tableau (...) [13]

Tableau 2.12. Cause typique du Blackout [18]

<i>Blackouts</i>	<i>Evènements initiaux</i>			
	Court-circuit	Surcharge	Défaillance d'une protection	Perte de générateur
<i>Algérie</i>		*		*
<i>Suède/Danemark</i>				*
<i>Italie</i>	*	*	*	
<i>Nord Est États-Unis et canada</i>	*			
<i>Grèce</i>	*			*
<i>Réseau interconnecté européen</i>		*		
<i>Nord et à l'Est de l'Inde</i>		*	*	
<i>Turquie</i>		*		

L'histogramme suivant représente les défaillances les plus graves conduisant à l'effondrement total du réseau électrique (Blackout).

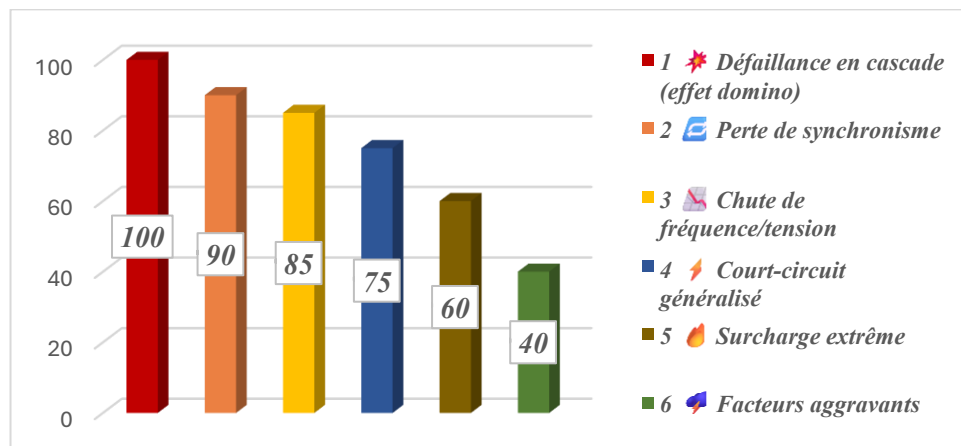


Figure 2.13. Les défaillances les plus graves conduisant à l'effondrement total du réseau électrique

II.5. Conclusion

Les perturbations et les défauts dans le réseau électrique représentent des enjeux majeurs pour la stabilité, la sécurité et la qualité de l'alimentation électrique. Ce chapitre a permis de mettre en lumière la diversité des phénomènes perturbateurs telle que les harmoniques, creux et surtensions, ... etc. Ainsi que les défauts typiques du réseau tels que les courts-circuits, les défauts d'isolement ou de mise à la terre. Chacun de ces éléments constitue une menace potentielle pour le bon fonctionnement des installations, la durée de vie des équipements, et parfois même la sécurité des personnes. Ainsi, la maîtrise des perturbations et des défauts ne peut être dissociée d'une gestion proactive du réseau, fondée sur la surveillance continue, la prévention et l'amélioration constante des dispositifs de protection.

La compréhension fine de ces phénomènes est pour les détecter rapidement, les localiser avec précision et les éliminer efficacement. C'est ce qui va être abordé dans le chapitre suivant.

***Chapitre III : Systèmes de
protection et de détection dans
le réseau électrique***

III. INTRODUCTION

La protection des réseaux électriques désigne l'ensemble des dispositifs de contrôle et de sécurité assurant la stabilité d'un réseau électrique. Ce dispositif est crucial pour éviter la détérioration inattendue d'équipements onéreux et assurer une fourniture constante d'électricité.

Ce chapitre vise à analyser précisément les mécanismes de protection et de détection employés dans les réseaux électriques, les normes de performance pertinentes, ainsi que les méthodes de supervision et de gestion avancées qui assurent une opération constante, stable et sans interruption du réseau.

III.1. Système de protection

III.1.1. Définition

La Commission Électrotechnique Internationale (C.E.I) définit un système de protection électrique comme l'ensemble des moyens techniques mis en œuvre pour détecter de manière rapide et fiable les défauts ainsi que les conditions de fonctionnement anormales dans un réseau électrique. L'objectif principal est de provoquer l'ouverture automatique des circuits concernés à l'aide d'appareils de coupure adaptés, tels que les disjoncteurs, afin d'assurer la sécurité des personnes, la protection des équipements et la stabilité du réseau [19].

III.1.2. Constitution d'un système de protection

Un système de protection efficace repose sur une coordination précise entre plusieurs éléments, qui forment une chaîne fonctionnelle cohérente:

- Les capteurs de mesure (de courant et de tension), qui recueillent en temps réel les grandeurs électriques nécessaires à l'analyse de l'état du réseau.
- Les relais de protection, qui surveillent en continu les signaux provenant des capteurs et prennent des décisions logiques en cas d'anomalie détectée, générant des ordres de déclenchement.
- Les dispositifs de coupure, tels que les disjoncteurs, interrupteurs-fusibles ou contacteurs-fusibles, qui exécutent physiquement la séparation des parties défectueuses du réseau pour éviter la propagation du défaut. [20]

Un exemple d'un système de protection pour une ligne HT est montré sur la Figure (3.1)

L'extrémité de la ligne possède un système de protection similaire. Dans le cas d'un défaut, les deux relais ont besoin de fonctionner, donc les deux disjoncteurs s'ouvrent et la ligne est mise hors service

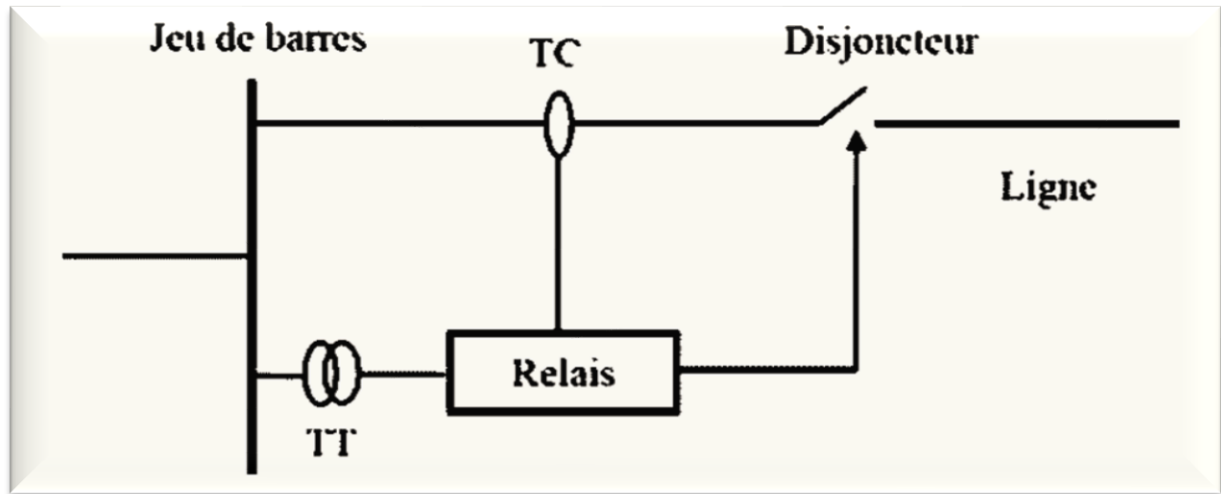


Figure 3.1. Chaîne principale de la protection électrique [20]

III.2. Objectifs de la protection

Un système de protection dans une installation électrique ne se limite pas à détecter les défauts et à provoquer leur élimination. Il répond à un ensemble d'objectifs fondamentaux visant à garantir à la fois la sécurité, la continuité de service et la préservation du matériel. Les fonctions principales peuvent être développées comme suit: [21]

- Assurer la sécurité des personnes et des biens
- Éviter la détérioration ou la destruction du matériel
- Garantir une continuité optimale de l'alimentation
- Éliminer les défauts par isolement sélectif
- Assurer la redondance par la protection de secours (backup)
- Protéger les équipements sensibles ou stratégiques
- Permettre l'adaptation temporaire des réglages de protection

III.3. Types de protection

Chaque type est adapté à une situation spécifique selon le type de défaut et l'emplacement dans le système électrique, parmi ces types on a :

III. 3. 1. Protections directionnelles

Le rôle fondamental des protections d'un réseau électrique est de détecter un défaut électrique et de mettre hors tension la portion du réseau qui est le siège de ce défaut - portion la plus limitée possible. La protection directionnelle permet de discriminer la partie du réseau en défaut mieux que ne le fait une protection à maximum de courant.

Elle est nécessaire en cas de défaut :

- En présence de plusieurs sources ;
 - Si boucles fermées ou câbles en parallèles ;
 - En neutre isolé pour les retours de courants capacitifs ;
 - Pour détecter le sens anormal d'écoulement d'énergie active ou réactive (machines tournantes).
- Ainsi, dans la situation d'un réseau à deux sources illustrées par la Figure (3.2), les protections à maximum de courant déclencheraient [22]

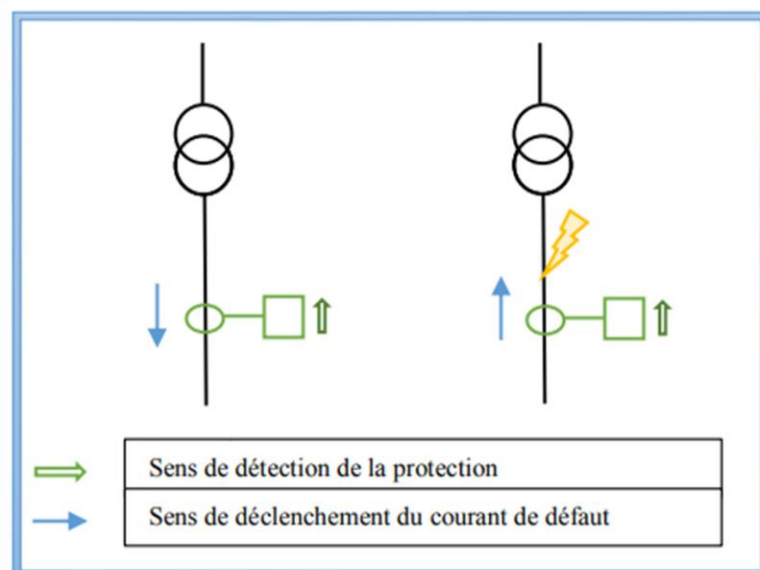


Figure 3.2. Principe des protections directionnelles [23]

III.3.2. Protection différentielle

Dans un circuit électrique, entre le générateur et le récepteur, les courants dans les conducteurs actifs (phase et neutre) ont une somme vectorielle nulle en fonctionnement normal.

- En distribution monophasée, le courant dans la phase est égal et opposé à celui du neutre.
- Si une différence de courant apparaît, cela indique un défaut d'isolement : une partie du courant fuit vers la terre.
- Un dispositif différentiel détecte cette différence de courant et ouvre automatiquement le circuit pour protéger les personnes et les équipements.
- Ce principe s'applique aussi aux systèmes polyphasés, où la somme des courants des phases doit également être nulle. [22]

Pour réaliser ces trois étapes la protection différentielle se décompose en quatre Parties

III.4. Qualités principales d'un système de protection

III.4.1. Rapidité

Les courts-circuits sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement et des performances prioritaire. Le temps d'élimination des courts-circuits comprend deux composantes principales : [21]

- Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes) .
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide), ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes.

III.4.2. Sélectivité

La sélectivité vise à isoler uniquement la partie défectueuse du réseau tout en maintenant l'alimentation des parties saines. Elle repose sur trois méthodes principales : [24]

- Sélectivité ampérométrique : basée sur la hiérarchie des courants de court-circuit. Plus le défaut est éloigné de la source, plus l'intensité diminue. On ajuste les seuils de déclenchement en conséquence.
- Sélectivité chronométrique : chaque protection agit avec un délai différent selon sa position. La plus proche du défaut agit la première.

- Sélectivité logique : permet une coordination instantanée entre protections via l'échange d'ordres logiques, réduisant les délais inutiles.

III.4.3. Sensibilité

La sensibilité d'un système de protection désigne sa capacité à détecter et réagir efficacement à des courants de court-circuit, même très faibles. Elle doit couvrir une large plage de fonctionnement, allant : [24] [22]

- Du courant de court-circuit maximal, bien connu car déterminé par le dimensionnement de l'installation ;
- Au courant minimal de défaut, souvent difficile à prévoir, survenant dans des conditions exceptionnelles.

On évalue généralement la sensibilité à partir du plus petit courant de défaut que la protection peut détecter et pour lequel elle déclenche de manière fiable.

III.4.4. Fiabilité

Les définitions présentées sont largement reconnues à l'échelle internationale dans le domaine de la protection électrique : [25]

- Une protection fonctionne correctement lorsqu'elle réagit de manière appropriée à un court-circuit, conformément aux attentes et à sa configuration.
- Un fonctionnement incorrect se manifeste de deux façons :
- Par un défaut de fonctionnement (absence de déclenchement alors qu'il était nécessaire).

III.5. Equipement de protection

III.5.1. Disjoncteurs

Un disjoncteur est un appareil destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée, aussi bien dans des conditions normales (comme la mise en service ou l'arrêt d'une ligne) que dans des situations anormales (telles que les courts-circuits ou les surtensions dues à la foudre).

Il constitue l'élément central de la protection dans les réseaux HTA, étant le seul capable d'interrompre les courants de court-circuit afin d'éviter des dommages matériels majeurs. [26]

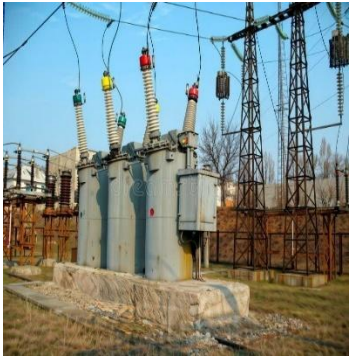
III.5.1.1. Caractéristiques de disjoncteurs

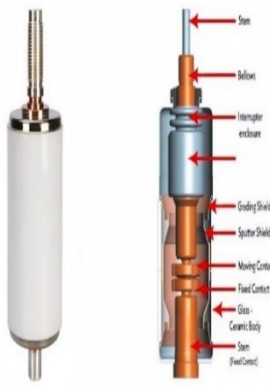
- Pouvoir de coupure : capacité à interrompre un courant de court-circuit élevé sans dommage.
- Temps de réponse : très rapide (de quelques millisecondes à quelques dixièmes de seconde), selon le type de défaut.
- Coût : plus élevé qu'un fusible, mais compensé par sa longévité et sa réutilisabilité.
- Maintenance : faible ; nécessite parfois des vérifications de bon fonctionnement.
-

III.5.1.2. Principaux types de disjoncteurs

Le tableau (3.1) montre les types principaux de disjoncteurs ainsi que leurs principes de fonctionnement et leurs zones d'application.

Tableau 3.1. Principaux types de disjoncteurs [26] [27]

<i>Type de disjoncteur</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>	<i>Applications courantes</i>	<i>Illustration</i>
<i>Disjoncteur à huile</i>	Utilise de l'huile pour isoler et éteindre l'arc grâce à la formation de gaz sous pression. Efficace, mais nécessite un entretien fréquent. <i>Tension d'utilisation</i> Moyenne et haute tension : 15kV à 230kV	*les postes de transformation HTA et HTB.	
<i>Disjoncteur à air comprimé</i>	Utilise de l'air sous pression pour souffler l'arc. Coupure rapide et efficace, mais bruyant et complexe à entretenir. <i>Tension d'utilisation</i> Haute et très haute tension : 72,5 kV jusqu'à 800 kV	*Réseaux HTB, *Installations industrielles à forte puissance, *Infrastructures nécessitant une coupure rapide avec haute fiabilité	

Disjoncteur à vide	La coupure se fait dans une ampoule sous vide, extinction rapide de l'arc. Très fiable, avec longue durée de vie des contacts et peu d'entretien. Tension d'utilisation Haute et très haute tension : 72,5 kV jusqu'à 800 kV	*Réseaux HTB, *Installations industrielles à forte puissance, *Infrastructures nécessitant une coupure rapide avec haute fiabilité.	
Disjoncteur à gaz SF6	Utilise le gaz SF₆, très efficace pour isoler et éteindre l'arc. Offre une coupure performante, dans un appareil compact, silencieux et quasiment sans entretien, avec une longue durée de vie.	*Réseaux HTA et HTB * postes GIS *Installations critiques à haute fiabilité. *Lignes THT	

III.5.2. Fusible

Les fusibles sont des dispositifs de protection essentiels dans les systèmes électriques, utilisés pour interrompre le courant en cas de surcharge ou de court-circuit. Ils assurent la protection des équipements et des personnes en coupant automatiquement le circuit lorsqu'un courant élevé traverse l'installation.

Le fonctionnement d'un fusible repose sur la fusion d'un conducteur calibré (le filament) lorsque le courant dépasse une valeur déterminée. Cette fusion ouvre le circuit et empêche le passage du courant, évitant ainsi des dommages plus graves. Les fusibles sont largement utilisés dans tous les niveaux de tension (basse, moyenne et haute tension), dans les réseaux industriels, résidentiels, ainsi que dans les systèmes embarqués. [27]

III.5.2.1. Caractéristiques des fusibles

Les principales caractéristiques des fusibles sont les suivantes :

- Haut pouvoir de coupure : capacité à interrompre des courants de défaut élevés sans danger.
- Temps de réponse rapide : leur intervention instantanée limite les dommages aux équipements sensibles.

- Simplicité et fiabilité : sans pièces mobiles, ils offrent une grande fiabilité de fonctionnement.
- Faible coût et maintenance nulle : ce qui les rend attractifs pour de nombreuses applications.
- Sélectivité : possibilité d'agir de manière ciblée pour isoler uniquement la partie défectueuse du circuit. [28]

III.5.2.2. Principaux types de fusibles

Tableau 3.2. Principaux types de fusible [28] [27]

Type	Fonctionnement principale	Illustration
Fusibles gG	*Fusibles à usage général : Ces fusibles offrent une protection contre les courts-circuits et les surcharges. Ils sont capables de supporter des courants instantanés élevés. *Utilisés dans des circuits nécessitant une protection contre différents types de défauts électriques.	
Fusibles aM	*Fusibles de protection des moteurs : Ces fusibles sont spécifiquement conçus pour protéger les moteurs électriques. Permet de résister aux pics de courant au démarrage sans se couper. *Utilisés principalement dans les circuits de moteurs pour garantir la protection contre les courts-circuits sans interruption du courant lors du démarrage du moteur.	
Fusibles AD	*Fusibles à élément double avec retard : Ces fusibles offrent une protection contre les surcharges et les courts-circuits, tout en permettant un délai temporaire pour supporter les courants de démarrage. Le retard permet d'éviter la rupture du fusible pendant les démarrages ou les pics de courant temporaires. *Utilisés dans des applications nécessitant une tolérance aux courants de démarrage.	

Fusibles UR	<i>*Fusibles ultra-rapides</i> : Ces fusibles sont caractérisés par une réponse très rapide aux courts-circuits ou aux surcharges. Ils Offrent une protection instantanée pour les circuits sensibles. <i>*Utilisés dans les circuits nécessitant une réponse immédiate, comme les équipements électroniques</i>	
--------------------	--	---

III.5.3. Relais de protection

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent un ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.) et les transmettent à un ordre binaire (fermeture ou ouverture d'un circuit de commande) lorsque ces informations reçues atteignent les valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées à l'avance.

Donc le rôle des relais de protection est de détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel que le court-circuit, variation de tension. ...etc. Un relais de protection détecte l'existence de conditions anormales par la surveillance continue, et détermine quels disjoncteurs à ouvrir et alimente les circuits de déclenchement. [26]

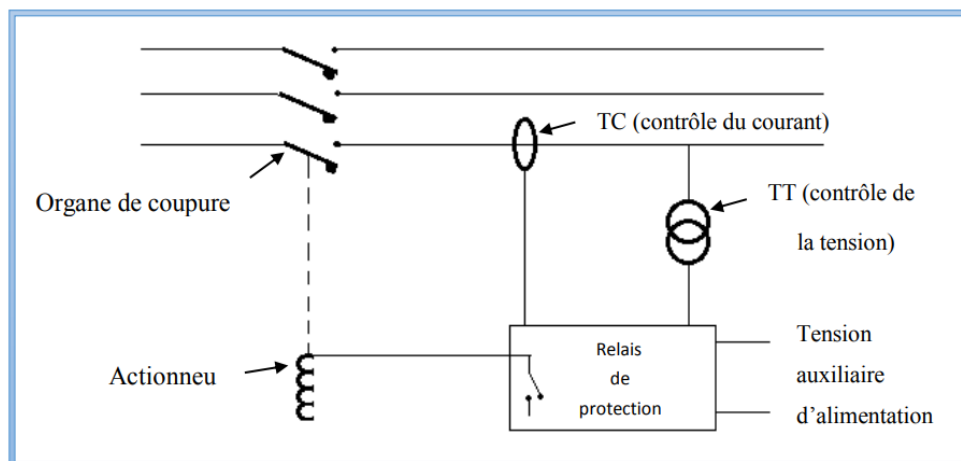


Figure 3.3. Raccordement d'un Relais de protection [26]

Les relais peuvent être classés en trois familles selon l'organigramme suivant :

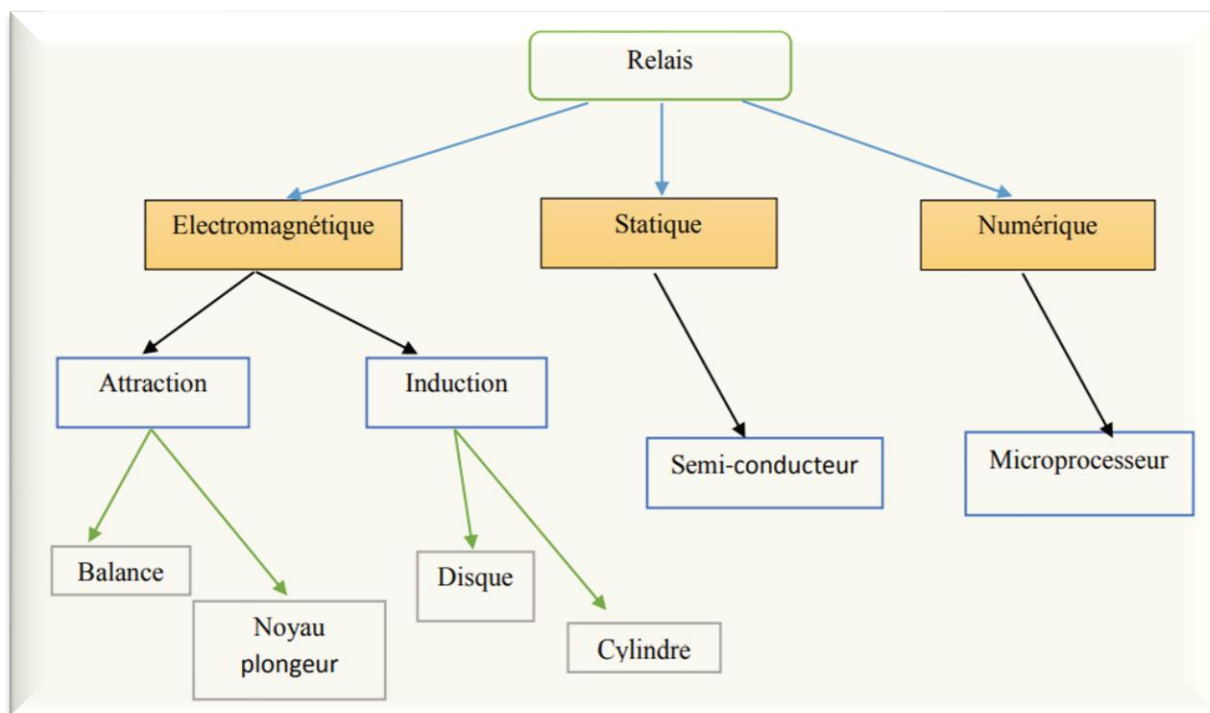


Figure 3.4. Schéma bloc de différent type des Relais [21]

III.5.3.1. Types de relais

Le tableau (3.3) montre les types principaux de disjoncteurs ainsi que leurs principes de fonctionnement et leurs zones d'application.

Tableau 3.3. Types de Relais de protection [26] [27]

Type de relais	Principe de fonctionnement	Applications typiques
Relais électromécanique	*Utilise un champ magnétique généré par un courant traversant une bobine pour actionner mécaniquement des contacts. *Applications typiques Anciennes installations, Systèmes où la précision n'est pas critique.	
Relais statique	*Fonctionne à l'aide de composants électroniques (diodes, transistors, amplificateurs) sans pièces mobiles. *Applications typiques Réseaux industriels modernes, Tableaux électriques moyens, Remplacements de relais électromécaniques.	

Relais numérique	*Analyse les signaux via un microprocesseur après conversion analogique-numérique (ADC). *Applications typiques Réseaux haute tension, Postes intelligents, Smart grid, Systèmes d'automatisation avancés	
-------------------------	--	---

III.5.3.2. Comparaison entre les relais

Tableau 3.4. Comparaison entre les relais [25] [20]

Type	Avantages	Inconvénients
Relais électromécanique	- Simplicité de conception - Facilité de visualisation du fonctionnement - Coût initial faible	- Temps de réponse lent - Usure mécanique - Nécessite une maintenance régulière - Moins précis
Relais numérique	- Haute précision - Multifonction (protection, mesure, enregistrement) - Programmable - Intégration dans les systèmes SCADA	- Coût initial plus élevé - Complexité de configuration - Dépendance à l'alimentation auxiliaire
Relais statique	*Temps de réponse très rapide *Grande fiabilité *Précision élevée *Moins de maintenance	*Coût plus élevé *Sensible aux surtensions et parasites *Dépendance à la température *Moins flexible qu'un relais numérique

III.5.4. Transformateur de mesure

Les transformateurs de mesure (transformateurs de courant – TC et transformateurs de tension – TT) sont des éléments essentiels des systèmes de protection et de comptage dans les réseaux électriques. Leur rôle principal est de ramener les grandeurs électriques (courant et tension) à des niveaux standards et sûrs, compatibles avec les équipements de mesure, de protection et de comptage. [27]

III.5.4.1. Caractéristiques des transformateurs

Ils assurent les fonctions suivantes :

- Mesurer les grandeurs électriques (intensité, tension) sans perturber le circuit principal.
- Alimenter les dispositifs de comptage d'énergie et de protection (relais, disjoncteurs, etc.) avec des signaux proportionnels.
- Isoler électriquement les circuits de mesure et de protection du réseau haute tension pour garantir la sécurité des équipements et du personnel.
- Normaliser les signaux à des valeurs compatibles (par exemple : 100 V, 5 A) facilitant l'utilisation universelle des appareils.
- Fournir des fonctions annexes comme la surveillance, le déclenchement automatique, ou encore la synchronisation des équipements. [22]

III.5.4.2. Types des transformateurs

Tableau 3.4. Types des transformateurs [22] [21]

<i>Types</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>	<i>Illustration</i>
<i>Transformateur de courant (TC)</i>	*Est un transformateur de mesure conçu pour réduire un courant primaire élevé à un courant secondaire (1 A ou 5 A). *Il permet l'alimentation des relais de protection et des appareils de mesure *assurant l'isolement électrique et la sécurité des équipements.	

Transformateur de potentiel (TP)	*Est un transformateur de mesure destiné à réduire une tension élevée du réseau à une valeur normalisée plus faible (généralement 100 V ou $100/\sqrt{3}$ V). * Il permet ainsi l'alimentation sûre des instruments de mesure et de protection sans exposer ces équipements à des tensions dangereuses.	
---	--	---

III.5.5. Parafoudre

Un parafoudre est un dispositif de protection utilisé pour protéger les équipements électriques et électroniques contre les surtensions transitoires, souvent causées par la foudre ou des perturbations industrielles. Le parafoudre est composé des résistances non linéaires en carbure de silicium, capables de limiter rapidement les surtensions [29]

III.5.5.1. Fonctionnement principale

Le parafoudre HTA agit en déviant les surtensions transitoires vers la terre afin de protéger les équipements sensibles. Son fonctionnement repose sur la conduction temporaire de l'énergie de surtension lorsque la tension dépasse un certain seuil : [28] [29]

1. En régime normal :

La tension appliquée reste inférieure au niveau d'amorçage, les éléments du parafoudre (résistances non linéaires et éclateurs) restent non-conducteurs → aucun courant ne circule.

2. En cas de surtension :

La tension dépasse le seuil d'amorçage → un arc électrique s'amorce à l'intérieur du tube en fibre contenant un des éclateurs.

3. Déclenchement du mécanisme de protection :

L'arc décompose la fibre, générant un gaz peu conducteur. Ce gaz est expulsé violemment à travers l'ouverture inférieure du tube → cela provoque l'extinction rapide de l'arc (en moins d'une demi-période).

4. Retour à l'état initial :

Une fois la surtension dissipée, le parafoudre cesse de conduire, et le système revient à son état normal sans endommager les équipements connectés.

Tableau 3.5. Principaux types de parafoudre [30] [29]

Type	Principe de fonctionnement	Tension visée	Illustration
Parafoudres à éclateurs	Une distance d'air est maintenue entre deux électrodes. Quand la tension dépasse un seuil, un arc électrique se crée, permettant de dévier la surtension. Utilisation : Anciennement utilisés en distribution, de moins en moins fréquents	HT/MT	
Parafoudres à cornes	Deux électrodes en forme de cornes s'écartent vers le haut. Lors d'une surtension, un arc s'amorce à la base et remonte, permettant l'extinction naturelle. Utilisation : Protection des lignes aériennes.	HT	

Parafoudres à valve	(À oxydes métalliques + éclateurs) : Combine un éclateur et un élément non-linéaire, souvent en carbure de silicium. Le courant est limité après l'amorçage de l'éclateur. Utilisation : Ancienne génération de parafoudres stationnaires.	HT	
Parafoudres à oxydes de zinc (sans éclateur)	Composés de varistances en oxyde de zinc, ils présentent une très forte non-linéarité : faible courant en tension normale, forte conduction en surtension.	BT/MT/HT	
Parafoudres pour basse tension	Type 1 : Pour protection principale en tête d'installation (parafoudre éclateur ou ZnO). Type 2 : Pour tableau électrique domestique (généralement ZnO). Type 3 : Pour équipements sensibles (ordinateur, télé, etc.).	BT	 T1  T2  T3

III.5.6. Mise à la terre

La mise à la terre est une opération qui consiste à connecter intentionnellement un point d'un circuit électrique (généralement les masses métalliques des équipements) à la terre, afin de garantir un potentiel électrique de référence (0 volt). Elle permet d'évacuer les courants de défaut vers le sol en toute sécurité. [21]

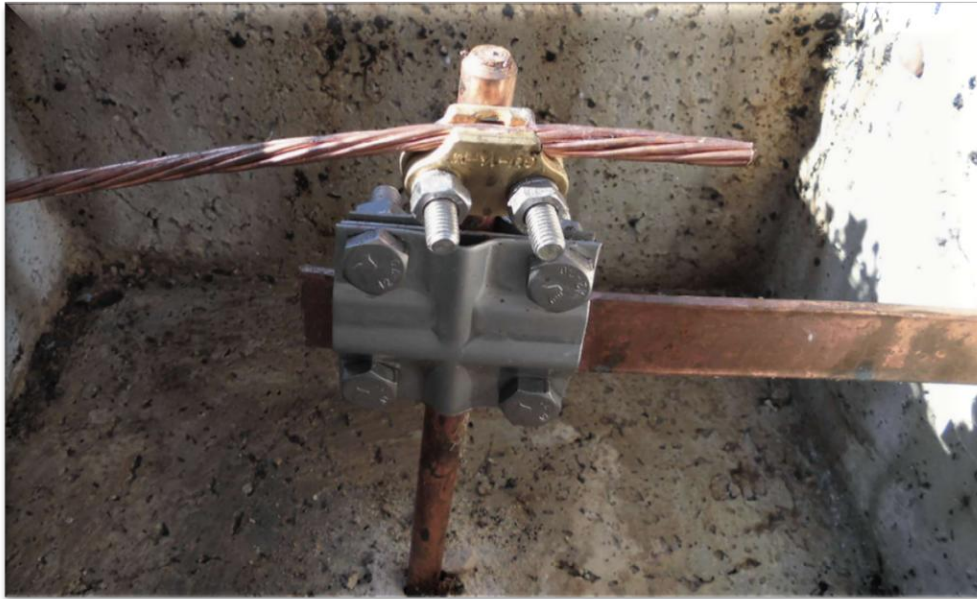


Figure 3.5. Mise à la terre [24]

III.5.6.1. Principe de fonctionnement

1. Protection des personnes : en cas de défaut d'isolement, la mise à la terre permet de dériver le courant de fuite, réduisant ainsi le risque d'électrocution.
2. Déclenchement des dispositifs de protection : facilite l'intervention des disjoncteurs ou fusibles en cas de court-circuit entre phase et masse.
3. Protection des équipements : contre les surtensions dues à la foudre ou aux phénomènes transitoires.
4. Stabilisation du potentiel du réseau : surtout dans les réseaux HT ou les systèmes industriels. [24]

III.5.6.2. Types de mise à la terre

1. TT (Terre-Terre)

- Neutre du transformateur relié à la terre.
- Masses de l'installation reliées à une prise de terre indépendante.
- Utilisé principalement dans les réseaux domestiques.
- Technique de protection des personnes : mise à la terre des masses, associées à l'emploi de dispositifs différentiels à courant résiduel,
- Technique d'exploitation : coupure au premier défaut d'isolement. [31] [32]

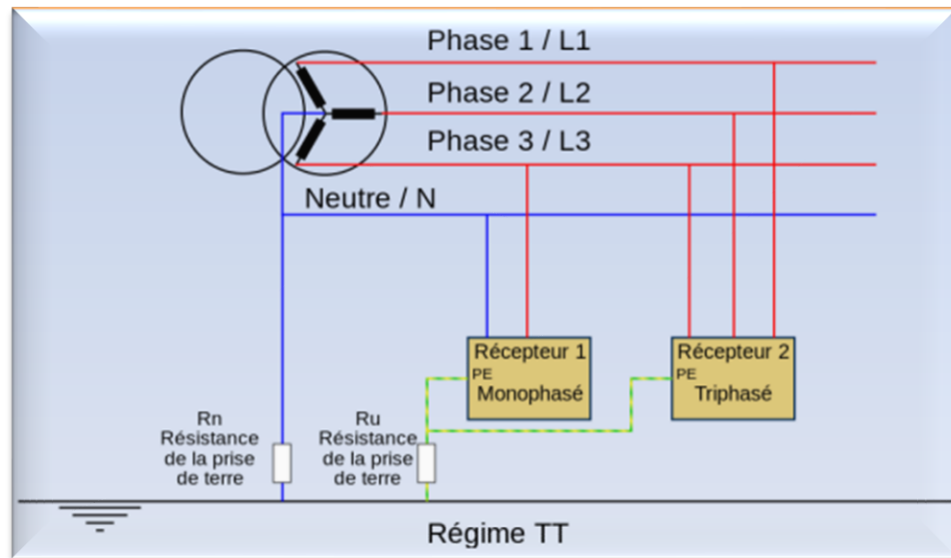


Figure 3.6 Mise à la terre « Régime TT » [31]

2. IT (Isolé-Terre)

- Neutre non relié à la terre ou relié via une impédance.
- Masses mises à la terre.
- Utilisé dans les hôpitaux ou les installations industrielles critiques pour assurer la continuité de service.

➤ Technique de protection :

- Interconnexion et mise à la terre des masses,
- Signalisation du premier défaut par contrôleur permanent d'isolement,
- Coupure au deuxième défaut par protection contre les surintensités (disjoncteurs ou fusibles) ;

➤ Technique d'exploitation :

- Surveillance du premier défaut d'isolement,
- Recherche et élimination obligatoires du défaut,
- Coupure en présence de deux défauts d'isolement simultanés.

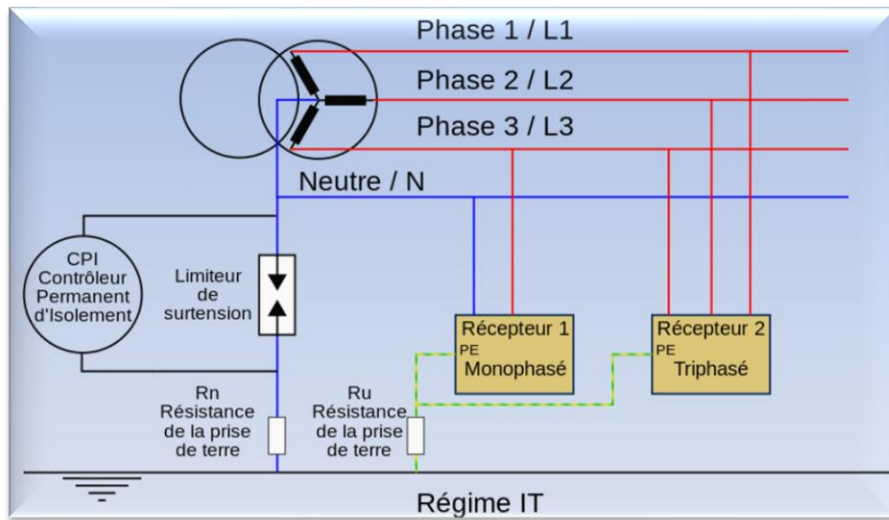


Figure 3.7. Mise à la terre « Régime IT » [31]

3. *TN (Terre-Neutre)*

- Le neutre du transformateur est relié directement à la terre.
- Les masses métalliques des équipements sont reliées à ce même point de terre, via un conducteur de protection (PE ou PEN).

Il y a trois variantes :

➤ *TN-S : conducteur neutre et conducteur de protection séparés.*

Le conducteur PE (protection) et le neutre N sont séparés tout au long de l'installation. Elle est plus fiable et sécurisée, car le PE ne transporte pas de courant en fonctionnement normal. Ainsi que la compatibilité avec les dispositifs différentiels.

Utilisation :

- Bâtiments résidentiels récents
- Tertiaire, écoles, hôpitaux
- Norme souvent imposée en zones urbanisées

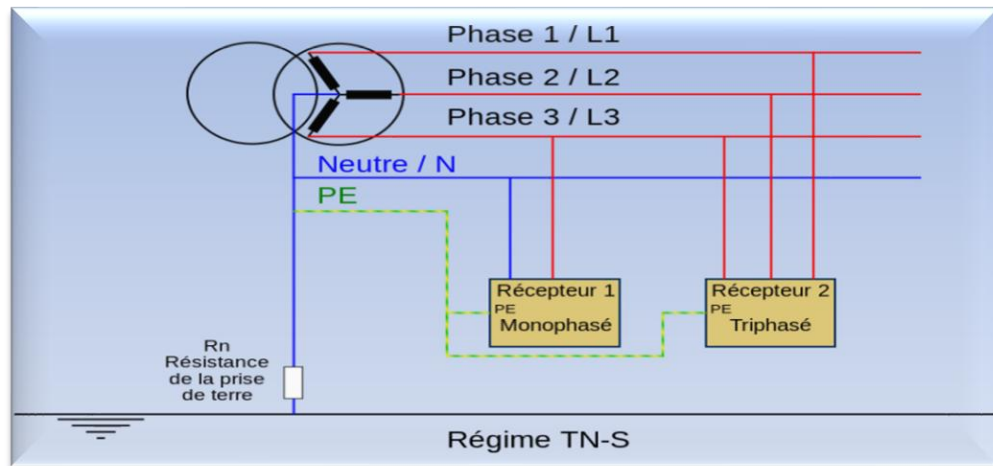


Figure 3.7. Mise à la terre « Régime TN-S » [31]

➤ ***TN-C : un seul conducteur pour le neutre et la protection (PEN).***

Le PE (protection) et N (neutre) sont combinés dans un seul conducteur : le PEN. Ce conducteur PEN transporte à la fois le courant de défaut et le courant neutre.

- Moins de câbles : installation plus économique
- Simple à câbler sur de longues distances

Utilisation :

- Anciennes installations
- Réseaux industriels ou ruraux en amont (HT/MT → BT)

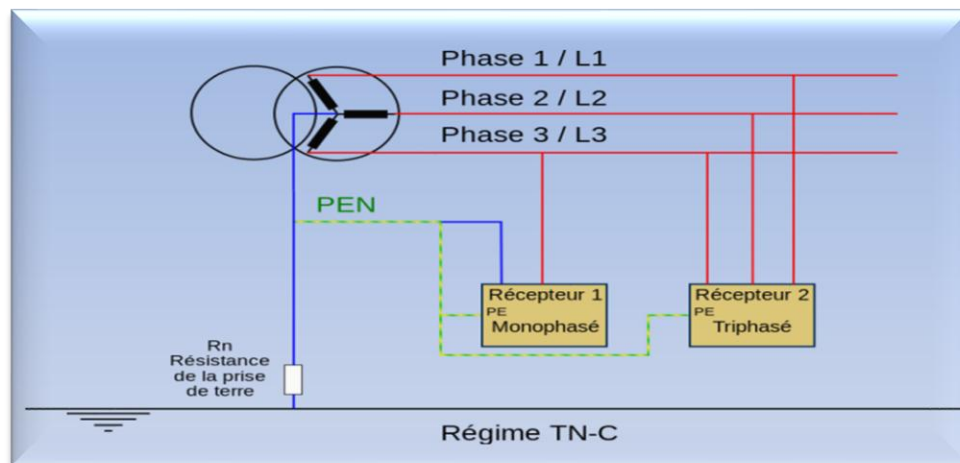


Figure 3.8. Mise à la terre « Régime TN-C » [31]

➤ *TN-C-S : combinaison des deux précédents.*

PEN combiné jusqu'à un certain point (souvent jusqu'au tableau principal). Ensuite, séparation en PE + N pour le reste de l'installation. [32]

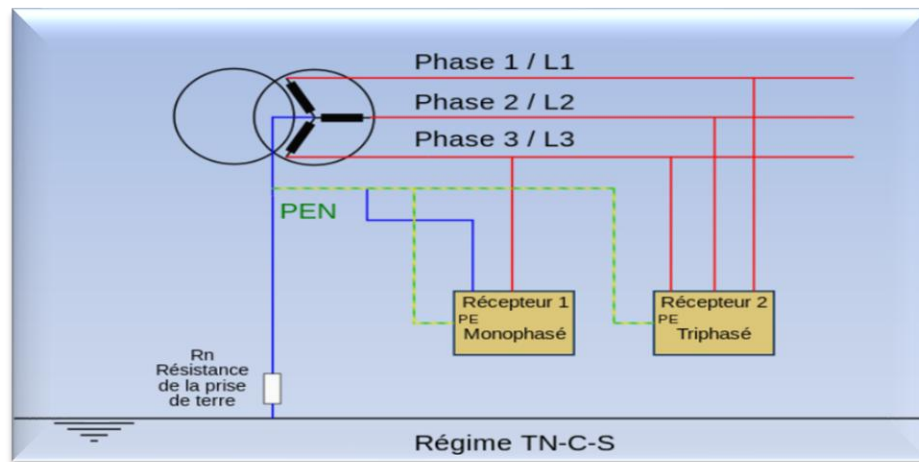


Figure 3.9. Mise à la terre « Régime TN-C-S » [31]

III.6. Détection classification et la localisation des défauts

La détection, la classification et la localisation des défauts font référence à l'ensemble des procédés techniques et analytiques utilisés pour identifier un défaut dans un réseau électrique, en déterminant sa nature spécifique, sa localisation en précisant sa position géographique ou électrique. Ces trois étapes essentielles sont interdépendantes dans la gestion contemporaine des réseaux de distribution et de transport car elles influent directement sur la rapidité, l'efficacité et la pertinence des actions correctives [33].

III.6.1. Détection et isolation de défaut

La détection des défauts dans un réseau électrique implique la surveillance constante des paramètres électriques tels que la tension, le courant et la puissance, dans le but de repérer toute variation notable par rapport aux valeurs standards de fonctionnement. Cette phase repose essentiellement sur l'utilisation de dispositifs de protection tels que les relais de surintensité, les relais différentiels et les relais de distance. L'émergence d'une imperfection est habituellement identifiée par des phénomènes électriques inhabituels comme une baisse soudaine de la tension ou une augmentation subite du courant.

L'isolation du défaut est effectuée immédiatement après sa détection. Son but est la séparation rapide de la section du réseau touchée afin de prévenir une détérioration des perturbations et de maintenir l'intégrité du reste du système. En général, cette procédure est automatisée à l'aide de dispositifs de coupure tels que des disjoncteurs ou des interrupteurs, qui sont contrôlés par des relais de protection. La rapidité, la fiabilité de la détection et de l'isolation des défauts revêtent une importance cruciale afin de minimiser leur impact à la réduction des risques de dommages aux équipements et de garantir la continuité du service électrique pour les utilisateurs non touchés. [33] [34]

III.6.2. Classification des défauts

La classification des défauts apparaît après la détection et sert à identifier le type d'anomalie aperçu. Elle se base sur l'étude des indices électriques observés durant le défaut. Les défauts sont regroupés en différentes catégories selon certains critères :

- Selon la configuration : défaut monophasé, biphasé, triphasé, ou à la terre.
- Selon le comportement : défaut transitoire (qui disparaît spontanément) ou permanent (qui nécessite une intervention physique).
- Selon la cause probable : court-circuit dû à une dégradation d'isolant, rupture de conducteur, contact avec des objets étrangers, phénomènes climatiques, etc.

La classification est indispensable pour choisir les stratégies de rétablissement appropriées et adapter les dispositifs de protection. Par exemple, un défaut monophasé transitoire sur un réseau rural isolé peut être toléré temporairement, tandis qu'un défaut triphasé permanent sur un réseau urbain nécessite une coupure immédiate.

Avec l'émergence des technologies avancées, des méthodes de classification automatique basées sur des techniques d'apprentissage machine commencent à être mises en œuvre, ce qui permet d'obtenir une précision accrue et une réactivité améliorée. [34]

III.6.3. Localisation des défauts

La localisation des défauts consiste à déterminer le point précis du réseau où le défaut s'est produit. Cette information est essentielle pour organiser rapidement les opérations de maintenance, réduire les temps d'interruption, et minimiser les pertes économiques.

Plusieurs méthodes de localisation existent, notamment :

- Méthodes basées sur les mesures d'impédance : Estimation de la distance au défaut par l'analyse des variations de tension et de courant au point de mesure.
- Techniques de temps de vol (Time Domain Reflectometry, TDR) : Utilisation de signaux transitoires générés par le défaut pour estimer la position en fonction du temps de propagation.
- Méthodes basées sur la synchronisation temporelle : Exploitation des PMU (Phasor Measurement Units) pour analyser la propagation des ondes de défaut à différents points du réseau.
- Approches basées sur l'intelligence artificielle : Application d'algorithmes de classification et de régression pour estimer l'emplacement des défauts à partir de vastes ensembles de données. [35]

Méthode de TAKAGI_ Localisation numérique de défauts :

Cette méthode est basée sur l'utilisation des mesures de la composante fondamentale des signaux des courants et des tensions d'une seule extrémité de la ligne lors d'un défaut. La méthode repose sur :

- L'utilisation des valeurs transitoires (et non en régime permanent).
- L'idée est de calculer la distance au point de défaut à partir de ces données [36].

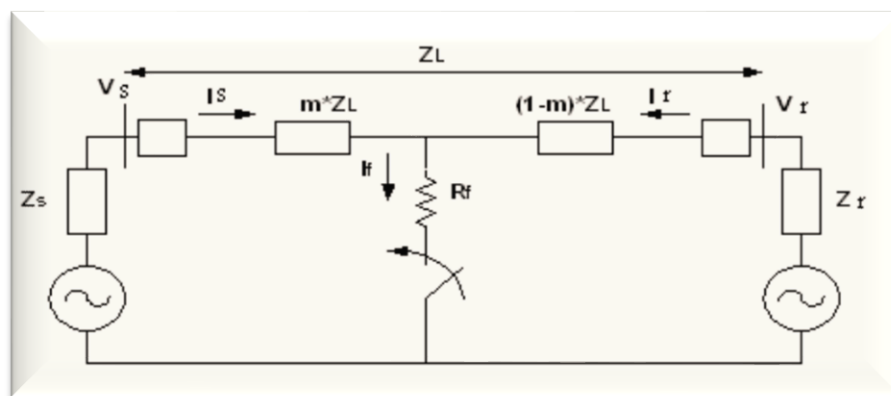


Figure 3.10. Schéma équivalent d'une ligne à la présence d'un défaut [36]

Avec :

V_s : la tension à l'entrée de la ligne.

I_s : le courant à l'entrée de la ligne.

V_r : la tension à la sortie de la ligne.

I_r : le courant à la sortie de la ligne.

R_f : la résistance du défaut.

I_f : le courant du défaut

Z_L : l'impédance totale de la ligne entre le jeu de barre S et R.

m : distance du défaut.

Z_s et Z_r : impédances respectives des sources « GS » et « GR ».

A partir de la Figure (3.10) on peut écrire l'équation suivante :

$$V_S = m \cdot Z_L \cdot I_S + R_f \cdot I_f \quad (3.1)$$

La valeur de l'impédance Z_{FS} mesurée à partir de S (impédance de la boucle en défaut vue de S) peut être déterminée en divisant (3.1) par le courant mesuré ΔI_S .

$$Z_{FS} = V_S / I_S = m \cdot Z_L + R_f \cdot (I_f / I_S) \quad (3.2)$$

$$\text{Avec} \quad \Delta I_S = I_S - I_L \quad (3.3)$$

Où

I_S : le courant à la source GS après le défaut.

I_L : le courant à la source GS avant le défaut

➤ **Pour un défaut monophasé à la terre :** (phase a-g) le calcul est comme suit :

$$I_R = 3 \cdot I_0 = I_a + I_b + I_c \quad (3.5)$$

$$K_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3 \cdot Z_{1L}} \quad (3.6)$$

$$m = \frac{I_m (V_S \cdot \Delta I_S^*)}{I_m (Z_{1L} \cdot I_S \cdot \Delta I_S^*)} \quad (3.7)$$

➤ **Pour un défaut biphasé à la terre (a-b)**

$$m = \frac{I_m (V_{Sab} \cdot \Delta I_S^*)}{I_m (Z_{1L} \cdot I_{Sab} \cdot \Delta I_S^*)} \quad (3.8)$$

➤ **Pour un défaut triphasé à la terre (a-b-c)**

$$m = \frac{I_m (V_{Sab} \cdot \Delta I_S^*)}{I_m (Z_{1L} \cdot I_{Sab} \cdot \Delta I_S^*)} \quad (3.9)$$

La précision de la localisation dépend fortement de la densité des capteurs installés sur le réseau, de la qualité des mesures et de la rapidité des algorithmes d'analyse. Une localisation efficace permet de réduire significativement les temps d'intervention, d'améliorer la disponibilité du réseau, et de limiter les coûts d'exploitation. [29]

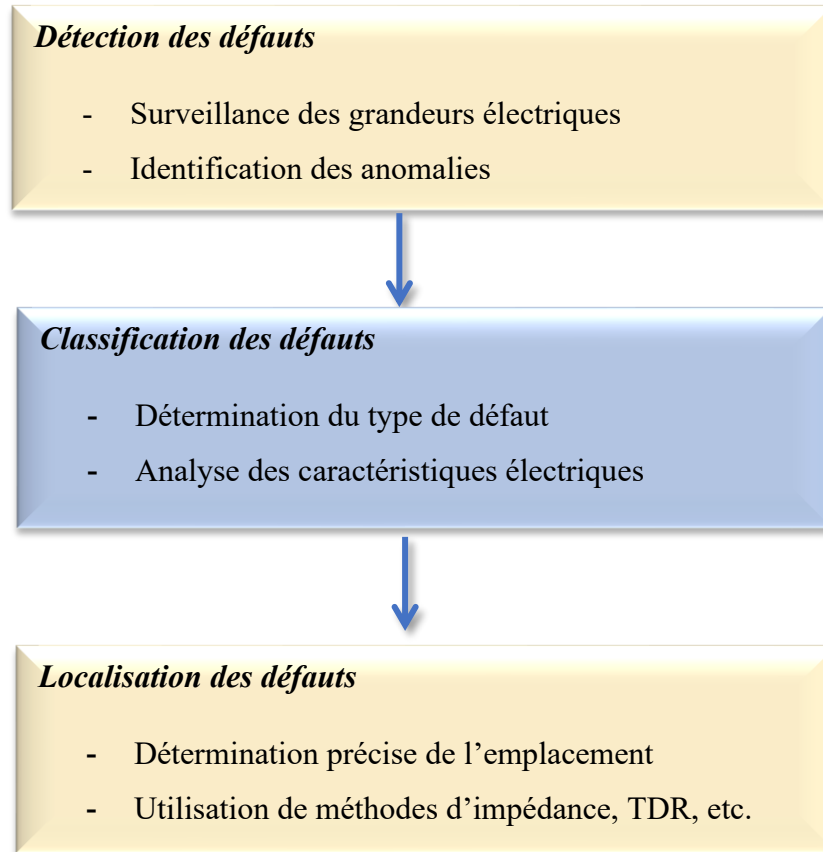


Figure 3.11. Organigramme de détection, classification et localisation des défauts

III.7. Systèmes de surveillance moderne dans RE

Les systèmes de surveillance modernes dans le Réseau électrique désignent l'ensemble des dispositifs technologiques et des architectures de communication destinés à observer, analyser et contrôler en temps réel les états électriques du réseau de transport. Ils constituent un pilier fondamental pour assurer la sûreté, la fiabilité, la stabilité et l'efficacité opérationnelle des infrastructures électriques à grande échelle.

Contrairement aux méthodes classiques fondées sur des inspections périodiques ou des mesures ponctuelles, les systèmes modernes reposent sur une surveillance continue, fine et dynamique des différentes grandeurs électriques telles que la tension, le courant, la fréquence, et les angles de phase. Ils permettent de détecter rapidement toute anomalie, de suivre l'évolution

des phénomènes transitoires, de prévoir les risques de défaillance, et d'optimiser la gestion du réseau en temps réel. [37]

Ces systèmes intègrent plusieurs composants intelligents, tels que les capteurs synchronisés (PMU), les dispositifs électroniques intelligents (IED), les unités de contrôle local (RTU, FRTU) ainsi que des plateformes de supervision centralisée (SCADA, WAMS). Grâce à la collecte massive de données, à leur transmission rapide et à leur traitement automatique, il devient possible de construire une image précise et évolutive de l'état du réseau, appelée parfois "modèle temps réel".

Le développement des systèmes de surveillance modernes s'inscrit dans une dynamique de transition énergétique et de digitalisation accrue des réseaux électriques, où l'intégration des énergies renouvelables intermittentes, la variabilité de la charge et les nouvelles menaces cybernétiques exigent une visibilité et une réactivité sans précédent. [38]

III.7.1. Objectifs

Les systèmes de surveillance modernes dans le Réseau électrique poursuivent plusieurs objectifs stratégiques qui répondent aux exigences croissantes de fiabilité, de sécurité et d'efficacité des infrastructures électriques.

- Suivi continu de l'état du réseau
- Détection des anomalies en temps réel
- Analyse prédictive permettant d'anticiper les risques de défaillance avant qu'ils ne surviennent.
- Suivi des performances des infrastructures
- Optimiser l'exploitation du réseau
- Favoriser l'intégration des énergies renouvelables
- Permettre une maintenance prédictive
- Soutenir la prise de décision stratégique [37]

III.7.2. Système de contrôle

Les systèmes de contrôle et de détection jouent un rôle essentiel dans la surveillance active et la gestion efficace des réseaux électriques de transport. Ils sont conçus pour collecter en temps réel des données critiques, détecter les anomalies ou défauts, isoler les sections affectées, et

permettre une prise de décision rapide, souvent automatisée, pour préserver la stabilité et l'intégrité du réseau.

Ces systèmes sont constitués de plusieurs équipements complémentaires, chacun jouant un rôle spécifique dans la chaîne de supervision :

III.7.2.1. FTU (Feeder Terminal Unit)

La FTU (Feeder Terminal Unit) est un équipement électronique intelligent installé sur les départs des lignes moyenne tension (généralement entre 11 kV et 36 kV) dans les réseaux de distribution électrique. Elle permet de surveiller, protéger, enregistrer, et commander à distance les éléments du réseau (disjoncteurs, interrupteurs, sectionneurs), tout en communiquant en temps réel avec les centres de contrôle [39]

➤ *Principe de fonctionnement*

Le FTU fonctionne comme un système intelligent de surveillance, protection et commande sur les lignes moyenne tension. Il agit en interface entre le réseau électrique et le centre de contrôle, tout en étant capable d'agir de manière autonome en cas de défaut. Les étapes de fonctionnement du FTU sont illustrés dans le tableau (3.6).



Figure 3.12. FTU (Feeder Terminal Unit) [39]

Tableau 3.6. Étapes de fonctionnement d'un FTU [39]

Étape	Fonction
<i>Acquisition des données</i>	Mesure en continu des tensions (VT) et courants (CT) par phase.
<i>Détection des défauts</i>	Analyse des valeurs mesurées → déclenchement si seuil dépassé (surtension, court-circuit, etc.).
<i>Commande locale/distance</i>	Le FTU peut ouvrir/fermer l'interrupteur manuellement ou via SCADA.
<i>Transmission des infos</i>	Envoi des mesures et alarmes vers le centre de contrôle (SCADA/DMS).
<i>Enregistrement des événements</i>	Journalisation des défauts (heure, type, phase touchée, valeurs) pour diagnostic.

III.7.2.2. FRTU (Feeder Remote Terminal Unit)

La FRTU est une unité terminale distante spécialement conçue pour les réseaux de distribution moyenne tension. Elle sert à superviser, contrôler, mesurer et automatiser les équipements sur le terrain (interrupteurs, disjoncteurs, sectionneurs), tout en assurant une communication en temps réel avec le centre de contrôle (SCADA/DMS). [40]



Figure 3.13. FRTU (Feeder Remote Terminal Unit) [40]

➤ *Principe de fonctionnement de la FRTU*

Tableau 3.7. Principe de fonctionnement de la FRTU [40]

<i>Étape</i>	<i>Fonction principale</i>
<i>Acquisition des données</i>	Récupère les mesures de courant, tension, état des équipements (ouvert/fermé, défauts).
<i>Surveillance et détection</i>	Analyse en temps réel les valeurs et détecte les anomalies (court-circuit, défaut à la terre).
<i>Commande locale/distance</i>	Reçoit des ordres manuels (local) ou SCADA (distance) pour ouvrir/fermer les équipements.
<i>Communication avec SCADA</i>	Transmet toutes les données, alarmes et événements vers le centre de contrôle en temps réel.
<i>Automatisation et coordination</i>	Exécute des scénarios automatiques (isolation du défaut, réalimentation, coordination avec autres FRTU).

III.7.2.3. IED (Intelligent Electronic Device)

Un dispositif électronique intelligent (IED) est un appareil intégré doté d'un microprocesseur et de capacités logicielles avancées, utilisé dans les réseaux électriques modernes (postes de distribution et de transport) pour les fonctions de contrôle, de protection, de mesure et de supervision.

Les IED_s collectent et analysent les données du réseau électrique, prennent des décisions locales (par exemple, l'ouverture ou la fermeture des disjoncteurs) ou transmettent les informations aux centres de contrôle supérieurs (tels que les systèmes SCADA), renforçant ainsi l'automatisation, l'efficacité et la sécurité du réseau. [41]

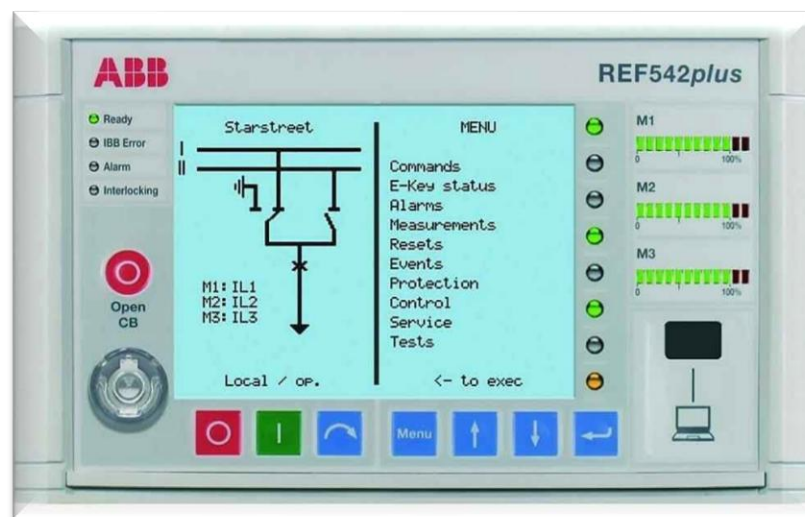


Figure 3.14. IED (Intelligent Electronic Device) [41]

➤ Principe de fonctionnement d'un IDE

Tableau 3.8. Principe de fonctionnement d'un IDE [41] [42]

Étape	Fonction principale
Acquisition des signaux	Reçoit les signaux électriques (courant, tension) via des transformateurs (CT/VT).
Traitement et analyse	Numérise les signaux et les analyse pour détecter anomalies ou conditions de défaut.
Protection	Déclenche les actions de protection (ex : ouverture du disjoncteur) en cas de défaut.
Mesure et supervision	Fournit des mesures précises (U, I, P, Q, f, etc.) aux systèmes SCADA/DMS.
Communication	Échange des données avec d'autres IED ou le centre SCADA via protocoles (IEC 61850, Modbus...).
Automatisation locale	Exécute des logiques programmées (interverrouillage, séquences de manœuvre, etc.).
Journalisation et diagnostics	Enregistre les événements, défauts, et oscillographies pour analyse post-incident.

III.7.2.4. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

Le système SCADA est un système informatique interconnecté via un réseau de communication, destiné à surveiller, contrôler et gérer à distance les processus industriels, tels que la production de gaz, d'électricité, d'eau et les réseaux de transport. Il permet une supervision centralisée des installations industrielles, facilitant ainsi la collecte des données et le contrôle des équipements répartis sur différents sites géographiques. [42]

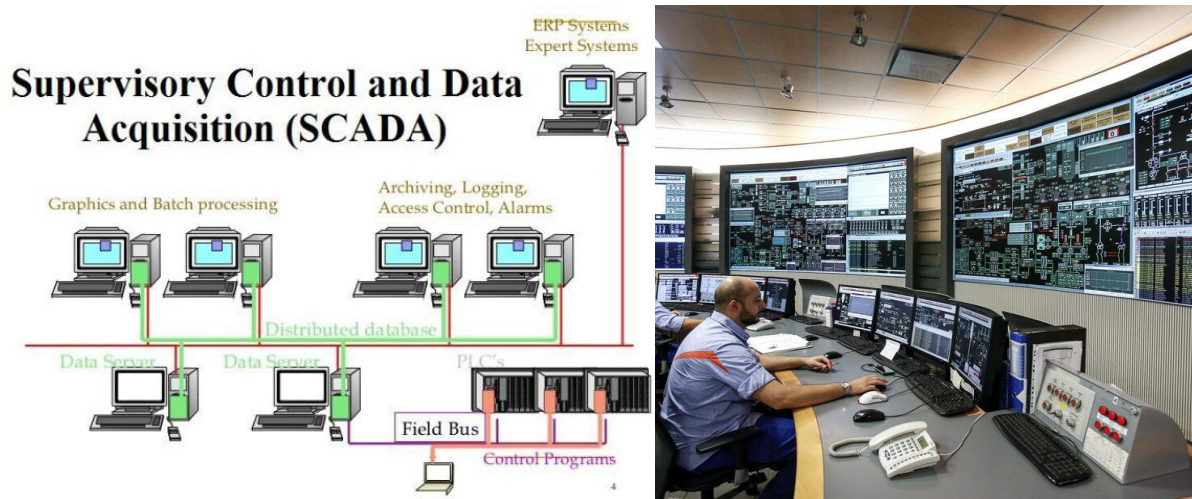


Figure 3.15. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [43]

➤ *Principe de fonctionnement du SCADA*

- Le système acquiert des signaux numériques et analogiques provenant des équipements et instruments de terrain (capteurs, actionneurs, etc.).
- Ces données sont transmises vers un centre de contrôle via des réseaux de communication (câblés ou sans fil).
- Au centre, les données sont traitées et visualisées sur des interfaces graphiques.
- Les opérateurs peuvent alors envoyer des ordres de commande aux installations de terrain pour démarrer, arrêter ou ajuster les équipements. [43]

➤ *Composants d'un système SCADA*

1. Dispositifs de terrain : capteurs, actionneurs, vannes, etc.
2. Unités Terminales Distantes : acquisition des données et transmission au centre de contrôle.
3. Automates Programmables Industriels (PLC) : parfois utilisés pour le contrôle local à la place des RTUs.

4. Centre de Contrôle : serveurs et postes opérateurs pour l’affichage des données et la gestion des commandes.
5. Réseaux de communication : fibre optique, câbles cuivre, liaisons radio.
6. Logiciels : systèmes d'exploitation, applications SCADA pour l’acquisition, l’analyse, l’affichage et l’archivage des données. [43]

III.7.2.5. WAMS (Wide Area Monitoring Systems)

Les WAMS (systèmes de surveillance à grande échelle) sont des ensembles de technologies avancées combinant divers outils et dispositifs destinés à surveiller, en temps réel, l’état et les performances des réseaux électriques sur de vastes zones géographiques. Ces systèmes reposent sur l'utilisation d'unités de mesure de phase (PMU) et d'autres capteurs sophistiqués, permettant la collecte de données électriques précises synchronisées grâce au GPS, ce qui favorise une meilleure stabilité du réseau et une détection rapide des anomalies. [44]

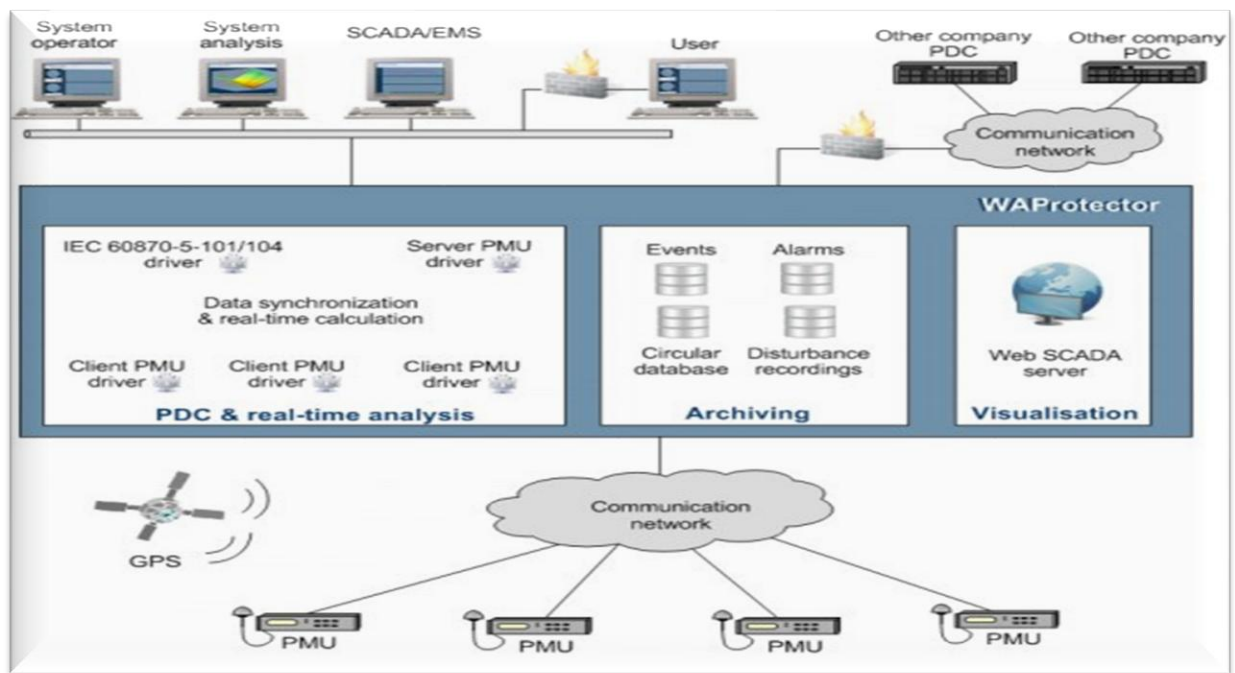


Figure 3.16. WAMS (Wide Area Monitoring Systems) [44]

➤ Principe de fonctionnement des WAMS

- Les unités PMU, déployées à travers le réseau, mesurent des grandeurs électriques synchronisées (tensions et courants).
- Les données collectées sont transmises via des réseaux de communication hautement performants (fibres optiques, satellites, réseaux sans fil) vers les centres de traitement.

- Ces centres analysent les données en temps réel afin d'identifier tout écart ou perturbation dans le fonctionnement du réseau.
- Lors de la détection d'anomalies, les systèmes de contrôle et de protection interviennent pour appliquer les mesures correctives nécessaires et maintenir la stabilité du réseau. [44] [42]

➤ **Composants d'un système WAMS**

Un système WAMS est constitué de plusieurs éléments interdépendants :

- Unité de mesure de phase (PMUs)
- Systèmes de communication
- Centres de traitement et d'analyse des données
- Interfaces homme-machine (IHM)
- Systèmes de contrôle et de protection [44]

III.7.2.6. PMU (Phasor Measurement Unit)

L'Unité de mesure de phase (PMU) est un dispositif électronique capable de produire des estimations synchronisées du phase, de la fréquence et du taux de variation de la fréquence (ROCOF) à partir de signaux de tension ou de courant, en utilisant un signal de synchronisation temporelle, tel que celui fourni par un système de positionnement global (GPS). Les PMUs constituent des outils essentiels pour garantir une conscience situationnelle précise et une surveillance fiable des réseaux électriques. [45]



Figure 3.17. PMU (Phasor Measurement Unit) [45]

➤ *Principe de fonctionnement du PMU*

- Le PMU mesure les signaux de tension et de courant et les convertit en valeurs numériques à l'aide d'un système d'acquisition de données (DAQ).
- Des algorithmes spécialisés sont appliqués pour extraire les valeurs de phase (amplitude et angle) ainsi que la fréquence des signaux numériques.
- Toutes les mesures sont synchronisées grâce à un signal temporel précis issu du GPS, permettant d'obtenir les différents points du réseau.
- Les résultats sont ensuite transmis à un Concentrateur de Données de Phase (PDC) pour être agrégés et analysés. [44]

➤ *Composants du PMU*

- Capteurs de tension et de courant
- Système d'acquisition de données (DAQ)
- Système de synchronisation temporelle
- Unité de traitement centrale ou ordinateur embarqué
- Système de communication [45]

III.7.2.7. RTU (Remote Terminal Unit)

Une Unité Terminale Distante (RTU) est un dispositif électronique destiné à la collecte de données, à la surveillance et au contrôle des équipements de terrain à distance. Les RTU sont principalement utilisées dans les systèmes de contrôle et de supervision (tels que SCADA) pour connecter les équipements industriels ou les réseaux électriques aux postes de commande principaux. La RTU agit comme un intermédiaire qui capte les signaux provenant des capteurs et des dispositifs, les convertissant en données transmissibles via les réseaux de communication vers les centres de contrôle. Elle peut également exécuter des commandes de contrôle à distance, telles que l'activation ou la désactivation des équipements. [42] [46]



Figure 3.18. RTU (Remote Terminal Unit) [46]

➤ *Composants d'une RTU*

- Unité centrale de traitement (CPU)
- Modules d'entrée/sortie (Modules I/O)
- Modules de communication (Communication Modules)
- Alimentation électrique (Power Supply)
- Unités de traitement local (Local Processing Units)
- Mémoire de stockage (Memory). [46]

III.7.3. Comparaison entre les systèmes de surveillance traditionnels et modernes

Pour mieux comprendre l'évolution des technologies de surveillance dans les réseaux électriques, le tableau (3.9) compare les approches traditionnelles et modernes en s'appuyant sur des critères clés techniques et fonctionnels. [42] [46]

Tableau 3.9. Comparaison entre les systèmes de surveillance traditionnels et modernes

<i>Critère</i>	<i>Surveillance traditionnelle</i>	<i>Surveillance moderne</i>
<i>Technologie</i>	Instruments simples, mesures locales	Dispositifs intelligents, mesures synchronisées
<i>Détection des défauts</i>	Lente, souvent manuelle	Rapide, automatique et en temps réel
<i>Communication</i>	Limitée, souvent décentralisée	Communication en temps réel via SCADA, WAMS, etc.

Couverture du réseau	Partielle, limitée aux zones critiques	Globale, couvrant l'ensemble du réseau
Réactivité	Intervention après apparition du défaut	Intervention anticipée ou immédiate
Maintenance	Réactive (réparer après la panne)	Prédictive (anticipation des défauts)
Fiabilité du réseau	Faible à modérée	Élevée grâce à la supervision continue
Analyse de données	Faible capacité d'analyse	Analyse avancée et traitement massif de données

Afin de mieux comprendre l'interconnexion entre les différents niveaux de surveillance et de protection du réseau, l'organigramme ci-dessous (Figure 3.19) illustre la coordination entre les équipements intelligents sur le terrain (FTU, FRTU, IED) et les plateformes de contrôle globales (SCADA, WAMS, RTU) pour la détection et le traitement des défauts.

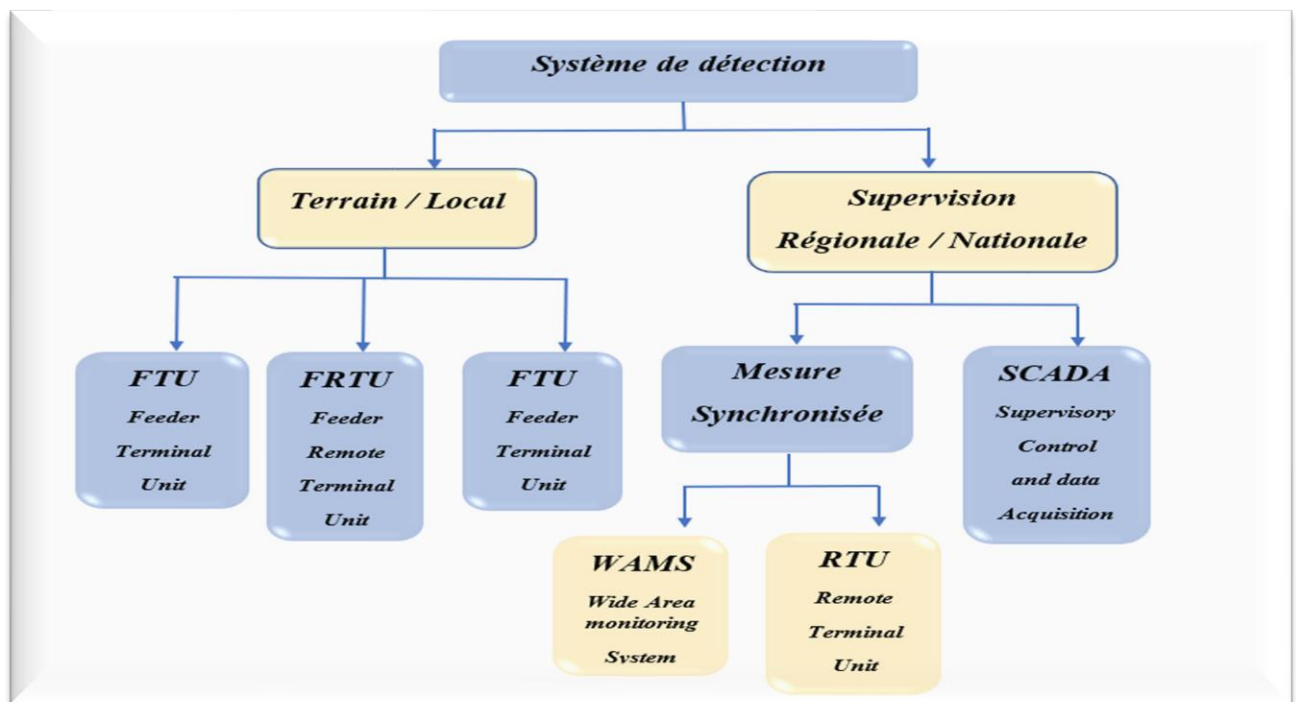


Figure 3.19. Système de détection (Local/ supervision)

III.7.3.1. Organigramme des étapes de détection des défauts dans le réseau électrique

L'organigramme ci-dessous illustre les différentes étapes de détection des défauts dans un réseau électrique, depuis l'acquisition des signaux jusqu'à la prise de décision et l'action de protection. [41] [46]

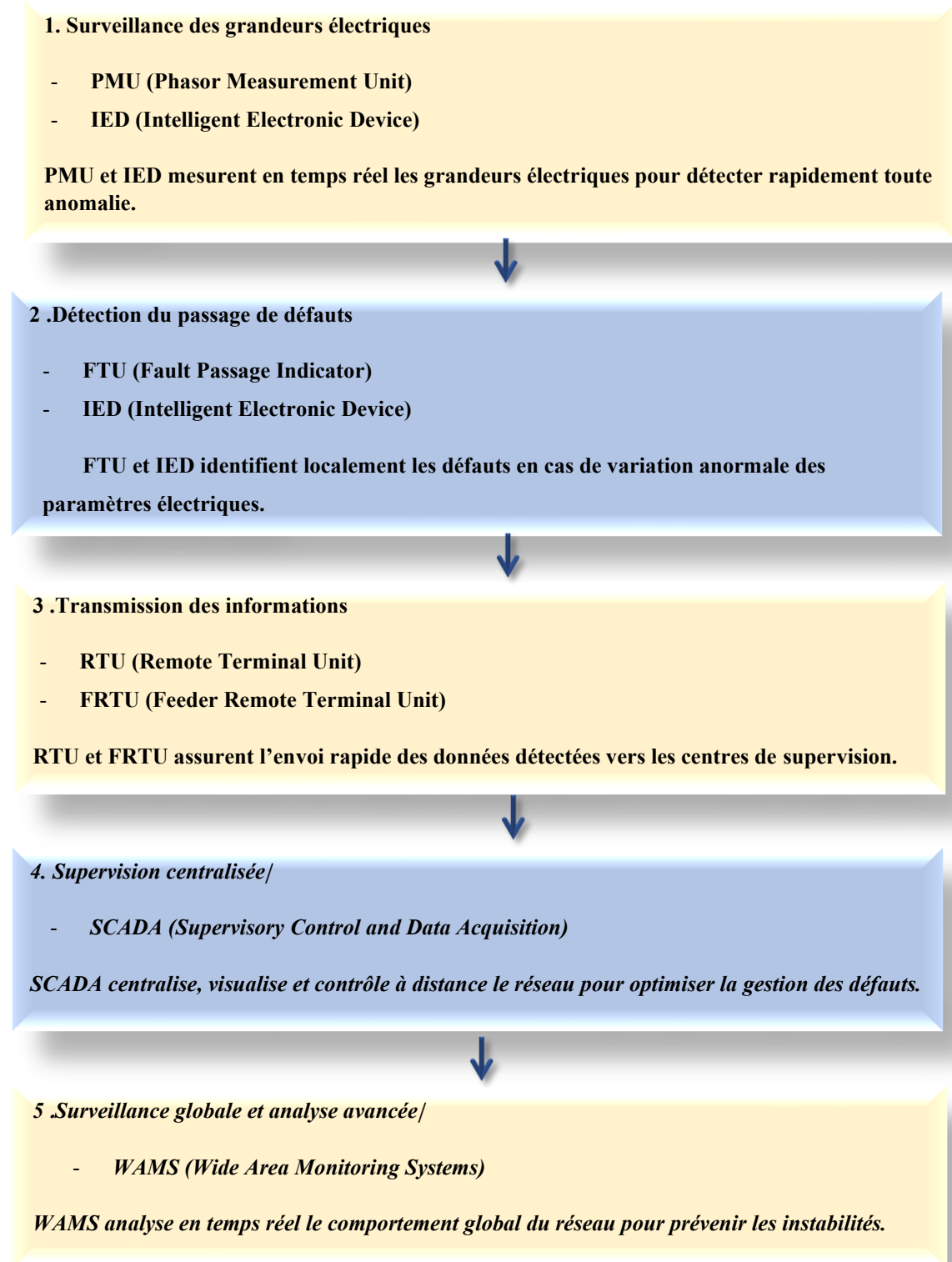


Figure 3.20. Organigramme des étapes de détection des défauts dans le réseau électrique

III.8. CONCLUSION

Les systèmes de protection et de surveillance jouent un rôle fondamental dans le maintien de la fiabilité, de la sécurité et de la stabilité des réseaux électriques modernes. Grâce aux dispositifs intelligents tels que les FTU, FRTU, IED et aux systèmes de supervision centralisés comme SCADA et WAMS, le réseau est capable de détecter rapidement les défauts, de les classer selon leur nature, et localiser avec précision leur origine.

Ces avancées permettent non seulement d'accélérer la réponse aux incidents, mais aussi de limiter les zones affectées et de préserver l'intégrité des installations. L'automatisation et la coordination entre les différents niveaux du système rendent possible une gestion dynamique et intelligente des défauts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un contexte mondial où l'électricité occupe une place centrale dans le bon fonctionnement des sociétés modernes, garantir la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques sont devenus un enjeu stratégique majeur. À travers ce mémoire, nous avons mis en évidence les défis croissants auxquels est confrontée l'infrastructure électrique, en particulier sa vulnérabilité aux pannes et les conséquences catastrophiques qu'elles peuvent avoir. Les pannes de courant peuvent se transformer en crises nationales, affectant des millions de citoyens, comme on l'avait vu en Espagne et au Portugal en 2021 et en Inde en 2012, où 620 millions de personnes ont été privées d'électricité pendant plus de 16 heures.

Le chapitre initial vise à poser les fondements essentiels en décrivant la configuration des réseaux électriques ainsi que les critères de qualité et de fiabilité à contrôler afin d'assurer la continuité du service. Le deuxième chapitre a focalisé sur une analyse approfondie des pannes électriques, en les catégorisant en fonction de leur origine et de leur nature, tout en mettant en évidence leur potentiel qui cause des pannes massives en cas de retard dans l'intervention rapide. Le dernier chapitre traite les solutions technologiques avancées utilisées pour la surveillance et la protection des systèmes électrique, notamment les systèmes SCADA et les unités FTU/RTU. Il souligne l'importance cruciale de ces technologies dans la détection, l'identification et la classification précise des défauts, visant ainsi à prévenir les interruptions majeures potentiellement catastrophiques.

Cette étude montre clairement que l'amélioration de la résilience des réseaux électriques dépend de l'intégration de systèmes de surveillance avancés ainsi que d'une connaissance approfondie des pannes. Les infrastructures énergétiques modernes capables de relever les défis présents et futurs dépendent de la prévention, d'une réponse rapide et de l'automatisation des activités de protection.

- **Perspectives :**

- Intégrer des outils plus avancés (l'intelligence artificielle), comme le machine learning dans les systèmes supervision, pour anticiper les défauts avant même qu'ils ne se produisent.
- Améliorer l'automatisation et la coordination des protections pour renforcer encore la robustesse et la sécurité du système électrique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] Zitouni Abdelrahmane et Bougueera Bourid «Analyse des défauts dans un réseau électrique » Mémoire Master, Université Saad Dahlab de Blida .2014
- [2] Yahiaoui Hamza et Benarous Salah «Analyse des défauts dans les réseaux en utilisant la transformée d'ondelette »Mémoire Master, UniversitéYahia Fares de Médéa .2016
- [3] Sakouni Khemise et Okbaoui Tayeb «Localisation des défauts dans les réseaux d'énergieélectrique à base de Relais de distance »Mémoire de Master ,Université Ahmed Draia Adrar .2018
- [4] Regaia Bilal et Barkia Adel «Analysedes éléments de base d'un réseau H.T. àélaborer »Mémoire de Master ,université 8 Mai1945 Guelma .2012
- [5] Belmahdi Abdelhamid et Laksaci Mohamed «Étude de protection des lignes Hautes Tension » Mémoire de Master ,université Ahmed DraiaAdrar .2023
- [6] Sekri Meriem et Bouasla Mohamed Ali «Analyse des régimes de fonctionnement d'une ligne de transport d'énergie électrique haute tension »Mémoire de Master ,Université de Badji Mokhtar - Annaba .2021
- [7] Adil Meriem et Nait Djoudi Amel «Restructuration du réseau électrique moyennetension 30 K.V de Tizirt »Mémoire de fin d'étuded'ingénieur d'état en Electrotechnique, UniversitéMouloud Mammeri de Tizi-ouzou .2009
- [8] Allaoua Amayas et Slimani Menad «insertion de production distribuée dans les réseaux dedistribution électrique » Impact et régulation de la tension »Mémoire de Master: Université deBejaia .2020
- [9] Kazouz Mohamed Lamine «Henine Nadjat et lamri Merwane »Simulation et étude de l'écoulement de puissance optimal dans un réseau électriqueavec l'intégration des sources d'énergie renouvelables Application sur les réseaux électrique Algérien »Mémoire de Master, Université Naama .2021
- [10] H. Fatima «Reconnaissance automatiquede défauts sur le réseau électrique »Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou .2016
- [11] Zebiri Bouzid et Zargoune Hamza «Étude et développement d'un suiveur résistant aux défauts d'un réseau d'énergie électrique »Mémoire de Master, Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj .2023
- [12] Kheder Nazim et Ladjel Lokman «Amélioration de la qualité d'énergie électrique »Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique .2013
- [13] V. Ignatouva «Méthode d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique »Thèse de doctorat,Université Joseph Fourier .2006
- [14] Mokhtari Mohamed Lamine et Jajdine Yahya Didi «La protection électrique des Réseaux H.T.B » Mémoire de Master, Université Aïn Témouchent .
- [15] Cong Duc Pham «Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution H.T.A en présence de génération d'énergie dispersée »Thèse de doctorat ,Institut national polytechnique de Grenoble .2005

- [16] Maslhi Aicha et Ahcene Djaballah, Chahrazad «Étude de la protection des réseaux électrique » Mémoire de Master «Université Annaba .2020
- [17] G. Boulaares «Méthodes d'analyse des Perturbations Électriques dans la qualité de l'énergie Électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux Creux de tension »Mémoire de Master« université de Batna .2012
- [18] D. Nguyen «Contribution à l'analyse et à la prévention des blackouts de réseaux électriques »Thèse de doctorat «Institut polytechnique de Grenoble .2008
- [19] A. Beddame et D. Belbala «Étude des protections des réseaux électriques HT »Mémoire de Master« Université Ibn-Khaldoun de Tiaret .2018
- [20] C .Meheraz «Protection des installations électriques MT – Application « réseau CEVITRAL-Béjaïa »Mémoire de Master «Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .2016
- [21] A. T. Gueye «Étude de la sélectivité des protections électriques au niveau de la centrale thermique de Cap des Biches (SENELEC) »Mémoire d'ingénieur« École Polytechnique de Thiès .1991
- [22] M. Zellagui «Étude des protections des réseaux électriques HT (10–30 kV) »Mémoire de Magistère «Université Mentouri Constantine .2010
- [23] Merlin Gerin «Protection des réseaux électriques »Fiche technique Schneider Électrique: Guide « .2003
- [24] T. Siabdellah «O. Aouici et Z. Doghmane »Protection des réseaux électriques HT/HT »Mémoire de fin d'études «Université de M'sila .2012
- [25] P. Bortemal «Les protections directionnelles »Fiche technique Schneider n°181 .1996
- [26] H. Saadani et N. Hammouche «Paramétrage et réglage d'un relais de protection Micom P142 du départ 30 kV - HTA « SN-SEMPAC » issu du poste source THT « Oued-Aïssi » »Mémoire de Master «Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .2015
- [27] H. Zakarya «Étude des appareillages de protection des systèmes électriques dans une installation d'une unité industrielle » Lafarge Ciment Biskra »Mémoire de Master«Université Mohamed Khider .2018
- [28] Tolba Ammara «Cognitive object protection against adversarial attacks »Thesis, University of L'Aquila «Potenza .2010
- [29] F. Maciel «"Panafondos" (Genie électrique) »Etude experimentale de l'acoustique et Histoire culturelle« Université de Montréal .2015
- [30] Y. Pelgrin «Approach to age classification using circuit techniques »International Journal of Circuit Theory and Applications .2013
- [31] S. Quijada «You know what I mean »Homage - Constatations .2014
- [32] R. Abdellah «Detection and classification of electrical signals »Mémoire de Master«Université de Guyane .2016
- [33] R. P. Douradoseussc «Electrical newsgame »Houston University .2017

- [34] A. Derdar et H. Hammoni «Localisation des défauts avec PMU et détection de la nature du défaut » Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida .2020
- [35] A. Recioui ,H. Merdji et A. Kamli «Optimal Placement of Fault Passage Indicators in Distribution Networks using Genetic Algorithms »Algerian Journal of Signals and Systems (AJSS), Boumerdes .2021 «
- [36] O. Khoudiame et A. Sellam «Classification et localisation des défauts dans les lignes électriques » Mémoire de Master, Université de Blida .2021
- [37] S. Electric «Protection des réseaux HTA industriels et tertiaires »Fiche technique Schneider n°174 « .1994
- [38] S. Foucal «Étude et coordination des protections des générateurs et du réseau »Mémoire de Doctorat, École Centrale de Lille .2010
- [39] Z. Yuhao «Feedforward Compensation for Voltage Regulation in Power Systems »Journal of Electrical Engineering »Volume 30, Issue 4 .2018
- [40] Hong C.C «Li-Chun H et Chang C.K «Design and Implementation of a High-Performance Remote Terminal Unit (RTU) for Energy Management System »International Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) .2016
- [41] Hompoim H.J «Ammin Ruhin et Admon Anwaj «Energy Management System Based on Wireless SCADA Technology »Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications .2017
- [42] Alioua Naolime et Bechini Soumia «Etude et réalisation d'un mini système SCADA pour la gestion de l'énergie électrique »Mémoire de Master «Université de Moncton .2021
- [43] H. Mezeloun et M. Ayab «Étude et réalisation d'un système de supervision sous Yokogawa CS3000 : Application à l'unité de protection d'air de l'entreprise nationale SONATRACH » Mémoire Master,Université de Guelma .2019
- [44] Y. Ancaya et D. Bensatalla «Design of Active Fault-Tolerant Control for Mitigating Communication Failures in Wide-Area Damping Control »Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret .2024 «
- [45] V. Onisokonikumen «Construction of Phasor Measurement Unit (PMU) for Power System Applications »Mémoire Master,Université de Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada .2015
- [46] S. Bakhita et F. Yusman «Development of a High-Performance Remote Terminal Unit (RTU) of Wireless SCADA System for Monitoring Performance of Micro Hydro Power Plant »in Proc. 2nd Int. Conf. on Science and Innovated Engineering: IOP, Materials Science and Engineering .2020