

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira
Faculté de la Technologie



Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Thème

Etude de l'impact des productions décentralisées sur
le fonctionnement des protections sur les réseaux
électriques

Préparé par :

☐ M.^{elle} .Maouche Kamilia

☐ M.^{elle} .Meddour Hania

Dirigé par :

M.^{re} .O.Aouchenni

Composition De Jury

Mr F.HAMOUDI

Mme N.AOUZELLAG

Soutenus Le : 18/06/2025

Année Universitaire 2024/2025

:

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : MEDDOUR
Prénom : HANIA
Matricule : 191933003441
Spécialité et/ou Option : PSBAA ELECTRIQUE
Département : GAIE ELECTRIQUE
Faculté : TECHNOLOGIE
Année universitaire : 2024-2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) :

Intitulé : ETUDE DE L'IMPACT DES PRODUCTIONS D'ORIENTAIS
SUR LE FONCTIONNEMENT DES PRODUCTIONS SUR LES
PSBAA ELECTRIQUES

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa, le

18-10-2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

LI. ET APPROUVE

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : MAOUCHE
Prénom : KARILIA
Matricule : 191933007548
Spécialité et/ou Option : RESEAUX ELECTRIQUE
Département : GENIE ELECTRIQUE
Faculté : TECHNOLOGIE
Année universitaire : 2024-2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : MASTER

Intitulé : ETUDE DE L'IMPACT DES PRODUCTIONS
DECENTRALISEES SUR LE FONCTIONNEMENT DES
RESEAUX ELECTRIQUES

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
18.10.2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

LU ET APPROUVE

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bajaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions dieu de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute nos sincères remerciements à notre encadrante Mme O.Aouchenni. Son engagement et son expertise ont été essentiels tout au long de cette collaboration. Nos vifs remerciements vont

également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs recommandations. Un grand merci à nos enseignants qui ont fait de grands efforts pour nous voir arriver là

dans nos parcours. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et tout notre respect envers nos parents bien-aimés, qui nous ont éduqués, guidés et soutenus de toutes les manières possibles, jour après jour, depuis notre naissance jusqu'à aujourd'hui.

Dédicace

J'ai le désir sincère de dédier ce modeste travail en tant que témoignage de mon affectation, de mon respect et de mon admiration envers toutes les personnes qui me sont chères.

À ma chère mère

Source inépuisable de tendresse et de sagesse, dont le soutien indéfectible et les prières m'ont accompagné à chaque étape de ma vie. Que Dieu te préserve et te comble de ses bienfaits.

À mes frères, Zaid, Souhil et Hmidan

Pour leur présence constante, leur soutien et leur affection sincère. Vous êtes pour moi un repère solide. Je vous porte dans mon cœur.

À mes sœurs bien-aimées, Katia et Zina

Véritables lumières dans ma vie. À toi, grande sœur, je ne trouverai jamais assez de mots pour exprimer toute ma gratitude, mon amour et ma reconnaissance. Que ta vie soit emplie de paix, de bonheur et de réussite.

À mes chères nièces, Ociene et Macilia

Ces étoiles qui illuminent nos vies par leur joie et leur innocence. Que vos chemins soient parsemés de bonheur et de succès.

À ma bien-aimée Basma

Pour ton amour, ta patience et ton soutien indéfectible. Merci d'avoir cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

À toute ma famille, pour leur amour inconditionnel et leur présence réconfortante.

À mes amis, sans exception, pour les moments partagés, leur écoute et leur encouragement constant.

Enfin, à tout le groupe d'électrotechnique industrielle, et en particulier à mon binôme Kamilia, ainsi qu'à sa famille, pour leur bienveillance, leur générosité et leur soutien précieux tout au long de cette aventure.

Meddour Hania

Dédicace

Je dédie ce modeste projet de fin d'étude:

A mon cher père Moubarak

Aucune parole ne saurait exprimer mon éternel attachement, ma reconnaissance infinie.

Ta présence, ton amour, ton soutien et tes sacrifices silencieux ont été
ma force tout au long de ce parcours.

J'espère avoir été à la hauteur de tes espoirs portés en moi. Tu attends ce jour
Impatience, et avec fierté je te dédie ce modeste travail,
en témoignage de ma gratitude et de tout mon amour.

A ma chère mère Malika

Toi qui as toujours cru en moi, même en silence,
Ton amour, tes prières et ton dévouement m'ont accompagné à chaque étape de ce chemin.
Tu as rêvé de ce moment autant que moi, peut-être même plus.
Aujourd'hui, ce rêve que tu portais dans ton cœur est devenu réalité.
Ce travail est le fruit de ton espoir, et je te le dédie avec tout mon amour.

A ma chère sœur Ourida et son mari Hichem

Je vous remercie du fond du cœur pour votre soutien, votre présence et vos
Encouragements tout au long de ce parcours.

A mes chères sœurs Amina, Salabil

A mes petits anges Elina, Ania Sources
de joie et de motivation quotidienne.

A mon cher époux Mohamed

Merci du fond du cœur pour ton soutien, ton aide précieuse et ta présence tout au long de
mon parcours.

Ta patience, tes encouragements et ta confiance en moi ont été essentiels à
l'aboutissement de ce mémoire.

Que ce travail soit une source de fierté pour toi, comme tu es une fierté pour moi.

A mes copines Ibtissem, Imen,

Vous m'avez toujours aidé depuis les années qu'on se connaît, vous avez été un grand
soutien dans les études et la vie privée.

Maouche Kamilia

TABLE DES MATIERES

Remerciement

Dédicaces

Introduction générale.....	1
I.1.Introduction.....	4
I.2.Définition du système électrique	4
I.3.Fonctionnement du réseau électrique	4
I.4.Structure des réseaux électriques.....	4
I.4.1. Production	4
I.4.2 Réseaux de transport	4
I.4.3. Réseaux de répartition.....	4
I.4.4. Réseaux de distribution.....	4
I.5.Topologie du réseau électrique.....	5
I.5.1. Réseaux maillés :.....	5
I.5.2. Réseaux radiaux	6
I.5.3. Réseaux bouclés	7
I.6.Protections des réseaux électriques	7
I.6.1. Objectifs d'un système de protection :.....	7
I.6.2. Définition de la protection :	7
I.6.3. Constitution d'un système de protection.....	22
1.6.3.1 Chaîne de protection.....	22
I.6.3.2. Transformateurs de mesure.	22
I.7.Différents types de protection	24
I.7.1. Protections à maximum de courant.....	24
I.7.2. Protections wattmétriques	27
I.7.3. Protection directionnelle	27
I.7.4. Protection différentielle :.....	27
I.7.5. Protection de distance	28
I.7.5.1. Schéma de protection à distance	28
I.8.Appareillages de protection.....	29

I.8.1. Relais	29
I.8.2. Sectionneurs	30
I.8.3. Disjoncteurs.....	31
I.8.4. Interrupteur.....	31
I.8.5. Fusible :	32
I.9. Production d'électricité décentralisée	33
I.9.1. Différents types de production décentralisée	33
I.9.2. Différentes sources d'énergies renouvelables.....	33
Conclusion.....	36
II.1. Introduction.....	38
II.2. Impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques.	38
II.2.1. Impacts sur le système de distribution.....	38
II.2.1.1. Impacts sur le sens de transit de puissance	38
II.2.1.2. Impacts sur la stabilité du réseau.....	39
II.2.1.3. Impacts sur la qualité d'énergie.....	40
II.2.1.4. Impacts sur le profil de tension	40
II.2.2. Impact sur le système de transport	41
II.2.2.1. Risque de congestion.....	41
II.2.2.2. Incertitude sur la production	41
II.2.2.3. Changement des marges d'exploitation.....	42
II.2.2.4. Apparition des flux d'énergie réactive	42
II.2.2.6. Perte de la production d'énergie	42
II.3. Impact sur les dispositifs de protection.....	42
II.3.1. Impacts sur le plan de protection	42
II.3.2. Impact de la PD sur les niveaux des courants de défaut.....	45
II.3.4. Les changements de niveau du courant de défaut	46
II.3.5. Impact de PD sur la protection des départs	46
II.3.6. Impact de PD sur les relais de protection de Coordination	46
II.4. Solutions proposées pour limiter les impacts des PDs	47
II.4.1. Des solutions pour un taux moyen d'intégration des PDs.....	47

II.4.2. Des solutions pour un taux élevé d'intégration des PDs	48
II.4.3. Relais de protection numériques et les technologies de l'information et de communication	48
II.4.4. Protection adaptative	49
Conclusion	49
CHAPITRE 03 : Impacts de l'intégration des productions décentralisées sur la coordination et réactions des protections - résultats de simulation . 35	
III.1. Introduction	51
III.2. Modélisation des éléments du réseau	51
III.2.1. Modélisation des générateurs	51
III.2.2. Modélisation des charges	52
III.2.3. Modélisation des lignes	52
III.2.3.1. Ligne courte	53
III.2.3.2. Ligne moyenne	54
III.3 Présentation du réseau étudié	55
III.4. Synthèse d'une protection à max de courant	56
III.5. Contrôle du convertisseur de liaison au réseau de la PD	57
III.5. Interprétation des résultats de la simulation	58
III.5.1. Réseau sans PD	59
III.5.1. Réseau avec PD	62
Conclusion	64
Conclusion générale	66
Bibliographie	67
Annexes	70
Résumé	

Liste des figures

Chapitre 01

Figure I.1. Structure traditionnelle du système électrique .	5
Figure I.2. Différentes topologies des réseaux électriques .	5
Figure I.3. Architecture d'un réseau maillé (grille) .	6
Figure I.4. Architecture d'un réseau radial .	6
Figure I.5. Architecture d'un réseau boucles .	7
Figure I.6. Chaîne de protection.	8
Figure I.7. Schéma (a) et photo (b) d'un transformateur de courant de type inversé.	9
Figure I.8. Schéma (a) et photo (b) d'un transformateur de tension inductif .	10
Figure I.9. Décomposition du temps de réaction d'une protection .	10
Figure I.10. Courant de défaut en fonction du point de défaut.	11
Figure I.10.a. Caractéristique de déclenchement à temps indépendant.	12
Figure I.10.b. Caractéristique de déclenchement à temps inverse.	12
Figure I.11. Protection directionnelle dans un réseau avec deux arrivées parallèles .	13
Figure I.12. Protection différentielle .	14
Figure I.13. Principe de base du fonctionnement de protection à distance.	14
Figure I.14. Zones de fonctionnement d'une protection de distance.	15
Figure I.15. Classification des relais de protection.	16
Figure I.16. Sectionneur utilisé pour la sécurité des métros.	16
Figure I.17. Sectionneur de ligne .	17
Figure I.18. Disjoncteur à gaz SF ₆ .	17
Figure I.19. Interrupteur-sectionneur PV.	18
Figure I.20. Fusible Socomec gPV (125 A/ 1000 VDC).	18
Figure I.21. Schéma d'un aménagement hydroélectrique .	20
Figure I.22. Schéma d'un système photovoltaïque .	20
Figure I.23. Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne .	21
Figure I.24. Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique.	22

Chapitre 02

Figure II.1 . Transit de puissance en présence de PD .	24
Figure II.2. Variations de la tension du réseau sans et avec PD .	26
Figure II.3. Problème d'aveuglement de protections .	28
Figure II.4. Problème du déclenchement intempestif des protections .	29
Figure II.5. Influence de la PD sur la sélectivité des protections .	29
Figure II.6. Forme typique de courant de court-circuit .	30
Figure II.7. Analyse du niveau de défaut en présence des PDs.	31
Figure II.8. Différentes tailles de PD contribuent au niveau du courant de défaut.	31

Chapitre 03

Figure III.1. Modèle du générateur.	36
Figure III.2. Modèle de la charge.	37

Figure III.3. Représentation d'une ligne courte par un dipôle.	38
Figure III.4. Représentation d'une ligne moyenne par un quadripôle.	38
Figure III.5. Schéma du réseau d'étude.	39
Figure III.6. Schéma de principe d'un relais à maximum d'intensité RMI.	40
Figure III.7 Schéma de commande de la connexion au réseau.	42
Figure III.8. Evolutions des courants sur le réseau.	42
Figure III.9. Evolutions des courants sur le réseau avec défaut sur le départ 1 à 0.3s.	43
Figure III.10.Evolutions des courants sur le réseau avec défaut sur le départ 2 à 0.3s.	44
Figure III.11. Evolutions des courants sur le réseau avec défaut sur le départ principal à 0.3s.	44
Figure III.12. Signal de commande d'un relais avec défaut.	45
Figure III.13. Signal de commande d'un relais sans défaut	45
Figure III.14 Evolution des courants sur le réseau avec PD sans défaut.	46
Figure III.15 Evolution des courants sur le réseau avec PD et défaut sur le même départ.....	47
Figure III.16 Evolution des courants dans le réseau avec PD sur départ 1 et défaut sur départ 2... ..	48

Liste des abréviations

PD	Production décentralisée
RD	Réseau de distribution
HT	Haute tension
BT	Basse tension
HTA	Réseau de haute tension de niveau A.
BTA	Réseau de basse tension de niveau A
PCC	Puissance de court-circuit
Iseuil	Courant de seuil
P1, P2	Protection correspond à la 1 ^{ère} , 2 ^{ème} protection
Id _{f1} , Id _{f2}	Les courants défauts
GD	Générateurs dispersés
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line en anglais)
CPL	Courants Porteurs en Ligne, fibre optique
MT	Moyenne tension
TC	Transformateurs de courant
TT	Transformation de tension
IEC	Commission électrotechnique Internationale
TVC	Transformateur de tension à condensateur
I _r	Courant de réglage
ZL	L'impédance de la zone de protection de la ligne
RL	Résistance de la ligne
XL	Réactance de la ligne
SF ₆	Hexafluorure de soufre
DPCC	Dispositif de Protection au Court-Circuit
VDC	Volt courant continu gPV
Gamme photovoltaïque DC	Courant continue
AC	Courant Alternative
P _{Gi}	Puissance active délivrée par le générateur au nœud i.
Q _{Gi}	Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud i.
P _{Gimin}	Puissance réactive minimale délivrée par le générateur au nœud i.
Q _{Gi}	Puissance réactive maximale délivrée par le générateur au nœud
□ □	Déphasage de la tension au nœud i.
V _i	Tension complexe au nœud i
P _{chi}	Puissance active de la charge

Q_{chi}	Puissance réactive de la charge
\bar{S}_{ich}	Puissance apparente complexe au nœud i
V_s	Tension de la source
I_s	Courant de la source
V_r	Tension de la réception
I_r	Courant de la réception
L	Inductance
C	Capacité de la ligne
R	Résistance de la ligne
G	Conductance de la ligne
A, B, C, D	Coefficients de la matrice de transmission
Z	Impédance
Y	Admittance
L	Longueur
Ω	Ohms
S	Siemens
m	Mètres
H	Henry
F	Farad
I_L	Courant dans l'inductance série
P_{dp}	Protection de départ principale
P_{d1}	Protection de départ 1
P_{d2}	Protection de départ 2
J_{db1}	Jeu de barres 1
J_{db2}	Jeu de barres 2
V_{ch1}	Tension charge 1
V_{ch2}	Tension de charge 2
G	Générateur
$\square\square$	Taux d'intégration
$\square\square_e$	Puissance générée par l'éolienne
P_n	Puissance nominale
And	Fonction ET
R/S	Bascule Rest /set
$Ph1, Ph2, Ph3$	Courant de référence des phases 1, 2,3 PLL
	Boucle de verrouillage de phase
$\square\square$	Tension réseau en quadrature
I	Courant de référence en quadrature
$\square\square$	Puissance réactive de référence
$\square\square$	Tension efficace
$\square\square$	Tension réseau directe

□ □

Courant réseau quadrature

Pg

Puissance active

Introduction générale :

L'énergie électrique occupe une place très importante dans toutes les branches de l'économie moderne et de la vie courante. La consommation d'énergie électrique augmente considérablement. Il est admis, de manière générale, que depuis le début du XIX^e siècle, l'énergie électrique consommée dans le monde double en moyenne tous les dix ans. Le rôle des systèmes d'énergie électrique est de fournir aux consommateurs une énergie à moindre coût, dans des conditions de qualité et de sécurité satisfaisantes.

En effet, les réseaux électriques sont traditionnellement exploités de manière centralisée. Ainsi, la plus grande partie de la production est assurée par des centrales de grande capacité (hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques spécifiques (sources d'eau, contraintes techniques, etc.). L'énergie est ensuite acheminée vers les grands centres de consommation par des lignes aériennes ou des câbles, sur de longues distances et à différents niveaux de tension. Cette structure repose sur des critères économiques, de sécurité du système et de qualité de fourniture.[1]

La dérégulation et l'ouverture du marché de l'électricité ont créé un contexte favorable à l'émergence de petits producteurs connectés aux réseaux de manière décentralisée. Ces sources de petite taille, généralement intégrées au niveau des réseaux de distribution, permettent de produire l'énergie localement, à proximité des zones de consommation, ce qui limite les distances de transport. Leur insertion permet de réduire la dépendance vis-à-vis des réseaux de transport, de répondre à l'augmentation de la demande, et d'éviter des investissements coûteux dans de nouvelles infrastructures (lignes, transformateurs). Elle permet aussi de couvrir les besoins locaux en cas de surcharge, de réduire les pertes techniques, d'améliorer la qualité de service, le profil de tension et de soulager les lignes de distribution. [2][3]

Cependant, malgré les avantages de l'intégration des productions décentralisées dans les réseaux de distribution, leur présence peut générer plusieurs impacts négatifs, notamment lorsque leur taux de pénétration est élevé. En effet, les réseaux actuels n'ont pas été conçus pour accueillir ce type de production. Leur intégration peut entraîner une inversion des flux d'énergie, bouleversant la philosophie et le fonctionnement des systèmes de gestion et de protection du réseau. [1]

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'intégration de productions décentralisées dans un réseau électrique à architecture radiale, afin d'analyser leurs impacts sur le système de protection existant, notamment en ce qui concerne l'aveuglement des protections et les déclenchements intempestifs des départs sains. Pour cela, notre travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les réseaux électriques classiques, à savoir les réseaux de transport, de répartition et de distribution, ainsi des généralités sur les productions décentralisées. Il offre aussi une vue d'ensemble sur les systèmes de protection, leurs principes de fonctionnement, les dispositifs utilisés et les appareillages associés.

- Le deuxième chapitre traite des impacts de l'intégration de la production décentralisée sur les réseaux de distribution et de transport, ainsi que des principales solutions proposées pour limiter ces effets.
- Enfin, dans le troisième chapitre, une simulation est réalisée sur un réseau radial comportant un relais de protection à maximum de courant. Ce modèle permet d'étudier la coordination des protections (coordination ampérométrique) en mettant en évidence les impacts de l'insertion d'une production décentralisée sur le comportement des protections. L'intermittence de la production décentralisée est également simulée, et son influence sur le déclenchement des dispositifs de protection est analysée. Toutes les simulations sont effectuées dans l'environnement MATLAB à l'aide de l'outil Simulink.

CHAPITRE 01 :

Etat de l'art sur les réseaux électriques et les productions
décentralisées

I.1.Introduction

Les infrastructures de réseaux électriques sont essentielles pour notre société. Traditionnellement, ces réseaux sont élaborés de façon verticale, en respectant un modèle de transmission d'énergie « du haut vers le bas » : Production - Transport - Distribution.

En effet, l'exploitation des réseaux électriques se fait traditionnellement de manière centralisée. Une grande part de l'électricité est générée par des centrales de taille importante (hydrauliques, thermiques, nucléaires), qui se trouvent en des lieux stratégiquement choisis.

Par la suite, l'énergie est acheminée vers les principaux pôles de consommation grâce à un système de lignes aériennes et de câbles, généralement sur des tronçons étendus et à des tensions diverses. Cette structure verticale (production-transport-distribution) est en pleine mutation due à la production décentralisée (éolienne, solaire, etc.), où la production d'énergie se fait au niveau de la distribution, à proximité des consommateurs.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps essayer de présenter une description et le fonctionnement du système électrique, de la production jusqu'à la consommation. Par la suite, nous décrivons en détail sur les différents éléments de protection et les différents types de production décentralisées selon le type de source d'énergie utilisée.

I.2.Définition du système électrique

Un réseau électrique est un ensemble constitué d'unités de production, unités de consommation, lignes électriques, centres de contrôle et de postes de transformation. Pour aborder la problématique de l'intégration des éoliennes dans le réseau électrique, il est intéressant de comprendre les contraintes de fonctionnement de ce dernier. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseaux dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par leurs architectures, le niveau de tension de leurs lignes ou le niveau de puissance qui transite. Ces fonctions sont les suivantes :

- ☐ L'acheminement de l'énergie des centrales de production aux abords des grands centres de consommation, c'est le rôle du réseau de transport :
- ☐ La répartition de cette énergie en différents points de chacun des centres de consommation de manière à mieux assurer la sécurité de l'alimentation de l'ensemble des consommateurs, c'est le rôle des réseaux de répartition :
- ☐ L'alimentation directe de chacun des consommateurs à partir du réseau de répartition, c'est le rôle des réseaux de distribution.

Les sous-sections suivantes présenteront brièvement les différentes structures et les niveaux de tension des réseaux électriques.[4]

I.3.Fonctionnement du réseau électrique

Le système électrique est un ensemble d'installations électriquement connectées qui assure, via le réseau, le transfert de l'énergie électrique, des producteurs aux consommateurs Cette énergie peut être produite à partir de sources aussi variées que l'hydraulique, les combustibles fossiles, la fission nucléaire, le vent, le soleil.

Le stockage à grande échelle de l'énergie électrique sous forme immédiatement disponible n'est, actuellement, pas possible dans des conditions économiques satisfaisantes.

Le problème majeur de l'exploitant du système électrique est donc de maintenir en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire au fonctionnement de ce système, son exploitation repose donc sur l'adaptation permanente de la production aux fluctuations de la demande, dans le respect des contraintes liées au réseau.[5]

I.4. Structure des réseaux électriques

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau électrique de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension.[6]

I.4.1. Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe.[7]

I.4.2 Réseaux de transport

Une fois produite, l'électricité doit être acheminée vers les différents lieux d'utilisation par l'intermédiaire des lignes de transport. Les lignes de transport à haute tension sont supportées par de grands pylônes d'acier. L'énergie électrique arrive ensuite dans une Sous-station (poste de transformation et de répartition), qui convertit la haute tension en moyenne tension, avant d'être répartie sur le réseau de distribution. Cependant, certains centres d'exploitation n'ont pas de lignes de transport. L'énergie électrique est directement acheminée vers le réseau de distribution, après avoir subi une transformation en MT. Ceci dépend notamment de l'emplacement de la Centrale et de la puissance à transiter.[8]

I.4.3. Réseaux de répartition

Sont des réseaux qui reçoivent l'énergie des réseaux de transport, leur rôle est de mener l'électricité aux villes et aux importants clients industriels, Le niveau de tension de ces réseaux est entre 45 kV et 160 kV, ils assurent la desserte des points de livraison à la distribution.[9]

I.4.4. Réseaux de distribution

L'énergie électrique arrive de la sous-station (qui fait partie du réseau de transport) pour desservir les agglomérations environnantes. La tendance actuelle est la normalisation des tensions MT en 20.000 volts. Les lignes électriques du réseau de distribution peuvent être aériennes (suspendues par des poteaux électriques : en béton, en bois en métal), ou souterraines (enfouies sous terre). La moyenne tension (MT) est ensuite transformée en basse tension (BT) par des postes de transformation MT/BT installés dans différents endroits. Les branchements d'abonnés sont raccordés à partir des lignes de basse tension issues de ces transformateurs. Les tensions sont actuellement normalisées à 230 volts pour les branchements monophasés, et de

Chapitre I Etat de l'art sur les réseaux électriques et les productions décentralisées

230/400 volts pour les branchements triphasés (230 volts entre une phase et le neutre, 400 volts entre deux phases différentes). Chaque branchement d'abonné est équipé d'un compteur électrique afin de mesurer la consommation d'énergie.[8]

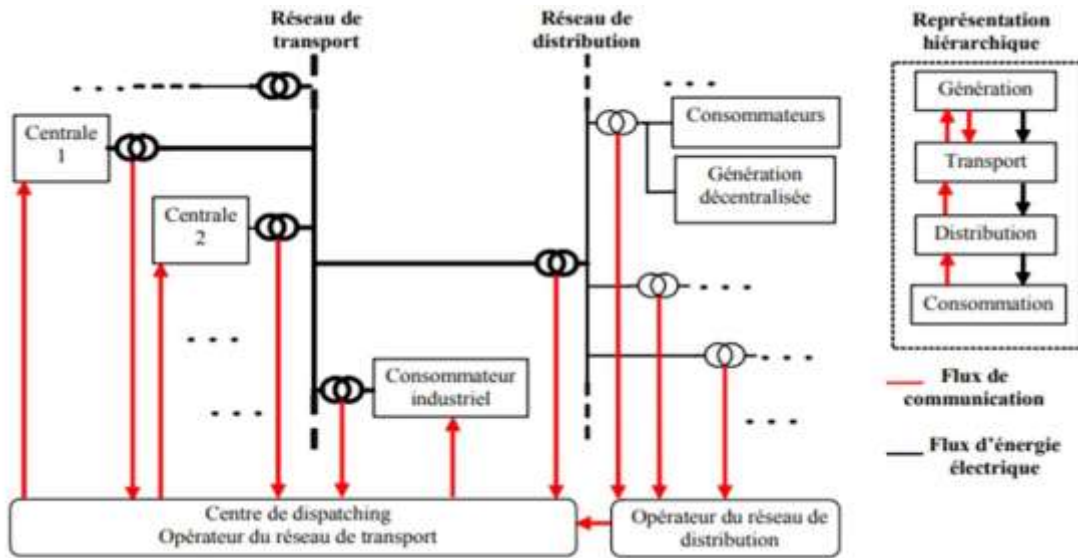


Figure.I.1.Structure traditionnelle du système électrique.[10]

I.5.Topologie du réseau électrique

Ils existent plusieurs structures, dans ce qui suit, sont présentées les plus habituelles :

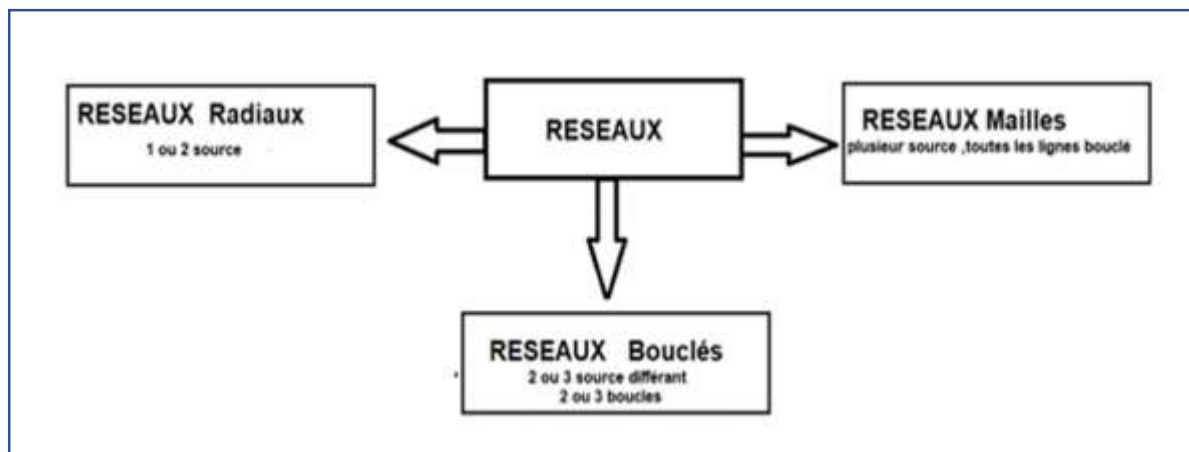


Figure.I.2. Différentes topologies des réseaux électriques. [11]

I.5.1. Réseaux maillés :

Les réseaux maillés (Figure.I.3) sont des réseaux où les liaisons forment des boucles réalisant une structure semblable à la maille d'un filet qui constitue les réseaux de transport et d'interconnexion.

Ce type de réseau présente l'avantage de garantir une meilleure sécurité d'exploitation et une continuité de service pour les consommateurs, car en cas de défaut il suffit d'isoler le tronçon défectueux entre les deux nœuds. Son inconvénient réside dans l'étude de ce type de réseau qui

est très complexe, de plus sa réalisation est plus coûteuse par rapport à d'autres types de réseaux électriques. [1]

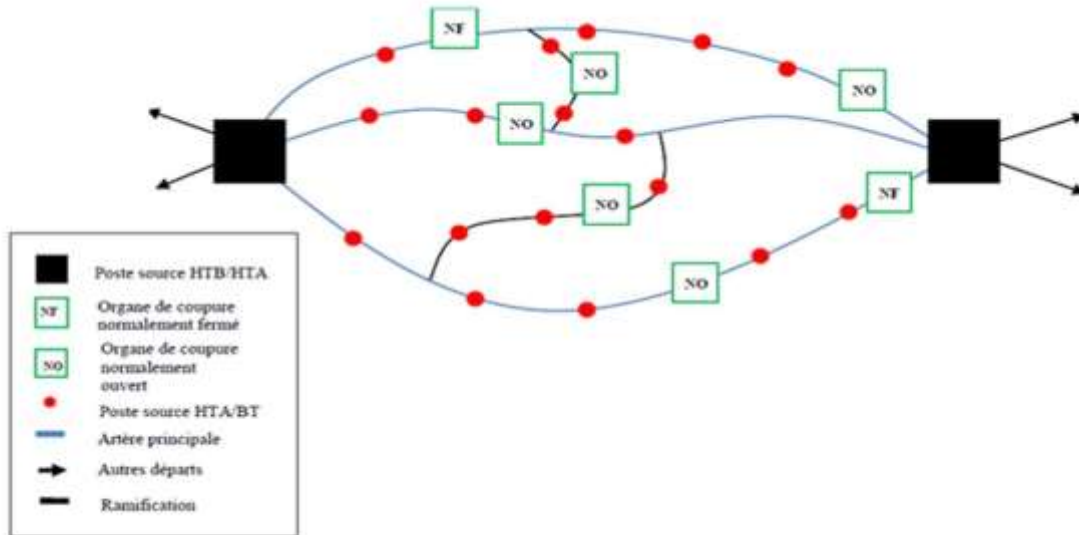


Figure. I.3. Architecture d'un réseau maillé (grille). [11]

I.5.2. Réseaux radiaux

Un réseau radial issu d'un poste d'alimentation est constitué de plusieurs artères dont chacune va en se ramifiant ont une topologie très faiblement maillée, avec des boucles entre des différents postes source ou les ramifications, mais l'exploitation se réalise via une structure arborescente. Cette structure nous permet d'avoir des points communs. Car en un point est placé toujours un appareil de coupure, ouvert en régime normal. Cette disposition permet en cas d'incidents sur une artère de reprendre l'alimentation. Les réseaux radiaux sont des structures simples et peuvent être contrôlés et protégés par un appareillage simple. Ce sont les réseaux les moins onéreux. Une telle structure avec un poste source est illustrée sur la figure I.4.[11]

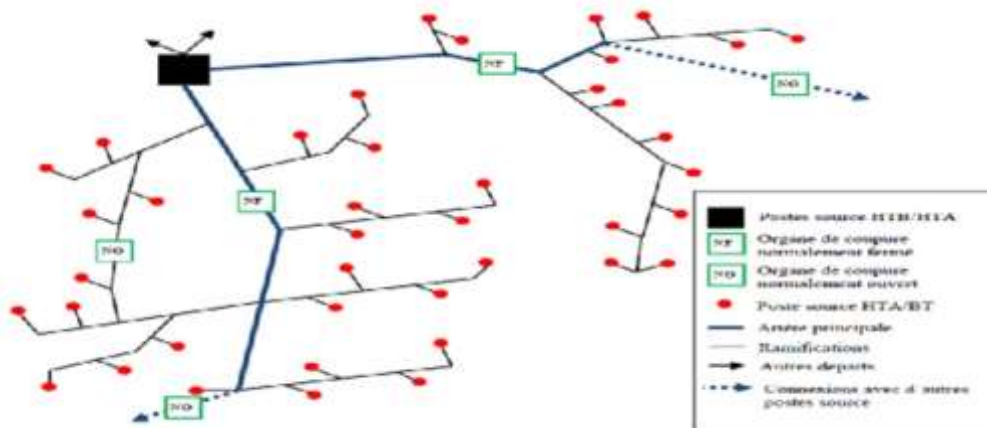


Figure.I.4. Architecture d'un réseau radial.[11]

I.5.3. Réseaux bouclés

Une structure bouclée (Figure.I.5) se distingue par l'existence d'une boucle fermée, contenant un nombre limité de sources qui constituent les réseaux de répartition. L'avantage principal de ce type de réseau est qu'en cas de défaut d'un élément, la continuité de service est toujours assurée, car la mise hors tension d'un tronçon bien défini n'entraîne pas l'interruption des autres.[1]

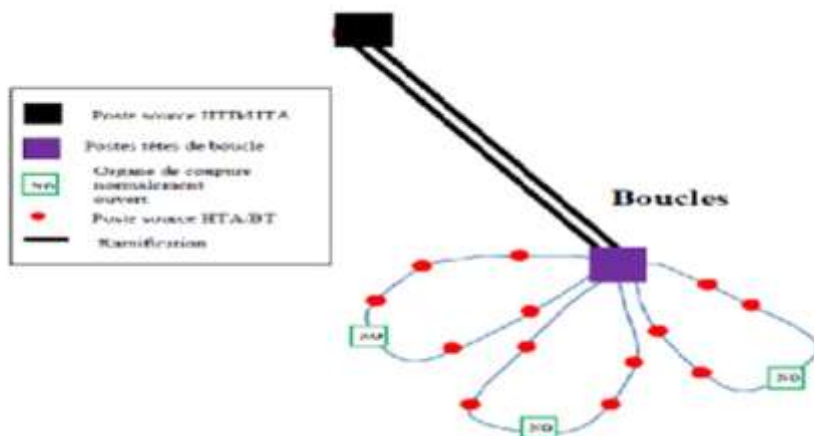


Figure.I.5. Schéma de principe d'un réseau bouclé.[11]

I.6. Protections des réseaux électriques

I.6.1. Objectifs d'un système de protection :

Un système de protection doit répondre aux objectifs suivants :

- ☐ Préserver la sécurité des personnes et des biens ;
- ☐ Éviter la destruction partielle ou totale des matériels ;
- ☐ Assurer la meilleure continuité de fourniture possible.[12]

I.6.2. Définition de la protection :

Un plan de protection est l'ensemble des dispositions pour :

- ☐ Éliminer les défauts en séparant l'élément défectueux du reste du système électrique par un organe de coupure ;
- ☐ Éliminer un défaut par une protection et assurer éventuellement la protection de secours (redondance des protections) ;
- ☐ Protéger certains matériels spécifiques : transformateurs, lignes/câbles HTA, gradins de condensateurs HTA, entre autres ;
- ☐ Permettre la modification temporaire des fonctionnements (sensibilité, rapidité) pour effectuer certaines opérations d'exploitation : travaux sous tension, mise en parallèle de transformateurs.[12]

I.6.3. Constitution d'un système de protection

1.6.3.1 Chaîne de protection

Le système de protection se compose d'une chaîne constituée généralement des éléments suivants : [9].

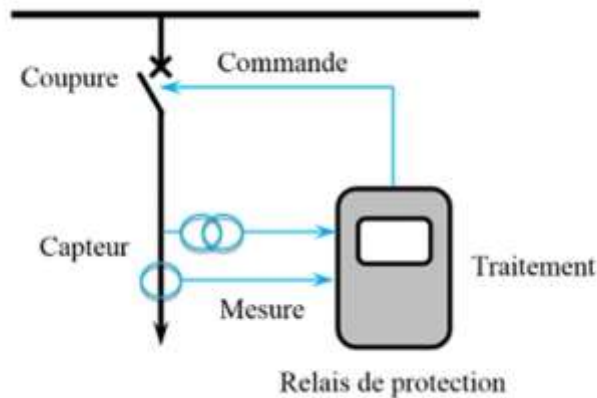


Figure. I.6.Chaîne de protection.[9]

- Capteurs ou transformateur de mesure – de courant et de tension – qui fournissent les informations nécessaires à la détection des défauts ;
- Relais de protection, qui surveillent en permanence l'état électrique du réseau et qui élaborent des ordres de commande au circuit de déclenchement ;
- Appareillages qui ont le rôle de coupure : disjoncteurs, interrupteurs-fusibles, contacteurs-fusibles.[12]

I.6.3.2. Transformateurs de mesure.

Les principales tâches des transformateurs de mesure sont les suivantes :

- Transformer les courants ou les tensions d'une valeur généralement élevée en une valeur facile à manipuler pour les relais de protection ;
- Isoler les relais, les instruments de mesure et les instruments du système primaire à haute tension ;
- +Offrir la possibilité de standardiser les relais, les instruments à quelques courants et tensions nominaux.[13]

A. Transformateurs de courant (TC)

Tous les transformateurs de courant utilisés dans la protection ont une construction fondamentalement similaire à celle des transformateurs standards en ce sens qu'ils sont constitués d'enroulements primaires et secondaires couplés magnétiquement, enroulés sur un noyau de fer commun, l'enroulement primaire étant connecté en série avec le réseau, contrairement aux transformateurs de tension. Ils doivent donc supporter le courant de court-circuit du réseau. Il existe deux types de transformateurs de courant :

- Le type primaire bobiné ;

- Le type primaire à barres.

Le primaire bobiné est utilisé pour les courants plus faibles, mais il ne peut être appliqué que sur des installations à faible niveau de défaut en raison des limitations thermiques ainsi que des exigences structurales en raison des forces magnétiques élevées. Pour les courants supérieurs à 100 A, on utilise le type de primaire à barres, car si l'enroulement secondaire est réparti uniformément autour du noyau de fer complet, sa réactance de fuite est éliminée. Les CTs de protection sont le plus souvent de type primaire à barres, noyau toroïdal avec enroulement secondaire uniformément réparti. La valeur nominale d'un CT se compose d'un courant nominal primaire et d'un courant nominal secondaire associé. Ces valeurs sont liées par le rapport de transformation nominal du CT, qui est généralement aussi le rapport de transformation physique du transformateur.[13]

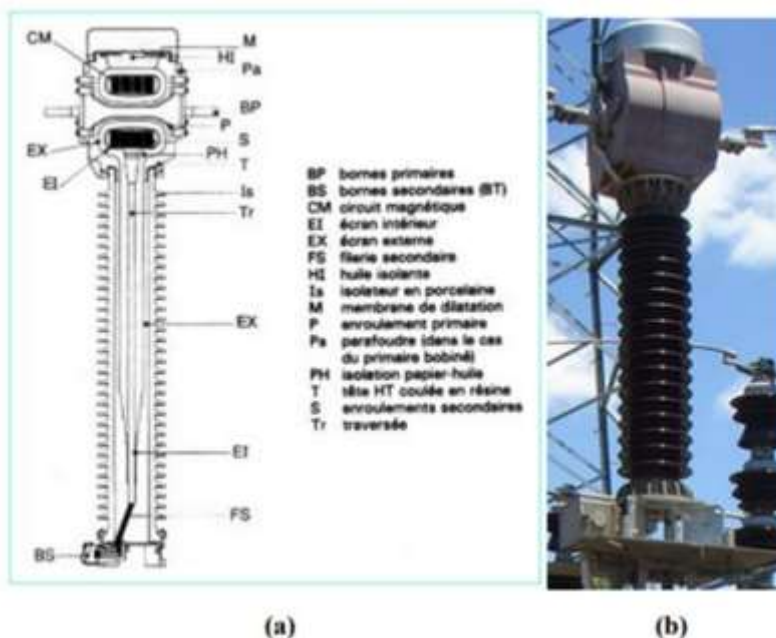


Figure. I.7.Schéma (a) et photo (b) d'un transformateur de courant de type inversé.[14]

B. Transformateurs de tension (TT)

Selon l'IEC, il existe essentiellement deux types de transformateurs de tension utilisés pour les relais de protection.

- Le type électromagnétique, (communément appelé transformateur de tension (VT)) ;
- Le type à condensateur (appelé transformateur de tension à condensateur (CVT)) ;
- Le type électromagnétique est un transformateur abaisseur de tension dont les enroulements primaire et secondaire sont reliés par un nombre de spires directement proportionnel à la tension en circuit ouvert mesurée ou produite à ses bornes ;

La plupart des transformateurs de tension sont conçus pour fournir 120 volts aux bornes secondaires lorsque la tension nominale est appliquée au primaire.[13]

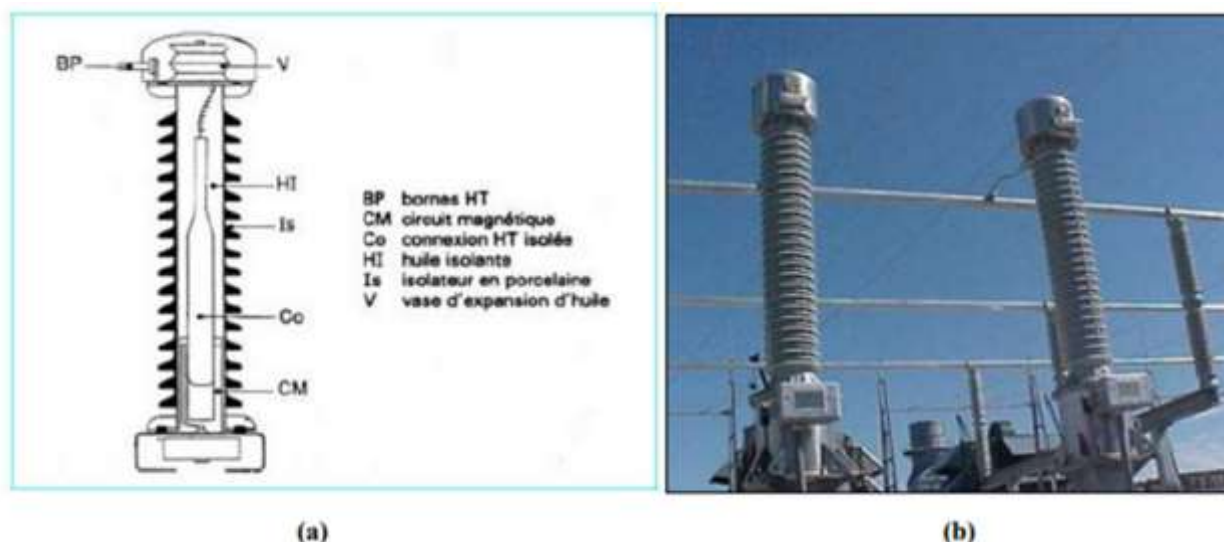


Figure. I.8.Schéma (a) et photo (b) d'un transformateur de tension inductif.[14]

I.7.Différents types de protection

Les protections sont utilisées pour détecter et isoler tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique. La fonction de protection est réalisée par des relais ou des appareils multifonctions, qui comparent en permanence les grandeurs électriques du réseau à des seuils réglables. En fonction du type de protection, les grandeurs mesurées par les capteurs peuvent être : courant, tension, fréquence, et les grandeurs calculées peuvent alors être : puissances, impédances. Lorsque la mesure dépasse le seuil, la protection donne des ordres d'action comme l'ouverture du disjoncteur, après une temporisation. Cette temporisation inclut plusieurs composantes : le temps de mesure, le temps de calcul de l'algorithme, le temps de réponse de l'appareil, le temps d'élimination de l'arc, ainsi que les tolérances de temporisation (marges de sécurité permettant d'éviter les déclenchements multiples). Cette chaîne d'actions est présentée dans la Figure I-9.[12]

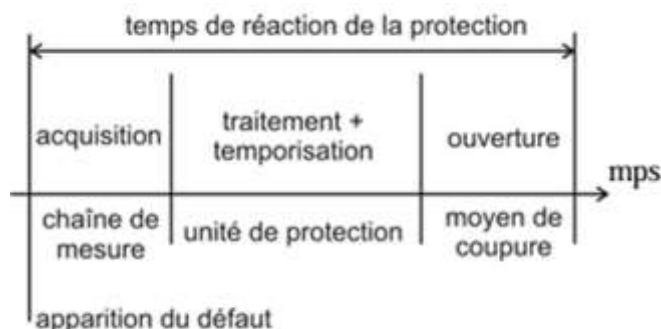


Figure.I.9. Décomposition du temps de réaction d'une protection.[12]

I.7.1. Protections à maximum de courant

La protection à maximum de courant est destinée à débrancher le circuit protégé, quand le courant dépasse la valeur dite seuil. La protection est destinée uniquement à débrancher le circuit en défaut. Pour illustrer l'utilisation du relais à maximum de courant, considérons la

figure I.10. Dans ce réseau, le courant de défaut (vu par le relais de protection) est d'autant plus faible que le défaut se produit à l'extrémité éloignée de la ligne, il est d'autant plus fort que le défaut se produit à proximité de la protection. On voit clairement la variation du courant de défaut en fonction du point de défaut. En général, si le courant de défaut minimal, prévu à l'intérieur de la zone de protection, est supérieur au courant de charge maximal prévu, il y a présence d'un défaut dans la zone de protection et le relais doit déclencher.[1]

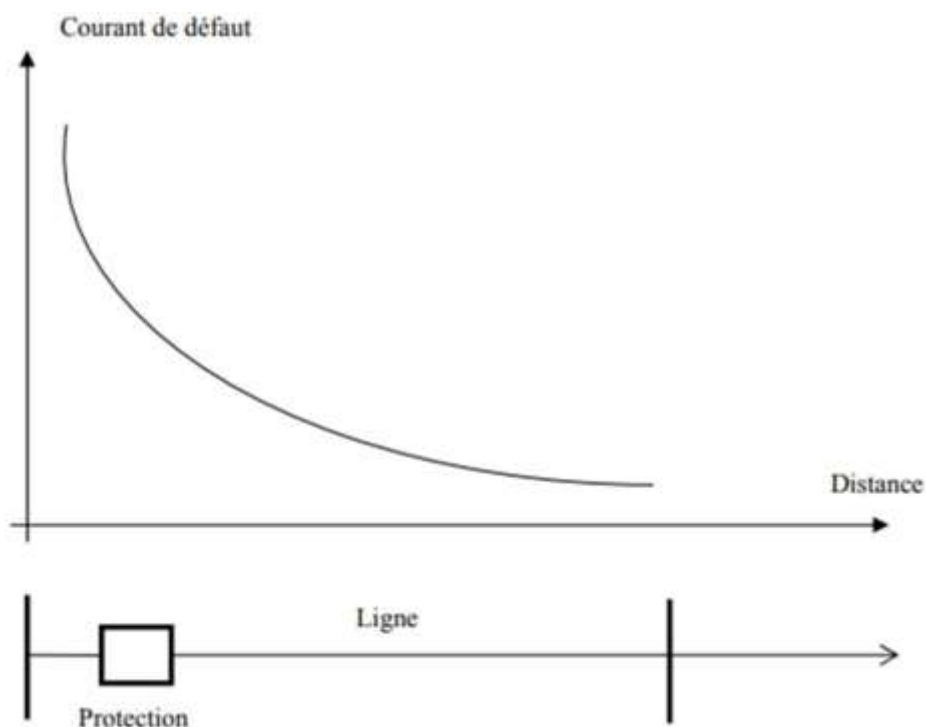


Figure.I.10. Courant de défaut en fonction du point de défaut.[1]

Cependant, il est très difficile de distinguer le niveau du courant de défaut du courant de surcharge avec ce type de relais. Pour remédier à cette difficulté, plusieurs variantes de relais à maximum de courant ont été développées utilisant le principe du relais à max de courant combiné à un temps de retard du fonctionnement (relais temporisé). Dans ce cas, le relais ne déclenche que si le courant détecté dépasse le seuil de courant de fonctionnement (I_r) pendant un temps au moins égal au temps de retard sélectionné (T).

Cette protection peut être temporisée et dans ce cas ne sera activée que si le courant surveillé dépasse le seuil de réglage pendant une durée au moins égale à la temporisation sélectionnée. Ce retard peut être un temps indépendant (défini) ou retard à temps inverse.

□ Protection temporisée à temps indépendant

Le seuil de courant et la temporisation sont généralement fixés par l'utilisateur comme indiqué sur la (Figure.I.10. a), la temporisation T est constante, elle est indépendante de la valeur du courant détecté.

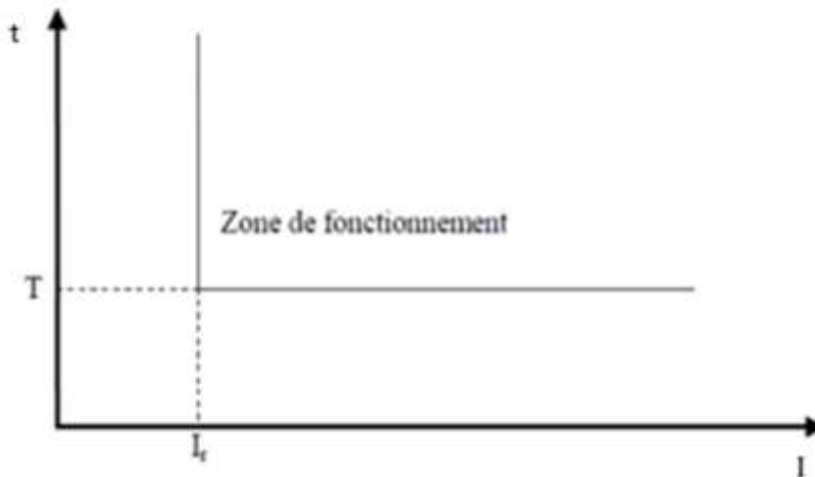


Figure.I.10. a. Caractéristique de déclenchement à temps indépendant.[1]

□ Protection temporisée à temps inverse

La temporisation dépend du rapport entre le courant mesuré et le seuil de fonctionnement. Plus le courant est élevé, plus la temporisation est courte. La temporisation est représentée en fonction du rapport du courant détecté et le seuil de fonctionnement (I/I_r).

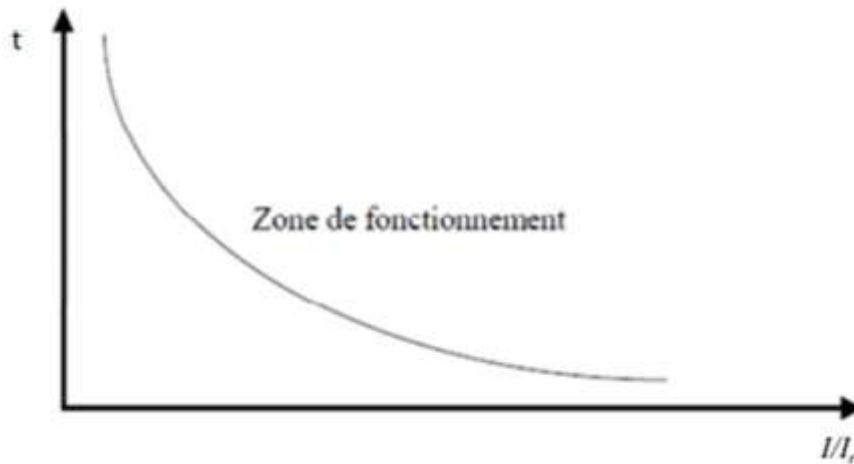


Figure.I.10. b. Caractéristique de déclenchement à temps inverse. [1]

Une protection à max de courant à temps inverse est constituée d'une unité instantanée et d'une unité de temporisation :

- L'unité instantanée est un relais à temps indépendant, il fonctionne instantanément quand le courant dépasse un certain seuil appelé seuil de courant instantané.
- L'unité de temporisation est un relais avec une caractéristique à temps inverse, cette unité est utilisée pour tous les courants de défauts qui sont inférieurs à la valeur du seuil de courant instantané mais supérieurs au courant de charge maximal.[1]

I.7.2. Protections wattmétriques

Ces protections mesurent le plus souvent la puissance résiduelle. En effet, l'apparition d'une telle puissance permet de détecter la présence d'un défaut monophasé situé en aval du point de mesure. Le principe et la conception de ces protections sont plus compliqués que pour une simple protection ampèremétrique ou voltmétrique, mais elles permettent d'améliorer notablement la sensibilité du plan de protection. Les protections wattmétriques entrent dans la catégorie plus vaste des protections directionnelles.[1]

I.7.3. Protection directionnelle

Cette protection est associée à une fonction de détection du sens du courant de défaut lorsqu'un jeu de barre alimenté par deux sources (Figure I.11), la sélectivité de fonctionnement ne peut pas être assurée par le principe considéré dans la protection à maximum de courant. Dans ce cas il est nécessaire d'introduire un organe complémentaire, dit organe directionnel de courant, dont le fonctionnement dépend du sens de la puissance de court-circuit. La protection, dans l'ensemble, réagit ainsi en fonction de la valeur du courant de court-circuit et du sens de l'écoulement de la puissance dans la ligne considérée. La protection fonctionne lorsque, simultanément, le courant ou la puissance dépassent un certain seuil et que l'énergie se propage dans une direction anormale.[1]

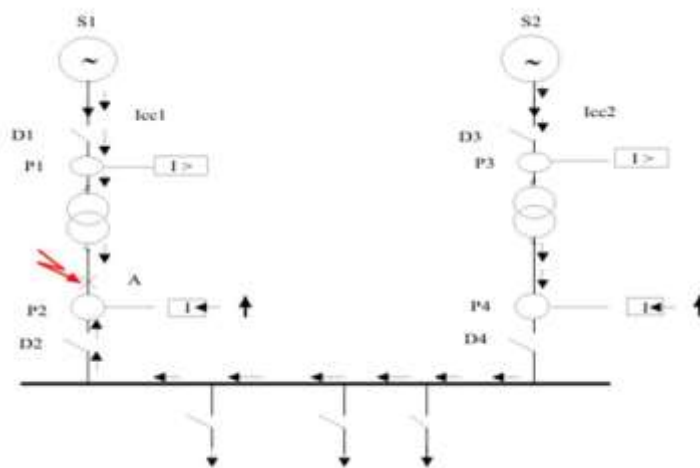


Figure.I.11. Protection directionnelle dans un réseau avec deux arrivées parallèles.[1]

I.7.4. Protection différentielle :

En l'absence de défaut, les courants entrant dans chaque élément d'une installation de distribution électrique sont égaux, phase à phase, à ceux qui en sortent. Le rôle de la protection différentielle est de contrôler ces égalités, de mesurer la différence éventuelle entre deux courants (due à un défaut) et, pour un seuil prédéterminé, de donner un ordre de déclenchement. L'élément défectueux est alors isolé du réseau (Figure I.12). Ce type de protection permet donc de surveiller une zone bien délimitée par deux jeux de réducteurs ou transformateurs de courant.

Cette protection est auto-sélective et peut donc être instantanée. Cet avantage doit être conservé dans des périodes où se produisent des phénomènes transitoires.

Cependant, la sensibilité doit être limitée aux phénomènes engendrés par des défauts et non point à d'autres considérés normaux (courant d'enclenchement, courant des défauts traversant et dont le siège est extérieur à la zone...). La protection différentielle peut être utilisée pour protéger les lignes, jeu de barres, transformateurs, moteur mais aussi les générateurs.[15]

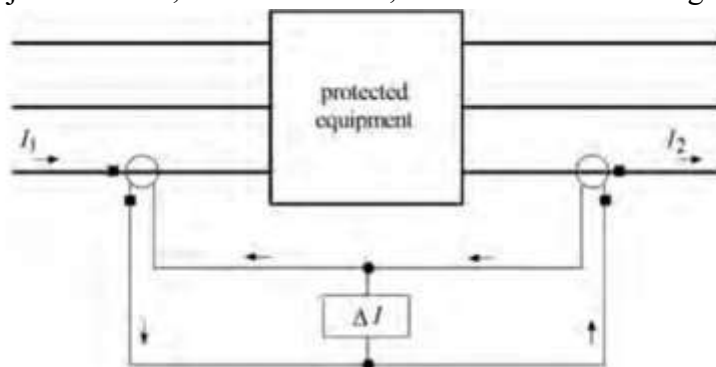


Figure. I.12. Protection différentielle.[15]

I.7.5. Protection de distance

On utilise un relais capable de mesurer l'impédance d'une ligne instantanément. En effet, l'impédance d'une ligne électrique est proportionnelle à sa longueur.

Le principe de base de la protection de distance implique la division de la tension au point de mesure par le courant mesuré. Par exemple l'impédance apparente ainsi calculée est comparée avec l'impédance de la ligne. Si l'impédance mesurée est inférieure à celle de la ligne, on suppose qu'il y a un défaut sur la ligne entre le relais et l'extrémité de la ligne ainsi protégée.

Le principe de la protection de distance est schématisé ci-dessous :

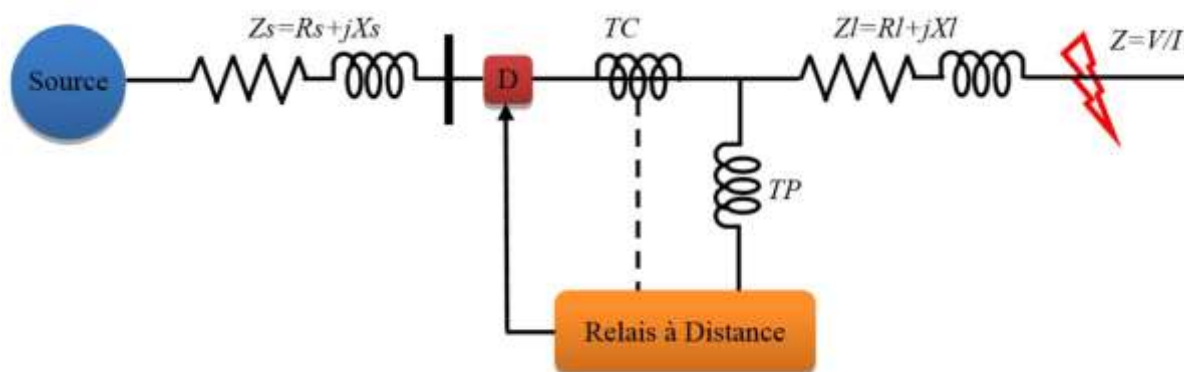


Figure. I.13. Principe de base du fonctionnement de protection à distance.[9]

I.7.5.1. Schéma de protection à distance

Le principe de la protection à distance est basé sur la loi d'Ohm: $V = RI$ sachant que

$$V = RI + jX I \quad (I.1)$$

- = Impédance de la zone de protection de la ligne.
- = Résistance de la ligne.
- = Réactance de la ligne.

En cas de défaut, le courant □□ augmente et la tension U sera diminuée ce qui affecte le changement de l'impédance de cette ligne □□ ; or l'impédance de la ligne □□ est proportionnelle à la longueur (L), donc pour déterminer la longueur où se trouve le problème, il suffit de connaître l'impédance qui est l'image de la tension et le courant circule à partir des transformateurs de mesures TT et TC. La ligne à protéger doit être partagée en deux zones avale et une zone amont (Figure. I.13). Le schéma conventionnel de la protection à distance est illustré par la figure I.14 :

- La première zone couvre 80% de la ligne avec un déclenchement instantané $t = 0s$.
- La deuxième zone est temporisée et destinée à protéger 120% de la ligne restante, et également le poste suivant.
- La troisième zone a un déclenchement en secours qui devrait protéger 140% des lignes, la temporisation est réglée à $t = 1,5s$.
- La quatrième zone temporisée à $t = 2,5s$, elle couvre 60% de la ligne en amont.[9]

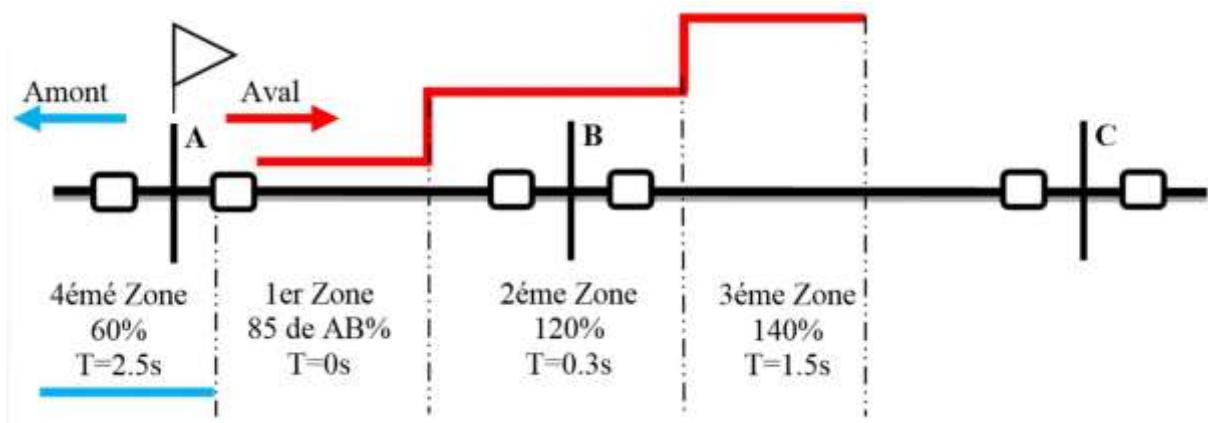


Figure.I.14. Zones de fonctionnement d'une protection de distance [9]

I.8.Appareillages de protection

I.8.1. Relais

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent une ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique (courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.) et les transmettent en un ordre binaire (fermeture ou ouverture d'un circuit de commande). Le rôle de ces relais de protection est donc, de détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel qu'un défaut de court-circuit, variation de tension, etc... et ce, par une surveillance continue. Ils déterminent l'ordre de déclenchement des disjoncteurs. Les relais de protection peuvent être classés en trois grandes familles :

- Les relais électromécaniques ;
- Les relais statiques ;
- Les relais numériques.[8]

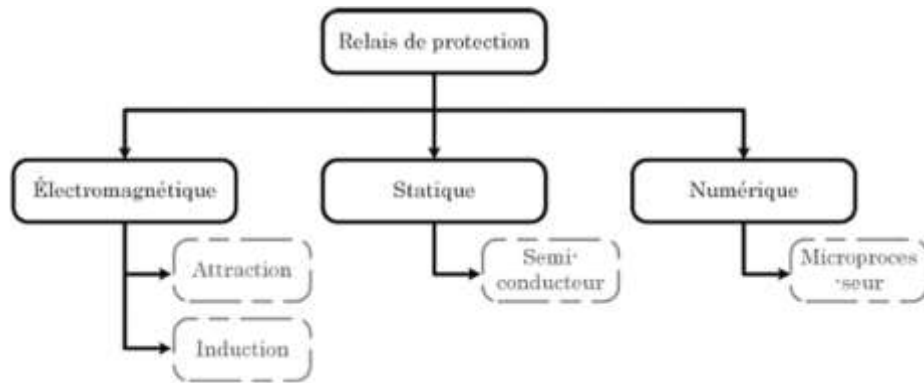


Figure.I.15. Classification des relais de protection.[13]

I.8.2. Sectionneurs

Le sectionneur est un appareil mécanique de connexion qui satisfait en position d'ouverture aux exigences spécifiées pour la fonction de sectionnement [14]. Il assure en position (ouvert) une coupure visible dans l'aire située entre deux conducteurs lors des travaux d'entretien en toute sécurité sur la zone mise hors tension. En position (fermé), il assure la liaison entre deux conducteurs situés sur un même plan horizontal ou les plans superposés et permet donc le passage du courant nominal. Le sectionneur doit résister aux courants de courts circuits.[15]



Figure.I.16. Sectionneur utilisé pour la sécurité des métros.[15]



Figure. I.17. Sectionneur de ligne. [15]

I.8.3. Disjoncteurs

Un disjoncteur est un organe électromécanique, de protection dont la fonction est le déclenchement automatique en cas d'un incident et de couper le courant de court-circuit ; il permet donc la protection des équipements contre tout défaut, en assurant l'ouverture de circuit sur ordre des relais de mesure ; et il peut également effectuer des réenclenchement. [15]

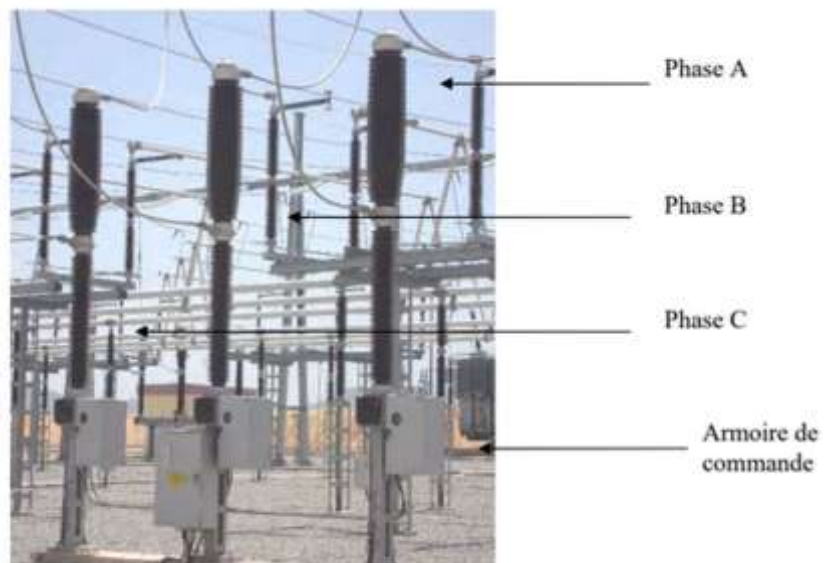


Figure.I.18. Disjoncteur à gaz SF₆. [15]

I.8.4. Interrupteur

L'interrupteur est un appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales de fonctionnement, y compris éventuellement les conditions spécifiées de surcharge en service. Il doit aussi être capable de supporter pendant une durée spécifiée des courants dans des conditions anormales spécifiées du circuit telles que celles du court-circuit. Un interrupteur peut être capable d'établir des courants de court-circuit mais n'est pas capable de les couper.[16]

L'interrupteur n'est pas conçu pour assurer la protection des circuits qu'il commande. C'est pour cela qu'il est souvent associé à un Dispositif de Protection au Court-Circuit (DPCC) tel que le fusible. Le fusible gère l'aspect protection des surcharges et du court-circuit par un confinement maximum de l'arc de coupure. Son fort pouvoir de limitation est très intéressant pour limiter les effets destructeurs sur les installations électriques. L'avantage de ce type d'association est la dissociation des fonctions de protection et d'interruption pour une meilleure optimisation de leur mise en œuvre.

La figure 1.19 présente un interrupteur - sectionneur PV pour les installations photovoltaïques, de courant assigné 400 A et une tension assignée de 1500 VDC.[17]



Figure.1.19. Interrupteur-sectionneur

PV.[17]

I.8.5. Fusible :

L'ouverture du circuit en cas de défaut peut se faire par la destruction d'une pièce permettant le passage du courant que l'on appelle fusible.



Figure. I.20.Fusible Socomec gPV (125 A/ 1000 VDC).[17]

Il s'agit d'un élément conducteur assez fin dont les propriétés thermiques sont bien connues. Si un courant supérieur à son calibre le traverse, il s'échauffe, fond, se vaporise et rompt ainsi le circuit. Il est généralement encapsulé dans un milieu destiné à absorber l'énergie de l'arc. Cette solution est utilisée pour tous les domaines de tension.

Le fusible ne coupe le circuit que lorsqu'il est traversé par un fort courant (surcharge ou court-circuit) et cette ouverture n'est pas commandable.

Le fusible est à usage unique et il doit être remplacé après chaque coupure. La figure 1.18 présente un fusible PV, spécifique pour les installations photovoltaïques, pour un courant

assigné de 125 A à une tension assignée de 1000 VDC avec les caractéristiques de fonctionnement temps/courant.[17]

I.9. Production d'électricité décentralisée

La production décentralisée (dite encore « dispersée » ou « distribuée ») est la production d'énergie électrique à l'aide des installations de petite puissance raccordées aux réseaux à basse (et plus rarement moyenne) tension contrairement à la production centralisée de grande puissance, raccordées au réseau de transmission. La production décentralisée est à base de sources d'énergie renouvelable, mais dans certains cas elle peut être effectuée aussi avec des générateurs conventionnels (groupes diesel et micro-turbines à gaz en cogénération). Actuellement, la puissance cumulative de la production d'électricité décentralisée est en forte augmentation. Cet accroissement est dû à différents facteurs, mais principalement c'est la libéralisation progressive des marchés de l'énergie dans une grande majorité des pays. En effet, désormais, les producteurs d'énergie indépendants peuvent vendre leur production d'électricité à travers des bourses de l'énergie. Selon le pays, différents systèmes existent : contrats bilatéraux, système de pool, acheteur unique, etc.... [10]

I.9.1. Différents types de production décentralisée

La production décentralisée regroupe différents types de sources d'énergie installées près des lieux de consommation, parmi ces types on retrouve principalement l'énergie renouvelable.

I.9.2. Différentes sources d'énergies renouvelables

Les technologies de production d'électricité renouvelable exploitent les flux énergétiques existants naturellement (vent, soleil, chaleur, marées, rivières, etc.) et les convertissent en puissance électrique c'est à-dire une source inépuisable qui se renouvelle de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future. Cependant, les phénomènes naturels ont des constantes de temps, des cycles et des densités d'énergie variables et très souvent non stockables ou transportables.[18]

A. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique fonctionne grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau (chutes, rivières, marées, courants marins, vagues...). La production de l'électricité à partir de la force de l'eau est une technique très ancienne et il existe différents types d'installations hydrauliques: Il y a notamment l'énergie marémotrice issue du mouvement de l'eau créé par les marées, l'énergie thermique des mers produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans, les éoliennes offshore, et l'énergie houlomotrice qui utilise l'énergie des vagues. On distingue deux types de centrales hydroélectriques : les centrales au fil de l'eau et les centrales alimentées par un réservoir.[18]

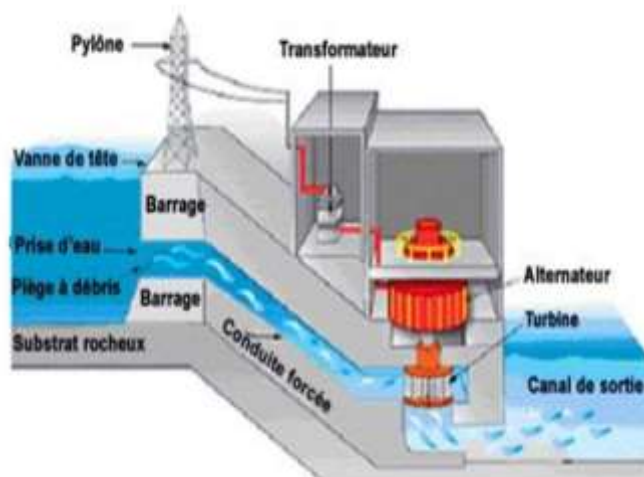


Figure.I.21. Schéma d'un aménagement

hydroélectrique.[18] B. Biomasse :

L'énergie biomasse La conversion énergétique de la biomasse s'effectue par des conversions biochimique et thermochimique. Les procédés biochimiques incluent la fermentation et la digestion anaérobie pour produire respectivement l'éthanol et le biogaz. Les conversions thermochimiques peuvent être classées en deux catégories : procédés secs (combustion, gazéification et pyrolyse), et procédés hydrothermaux (gazéification, liquéfaction, carbonisation). La combustion génère de l'énergie thermique (chaleur) alors que la gazéification, la pyrolyse et le traitement hydrothermal décomposent la biomasse en combustibles solide, liquide et gazeux. [19]

C. L'énergie photovoltaïque :

L'énergie solaire est exploitée sous deux formes d'énergie à savoir l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable. La deuxième photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique.

L'énergie solaire est le produit d'une conversion du rayonnement solaire en électricité et ce grâce à des panneaux photovoltaïques. Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir de rayonnement solaire en électricité sous forme de courant continu (Figure I.24). [18]

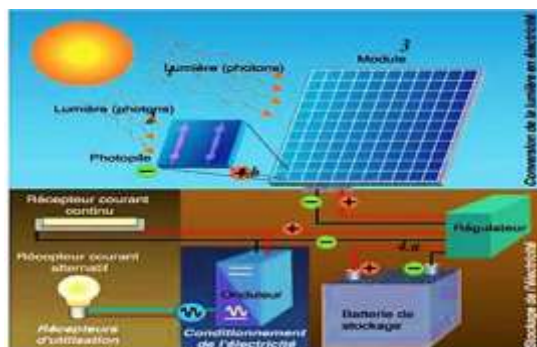


Figure.I.22. Schéma d'un système photovoltaïque.[20]

1. Flux radiatif solaire (éclairage).
2. Effet photovoltaïque dans les cellules photovoltaïques : les photons d'énergie supérieure au gap du semi-conducteur sont absorbés, création d'un courant continu.
3. Les cellules sont connectées en série / parallèle dans les modules photovoltaïques.
4. a) Le courant continu charge des batteries, éventuellement via un convertisseur DC/ DC.
b) Un onduleur convertit la puissance DC en puissance AC et l'injecte au réseau.

D. Energie Eolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif dit éolienne ou aérogénérateur, puis il la transforme en électricité. La mise en œuvre de l'énergie éolienne est d'abord fonction des conditions climatiques et géographiques, et notamment le régime des vents, et ensuite des conditions de faisabilité aussi bien technologique que financière. La ressource éolienne est présente quasiment partout sur Terre, son énergie sur l'ensemble du globe est estimée à 5.106 Twh/h par an.[21]

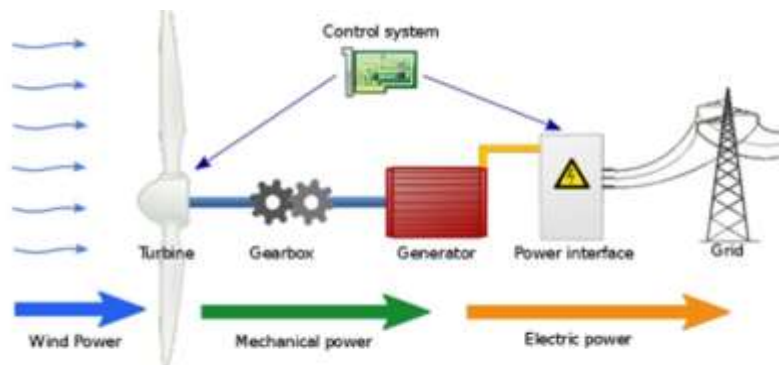


Figure.I.23. Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.[20]

E. Géothermie :

Les centrales géothermiques exploitent la chaleur des nappes d'eau souterraines pour la production d'électricité. Cette chaleur est véhiculée à la surface par un fluide caloporteur puis la vapeur produite est turbinée dans une centrale thermique classique. Les centrales géothermiques sont catégorisées comme un moyen de production décentralisée de type renouvelable, bien que la quantité de chaleur contenue dans le sol ne se renouvelle pas. Effectivement, celle-ci est considérée inépuisable à l'instar des marées.[22]

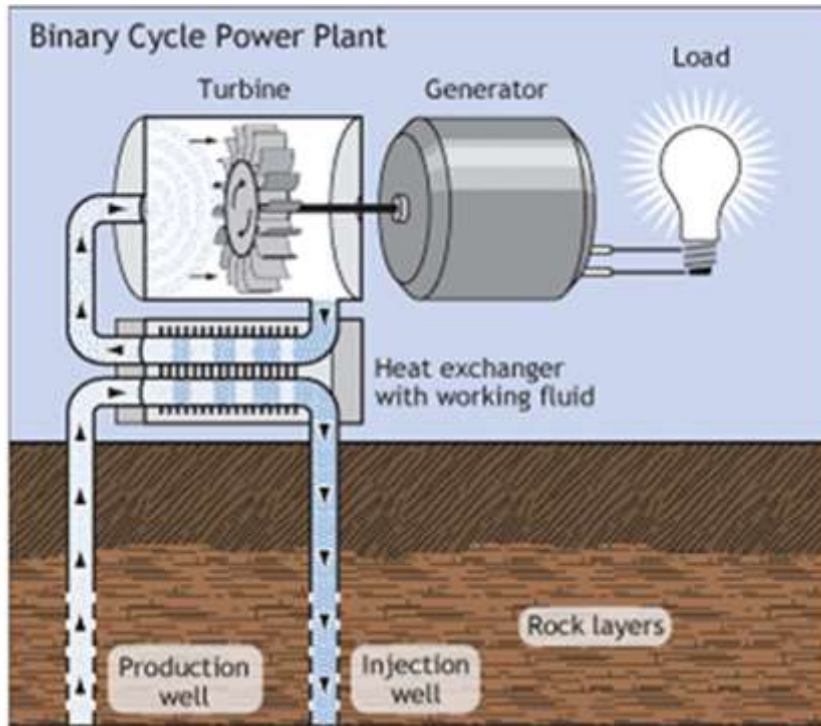


Figure. I.24. Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique. [10]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les différentes structures et topologies des réseaux électriques. Nous avons également donné un aperçu sur les moyens de production à base de ressources renouvelables, la production éolienne et la production photovoltaïque, qui sont actuellement connectées au réseau.

Dans la continuité de cette étude, il nous a paru nécessaire de fournir des informations suffisantes sur les différentes protections existantes dans un réseau électrique du fait que les éléments qui le constituent sont très sensibles et doivent être bien surveillés et protégés contre les différents types d'anomalies qui peuvent survenir.

Dans le chapitre qui suit nous allons présenter les impacts qui touchent le fonctionnement du réseau électrique lors de l'intégration massive de ces productions décentralisées sur les réseaux électriques.

CHAPITRE 02 :

Impact des productions décentralisées sur les protections des
réseaux électrique

II.1. Introduction

La production décentralisée est un domaine émergent, actuellement en plein essor. Le marché mondial de l'énergie électrique s'élargit grâce aux nouvelles technologies développées, principalement les énergies renouvelables : elles offrent de nombreuses solutions écologiques et garantissent un rendement satisfaisant. Toutefois, ces énergies sont encore en cours de développement d'atteindre des résultats meilleurs.

La production distribuée est utile pour renforcer les réseaux électriques, c'est plus simple, plus pratique et beaucoup moins coûteux que la production centralisée, qui était avant le seul moyen pour renforcer les réseaux électriques.

Mais l'insertion croissante de cette forme d'énergie est loin d'être sans inconvénients. Elle vient à changer tous les paramètres du système et présente plusieurs incertitudes sur son taux d'intégration dans les réseaux électriques. Dans ce deuxième chapitre, nous allons présenter plusieurs impacts de l'insertion de cette énergie sur les réseaux de distribution et de transport notamment sur le plan de protection.

II.2. Impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques.

La production décentralisée peut occasionner quelques impacts sur le système électrique ces impacts peuvent être classés en deux groupes: les impacts sur le système de distribution et les impacts sur le système de transport.[2]

II.2.1. Impacts sur le système de distribution.

II.2.1.1. Impacts sur le sens de transit de puissance

La modification du transit de puissance est le premier impact lié à l'intégration des PD dans un réseau électrique. Le réseau de distribution (RD) devient alors actif avec la présence des PD car les transits de puissance deviennent bidirectionnels et seront gouvernés non seulement par les charges, mais aussi par les sources de PD renouvelables. Les réseaux électriques ont été conçus et dimensionnés pour acheminer les flux de puissance de façon unidirectionnelle de la haute tension vers la basse tension. Ces flux ainsi que les tensions étaient déterminés par les charges.

L'intégration de la PD renouvelable dans un nœud du RD alimente non seulement la charge qui s'y trouve mais exporte du flux de puissance vers d'autres charges, qui étaient auparavant alimentées par le réseau de transport. De ce fait, les plans de protection du réseau doivent être modifiés afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. L'inversion des flux de puissance peut également endommager les appareils de mesure et de protection du réseau qui sont le plus souvent unidirectionnels. La figure (II.1) présente l'impact de PD renouvelable sur le transit de puissance.[23]

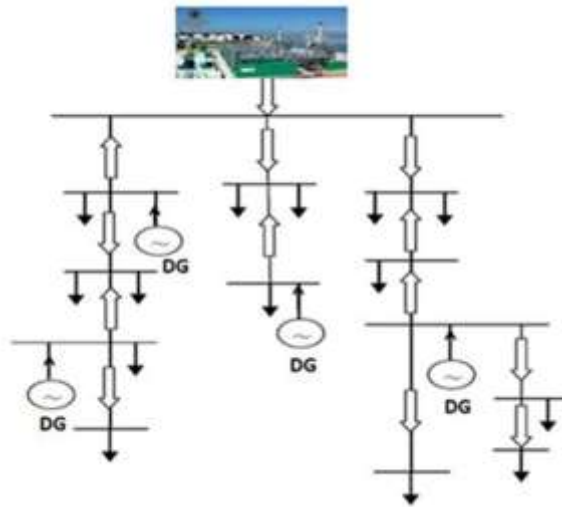


Figure. II.1. Transit de puissance en présence de PD.[23]

II.2.1.2. Impacts sur la stabilité du réseau

Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à laquelle le réseau peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système.[24]

□ Impact sur les courants de court-circuit

L'intégration de PD dans le réseau de distribution, entraîne en général une élévation du niveau de courant de court-circuit. Cette élévation peut alors créer des problèmes pour le fonctionnement des composants de système de distribution comme les lignes, les disjoncteurs et les interrupteurs...etc, qui ont été dimensionnés pour supporter des courants de court-circuit inférieurs. Ainsi le courant de court-circuit peut provoquer le dysfonctionnement du matériel de protection. Par ailleurs, lors d'un défaut, les producteurs alimentent le courant de défaut. Celui-ci peut alors dépasser la limite admissible des éléments du réseau (tels que les conducteurs, entre autres). [25]

□ Impact sur la puissance de court-circuit

Strictement liée aux niveaux des courants de court-circuit, la puissance de court circuit "PCC" du réseau en un point de connexion proposée est un élément important à analyser lors de la planification de la connexion de la PD au réseau électrique. La PCC peut varier d'un réseau à un autre et d'un point à un autre du même réseau. La PD et les gros consommateurs peuvent causer des changements relativement importants dans les niveaux de tension sur un réseau de faible PCC. En revanche, un réseau de forte PCC sera moins affecté par des changements dans la production et la demande. Un réseau électrique de faible PCC à un faible niveau de court-circuit. La puissance de court-circuit en un point du réseau est déterminée par l'impédance entre ce point et les principaux générateurs d'énergie du réseau. Plus cette impédance est petite, plus la PCC en ce point est forte. Autrement, un point du réseau dont la PCC est faible est un point qui se trouve plus loin des générateurs. La

PCC d'un réseau détermine aussi le courant qui peut circuler en cas de défaut.[26]

II.2.1.3. Impacts sur la qualité d'énergie

Les PDs de type machine asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (en profondeur). D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie. [24]

- Fluctuations (flicker)

Il s'agit de variations rapides de la tension inférieures à 10 % de la tension nominale de manière répétitive. Il provient du fonctionnement de certaines machines comme les fours à arcs par exemple. Le « flicker » n'a aucune incidence sur les matériels. Cependant il provoque une gêne visuelle car il est responsable du papillotement des ampoules à incandescence. Le « flicker » peut apparaître en raison de l'intermittence des PD si celles-ci sont des éoliennes ou encore des panneaux photovoltaïques.

- Creux de tension

Il s'agit d'une diminution brutale de la tension qui peut aller jusqu'à 90 % de la tension nominale pendant une durée comprise entre 10 ms et 1 minute. Le fonctionnement des protections limite la durée des creux de tension à la suite de défauts polyphasés. Ils peuvent intervenir également lorsqu'une PD se couple au réseau.

- Harmoniques

Les harmoniques sont une déformation de l'onde de tension ou de courant. Certaines PD peuvent avoir des interfaces d'électronique de puissance. Or ce sont ces dispositifs d'électronique de puissance qui sont responsables de la création d'harmoniques de fréquences relativement élevées qui peuvent provoquer un vieillissement prématuré des matériels. Par ailleurs, elles sont responsables de gênes acoustiques dans les transformateurs et de vibrations dans les machines tournantes .[27]

II.2.1.4. Impacts sur le profil de tension

Lorsque les PD sont connectées, la tension à certains jeux de barres du réseau peut devenir supérieure ou inférieure à la limite autorisée. On cherche à garder la tension du réseau dans les limites admissibles. La tension du réseau est augmentée avec l'intégration des PD comme montré sur la (Figure II.3.).

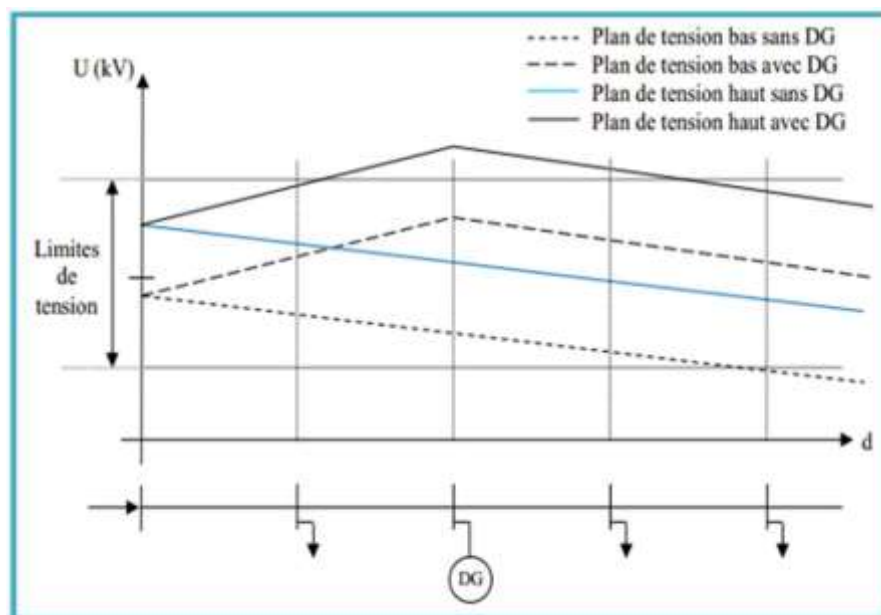


Figure. II.2. Variations de la tension du réseau sans et avec PD.[25]

Ces surtensions peuvent être éliminées par une adaptation de la puissance réactive générée par les PD. Selon la valeur de la tension, la puissance réactive est plus ou moins importante.

La connexion de la PD au réseau de distribution conduit à une modification des profils de tension sur ce réseau de distribution avec une augmentation possible de la tension le long de la ligne où la PD est connectée. Cette modification de la tension dépend de la taille de la PD connectée et de son emplacement ainsi que du facteur de puissance et de la structure du réseau.[25]

II.2.2. Impact sur le système de transport

L'intérêt de l'étude des impacts de l'insertion massive de production décentralisée sur le réseau de transport est apparu récemment lorsque certaines technologies utilisées sont arrivées à une certaine maturité (cas de l'éolien). Cependant, ce type d'étude devenait un véritable besoin notamment après des incidents majeurs qui se sont passés au cours des dernières années dans le monde, black-out par exemple, où la stratégie d'exploitation inadéquate des PDs a contribué à des causes décisives de l'écroulement total du réseau. Les principaux impacts à rappeler sont décrits ci-dessous.[28]

II.2.2.1. Risque de congestion

L'insertion des sources intermittentes est normalement localisée dans des zones où les Conditions climatiques sont plus appropriées. Ceci provoque le besoin d'un Renforcement local du réseau vu les possibilités de congestions locales.

II.2.2.2. Incertitude sur la production

L'intermittence des sources d'énergie provoque une incertitude dans le système en termes de quantité d'énergie générée et de la localisation de l'injection : le réseau électrique doit être prêt à accueillir un nombre important de producteurs d'énergie sans connaître a priori ni la position, ni la puissance qu'ils vont débiter.

II.2.2.3. Changement des marges d'exploitation

Le changement des marges d'exploitation comme conséquence du besoin d'un système de suivi non seulement de la charge mais aussi de l'intermittence des sources.

II.2.2.4. Apparition des flux d'énergie réactive

L'apparition des flux d'énergie réactive inattendus dans le système de transport lorsque le flux de puissance active est inférieur à la puissance naturelle de la ligne.

II.2.2.5. Fermeture des grandes centrales

La fermeture ou le non remplacement des grandes centrales à cause des raisons économiques et environnementales.

II.2.2.6. Perte de la production d'énergie

La perte de la production d'énergie par des conditions climatiques rudes, soit la déconnexion des éoliennes par vents excessivement forts (> 25 m/s onshore ou 34 m/s offshore).[29]

II.3. Impact sur les dispositifs de protection

Le réseau électrique utilise des équipements de protection pour détecter les défauts et faire fonctionner des équipements tels que des disjoncteurs, et des appareillages pour isoler la partie affectée du réseau, limiter les interruptions de service, et assurer le fonctionnement normal de la partie non affectée.

Avant le développement des PDs, le système de protection reposa sur l'exploitation traditionnelle du réseau, où la fourniture et la coordination des équipements de protection sont principalement conçus et coordonnés pour un flux de puissance unidirectionnel.

Cependant, l'installation de PD peut augmenter le courant de défaut et changer la direction du flux. L'utilisation de configurations de protection existantes avec flux d'énergie bidirectionnel peut conduire à un comportement malveillant instable, ou à d'autres erreurs dans le fonctionnement des équipements de protection tels que les relais de tension / courant et les disjoncteurs.[30]

II.3.1. Impacts sur le plan de protection

La connexion de la PD au réseau modifie les courants de courts -circuits, ce qui nécessite une réévaluation des seuils de déclenchement des protections. D'ailleurs, ce changement peut entraîner une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection.[25]

Lorsqu'un défaut apparaît sur un départ, le gestionnaire du réseau électrique doit, pour des raisons de sécurité, éliminer ce défaut en ouvrant le disjoncteur du départ associé. Dans le cas de défauts fugitifs sur un réseau aérien, une mise hors tension très courte est suffisante pour éliminer le défaut et permettre le succès d'un cycle de réenclenchement rapide. La présence d'une installation de production décentralisée ne doit pas perturber le fonctionnement du plan de protection en sensibilité et en sélectivité lors d'un défaut sur le départ auquel elle est raccordée. L'installation de la PD doit se découpler pour ne pas maintenir sous tension le défaut : c'est le rôle de la protection de découplage. Cette protection "de découplage" devant supprimer

la parallèle entre générateurs et réseau lors d'un défaut ou d'une autre anomalie sur celui-ci. Le découplage doit répondre à des conditions strictes lorsqu'il est effectué des ré enclenchements automatiques rapides, ce qui est le cas le plus général dans les réseaux aériens.[31]

□ Problème d'aveuglement des protections :

Le problème d'aveuglement des protections se produit lorsqu'un défaut apparaît sur un départ possédant une PD. Ce problème est illustré sur la figure. II.2, en effet, en l'absence de PD, le seuil de la protection P2 est réglé à $I_{seuil} = I_{df1}$ (courant de défaut provenant du réseau amont). Si on raccorde une PD, celle-ci va participer au courant de défaut. Le courant de défaut apporté par le réseau amont, I_{df2} , est alors plus faible que I_{df1} est donc inférieur au seuil de la protection P2 qui ne déclenche pas d'où le terme d'aveuglement.[27]

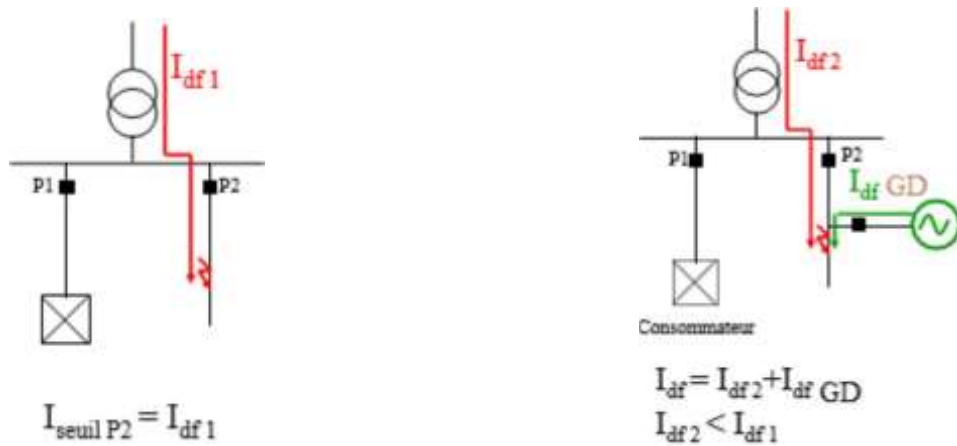


Figure. II.3. Problème d'aveuglement de protections. [27]

□ Problème du déclenchement intempestif des protections :

Le problème de déclenchement intempestif des protections (illustré sur la Figure. II.3) se produit lorsqu'un défaut apparaît sur un départ adjacent au départ possédant une PD. En effet, la PD participant au courant de défaut peut faire déclencher la protection P2 si le courant de défaut apporté par la PD est supérieur au seuil de la protection P2.[27]

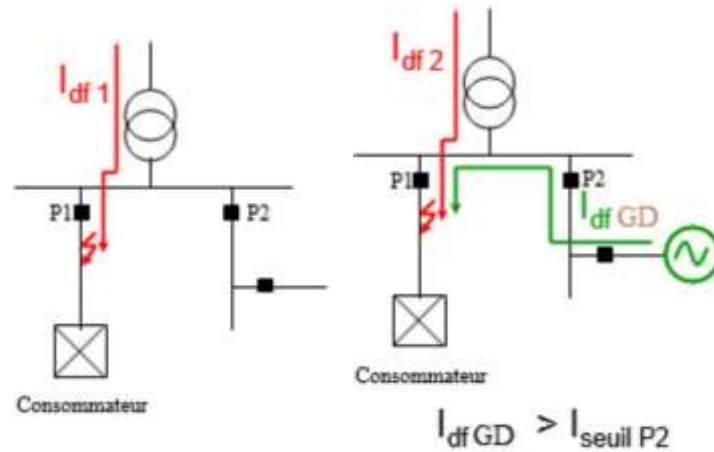


Figure. II.4. Problème du déclenchement intempestif des protections.[27]

□ Influence sur la sélectivité des protections

La sélectivité des protections peut être affectée par l'introduction d'unités de production décentralisée dans le réseau de distribution dont la structure est de type radial. Pour illustrer cette influence considérons le schéma de la (Figure II.2) ciaprès d'alimentation par une sous-station du réseau d'une charge par le départ 2, et la connexion à la sous-station par le départ 1 d'une unité de production décentralisée. Ces deux départs sont chacune protégées par un disjoncteur contre les surintensités comme c'est l'usage.

Dans cet exemple extrêmement simple la protection de la ligne 1 déconnecte inutilement la PD lors d'un défaut sur la ligne 2, car le courant du générateur lors de ce défaut est supérieur au seuil de protection en cas de défaut sur la ligne 2. Les seuils de protection doivent donc être revus pour que seule la ligne en défaut soit déconnectée.[25]

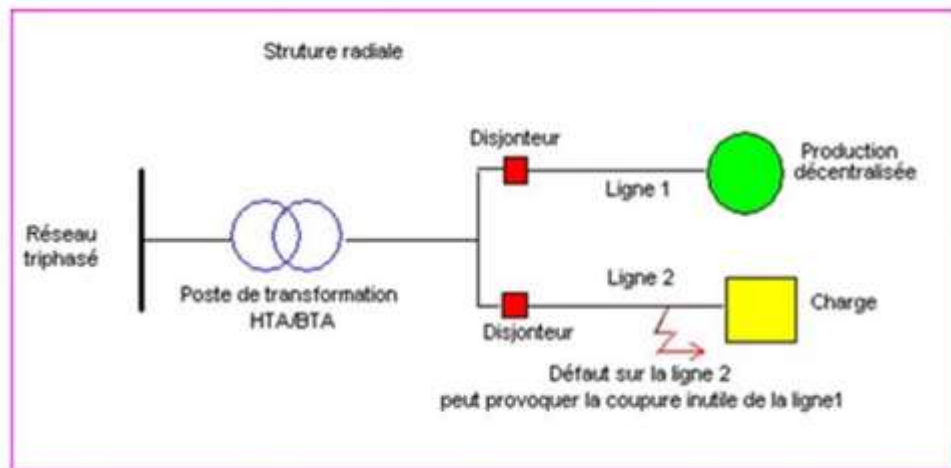


Figure.II.5. Influence de la PD sur la sélectivité des protections.[25]

II.3.2. Impact de la PD sur les niveaux des courants de défaut

Lorsque la PD est connectée au réseau de distribution, la contribution de la production décentralisée au niveau actuel du courant de défaut est un des principaux problèmes, dépendant de trois paramètres : le courant de court-circuit symétrique initial, le courant de pic de court-circuit et le courant de court-circuit en régime permanent. La figure. II.4 montre la symétrie appliquée à l'onde fondamentale du courant de court-circuit typique du courant.

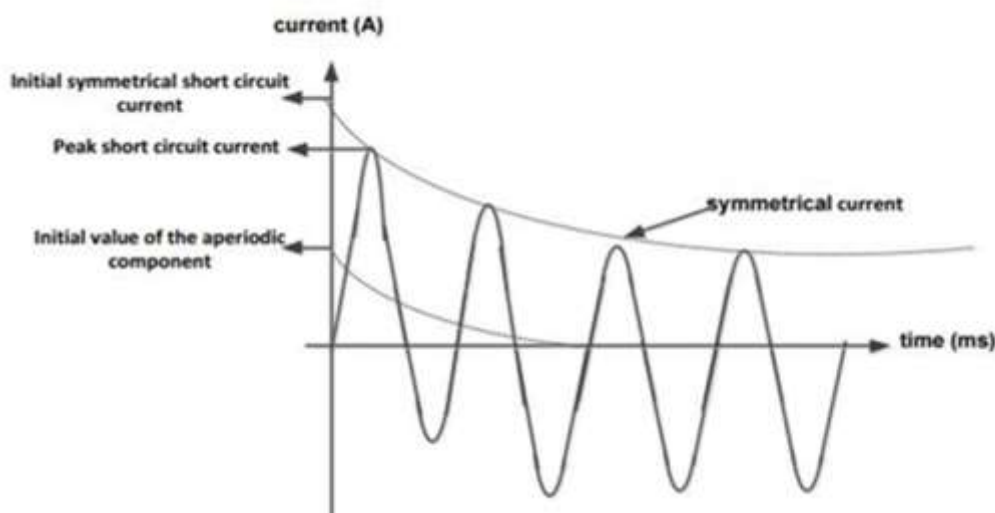


Figure.II.6. Forme typique de courant de court-circuit. [30]

La connexion de la PD au réseau de distribution impacte les schémas de protection existants. Cette influence dépend du nombre, du type, de la taille et de l'emplacement des unités PD.

Cette situation peut nuire à la sécurité et à la qualité de l'énergie fournie, en raison des perturbations introduites par les équipements de la PD. Il est donc essentiel que le concepteur du réseau gère correctement ce processus. Dans un réseau traditionnel, en cas de panne, le courant circule vers la zone défectueuse à partir de l'alimentation principale. Avec la PD, le courant de défaut provient à la fois du réseau et des sources décentralisées, augmentant la complexité de la détection et de la coordination des protections. La Figure II.5 montre l'analyse du niveau de courant de défaut causé par la connexion d'une PD au réseau à différents moments.[30]

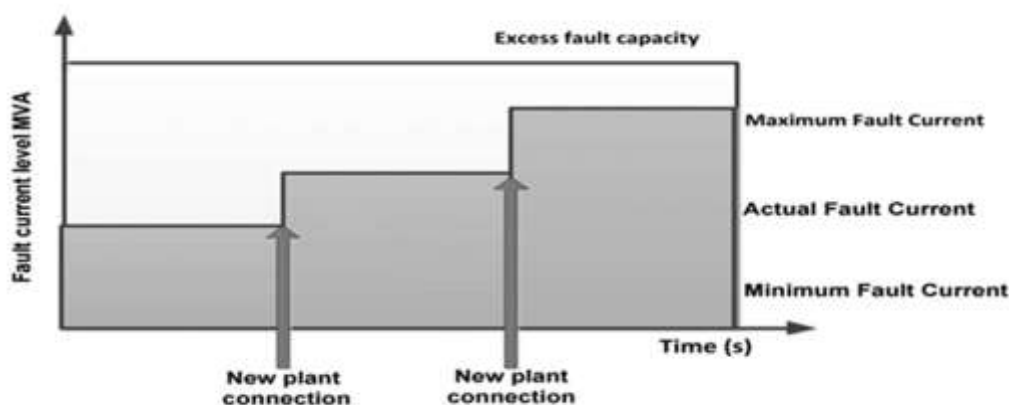


Figure. II.7. Analyse du niveau de défaut en présence des PDs.[30]

II.3.4. Les changements de niveau du courant de défaut

Comme le montre la Figure II.5, le réglage actuel du relais ne sera pas détecté. Cela conduit à une application incorrecte du schéma de relais. Des relais adaptatifs peuvent être utilisés pour résoudre ce problème, mais les relais adaptatifs doivent être ajustés dans un environnement variable.

La Figure II.6 illustre l'effet de différentes tailles de PD type synchrone sur le niveau des courants de défaut dans le réseau de distribution. Lorsque la PD 9 MVA est installée, le niveau de court-circuit augmente d'environ 50 MVA. 50 MVA représente environ 5% du pouvoir de coupure du disjoncteur. Cela signifie que 15% de la capacité du transformateur principal n'a aucun effet sur le niveau de court-circuit du système de distribution. La capacité de PD est inférieure à 15% du transformateur principal (règle simple) sans calculs techniques spécifiques, tels que les changements de la tension d'émission et le niveau de court-circuit. [30]

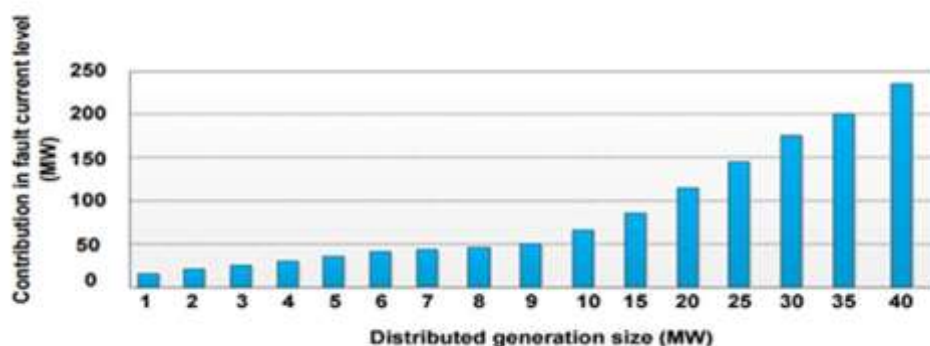


Figure.II.8. Différentes tailles de PD contribuent au niveau du courant de défaut.[30]

II.3.5. Impact de PD sur la protection des départs

Le réseau de distribution a généralement une topologie radiale. Chaque branche dispose d'une source qui alimente le départ en aval. Le système de protection dans la distribution d'énergie comprend un réenclencheur et un relais de surintensité. La conception de base du dispositif de protection suppose que le courant de défaut circule d'une seule source d'alimentation vers la zone de défaut dans une seule direction. Cependant, l'inclusion de PD peut poser plusieurs problèmes de protection au départ :

- Le raccordement de PD conduit à la diversité des sources d'énergie dans le réseau de distribution, ce qui entraîne un courant de défaut bidirectionnel ;
- À cause de l'augmentation ou de la diminution du courant de défaut, le relais de coordination du système de protection peut être perturbé ;
- À cause de l'intégration d'une PD intermittente, le niveau du courant de défaut peut être constamment modifié.[30]

II.3.6. Impact de PD sur les relais de protection de Coordination

Traditionnellement, dans les schémas de protection, le courant circule dans un seul sens, mais l'ajout de puissance au réseau entraînera la redistribution du courant de dérivation à travers le réseau. L'impact de la production d'énergie décentralisée sur la coordination des équipements

de protection repose sur plusieurs facteurs, tels que la sensibilité à la configuration du système de distribution, la taille et l'emplacement de la PD. Le niveau de courant de défaut augmente proportionnellement au taux de pénétration de PD.[32]

II.4. Solutions proposées pour limiter les impacts des PDs

II.4.1. Des solutions pour un taux moyen d'intégration des PDs

- Pour s'adapter à un courant de défaut plus élevé en présence des PDs, il faut renforcer le réseau en choisissant les matériels (lignes, câbles, disjoncteurs,) qui peuvent le supporter. On peut aussi raccorder des PDs via de nouveaux départs (départs dédiés) qui possède des matériels appropriés. Par ailleurs, pour connecter plus de PDs sans faire augmenter le courant de défaut, nous pouvons interfacer des PDs via des convertisseurs de puissance. Ainsi, leur contribution aux courants de défaut peut être limitée par la commande de ces convertisseurs. [33]
- Pour éviter des fonctionnements intempestifs des protections de départ du producteur, il faudrait les équiper avec des relais directionnels.[33] [34]
- Pour résoudre le problème d'aveuglement des protections, on peut abaisser le courant de seuil des protections. Pourtant, cela entraîne la diminution la sensibilité et la sécurité du système de protection et éventuellement le déclenchement intempestif en cas de défaut sur un départ voisin. Une autre solution est l'utilisation de protections avec une temporisation supplémentaire pour laisser le temps au GED de se déconnecter par sa protection de découplage. L'inconvénient est un temps d'élimination de défaut trop long, voire inacceptable. Par ailleurs, on peut faire diminuer la contribution des GED aux courants de défaut (en diminuant leur puissance de court-circuit ou en utilisant l'interface de convertisseur) ou prévoir une autre solution de raccordement.[35]
- La coordination entre les réenclencheurs et les fusibles peut aussi être rétablie en utilisant des relais numériques. Ces derniers peuvent s'adapter à l'évolution des conditions du système grâce à leurs variétés de courbes de caractéristiques à choisir. De plus, l'utilisateur peut définir soi-même la courbe appropriée pour assurer la coordination.
- La protection de distance pour les réseaux de distribution peut être une solution pour résoudre les problèmes comme la perte de sensibilité de protection, la perte de coordination entre protections, et le déclenchement intempestif (cas de défauts sur les zones plus loin que celle protégée par la protection) dû au raccordement des PDs. Les relais de distance, directionnels par leur nature, ont des caractéristiques qui peuvent être prédéfinis. De plus, ils sont moins influencés par les changements des conditions du système par rapport aux relais de surintensité.[35]
- Protection d'ilotage: pour éviter le fonctionnement involontaire en mode d'ilotage, il faudrait avoir de nouveaux moyens pour détecter cette circonstance. On peut utiliser des méthodes actives ou passives suivantes :

- Méthodes passives: ces méthodes sont basées sur la surveillance des paramètres importants comme la tension (y compris la tension homopolaire), le courant, la fréquence ou des distorsions harmoniques. Ces paramètres vont être modifiés lors de l'ilotage. La difficulté est de trouver un bon seuil pour la détection d'ilotage, qui peut distinguer cette dernière et d'autres perturbations sur le réseau. Par exemple, on peut utiliser le taux de variation de la fréquence comme critère de l'ilotage. Ce dernier fonctionne avec des réseaux où soit la charge, soit la production est en excédent. En revanche, si on a un bon équilibre production-consommation, ce taux devient petit et la détection d'ilotage sera vraiment compliquée.[35]
- Méthodes actives: dans les méthodes actives, on crée volontairement une petite perturbation dans le réseau qui entraîne des changements importants sur des paramètres du système en mode isolé. Au contraire, si le système est bien relié au réseau principal, ces changements sont presque inaperçus. Par exemple, on peut créer volontairement une fluctuation de la tension via un petit changement du régulateur automatique de la tension (AVR) des PDs. Pour un système isolé, l'influence de cette fluctuation est beaucoup plus élevée que celui en connexion au grand réseau. Les méthodes actives sont plus performantes en termes de détection d'ilotage. Pourtant, ces méthodes prennent plus de temps pour créer des perturbations et donc sont plus lentes que des méthodes passives.

De plus, la détection d'ilotage peut être effectuée par la voie de communication entre le centre de conduite et les PDs.[36]

Le plan de protection dépend au règlement sur le fonctionnement des PDs pendant le défaut. L'article [Loo11] présente trois scénarios avec différents règlements vis-à-vis le maintien de raccordement des PDs en cas de creux de tension. En cas d'un faible taux d'intégration de PDs dans les réseaux HTA, la déconnexion rapide des PDs lors du défaut est l'option la plus intéressante. Ainsi, le plan de protection classique peut se converser. En revanche, si on a un taux d'intégration de PDs élevé, ce sera plus avantageux d'utiliser les PDs pour améliorer la performance du réseau. Dans ce cas, la modification du plan de protection est inévitable.[35]

II.4.2. Des solutions pour un taux élevé d'intégration des PDs

A long terme, lorsque le taux de pénétration des PDs en réseau HTA est important, il faut peut-être prévoir une autre structure d'exploitation de ce réseau et également un nouveau plan de protection. On trouvera dans ce paragraphe quelques pistes de solutions proposées dans la littérature.

II.4.3. Relais de protection numériques et les technologies de l'information et de communication

Suite aux développements des technologies de microprocesseur dans les années 1990, ainsi qu'aux améliorations dans les algorithmes mathématiques, les relais numériques deviennent extrêmement populaires pour leur capacité multifonctionnelle, un prix bas et une grande fiabilité. De plus, ils peuvent communiquer entre eux et avec d'autres dispositifs du réseau.[35] Parmi les moyens physiques de communication dans les réseaux électriques, on peut citer les plus populaires : ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line en anglais), CPL (Courants Porteurs en Ligne), fibre optique, GPRS (General Packet Radio Service en anglais), wifi, etc. En accompagnant avec des logiciels intégrés au niveau des composants et des centres de pilotage, la communication sert à plusieurs services du réseau (compteur communicant, les

dispositifs de gestion d'énergie et des services énergétiques chez les utilisateurs, la gestion du réseau, ...) et également la protection et l'automatisation du réseau de distribution.[37]

II.4.4. Protection adaptative

La notion des protections adaptative: protection adaptative est l'activité « online » qui change la réaction du plan de protection selon les conditions et les besoins du système à protéger.[35] Le réglage d'un relais adaptatif n'est pas fixe, mais peut s'adapter selon l'état du réseau dont des paramètres comme des générateurs, des lignes et des charges peuvent varier considérablement, en changeant les caractéristiques du réseau.

Avec la capacité de programmation et de communication, les relais numériques peuvent offrir une protection adaptative. L'avantage principal de la protection adaptative est l'adaptation du réglage des relais à la configuration du réseau en temps réel. Ceci est différent au cas de la protection traditionnelle avec un réglage constant. Ce réglage est déterminé préalablement à partir d'un calcul de court-circuit dans le cas le plus critique et dans certains cas, il ne fournit pas la meilleure solution.

Les algorithmes de réglages du relais sont généralement en langages de bas niveau en raison de la nécessité d'un temps de réponse court qui n'est pas obtenu avec des langages de haut niveau tels que Pascal.

La protection adaptative peut être sollicitée pour le réseau du futur où il y aura l'intégration massive des PDs, en particulier des productions d'énergie renouvelable. La puissance injectée par ces derniers est de caractère aléatoire qui va entraîner la variation de l'amplitude des courants de défaut.[35]

Conclusion

L'intégration de productions décentralisées (PD) dans le réseau de distribution provoque de nombreuses modifications du comportement de celui-ci. Ces modifications peuvent être bénéfiques pour le réseau mais également préjudiciables à savoir, sur les transits de puissance, le plan de tension et les courants de court-circuit.

De plus, ces productions peuvent également modifier le comportement du système de protection et amener à des situations d'aveuglement ou de déclenchement intempestif, pour assurer la continuité de service et éviter les conséquences néfastes sur le fonctionnement du réseau, les gestionnaires optent pour l'ilotage du réseau.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation d'un réseau électrique de structure radiale dans un environnement MATLAB. Il sera sujet de différents scénarios de ses états de fonctionnement sans et avec présence des productions décentralisées

CHAPITRE 03 : Impacts de l'intégration des productions décentralisées sur la coordination et réactions des protections - résultats de simulation

III.1.Introduction

Dans le but d'évaluer l'impact des productions décentralisées (PD) sur le comportement des dispositifs de protection, une étude sera réalisée à travers une simulation appliquée à un réseau électrique de type radial.

Ce chapitre portera principalement sur la synthèse d'une protection à maximum de courant, la coordination des protections dans un réseau radial ainsi que les impacts de la PD sur ces protections.

Nous allons d'abord analyser le fonctionnement du réseau sans production décentralisée. Ensuite, une PD sera intégrée au réseau afin d'observer ses effets sur le système de protection dans le but de mettre en évidence l'impact de l'introduction d'une PD sur la coordination des protections.

III.2. Modélisation des éléments du réseau

III.2.1. Modélisation des générateurs

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion d'énergie (mécanique, chimique...) en une énergie électrique. Ils peuvent fournir de la puissance active, et aussi fournir ou consommer de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs définies par rapport à plusieurs facteurs comme la limite thermique et la limite de stabilité en régime permanent sont comme indiqué sur le système d'équations 2.1

$$(III.1) \quad P \leq P \leq P \quad (Q \leq Q \leq Q \quad III.2)$$

Le modèle du générateur est représenté sur la figure III.1.

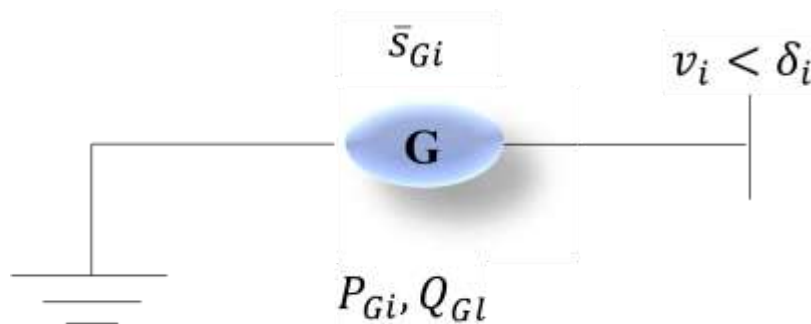


Figure.III.1.Modèle du générateur.

Avec : \bar{s}_{Gi} puissance complexe apparente du générateur .

P_{Gi} puissance active délivrée par le générateur au jeu de barres i .

Q_{Gi} : puissance réactive délivrée par le générateur au jeu de barres i .

v_i :tension au jeu de barres i.

δ_i : déphasage de la tension au jeu de barres i.

Pour le calcul du transit de puissance, la puissance $P_{ch i}$ produite et le module de la tension V_i sont maintenues à des valeurs constantes. La phase ϕ_i et la puissance réactive dépendent de V_i et $P_{ch i}$

l'état du réseau. Lorsque V_i dépasse une de ces limites, elle est fixée à cette dernière et la tension ne peut plus être contrôlée. Le nœud se comporte alors comme un nœud charge.[6]

III.2.2. Modélisation des charges

Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension nodale.

$$S_{ch i} = P_{ch i} + jQ_{ch i} \quad (III.3)$$

Avec : $S_{ch i}$: puissance complexe apparente de la charge, $P_{ch i}$: puissance active de la charge

$Q_{ch i}$: Puissance réactive de la charge (elle peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive, respectivement capacitive).[6]

Le modèle de la charge est représenté sur la figure. III.2.

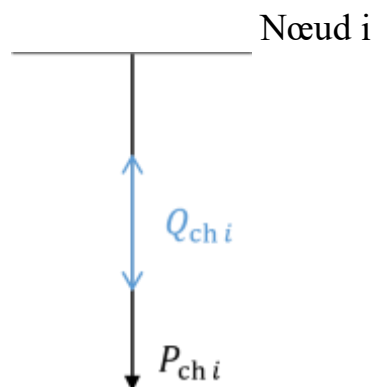


Figure.III.2. Modèle de la charge.

III.2.3. Modélisation des lignes

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés, où les paramètres de la source (V_s , ϕ_s) sont reliés aux paramètres de la réception (V_r , ϕ_r) par les coefficients A, B, C et D sous forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

Les coefficients A, B, C et D dépendent des constantes des lignes R , L , C et G

Avec : R : résistance qui représente les pertes par effet joule dans la ligne

L : inductance dans le sens longitudinal

C : capacité dans le sens transversal

G : conductance de la ligne.

Ces coefficients sont en général des complexes, les éléments de la diagonale n'ont pas de dimension, B exprimé en ohms (Ω) et C en siemens (S). Ces derniers vérifient l'égalité suivante :

$$(III.5) \quad C = B^T$$

$$G = 0$$

Pour lever la confusion entre l'impédance (admittance) par unité de longueur et l'impédance (admittance) totale de la ligne, les notations suivantes sont utilisées :

$$(III.6) \quad Z = Z_0 + Z_{\text{ext}} \quad (\Omega/\text{km}) \text{ impédance par unité de longueur ;}$$

$$(III.7) \quad Y = Y_0 + Y_{\text{ext}} \quad (\text{S}/\text{km}) \text{ admittance par unité de longueur ;}$$

$$(III.8) \quad Z_{\text{tot}} = Z \cdot l, \quad Y_{\text{tot}} = Y \cdot l$$

$$(III.9) \quad Y_{\text{tot}} = Y \cdot l \quad (\text{S}) \text{ admittance totale.}$$

La constante est généralement négligeable dans le cas des lignes sans perte. On classe les lignes de transmission d'énergie en fonction de leur longueur en trois catégories : lignes courtes, lignes moyennes et lignes longues.[4]

III.2.3.1. Ligne courte

La capacité de la ligne peut être ignorée quand celle-ci ne dépasse pas 80km, ainsi les courants de dérivation peuvent être négligés. Il s'ensuit que l'intensité du courant peut être considérée comme constante tout au long de la ligne et en particulier identique aux générateur et au récepteur. Le modèle de la ligne courte est représenté sur la figure Fig.III.3.

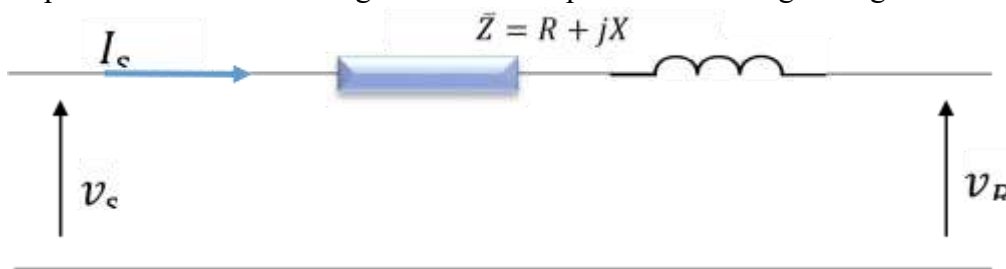


Figure.III.3. Représentation d'une ligne courte par un dipôle.

Dans ce cas le système matriciel de l'équation III.4 peut s'écrire [4]

$$(III.10) \quad \begin{bmatrix} V_s \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ V_R \end{bmatrix}$$

III.2.3.2. Ligne moyenne

Les lignes de longueur comprise entre 80km et 250km, sont considérées comme des lignes de longueur moyenne. Ce modèle doit être utilisé dès que le courant capacitif total dépasse les 3% du courant total mais ne dépasse pas les 10%. Le schéma équivalent en Π d'une ligne moyenne est représenté sur la figure III.4.[4]

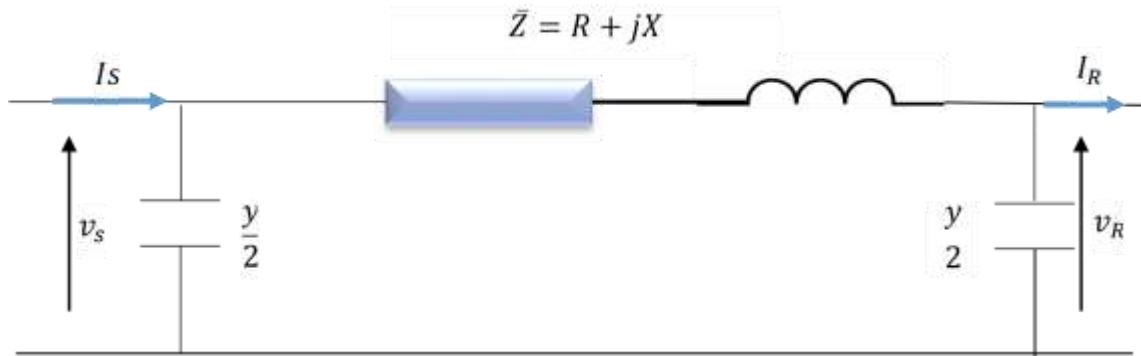


Figure. III.4. Représentation d'une ligne moyenne par un quadripôle.

A partir de la figure III.4., on écrit :

Le courant dans l'impédance série est désigné par :

$$I_s = I_R + \frac{y}{2} V_R \quad (III.11)$$

$$I_s = I_R + \frac{y}{2} V_R$$

La tension à la réception est

$$V_R = V_s - \bar{I}_R Z \quad (III.12)$$

A partir des équations III.11 et III.12, on obtient

$$\bar{I}_R Z = V_s - V_R \quad (III.13)$$

$$\bar{I}_R Z = V_s - V_R$$

Le courant de source est

$$I_s = I_R + \frac{y}{2} V_R \quad (III.14)$$

$$I_s = I_R + \frac{y}{2} V_R$$

Les équations III.11, III.13 et III.14 nous donnent

$$\bar{I}_R Z = V_s - V_R \quad \bar{I}_R Z = V_s - V_R$$

$$I_s = I_R + \frac{y}{2} V_R \quad (III.15)$$

Les équations III.13 et III.15 peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$I_s = I_R + \frac{y}{2} V_R \quad \bar{I}_R Z = V_s - V_R$$

$$\bar{V}_{ch1} = \bar{V}_{ch2}$$

$$2\bar{V}_{ch1}\bar{V}_{ch2} = \bar{V}_{ch1}^2 + \bar{V}_{ch2}^2 \quad (III.16)$$

$$\bar{V}_{ch1} = \bar{V}_{ch2} + 1 + \frac{1}{4} \quad 1 + \frac{1}{2}$$

Avec : $\bar{V}_{ch1} = 1 + \frac{1}{2}\bar{V}_{ch2}$:

$$\bar{V}_{ch2} = 1 + \frac{1}{2}\bar{V}_{ch1} \quad (III.17)$$

III.3 Présentation du réseau étudié

Nous considérons le réseau d'étude de la figure. III.5. Le réseau électrique étudié est de tension 400V, il est constitué d'une source centralisée de puissance nominale égale à 300 KW. Cette source est connectée à deux charges résistive et inductive à travers une ligne d'impédance

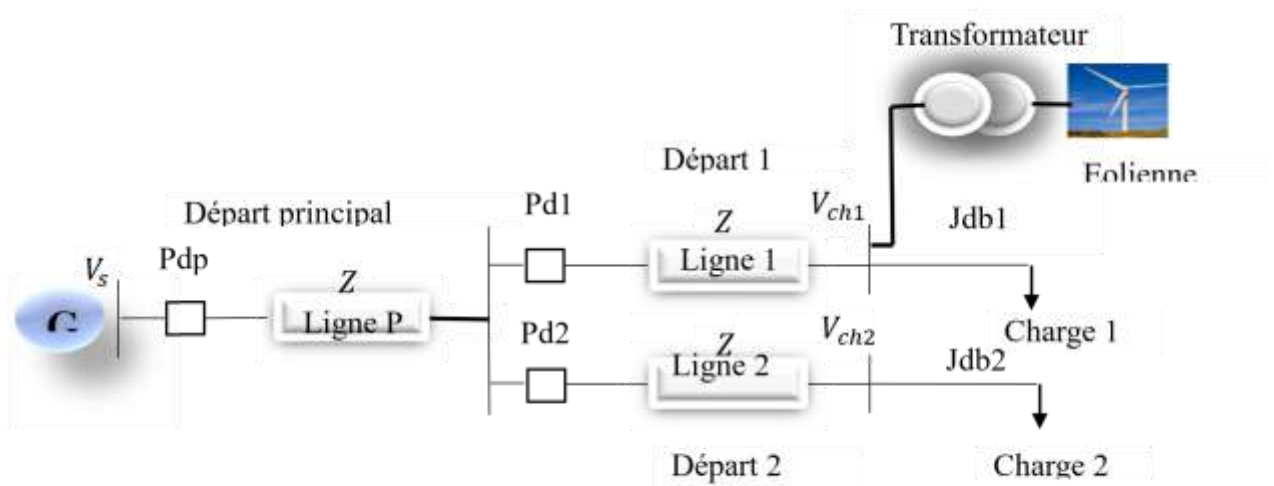


Figure. III.5. Schéma du réseau d'étude

$$\bar{V}_{ch1} = \bar{V}_{ch2} + \frac{1}{2}\bar{V}_{ch2} \quad (III.18)$$

Pdp : Protection de départ principal

Pd1 : Protection de départ 1

Pd2 : Protection de départ 2

Au jeu de barre 1 est connectée une éolienne, cette dernière générera au réseau une puissance à un taux d'intégration entre 15% et 30%. Les paramètres du réseau d'étude seront donnés en annexe. Nous définissons le taux d'intégration comme étant le rapport entre la puissance générée par l'éolienne et la puissance nominale de la source centralisée :

$$= \frac{I_{\text{cc}}}{I_{\text{nom}}} \times 100$$

$$I_{\text{cc}} = 0 \text{ A}$$

III.4. Synthèse d'une protection à max de courant

Dans ce travail réalisé à l'aide de l'environnement Simulink/Matlab on a étudié un exemple d'un court-circuit triphasé dans les réseaux électriques. Notons que la protection à max de courant consiste à protéger contre ce type de défaut. Cette protection comporte principalement un relais à max de courant (élément de surveillance et de contrôle) et un disjoncteur (élément de coupure). Pour assurer une sélectivité ampèremétrique, les seuils des trois protections ont été réglés à 125% du courant qui les parcourt en fonctionnement normal. Ce système doit être capable de détecter le courant de court-circuit et envoyer un ordre de déclenchement au disjoncteur pour assurer la protection.

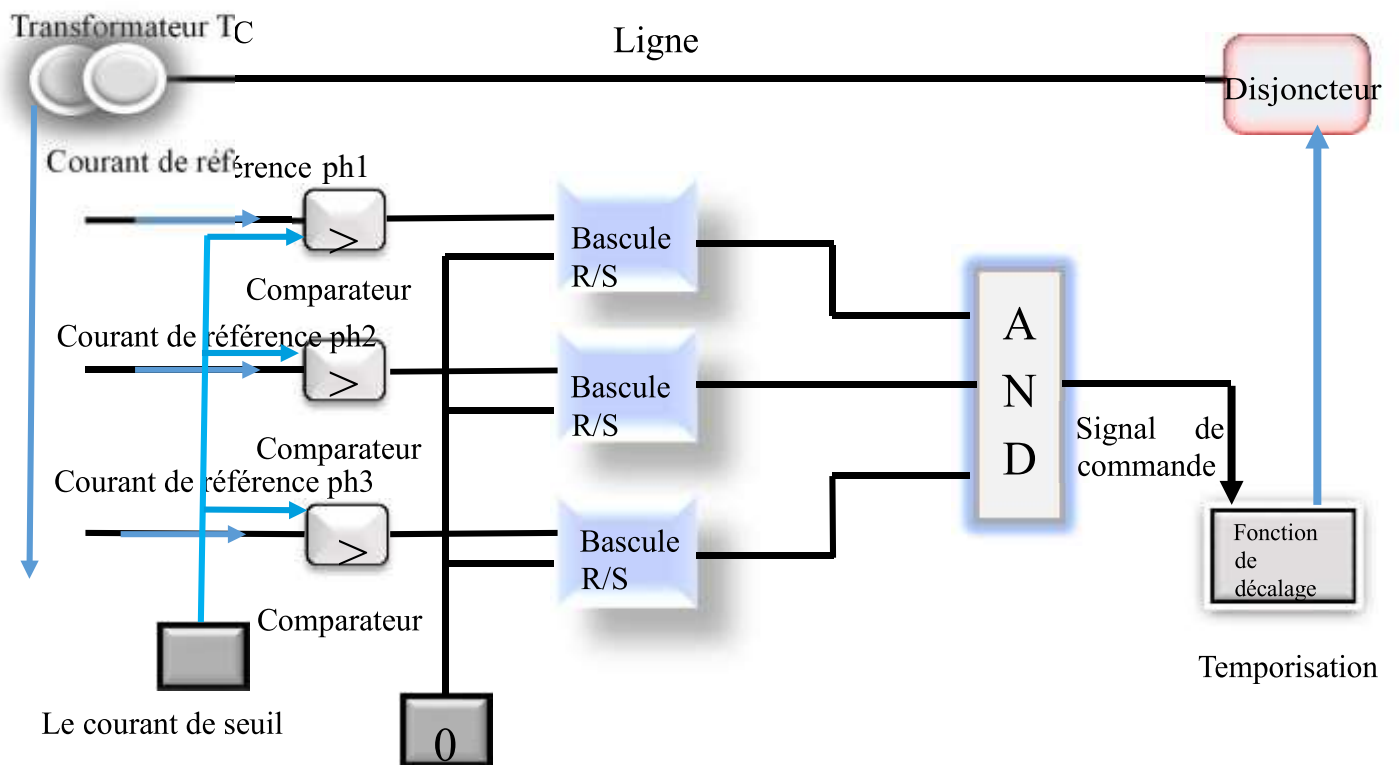


Figure.III.6.Schéma de principe d'un relais à maximum d'intensité RMI.

-La figure.III.6 représente le schéma de principe d'une protection à max de courant, les éléments principaux sont :

- Elément de comparaison chargé de comparer le courant mesuré et le seuil configuré, dont le but consiste à délivrer un ordre de commande si la valeur de courant dépasse le seuil.
- Une bascule qui est chargée de donner un ordre de changement d'état au disjoncteur dans le cas où l'élément de comparaison détecte une valeur de '1 logique'.
- Un disjoncteur qui assure la coupure en cas de défaut. Si le courant de la ligne dépasse le seuil de déclenchement, alors le relais envoie à un signal de commande instantanément au disjoncteur, ce qui va cesser la continuité de courant et ouvrir la ligne.

III.5. Contrôle du convertisseur de liaison au réseau de la PD

Dans le cadre de la production éolienne décentralisée, le convertisseur de liaison au réseau joue un rôle crucial dans l'intégration des énergies renouvelable au réseau électrique. Ce convertisseur aura pour rôle le contrôle de la tension du bus continu et le transfert de puissance active de l'éolienne vers le réseau électrique. Aucune régulation du plan de tension n'est prévue, par conséquent l'échange de puissance réactive avec le réseau est bloqué.

L'orientation du repère $\alpha\beta\gamma$ est assurée par la boucle de verrouillage de phase (PLL) rendant ainsi la composante en quadrature de la tension du réseau $\alpha\beta$ égale à zéro.

$$\alpha\beta\gamma = \alpha\beta\gamma$$

(III.20)

$$\frac{V}{V_n} = 0 \quad (III.21)$$

Avec : $V = \sqrt{3} V_n$: valeur efficace de la tension du réseau.

Avec : V_n : valeur efficace de la tension du réseau.

A partir de la relation on voit bien que la puissance active P ne peut être contrôlée que par les courants I les courants de références I_r et I_n sont donnés par la relation suivante :

$$I_r = \frac{P_e}{V_n} \quad (III.22)$$

$$I_n = 0 \quad (III.23)$$

Avec : P_e : puissance de l'éolienne injectée au réseau électrique.

I_r La composante directe du courant produit par l'éolienne sur le réseau au point de connexion. Une PLL est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau électrique. La composante directe de la tension est une image de l'amplitude de la tension mesurée, et la composante en quadrature est nulle ainsi le courant est l'image directe de la puissance active.

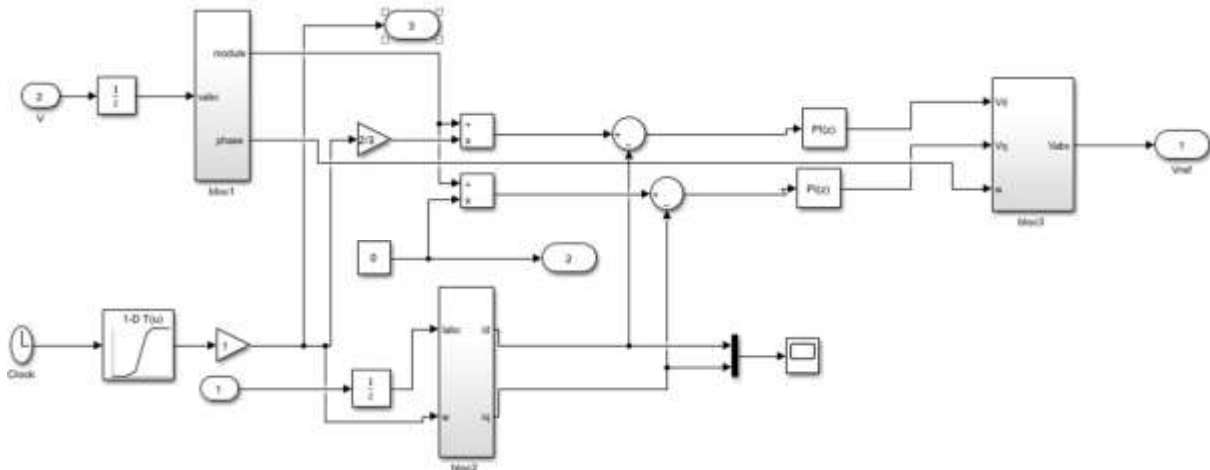


Figure.III.7.Schéma de commande de la connexion au réseau.

III.5. Interprétation des résultats de la simulation

Cette section est divisée en deux parties, la première présente les résultats de simulation du réseau sans l'intégration de la production décentralisée (éolienne), en régime normal (sans défaut). La deuxième partie expose les résultats obtenus après l'intégration de la production décentralisée éolienne.

Pour chaque scénario, les courants ont été visualisés au niveau des trois départs : le départ principal, le départ 1 (vers la charge1) et le départ 2 (vers la charge2).

Les résultats en l'absence de défaut, notamment les courants dans les trois départs sont présentés dans la figure III.8 ainsi que le signal de la commande sont présentés dans la figure(12,13). Les résultats en présence d'un défaut de court-circuit sont illustrés dans les figures (9-10-11).

III.5.1. Réseau sans PD

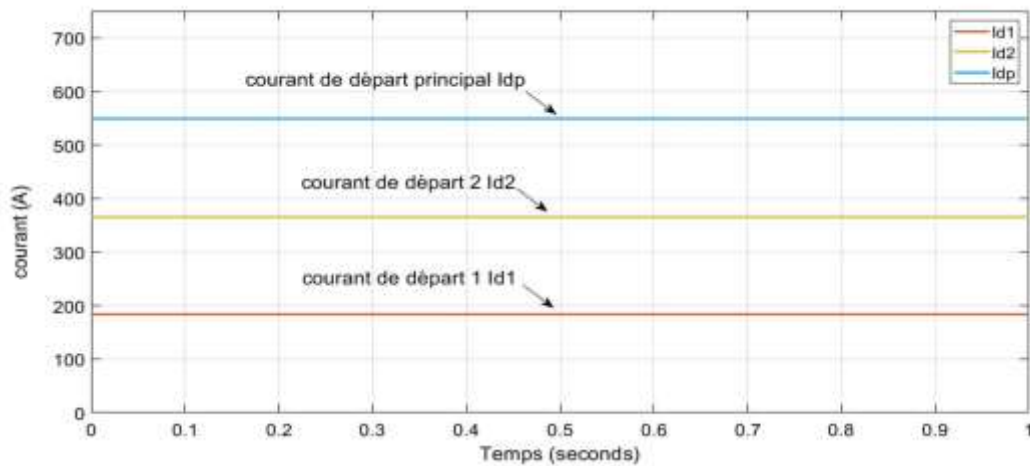


Figure. III.8. Evolutions des courants sur le réseau.

-La figure III.8 représente l'évolution des courants dans le réseau étudié sans production décentralisée et sans défaut. On observe que les courants restent constants au cours du temps, ce qui reflète un fonctionnement en régime permanent et stable. Le courant principal (I_{dp}), provenant de la source, est égal à la somme des courants I_{d1} et I_{d2} des départs 1 et 2 respectivement, ce qui confirme la cohérence du modèle. Aucun déclenchement de protection n'est observé, ce qui est logique en l'absence de perturbations. Cette courbe constitue donc une référence pour l'analyse comparative des cas avec défauts ou avec intégration de production décentralisée.

□ Coordination des protections

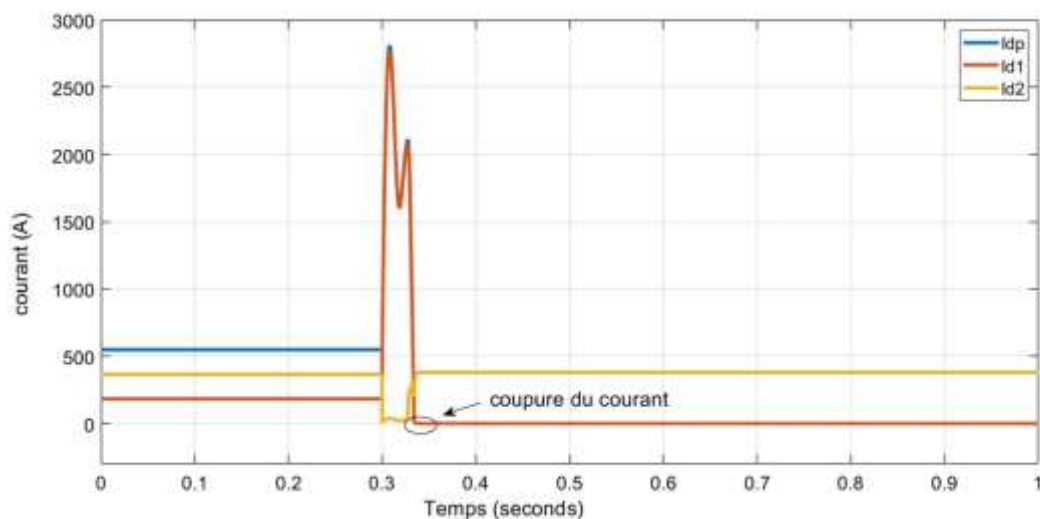


Figure. III.9. Evolutions des courants sur le réseau avec défaut sur le départ 1 à 0.3s. - La figure (III.9) montre la réponse du réseau électrique en présence d'un défaut appliqué sur le départ 1 à $t=0,3$ s. On observe une forte élévation du courant I_{d1} , caractéristique d'un court-circuit, suivie d'un pic qui atteint près de 2800 A. Ce pic représente le courant de défaut avant l'ouverture du disjoncteur. Peu après ce pic, le courant chute brusquement à zéro, ce qui indique le déclenchement de la protection du départ 1. Le courant du départ principal reste stable et ne chute

pas totalement, ce qui confirme que seule la branche défectueuse est isolée. Le courant du départ 2, reste quasiment inchangé, ce qui montre que la protection du départ 2 ne s'est pas déclenchée. Ce comportement est conforme au principe de sélectivité : seule la protection la plus proche du défaut intervient, afin de garantir la continuité d'alimentation sur les autres départs. Le retard observé entre l'apparition du défaut et la coupure reflète le temps de réaction réel du disjoncteur (temps de détection + ouverture).

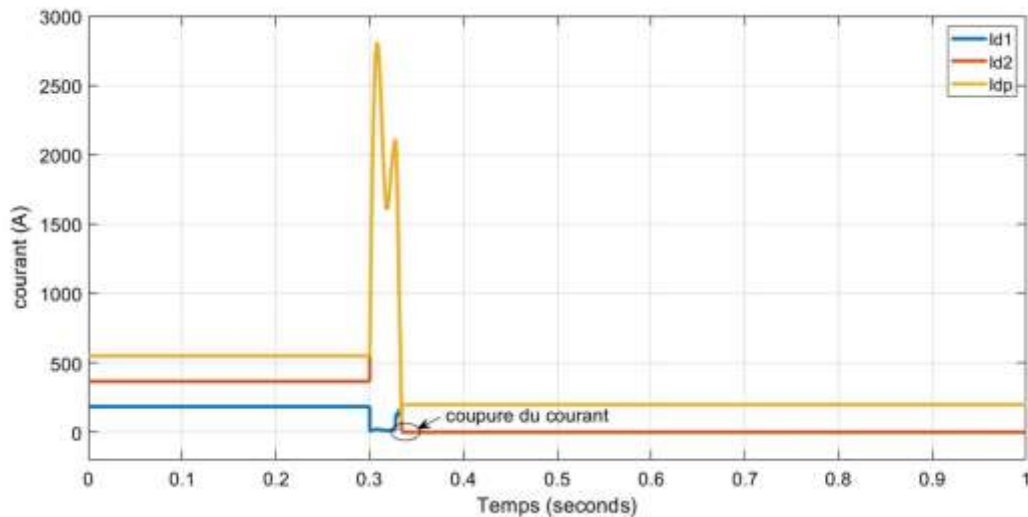


Figure. III.10. Evolutions des courants sur le réseau avec défaut sur le départ 2 à 0.3s.

- Dans cette figure (III.10), un défaut est simulé sur le deuxième départ à $t = 0,3$ s. On observe une forte pointe de courant caractéristique d'un court-circuit, suivie d'une coupure brutale qui indique l'intervention de la protection du départ 2. Le courant du départ principal reste stable pendant toute la durée de la perturbation, ce qui confirme que sa protection ne s'est pas déclenchée, conformément au principe de sélectivité. Ce comportement montre un fonctionnement correct de la coordination des protections, où seule la partie concernée par le défaut est isolée, assurant ainsi la continuité de service sur les autres départs. Le pic de courant précédant la coupure reflète le temps de réponse du disjoncteur avant son ouverture.

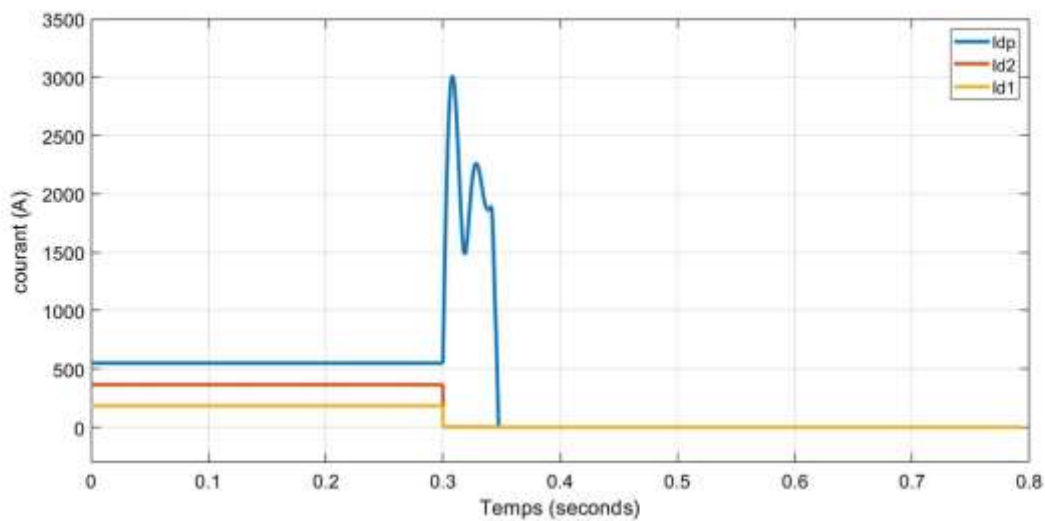


Figure. III.11. Evolutions des courants sur le réseau avec défaut sur le départ principal à 0.3s.

-Dans cette figure (III.11), un défaut est introduit sur le départ principal à $t = 0,3$ s, ce qui entraîne une forte augmentation du courant sur ce départ, atteignant un pic caractéristique d'un courant de court-circuit. Cette pointe illustre bien le comportement réel d'un disjoncteur face à un défaut il y a un délai de déclenchement nécessaire au mécanisme de coupure, durant lequel le courant reste élevé. Après ce court intervalle, on observe l'ouverture du disjoncteur, matérialisée par l'annulation brutale du courant. En parallèle, les courants des départs 1 et 2 deviennent également nuls, ce qui montre que la coupure sur le départ principal a isolé l'ensemble du système en amont. Cela signifie que la protection principale a bien réagi, et qu'il n'y a pas eu de déclenchement des protections secondaires, conformément à l'objectif de sélectivité : seule la protection en défaut est activée, ce qui assure la sécurité globale du réseau tout en minimisant les coupures inutiles.

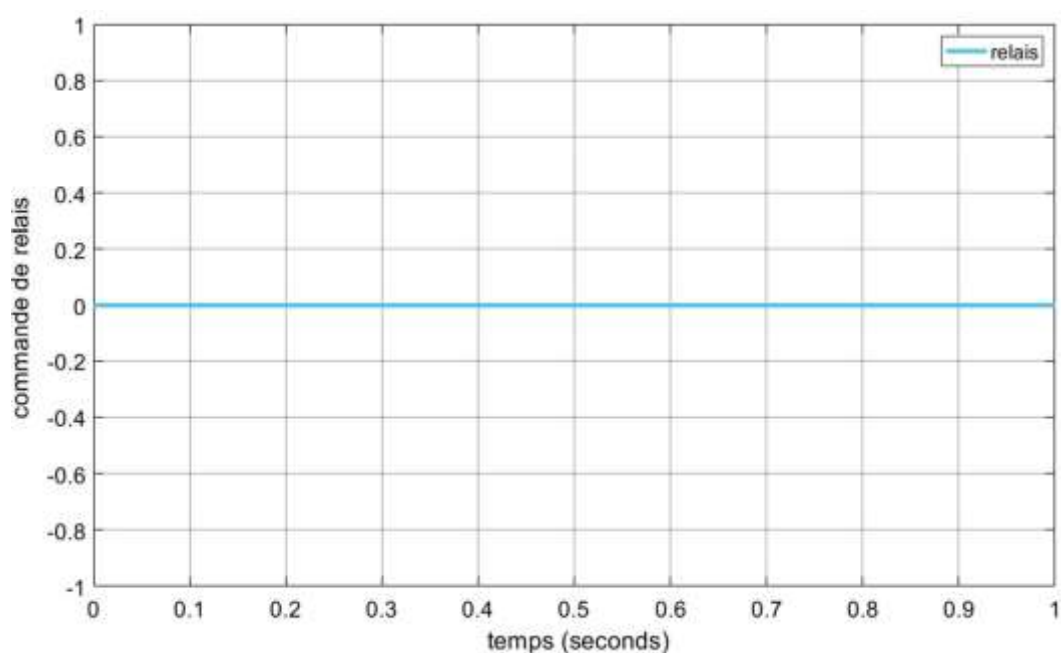


Figure.III.12. Signal de commande d'un relais sans défaut

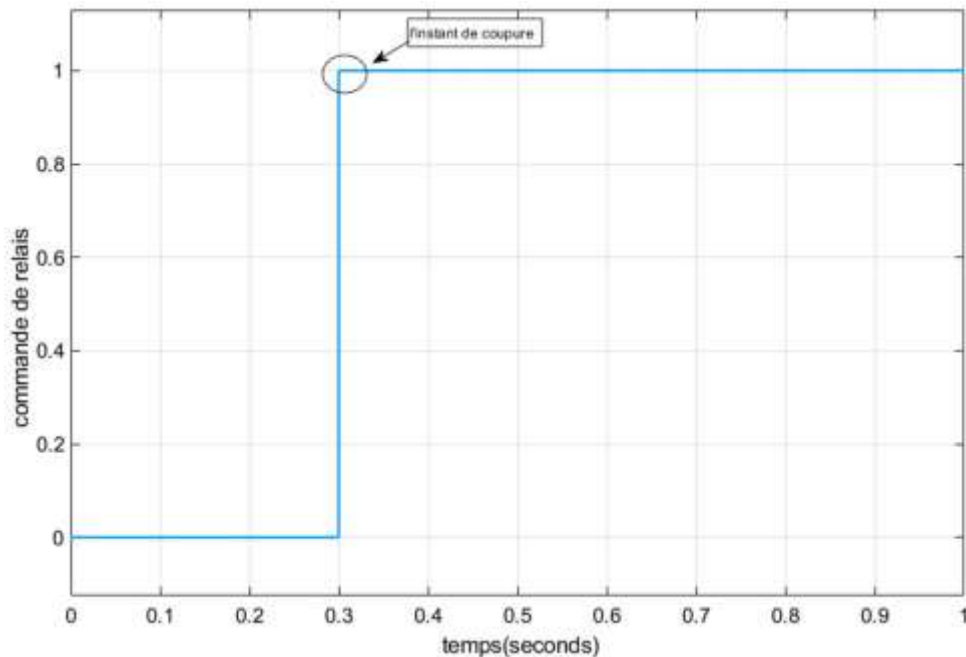


Figure.III.13. Signal de commande d'un relais avec défaut.

-Les figures(12) illustrent le comportement du signal de commande d'un relais dans deux situations distinctes : sans défaut et avec défaut. Dans le premier cas, représenté par la Figure III.12 (sans défaut), le signal reste constant à zéro pendant toute la durée de la simulation, indiquant que le relais ne détecte aucun incident sur le réseau et ne réagit donc pas. En revanche, dans la Figure III.13 (avec défaut), le signal de commande passe brusquement de 0 à 1 à $t = 0,3$ s, ce qui correspond à l'instant de détection du défaut et de la coupure. Cela montre que le relais a bien identifié la présence d'un défaut et a déclenché sa commande pour isoler la partie concernée du réseau.

III.5.1.Réseau avec PD

-Dans la figure (III.14) on observe le comportement du système lorsqu'une production décentralisée est intégrée au niveau du départ 1, sans présence de défaut. L'introduction de la PD entraîne une réduction visible du courant sur le départ principal, traduisant la prise en charge partielle de la charge locale par la source décentralisée. On constate que le courant sur le départ principal diminue, indiquant que la source centralisée est soulagée. Ce comportement est attendu et confirme que l'injection d'énergie locale améliore l'efficacité énergétique du réseau tout en modifiant les profils de courant, ce qui peut influencer la coordination des protections en cas de défaut futur.

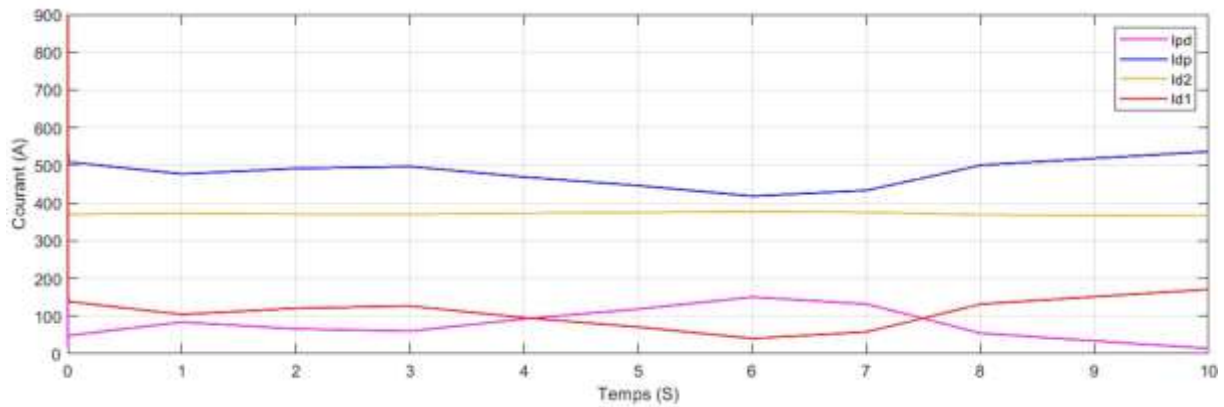


Figure.III.14. Evolution des courants sur le réseau avec PD sans défaut.

- Aveuglement de protection

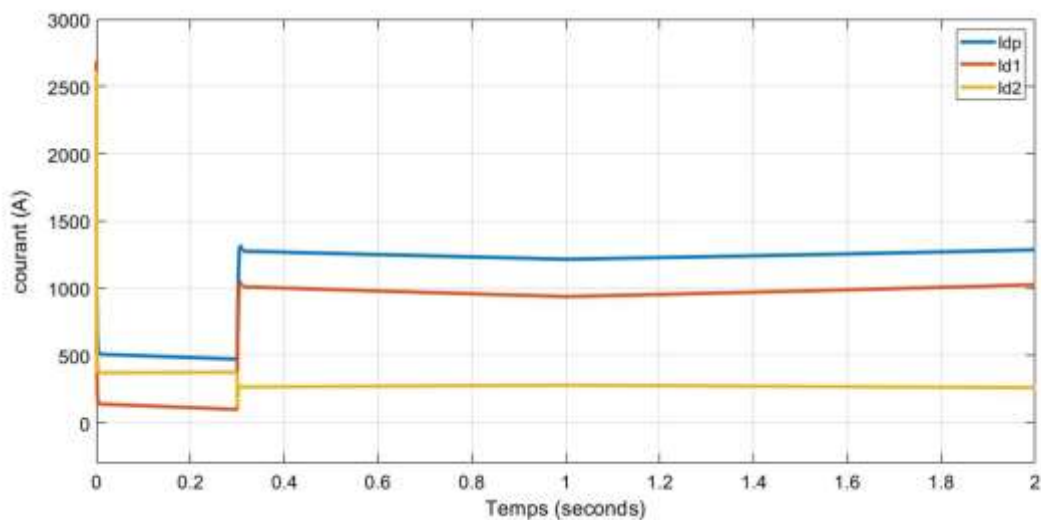


Figure.III.15. Evolution des courants sur le réseau avec PD et défaut sur le même départ.

-La figure (III.15) illustre l'évolution des courants dans les différents départs du réseau électrique étudié lors de l'apparition d'un défaut sur le premier départ (Id1), sur lequel est également connectée une (PD). Avant l'instant $t = 0.3$ s, le système fonctionne en régime normal, et les courants sur les trois départs (Idp, Id1, Id2) sont stables. À $t = 0.3$ s, un court-circuit à forte résistance est appliqué sur le premier départ. Cette perturbation provoque une forte élévation du courant Id1 (jusqu'à environ 1000 A) ainsi que du courant Idp mesuré au niveau du poste source (≈ 1300 A). Cependant, comme la PD est connectée localement sur le départ défectueux, elle participe à l'alimentation du défaut en injectant un courant dans la direction du point de défaut. Cette contribution locale réduit le courant vu par la protection amont (poste source), car une partie du courant de défaut ne remonte plus vers cette dernière. Il en résulte une diminution relative du courant Idp, malgré la présence du défaut. Ce phénomène, appelé aveuglement de la protection, signifie que le relais amont peut ne pas détecter le défaut, puisque le courant qu'il perçoit devient inférieur à son seuil de déclenchement. Par conséquent, le défaut persiste sans être éliminé. Cette simulation démontre clairement que la présence d'une

production décentralisée sur un départ peut masquer les défauts aux protections traditionnelles, mettant en évidence la nécessité de stratégies de protection adaptées, pour garantir la sécurité et la sélectivité du réseau.

- Déclenchement intempestif de protection

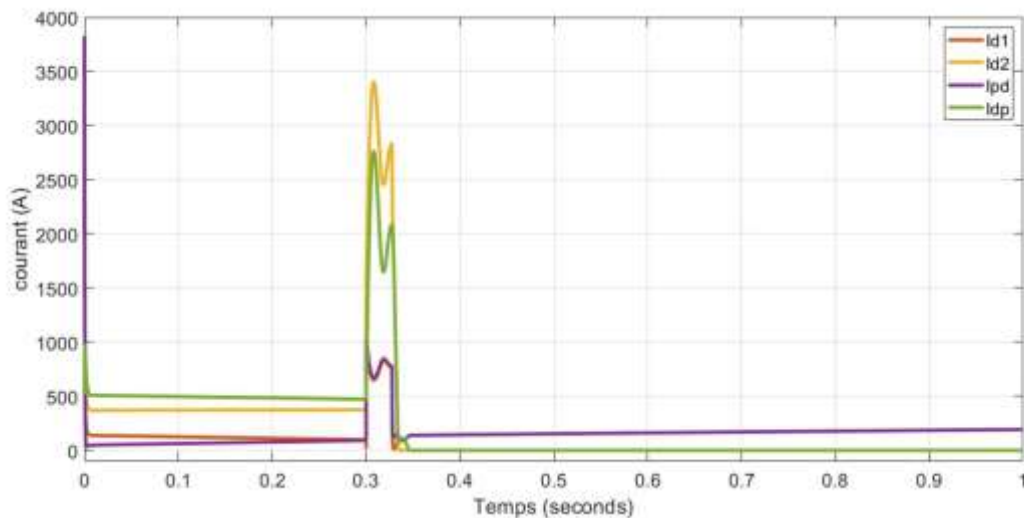


Figure. III.16.Evolution des courants dans le réseau avec PD sur départ 1 et défaut sur départ 2.

-La courbe obtenue met en évidence le comportement du réseau lors de l'apparition d'un défaut sur le départ 2, dans un système radial comportant une production décentralisée raccordée au départ 1. Lors de ce défaut, un courant de court-circuit important circule dans le départ 2, ce qui est attendu. Toutefois, on observe également une augmentation significative du courant dans le départ 1 provenant de la production décentralisée. Cette situation s'explique par le fait que la production décentralisée participe au courant de défaut à travers le départ 1, bien que celui-ci ne soit pas directement concerné par le défaut. Par conséquent, la protection du départ 1 peut détecter cette élévation de courant comme une anomalie et déclencher de manière intempestive. De plus, le départ principal voit également une augmentation de courant, car il alimente l'ensemble du réseau, y compris la contribution de la production au défaut. Cette configuration met en évidence une perturbation dans la coordination des protections, causée par la contribution de la production décentralisée au courant de défaut.

Conclusion

Les résultats montrent que l'introduction de la PD modifie significativement les profils de courant, en particulier en réduisant la charge sur la source principale en régime normal, ce qui améliore l'efficacité énergétique.

Cependant, en cas de défaut, la présence de la PD complexifie la coordination des protections. En effet, la contribution de la PD aux courants de défaut peut entraîner des déclenchements intempestifs ou une perte de sélectivité des protections, mettant ainsi en évidence les limites des systèmes de protection traditionnels dans un réseau avec production distribuée.

Enfin, des solutions techniques ont été proposées afin de pallier ces impacts, notamment l'utilisation de convertisseurs, de relais directionnels, de protections adaptatives et de relais

numériques intelligents, capables de mieux répondre aux dynamiques changeantes du réseau moderne.

Ces résultats soulignent la nécessité d'une adaptation du plan de protection pour intégrer efficacement les énergies renouvelables tout en garantissant la fiabilité et la sécurité du réseau électrique.

Conclusion générale

L'ouverture des marchés de l'énergie électrique a conduit au développement massif de la production décentralisée connectée directement aux réseaux de distribution. De nombreux avantages, techniques et économiques qui justifient le développement de ce type de production, parmi lesquels on relève les suivants : la production d'énergie aux plus près des centres de consommation entraîne une baisse des coûts de transport et de distribution, ainsi que la réduction des pertes dans les lignes ; en matière de planification, face à une augmentation de la charge. L'insertion des productions décentralisées sur le réseau de distribution permet d'éviter l'achat et la construction de nouvelles lignes HTB ; pour l'alimentation des sites isolés, il peut être plus rentable d'alimenter un réseau de distribution local avec des PD. Cette étude a permis de mettre en évidence les différents impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution grâce à des exemples simples. La principale conclusion est que l'introduction de productions décentralisées a un impact sur les grandeurs électriques et sur l'exploitation et la planification du réseau de distribution. Ces impacts, qui ne sont pas toujours bénéfiques, sont actuellement maîtrisés.

L'étude menée dans notre travail est l'étude d'impact des productions décentralisées sur le fonctionnement des protections. Le travail effectué a été subdivisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la structure et la topologie des réseaux électriques, ainsi qu'à une présentation des différents types de protections et des dispositifs de protection utilisés sur les réseaux électriques. Ce chapitre traite également des différents types de productions décentralisées, en particulier les sources renouvelables telles que l'énergie éolienne et photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre aborde les impacts de la production décentralisée sur les réseaux de transport et de distribution. Nous y avons analysé les effets de l'injection d'énergie sur le comportement des réseaux, notamment en termes de flux de puissance, de tension et de coordination des protections. Par ailleurs, des solutions ont été proposées pour limiter ces impacts, telles que l'adaptation des dispositifs de protection, la mise en place de systèmes de supervision ou encore la reconfiguration des réseaux.
- Le troisième chapitre présente une étude de cas simulée sur un réseau radial basse tension, dans deux configurations : sans production décentralisée, puis avec une production éolienne intégrée. L'objectif est d'évaluer l'impact de la production décentralisée sur la coordination des protections. Pour cela, nous avons choisi d'étudier un relais à maximum de courant, et d'analyser son comportement dans les deux situations. Cette simulation a permis de mettre en évidence les effets de la production décentralisée sur le fonctionnement des protections, notamment en termes de sélectivité, de sensibilité et de temps de déclenchement.

Bibliographie

- [1] HAKIM, B., Analyse et identification des défauts de court-circuit du Système de distribution électrique du complexe SIDER-El-Hadjar,;. 2022, Université Badji Mokhtar – Annaba,.
- [2] HadjSaïd, N., La Distribution d'énergie électrique en Présence de Production décentralisée (série Génie électrique, EGEM). 2010: Hermes science publications.
- [3] Nadhir, K., Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée. Option: Réseaux Electriques. Université de Batna, 2014.
- [4] AOUCHENNI, O., Amélioration de l'intégration de la production éolienne dans les réseaux électriques. Université de Béjaia-Abderrahmane Mira.
- [5] Bayem, H., Apport des méthodes probabilistes aux études d'intégration des énergies renouvelables aux systèmes électriques. 2009, Université Paris SudParis XI.
- [6] Narimen, L.A., ontribution à l'amélioration de la flexibilité dans les réseaux electriques liée à l'intégration des générateurs eoliens. 2011, Université de Béjaia-Abderrahmane Mira.
- [7] Berseneff, B., Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur. 2010, Université de Grenoble.
- [8] Hadji, B., Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité des Réseaux Electriques par l'Intégration et le Contrôle Flexible de l'Energie Eolienne et des Systèmes FACTS. 2017, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [9] MANCER, N., Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité de la Sélectivité du Système de Protection des Réseaux Electriques par les Méthodes Metaheuristiques. 2017, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [10] Kanchev, H., Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable: Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain. 2014, Ecole Centrale de Lille; Université Technique de Sofia. Faculté Francophone.
- [11] Omar, R., Amélioration de l'efficacité d'une installation de compensation d'énergie réactive. 2020, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [12] Jecu, C., Système de protections novateur et distribué pour les réseaux Moyenne Tension du futur. 2011, Université de Grenoble.
- [13] Assouak, A., Contribution à l'optimisation du réglage et la coordination des relais de protection dans les réseaux électriques. 2023.
- [14] Jeanneton, A., Transformateurs de mesure immergés haute tension: nouveaux matériaux isolants et diagnostic. 2023, Ecole Centrale de Lyon.

- [15] Bouzid, A. and M. Bouchahdane, coordination de systemes de protection appliquee au reseau national. 2013.
- [16] IEC 60947-3, Appareillage à base tension – Interrupteurs sectionneurs . Interrupteurs sectionneurs et combinés-fusibles.
- [17] Almurr, J., Etude de l'arc électrique dans la chambre de coupure d'un interrupteur DC sous l'effet d'un fort champ magnétique extérieur. 2020, Université Clermont Auvergne [2017-2020].
- [18] Louarem, S., Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique connecté à un système éolien utilisant les systèmes FACTS. 2021.
- [19] Missaoui, A., Etude de la conversion de la biomasse en energie par un procédé hydrothermal de carbonisation-Caractérisation des produits issus des grignons d'olive. 2018, Université d'Orléans.
- [20] Ghanjati, C., Contrôle de puissance et optimisation des flux d'énergie au sein des systèmes multi-sources à énergies renouvelables. 2021, Université de Poitiers; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie).
- [21] Hamaz, T., Le Secteur des énergies renouvelables en Algérie: stratégie et moyens de développement. 2023, UNIVERSITE DE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [22] Turker, H., Véhicules électriques Hybrides Rechargeables: évaluation des Impacts sur le Réseau électrique et Stratégies Optimales de recharge. 2012, Université de Grenoble.
- [23] Charles, P., Intégration des sources d'énergie renouvelable dans un réseau insulaire fragile: application au réseau de Port-au-Prince. 2020, Thèse de Doctorat 2020, UNIV-DES ANTILLES, France.
- [24] Boukaroura, A. and L. Slimani, Contribution à la modélisation et à l'optimisation des réseaux de distribution sous incertitudes. 2021.
- [25] DJEDIDI, I., Optimisation Des Performances Du Réseau Électrique de Distribution Par Des Méthodes Évolutionnaires. 2023, Université Mohamed Khider Biskra.
- [26] AISSAOUI, A., Planification des réseaux électriques de distribution HTA pour une présence massive de la génération d'énergie dispersée. 2016, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes.
- [27] Latreche, Y. and F. Kerrou, Etude de l'intégration de la production décentralisée dans les réseaux de distribution. 2021, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [28] Craciun, D., Modélisation des équivalents dynamiques des réseaux électriques. 2010, Université de Grenoble.

- [29] Bouakra, A., Impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique. 2016, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [30] Bouafia, A. and D. Labed, Analyse des réseaux HTA futurs lors de l'insertion d'une production décentralisée. Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [31] GRICHE, I., Contribution au contrôle de tension des réseaux électriques en présence de production décentralisée. Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf.
- [32] Favuzza, S., M. Ippolito, and F. Massaro. An investigation of protection devices coordination effects on distributed generators capacity in radial distribution systems. in 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). 2013. IEEE.
- [33] Fraisse, J.-L. and J.-P. Horson, Raccordement de la production décentralisée aux réseaux de distribution-aspects techniques. 2010.
- [34] Deuse, J., et al. Effective impact of DER on distribution system protection. in International Conference on Electricity Distribution: 21/05/2007-24/05/2007. 2007. AIM.
- [35] Le, T.D., Contribution des moyens de production dispersés aux courants de défaut. Modélisation des moyens de production et algorithmes de détection de défaut. 2014, Supélec.
- [36] Morren, J. and S. De Haan. Impact of distributed generation units with power electronic converters on distribution network protection. in IET 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2008). 2008. IET.
- [37] Hadjsaïd, N., Les réseaux électriques de distribution: de la production décentralisée aux SmartGrids. 2010: Hermès.

Annexe A : Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Type de réseau	Radial
Tension nominale	400 V (basse tension)
Fréquence	50 Hz
Durée de simulation	1 seconde
Nombre de charges	2
Puissance active – Charge 1	100 kW
Puissance réactive – Charge 1	1000 VAR
Puissance active – Charge 2	200 kW
Puissance réactive – Charge 2	100 VAR

Résumé:

Ce mémoire analyse l'impact des productions décentralisées (comme l'énergie solaire et éolienne) sur les systèmes de protection des réseaux électriques, en particulier les réseaux radiaux.

L'introduction de flux bidirectionnels avec les PD perturbe les protections classiques, conçues pour un seul sens de circulation.

Trois volets sont abordés : une présentation des réseaux et protections, une étude des effets négatifs (surtensions, instabilité, courant de court-circuit...), et des simulations sous MATLAB/Simulink qui confirment les perturbations observées.

Enfin, des solutions sont proposées : relais numériques, protections adaptatives et meilleure coordination des seuils de déclenchement.

Abstract:

This thesis analyzes the impact of decentralized generation (such as solar and wind power) on the protection systems of electrical networks, especially radial networks.

The integration of PD introduces bidirectional power flows, which disrupt traditional unidirectional protection devices.

The work includes: an overview of networks and protections, an analysis of negative effects (instability, overvoltages, fault current increases), and simulations using MATLAB/Simulink demonstrating these issues.

Proposed solutions include the use of digital relays, adaptive protection, and improved coordination of protection thresholds.

ملخص:

يتناول هذا البحث تأثير الإنتاجات اللامركزية (مثل الطاقة الشمسية والرياح) على أنظمة الحماية في الشبكات الكهربائية، خصوصاً في الشبكات الشعاعية. تؤدي هذه الإنتاجات إلى تدفقات طاقة ثنائية الاتجاه، مما يسبب اضطرابات في أجهزة الحماية التقليدية المصممة للعمل باتجاه واحد. ينقسم العمل إلى ثلاثة محاور: عرض عام للشبكات وأنظمة الحماية، دراسة الآثار السلبية (مثل التيارات الزائدة، عدم الاستقرار، التوافقيات)، ثم محاكاة باستخدام MATLAB/Simulink توضح هذه التأثيرات. ويُقترح استخدام مرحلات رقمية وحماية تكيفية وتحسين تنسيق العتبات كحلول لهذه المشاكل.