

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Electrotechnique industrielle

Thème:

---

### Impact du raccordement de la production décentralisée au réseau électrique sur les courants de court-circuit

---

Préparé par :

Mr: MESLEM LOUCIF

Mr: KHELLOUF MOHAMED IKBAL

Encadré par :

M<sup>me</sup> N.AOUZELLAG

Année Universitaire : 2018/2019

# *Remerciement*

---

*On tient tout d'abord à remercier le bon Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profonds remerciements et tous nos respects pour nos très chers parents, qui nous ont éduqué, encadré et soutenu par tous les moyens, jours après jours, depuis notre naissance jusqu'à ce jour là.*

*Nos sincères remerciements pour notre promotrice Mme AOUZELLAG.N pour ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du travail.*

*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.*

*On tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon acheminement de ce travail.*

---

# *Dédicace*

---

*Je dédie ce travail à mes chers parents, qui m'ont guidé et soutenu tout au long des étapes de ma vie. Sans vous je ne serai pas là aujourd'hui.*

*A mes frères : Kamel, Salim, Sofiane. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je vous porte.*

*A ma seule et unique sœur, la prunelle de mes yeux "Soraya" Je ne peux exprimer à travers ses lignes tous mes sentiments d'amour et de tendresse envers toi grande sœur. Je te souhaite une vie pleine de réussite, de santé et de bonheur.*

*A toute ma famille. A mes amis sans exception.*

*L'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.*

*A tous le groupe électrotechnique industriel en particulier mon chère binôme Ikbal et sa famille.*

**LOCIF**

---

# *Dédicace*

---

*Je dédie ce modeste travail*

*Pour vous mes très chers parents pour vos encouragements, vos multiples soutiens et votre affection quotidienne, Merci d'être présents dans toutes circonstances. Je pris le tout puissant de vous donner une longue vie et nous aider à être toujours votre fierté.*

*A mon frère Ahmed Rami.*

*A ma Sœur Norane.*

*A toute ma famille.*

*A mon cher Ami et Binome : Meslem Loucif .*

*A tous mes ami(e)s et personnes avec qui j'ai partagé beaucoup de moments agréables et inoubliables ;*

*Yacine, Razik, Mhamed, Walid , Tarik, Rafik, Irathen, Youcef et à tant*

*d'autres que je ne peux pas tous citer.*

*A tous la section électrotechnique.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

**M.IKBAL**

---

# ***TABLE DES MATIERES***

---

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques**

I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition du réseau électrique .....	3
I.3.Chemin de l'électricité dans le réseau électrique.....	3
I.4.Structure du réseau électrique et son rôle.....	4
I.4.1. Le réseau de transport et de répartition.....	4
I.4.2. Le réseau de distribution.....	4
I.5.Topologies des réseaux électriques.....	5
I.5.1.Réseau radial .....	5
I.5.2.Réseau arborescent.....	5
I.5.3.Réseau bouclé .....	6
I.5.4. Réseau maillé .....	6
I.6.Modélisation des éléments du réseau électrique.....	7
I.6.1. Modélisation des générateurs.....	7
I.6.2. Modélisation des lignes aériennes.....	7
I.6.3.Modélisation des charges.....	8
I.6.4. Modélisation du transformateur.....	9
I.7.Production décentralisée.....	10
I.7.1. Définition.....	10
I.7.2. Principaux types de production décentralisée à base de ressources renouvelables.....	10
I.8.Impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques .....	13
I.9.Conclusion.....	14

---

# ***TABLE DES MATIERES***

---

## **Chapitre II : Calcul des courants de court-circuit**

II.1.Introduction.....	15
II.2.Court-circuit.....	15
II.3.Origines d'un défaut de courts-circuits .....	15
II.4.Caractéristiques des défauts .....	16
II.4.1. Formes ou types des défauts de court-circuit.....	16
II.4.2. Durée des courts circuits.....	16
II.4.3. Intensité du courant de court- circuit.....	17
II.5.Effets des courants de court-circuit.....	17
II.6.Importance de calcul des courants de court-circuit.....	17
II.7.Calcul des courants de court-circuit .....	18
II.7.1. Intérêt de la méthode des composantes symétriques.....	18
II.7.2. Rappel sur les composantes symétriques.....	18
II.7.3.Méthode de résolution pratique.....	19
II.7.4. Formulation des équations générales de court-circuit.....	20
II.8.Conclusion.....	26

## **Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats**

III.1.Introduction.....	27
III.2.Modèle du réseau d'application.....	27
III.3.Résultats de simulation.....	28
III.3.1.Réseau sans présence de production décentralisée.....	28
A. Sens de transite de courant et plans de tension .....	28
B. Calcul des courants de court-circuit.....	30
C. Modification de la position du court circuit.....	32

---

# ***TABLE DES MATIERES***

---

III.3.2. Réseau avec production décentralisée.....	33
A. Impact sur le sens de transit de puissance .....	33
B. Impact sur les courants de court-circuit.....	35
III.4. Conclusion .....	40
CONCLUSION GENERALE .....	41

---

# *LISTE DES FIGURES*

---

Fig.I.1: chemin de l'électricité dans le réseau électrique.....	3
Fig.I.2: Structure du réseau électrique.....	4
Fig.I.3 : Schéma d'un réseau radial.....	5
Fig.I.4: Schéma simplifié d'un réseau arborescent.....	5
Fig.I.5: Schéma simplifié d'un réseau bouclé .....	6
Fig.I.6: Schéma simplifié d'un réseau maillé.....	6
Fig.I.7: Modèle du générateur.....	7
Fig.I.8: Modèle en $\pi$ d'une ligne aérienne.....	7
Fig.I.9: Modélisation d'une charge.....	8
Fig.I.10: Circuit équivalent du transformateur.....	9
Fig.I.11: Principe de conversion photovoltaïque.....	11
Fig.I.12: Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau.....	11
Fig.I.13: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	12
Fig.I.14: Schéma de principe d'une production éolienne connectée au réseau .....	12
Fig.II.1: Différentes types de défauts de court-circuit.....	16
Fig.II.2: construction graphique de la somme de trois systèmes triphasés équilibrés: direct, inverse et homopolaire.....	19
Fig.II.3: Représentation du réseau en séquences directe, inverse et homopolaire.....	20
Fig.II.4 : Cas de court circuit triphasé.....	21
Fig.II.5: Cas de court circuit biphasé.....	22
Fig.II.6: Cas de court circuit biphasé à la terre .....	23
Fig.II.7: Cas de court circuit monophasé à la terre.....	25
Fig.III.1:Structure générale du réseau test.....	28
Fig.III.2: Sens de courant de court-circuit sans production décentralisée (pour un défaut à N8et N12).....	35
Fig.III.3:Sens de transite de courant dans le cas d'un court circuit aux nœuds 12 et 8.....	39

---



# ***LISTE DES TABLEAUX***

---

Tab (III.1) : Intensité des courants et sens de transit dans la phase A.....	29
Tab (III.2) : Intensité des courants et sens de transit dans la phase B.....	29
Tab (III.3) : Intensité des courants et sens de transit dans la phase C.....	29
Tab (III.4) : Courants de séquences, et réelle pour différent types de court-circuit.....	30
Tab (III.5) : Tensions de séquences, et réelle pour différent types de court-circuit.....	30
Tab (III.6) : Courants de séquences, et réelle pour différent types de court-circuit.....	31
Tab (III.7) : Tensions de séquences, et réelle pour différent types de court-circuit.....	31
Tab (III.8) : Courants de séquences, et réelle pour différent types de court-circuit.....	31
Tab (III.9) : Tensions de séquences, et réelle pour différent types de court-circuit.....	31
Tab (III.10) : Intensité des courants réels pour différent types de court-circuit au nœud 5.....	32
Tab (III.11) : Intensité des courants réels pour différent types de court-circuit au nœud 4.....	32
Tab (III.12) : Intensité des courants réels pour différent types de court-circuit au nœud 3.....	33
Tab (III.13) : Intensité des courants réels pour différent types de court-circuit au nœud 1.....	33
Tab (III.14) : Puissance de la production décentralisée et de poste source en fonction du taux d'intégration.....	34
Tab (III.15) : Intensité de courant de court-circuit au point de défaut.....	39

---

# Liste des abréviations

---

HTB	Réseau de haute tension de niveau B.
HTA	Réseau de haute tension de niveau A.
GRD	Gestionnaire de Réseau de Distribution.
THT	Très haute tension.
HT	Haute tension.
MT	Moyenne tension.
BT	Basse tension.
PdC	Le pouvoir de coupure des disjoncteurs
$P_{Gi}$	Puissance active délivrée par le générateur au nœud $i$ .
$Q_{Gi}$	Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud $i$ .
$V_i$	Tension complexe au nœud $i$ .
$\delta_i$	Déphasage de la tension au nœud $i$ .
$P$	Puissance active.
$Q$	Puissance réactive.
$\bar{S}_{ich}$	Puissance apparente complexe au nœud ( $i$ ).
$P_i$	Puissance active demandée par la charge.
$Q_i$	Puissance réactive (elle peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive, respectivement, capacitive).
$U_{ch}$	Tension aux bornes de la charge.
$\bar{V}_m, \bar{I}_m$	Tension et courant respectivement au primaire du transformateur.
$\bar{V}_k, \bar{I}_k$	Tension et courant respectivement au secondaire du transformateur.
$\bar{E}_1, \bar{E}_2$	F.e.m primaire et secondaire respectivement.
$\bar{Z}_1 = r_1 + jx_1$	Impédance de l'enroulement primaire.
$\bar{Z}_2 = r_2 + jx_2$	Impédance de l'enroulement secondaire.

---

# Liste des abréviations

---

$r_1, r_2$	Résistance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement.
$x_1, x_2$	Réactance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement.
$\bar{Y}_T$	Admittance shunt.
$g_T, b_T$	Conductance et susceptance shunt.
$I_0$	Courant qui traverse la branche magnétisante.
$\mu$	Rapport de transformation.
$P_{cc}$	Pertes dans le cuivre.
$U_{cc}$	Tension de court-circuit.
$\sum R$	Somme des résistances.
$\sum X$	Somme des réactances.
PD	Production décentralisée.

---

---

A decorative border in a dark red color, shaped like a scroll. It has a vertical bar on the left side and rounded corners on the right side, with a small circular detail at the top right corner.

# INTRODUCTION GENERALE

---

# ***INTRODUCTION GENERALE***

---

Les réseaux électriques connaissent depuis quelques années de profondes mutations dues à des bouleversements à l'échelle internationale des politiques énergétiques. La dérégulation de la marche de l'électricité, qui a commencé en Europe avec la Grande-Bretagne au début des années 1990, a gagné le reste de l'Europe en 1996 avec l'édition par la commission européenne de la directive 96/92/CEE fixant les règles de l'ouverture du marché de l'énergie électrique à la concurrence. Les conséquences immédiates de cette directive sont une privatisation progressive des secteurs de la production et de la distribution du produit électrique, et donc la désintégration verticale du système électrique.

Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures hautement critiques pour notre société. Ces réseaux sont conçus traditionnellement d'une manière verticale où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » : Production -Transport-Distribution. En effet, les réseaux électriques sont traditionnellement exploités d'une manière centralisée. Ainsi, la plus grande partie de la production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (centrales hydraulique, thermique et nucléaire).

De nos jours, de nouvelles sources de production d'énergie décentralisée peuvent s'étaler de quelques kW raccordés aux réseaux de distribution HTA jusqu'à plusieurs dizaines de MW raccordées aux réseaux HTB de répartition. De plus, elle est encouragée par l'évolution de la réglementation en faveur des énergies renouvelables, et elle s'appuie aujourd'hui sur des moyens de production tels que les éoliennes et les photovoltaïques.

La production décentralisée introduit des changements radicaux sur les métiers de la génération, du traitement et de la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, ces réseaux n'ont pas été conçus dans cette optique (raccordement d'unités de production à grande échelle) et la possibilité d'introduire ces sources d'énergie au sein de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de la protection du réseau. Par ailleurs, cette forme de production, de par sa nature distribuée, a le potentiel de permettre une meilleure sécurisation des infrastructures [1].

Il est à prévoir que cette production d'énergie va tendre à s'accroître dans les années à venir, amenant avec elle un problème d'intégration dans le réseau actuel de la distribution. L'impact de ce type de production sur le fonctionnement du réseau n'est pas négligeable. Il faut souligner le fort taux d'intermittence attendu du fait des énergies renouvelables. A cet effet, un taux de pénétration important amènera des problèmes de fonctionnement que ce soit au niveau de la tension, du plan de protection, de la qualité de l'énergie, de la stabilité du réseau et sur l'intensité des courants de court-circuit, etc. [2].

Il convient donc de rechercher des solutions innovantes à ces problèmes. Les travaux présentés dans ce mémoire se focalisent sur le calcul des courants de court-circuit dans le réseau électrique et l'impact de la production décentralisée sur celui-ci.

# ***INTRODUCTION GENERALE***

---

Il n'y a pas de doute qu'un effort considérable est accompli afin de contrecarrer les problèmes de court-circuit et leurs conséquences dans un réseau électrique. Des relais de protection sont conçus pour minimiser les effets de ces défauts quand ils se produisent, ce qui nécessite la connaissance du niveau de courant de court-circuit. La sélection de dispositifs d'interruption (fusibles, disjoncteurs...) dépend aussi des exigences à connaître pour interrompre le courant de court-circuit. Le dimensionnement d'une installation électrique et des matériels à mettre en œuvre, la détermination des protections des personnes et des biens, nécessitent l'étude et le calcul des courants de court-circuit en tout point du réseau.

Dans ce contexte, l'étude menée dans ce travail se porte sur le calcul des courants de court-circuit dans un réseau électrique en présence d'une production décentralisée. Le travail sera développé en trois chapitres:

Le premier chapitre expose les différentes structures et architectures d'un réseau électrique, la modélisation des éléments le constituant sera aussi abordé. Deux moyens de production d'énergie électrique à base de ressources renouvelables, à savoir, l'éolien et le photovoltaïque seront présentés.

Dans le second chapitre, le court-circuit sera défini avec les causes d'apparition et les conséquences. Nous traiterons les caractéristiques de ces derniers ainsi que la méthode des composantes symétriques qui permettra d'évaluer leurs intensités.

Dans le dernier chapitre, une première évaluation des grandeurs électriques (tensions aux nœuds et l'intensité des courants transités à travers les lignes) d'un réseau de distribution à son état initial ainsi qu'un calcul des courants de court-circuit en appliquant la méthode des composantes symétriques seront effectués. Un nouveau calcul des grandeurs électriques sera effectué avec une insertion d'une production décentralisée afin d'évaluer l'impact de cette dernière sur le fonctionnement du réseau, à savoir, sur le sens de transit du courant, sur l'intensité de courant de court-circuit et sur le plan de protection.

---



# Chapitre I

---

### I.1.Introduction

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage,...etc. dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique [3].

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter les différentes structures et architectures du réseau électrique et modéliser les éléments le constituant. Le chapitre sera consacré aussi à la présentation de deux moyens de production d'énergie électrique à base de ressources renouvelables, à savoir, l'éolien et le photovoltaïque.

### I.2.Définition du réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs.

### I.3. Chemin de l'électricité dans le réseau électrique

L'électricité produite par les centrales est d'abord acheminée sur de longues distances dans des lignes à haute tension (HTB) gérées par le gestionnaire du réseau (figure I.1). Elle est ensuite transformée en électricité à la tension HTA pour pouvoir être acheminée par le réseau de distribution. Cette transformation intervient dans les postes sources.

Une fois sur le réseau de distribution, l'électricité haute tension HTA alimente directement les clients industriels. Pour les autres clients (particuliers, commerçants, artisans...), elle est convertie en basse tension (BT) par des postes de transformation avant d'être livrée.

Au final, la qualité de l'alimentation en électricité des utilisateurs du réseau est donc le résultat de la qualité de tout ce parcours [4].

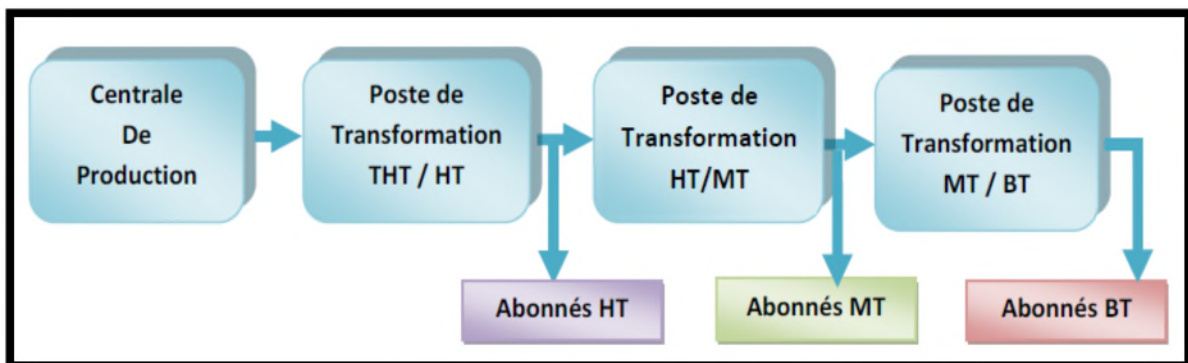


Fig.I.1: Chemin de l'électricité dans le réseau électrique



### I.4. Structure du réseau électrique et son rôle

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution (figure I.2) [2] [5] [6].

#### I.4.1. Réseau de transport et de répartition

La première de ces divisions est le réseau de transport (400kV, 225kV) ou réseau de haute tension de niveau B (HTB). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale. Sur ce réseau sont connectées les centrales de production classique comme les centrales nucléaires. Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles ou interconnectées, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc.

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition (63kV, 90kV), celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.

La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de transport et de répartition est effectuée de manière centralisée.

#### I.4.2. Réseau de distribution

La troisième et dernière subdivision est le réseau de distribution (20kV, 400V). Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD). Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée, une structure radiale est une structure arborescente. Ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HTB/HTA ou HTA/BT vers le point de consommation considérée.

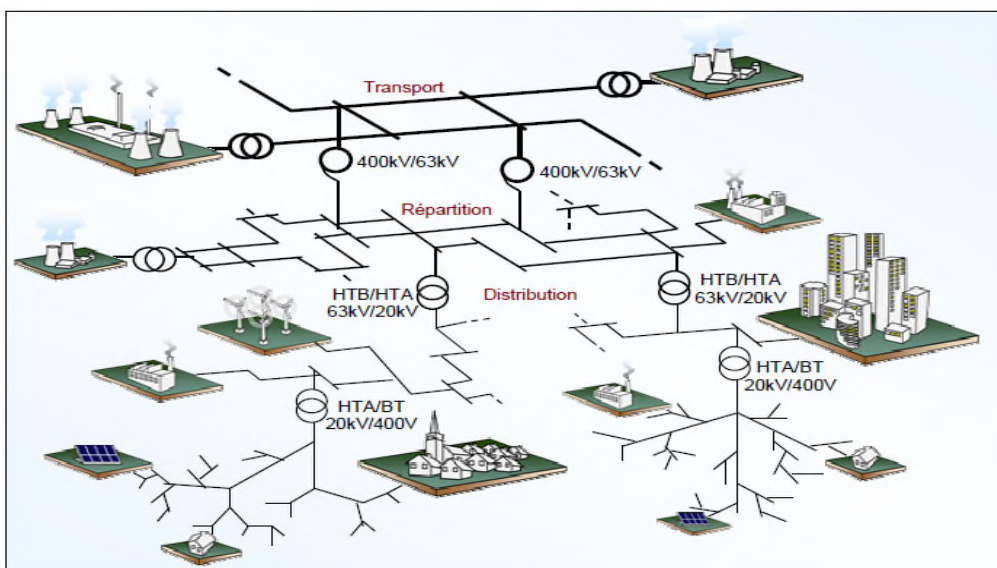


Fig.I.2: Structure du réseau électrique

### I.5.Topologies des réseaux électriques

Les réseaux doivent assurer le transit de l'énergie électrique avec une sécurité suffisante, cette sécurité d'alimentation est augmentée soit [7-9] :

- Par les lignes aux appareillages plus solides ;
- Par des circuits plus nombreux.

#### I.5.1.Réseau radial

C'est une topologie simple (figure I.3) qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

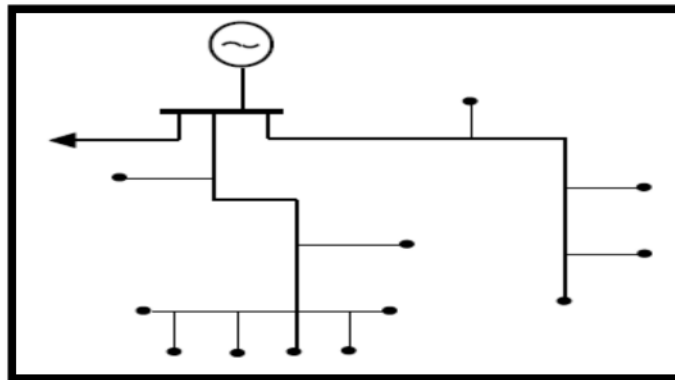


Fig.I.3 : Schéma d'un réseau radial

#### I.5.2.Réseau arborescent

Cette structure (figure I.4) est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

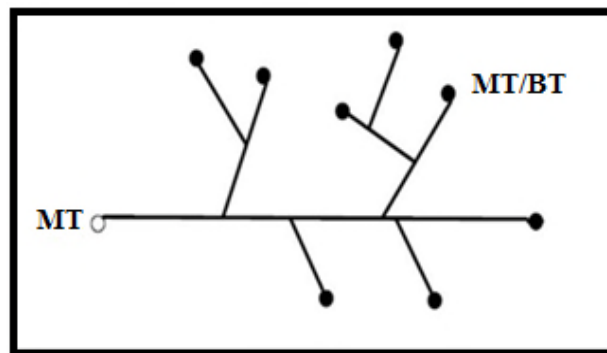


Fig.I.4: Schéma simplifié d'un réseau arborescent

### I.5.2. Réseaux bouclés

Cette topologie (figure I.5) est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

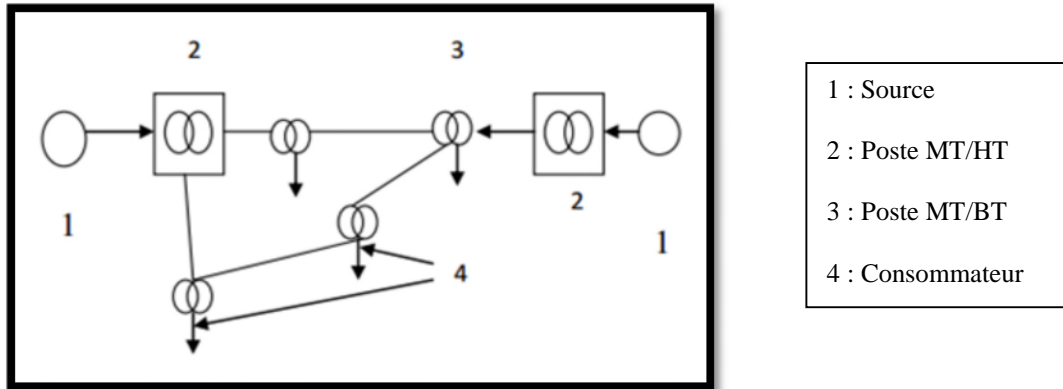


Fig.I.5: Schéma simplifié d'un réseau bouclé

### I.5.3. Réseau maillé

Cette topologie (figure I.6) est la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus chers.

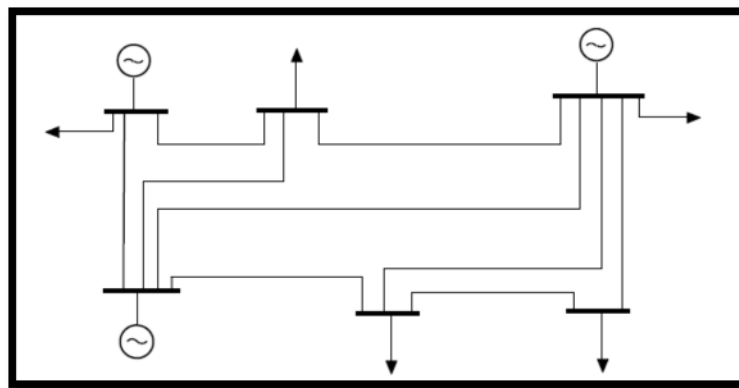


Fig.I.6: Schéma simplifié d'un réseau maillé

Les choix entre les différentes structures ne peut se faire qu'après une étude économique, tenant compte non seulement du prix de revient du réseau, mais aussi de la qualité de service qui pourra être assuré et des possibilités d'extension du réseau.

**I.6. Modélisation des éléments du réseau électrique**

**I.6.1. Modélisation des générateurs**

Les générateurs sont des éléments du réseau capable de fournir de la puissance active au système (figure I.7). Ils peuvent aussi produire, voire consommer, de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs sont définies par [10] :

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax}$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax}$$

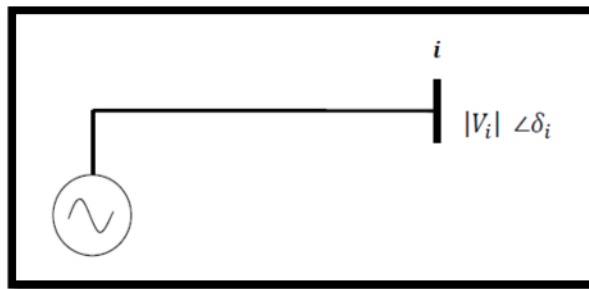


Fig.I.7: Modèle du générateur

Avec,

$P_{Gi}$  : Puissance active délivrée par le générateur au nœud  $i$  ;

$Q_{Gi}$  : Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud  $i$  ;

$V_i$  : Tension complexe au nœud  $i$  ;

$\delta_i$  : Déphasage de la tension au nœud  $i$  ;

**I.6.2. Modélisation des lignes aériennes**

Les lignes aériennes sont conçues pour véhiculée l'énergie électrique produite par les centrales de production jusqu'aux consommateurs les plus éloignés.

Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal (figure I.8) [10].

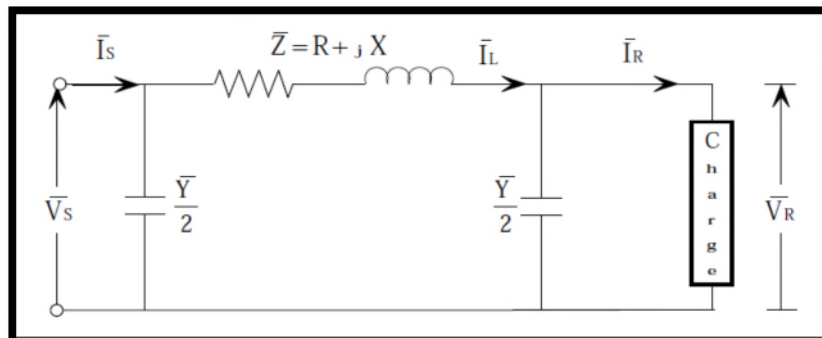


Fig.I.8: Modèle en  $\pi$  d'une ligne aérienne

En appliquant la loi de Kirchhoff pour déterminer la tension  $V_s$  et le courant  $I_s$  à la source, le système d'équation est donné comme suit [11]:

$$\begin{cases} \bar{V}_S = A. \bar{V}_R + B. \bar{I}_R \\ \bar{I}_S = C. \bar{V}_R + D. \bar{I}_R \end{cases} \quad (I-1)$$

Sachant que,

$$A=D=\left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) ;$$

$$B = \bar{Z} ;$$

$$C = \bar{Y}. \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right) ;$$

Avec,

A, B, C et D : sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission ;

$\bar{V}_S, \bar{I}_S$  : Tension et courant à la source respectivement ;

$\bar{V}_R, \bar{I}_R$  : Tension et courant à la réception respectivement ;

$\bar{Z}$ : Impédance de la ligne ;

R, X: Résistance et réactance de la ligne respectivement ;

$\bar{Y}$ : Admittance shunt de la ligne.

### I.6.3.Modélisation des charges

Dans les calculs de répartition de puissance, on représente les charges par des consommations de puissances active  $P_i$  et réactive  $Q_i$  (figure I.9), que l'on peut considérer comme constantes en régime normal car la fréquence et la tension aux bornes de la charge sont constantes [10].

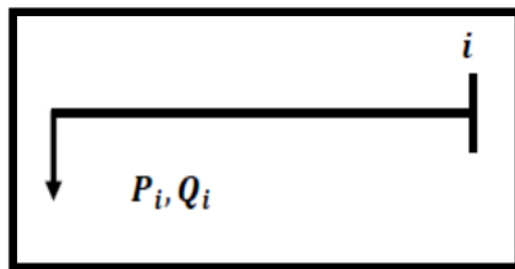


Fig.I.9: Modélisation d'une charge

La puissance apparente aux bornes de la charge est donnée par :

$$\bar{S}_{ich} = P_i + jQ_i$$

Avec,

$\bar{S}_{ich}$  : Puissance apparente complexe au nœud (i) ;

$P_i$  : Puissance active demandée par la charge ;

$Q_i$  : Puissance réactive (elle peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive, respectivement, capacitive) ;

I.6.4. Modélisation du transformateur

Quel que soit le mode de couplage, le transformateur peut être modélisé par le schéma équivalent présenté sur la figure (I.10) [10].

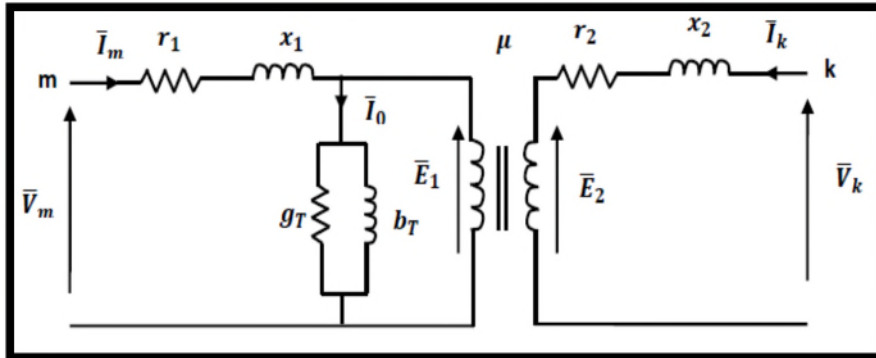


Figure I.10 : Circuit équivalent du transformateur

Avec,

$\bar{V}_m, \bar{I}_m$  : Tension et courant respectivement au primaire du transformateur ;

$\bar{V}_k, \bar{I}_k$  : Tension et courant respectivement au secondaire du transformateur ;

$\bar{E}_1, \bar{E}_2$  : F.e.m primaire et secondaire respectivement ;

$r_1, r_2$  Et  $x_1, x_2$  : Résistances et Réactances de l'enroulement primaire et secondaire respectivement ;

$\bar{Y}_T = g_T + jb_T$  : Admittance shunt;

$g_T, b_T$  : Conductance et susceptance shunt ;

$I_0$  : Courant qui traverse la branche magnétisante ;

$\mu$  : Rapport de transformation.

Les paramètres résistance et réactance du transformateur peuvent être calculés comme suit :

• **Résistance  $R_T$**

La résistance totale du transformateur calculée au primaire est donnée par :

$$R_T = \frac{P_{cc}(\%)}{100} \cdot \frac{U_{1n}^2}{S_n} \quad (I-2)$$

Avec, 
$$\begin{cases} P_{cc}(\%) = \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot 100 \\ P_{cc} = 3 \cdot R_T \cdot I_{1n}^2 \end{cases}$$

$P_{cc}$  : Pertes dans le cuivre

• **Réactance  $X_T$**

La réactance totale du transformateur calculée au primaire est donnée par :

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (I-3)$$

$$Z_T = \frac{U_{cc}(\%)}{100} \cdot \frac{U_{1n}^2}{S_n} \quad (I-4)$$

$$\text{Avec, } \begin{cases} U_{cc}(\%) = \frac{U_{cc}}{U_{1n}} \cdot 100 \\ U_{cc} = \sqrt{3} \cdot Z_T \cdot I_{1n} \end{cases}$$

$U_{cc}$  : Tension de court-circuit

## I.7. Production décentralisée

### I.7.1. Définition

La production décentralisée ou dispersée (PD) se définit par opposition à la production classique, par unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification, et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, et assurer un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Ces unités centralisées sont dites «dispatchables» [12]. Par rapport aux unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100 MW, ne sont pas planifiées de manière centralisée, ni actuellement coordonnées, elles sont généralement raccordées au réseau de distribution (<15 MW) et ne sont pas non plus actuellement destinées à assurer des services systèmes. Cette production décentralisée se développe dans tous les pays, sur base d'unités de cogénération, d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des producteurs indépendants [13].

La production décentralisée a inévitablement un impact plus ou moins important sur les réseaux aux plans suivants : topologie ou conception, dimensionnement, gestion prévisionnelle, exploitation en temps réel.

On définit le taux d'intégration ( $\tau\%$ ) d'une production décentralisée comme le rapport entre la puissance injectée par cette dernière ( $P_{PD}$ ) au réseau et la puissance totale demandée par les charges situées au niveau du réseau ( $\sum P_{charges}$ ). L'expression mathématique est donnée comme suit :

$$\tau\% = \frac{P_{PD}}{\sum P_{charges}} \quad (I.5)$$

Dans ce cas, la puissance générée par la centrale classique ' $P_G$ ' va diminuer sa production de sorte à garantir l'équilibre entre la production et la consommation. La nouvelle valeur de la puissance du générateur devient :

$$P'_G = P_G - P_{PD} \quad (I.6)$$

### I.7.2. Principaux types de production décentralisée à base de ressources renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), éoliens mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [14-17].

On se limite dans ce qui suit à la description des productions connectées au réseau.

### A. Production solaire ou photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque (figure I.11).

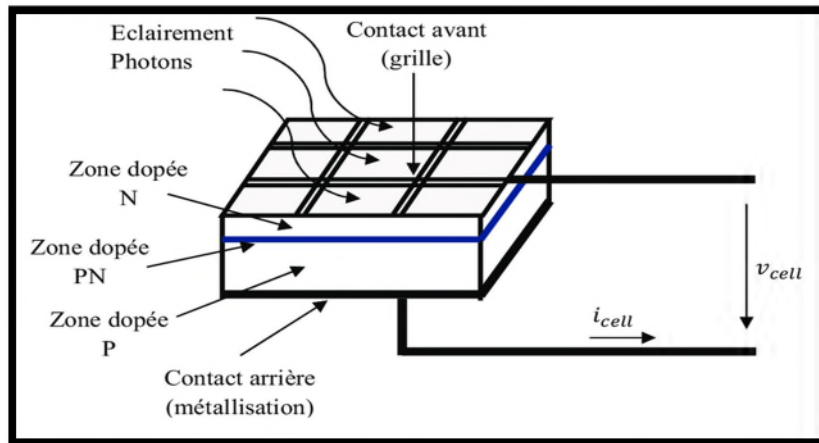


Fig.I.11 : Principe de conversion photovoltaïque

Un premier processus consiste à fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire en utilisant les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique ( $i_{cell}$ ) par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension ( $v_{cell}$ ), les cellules sont assemblées en panneaux (figure I.12). Un autre procédé utilise des miroirs pour concentrer le flux d'énergie vers un foyer où de l'eau est vaporisée pour entraîner un alternateur.

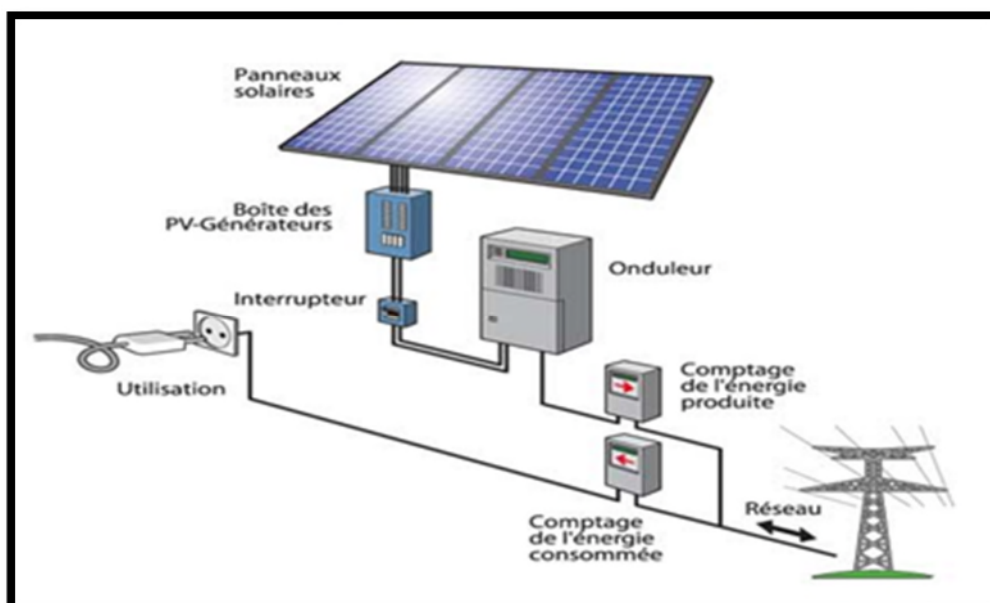


Fig.I.12 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau



**B. Production éolienne**

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moulin le grain (figure I.13). Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau).

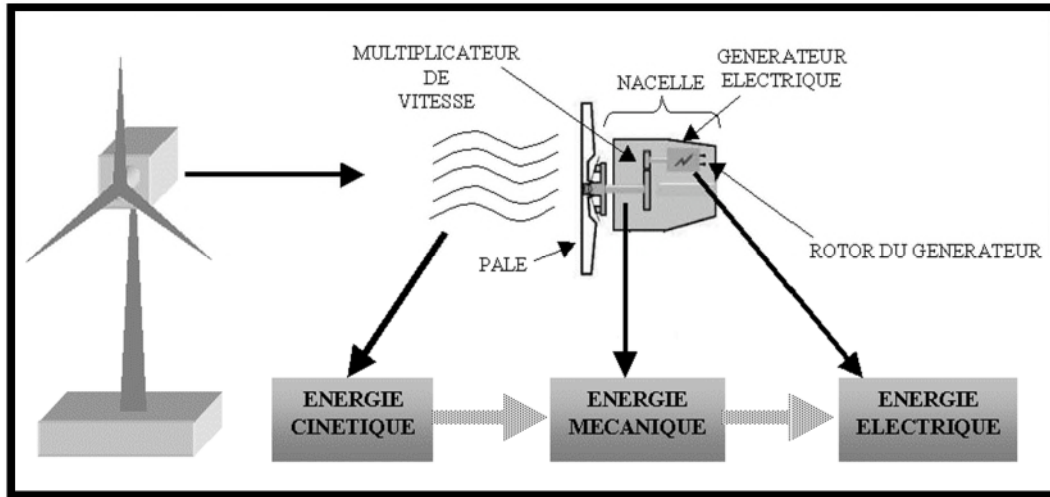


Fig.I.13 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : L'éolienne transforme la puissance de translation du vent en puissance de rotation. Un alternateur est mécaniquement couplé à l'axe des pales (rotor) pour produire les tensions triphasées. Un dispositif de régulation permet d'obtenir une vitesse de rotation constante compatible avec la fréquence du réseau (50Hz), (figure I.14).

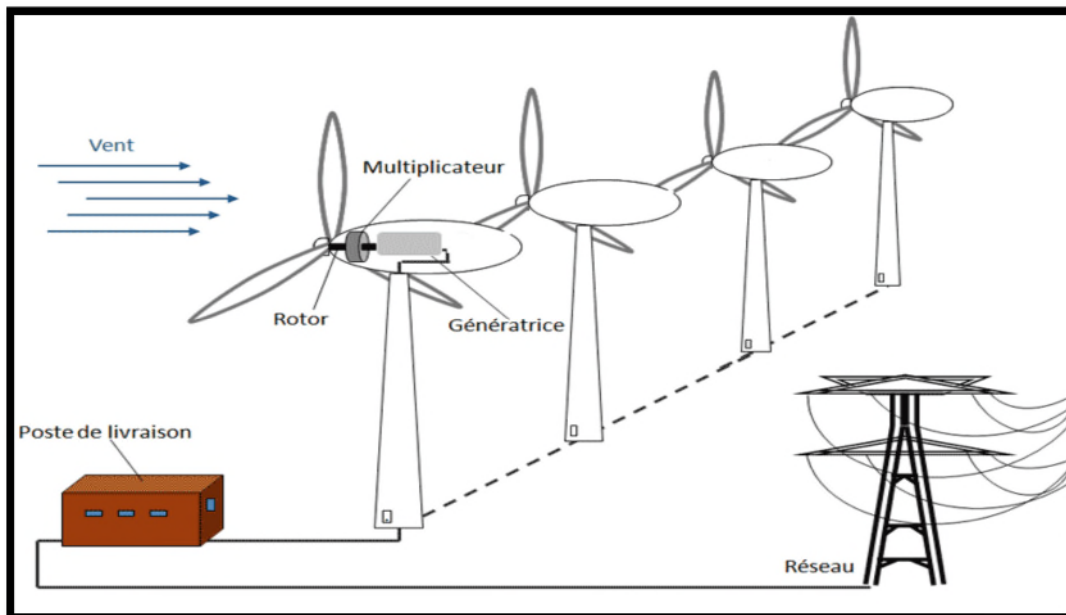


Fig.I.14: Schéma de principe d'une production éolienne connectée au réseau

**I.8.Impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques**

La production décentralisée peut occasionner quelques impacts sur le système électrique. Ces impacts peuvent toucher le fonctionnement du réseau de distribution ainsi que le réseau de transport. Les principaux impacts touchant le système de distribution sont résumés dans ce qui suit [8] [18] [19] :

- Impacts sur le sens traditionnel d'écoulement de l'énergie, le système électrique a été dimensionné pour un flux de puissance du système de transport vers le système de distribution. Ainsi, il est possible que l'énergie soit injectée à partir du système de distribution dans le système de répartition et de transport. Ceci implique un besoin de bidirectionnalité dans l'équipement mis en jeu.
- La connexion de nouveaux générateurs dispersés au réseau modifiera également l'intensité des courants de court-circuit et donc le réglage des seuils des protections. Cet impact sur le plan de protection, nécessite le redimensionnement des seuils des protections, car il peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection.
- Impacts sur le profil de la tension à cause des injections ou demandes d'énergie.
- Impacts sur la stabilité du système à cause de l'insertion de machines synchrones qui changent le temps critique d'élimination de défaut du système.
- Impacts sur la qualité de l'énergie (forme et valeur efficaces de la tension, déséquilibres entre autres).
- Impacts sur la planification du réseau, son contrôle et son exploitation. Ceci implique une nouvelle observabilité des réseaux de distribution car ils ont été conçus comme un élément passif. Avec la production décentralisée, ces réseaux deviennent actifs. La production décentralisée devrait être, dans l'idéal, contrôlable par les compagnies électriques et les opérateurs de la distribution.
- Impacts économiques sur les marchés de l'énergie : des associations et accords entre producteurs décentralisés pourraient favoriser la concurrence et, au final, une baisse du prix de l'énergie (marché journalier, mécanismes de compensations des équilibres, marché des réserves, services systèmes).

D'un autre côté, les principaux impacts qu'une grande quantité d'insertion de la production décentralisée peut provoquer dans le système de transport, sont les suivants [8] [18] [19]:

- Le risque de congestion dans des zones spécifiques : 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.
- L'intermittence des sources d'énergie provoque une incertitude dans le système en terme 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 sans connaître a priori ni la position, ni la puissance qu'ils vont débiter.
- 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.

- La fermeture ou le non remplacement des grandes centrales à cause des raisons économiques et environnementales.
- La perte de la production décentralisée par des conditions climatiques rudes, soit la déconnexion des éoliennes par vents excessivement forts.

**I.9.Conclusion**

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

Nous avons consacré la dernière partie de ce chapitre pour la présentation des impacts qui touchent le fonctionnement du réseau électrique lors de l'intégration massive de ces productions décentralisées sur les réseaux de distribution et de transport.

---



# Chapitre II

---

**II.1.Introduction**

Les courants et tensions qui apparaissent lors d'un défaut (court-circuit ou défaut d'isolement) affectant les réseaux électriques peuvent provoquer d'énormes pertes matérielles, humaines et économiques d'où l'intérêt de maîtriser et d'étudier ce type de perturbations.

Toute installation électrique doit être alors protégée contre les courts-circuits et ceci, sauf exception chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique. L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou couper ce courant de défaut. Pour cela, nous étudierons dans ce chapitre les caractéristiques des courants de court circuit ainsi que la méthode des composantes symétriques qui permettra d'évaluer leurs intensités.

**II.2.Court-circuit**

Les courts-circuits sont des phénomènes transitoires, ils apparaissent lorsque l'isolement entre deux conducteurs de tensions différentes ou entre un conducteur sous tension et la terre est rompu. Ils engendrent des courants très importants dans les éléments constituant le réseau. Les courts-circuits peuvent provoquer des dégâts économiques importants s'ils ne sont pas éliminés rapidement par les systèmes de protection. Un court-circuit est une liaison accidentelle entre conducteurs à impédance nulle (Court-circuit franc) ou non (court-circuit impédant). Un court-circuit peut être interne s'il est localisé au niveau d'un équipement, ou Externe s'il se produit dans les liaisons. [20]

**II.3.Origines d'un défaut de courts-circuits**

Le court circuit représente le test le plus sévère pour valider les modèles de systèmes connectés sur un réseau électrique. Alors le risque d'apparition d'un incident sur le réseau n'est pas nul car lié à de nombreux paramètres aléatoires [21-23]. Ainsi, les courts circuits peuvent avoir diverses origines :

- **Electriques** : C'est l'altération des isolants des matériels de réseau, par exemple. En effet, les matériels électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des courts-circuits.
- **Atmosphériques** : Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.
- **Mécaniques** : C'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteurs consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple.
- **Humaines** : Ce sont les fausses manœuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple.

## II.4. Caractéristiques des défauts

Les défauts sont caractérisés par leur forme, leur durée et l'intensité du courant [24-26].

### II.4.1. Formes ou types de défauts de court-circuit

Plusieurs types de court-circuit peuvent se produire dans un réseau électrique :

- **Court-circuit triphasé** : Il correspond à la réunion des trois phases, c'est le courant de court-circuit le plus élevé (figure II.1.a).
- **Court-circuit biphasé isolé** : Il correspond à un défaut entre deux phases. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur (figure II.1.b).
- **Court-circuit biphasé terre** : Il correspond à un défaut entre deux phases et la terre (figure II.1.c).
- **Court-circuit monophasé** : Il correspond à un défaut entre une phase et la terre, c'est le plus fréquent (figure II.1.d).

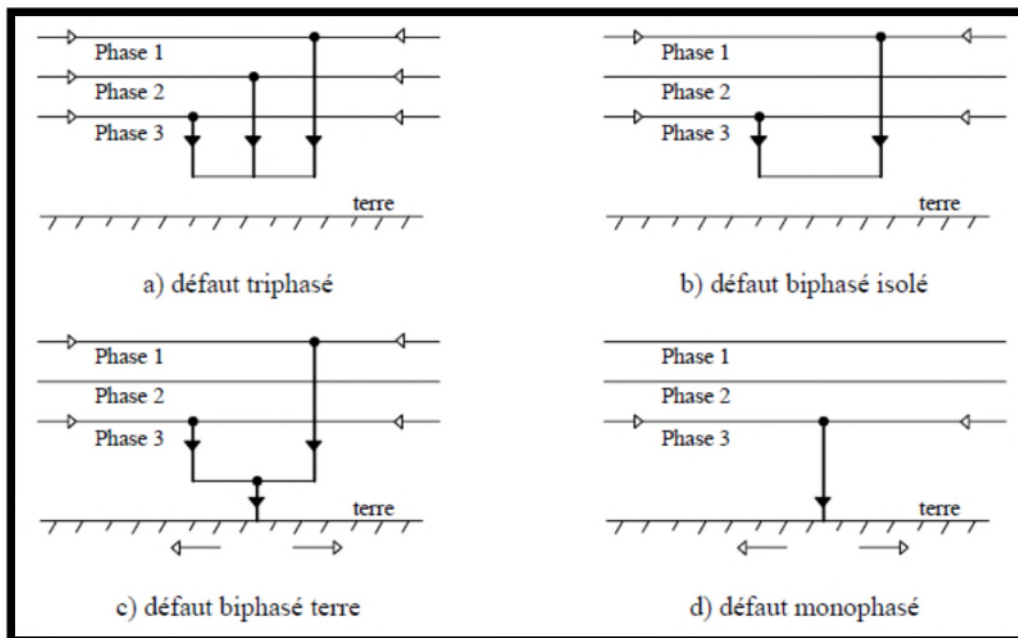


Fig.II.1 : Différents types de défauts de court-circuit

### II.4.2. Durée des courts circuits

- **Court-circuits fugitifs** : Les courts-circuits fugitifs nécessitent une coupure très brève du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dixièmes de seconde).
- **Courts-circuits permanents** : Ces courts-circuits provoquent un déclenchement définitif qui nécessite l'intervention du personnel d'exploitation pour la localisation du défaut et remise en service de la partie saine.
- **Courts-circuits auto-extincteurs** : c'est ceux qui disparaissent spontanément en des temps très courts sans provoquer de discontinuités dans la fourniture d'énergie électrique.

- **Court -circuit semi permanents** : Ces courts-circuits exigent pour disparaître une ou plusieurs coupures relativement longues du réseau d'alimentation (de l'ordre de quelques dizaines de secondes) sans nécessité d'intervention du personnel d'exploitation.

### II.4.3. Intensité du courant de court- circuit

L'intensité du courant de court-circuit est une caractéristique importante, elle détermine la sévérité de la contrainte appliquée au réseau et au matériel en défaut. Elle dépend de la forme des courts-circuits et, pour ceux impliquant la terre, du mode de mise à la terre des points neutres. A titre d'exemple, pour le court circuit symétrique l'intensité du courant de court circuit est donné par l'expression suivante :

$$I_{cc} = \frac{U/\sqrt{3}}{\sum Z_{\text{défaut}}} \quad (\text{II-1})$$

Tel que :

$$\sum Z_{\text{défaut}} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (\text{II-2})$$

Avec,

$\sum Z_{\text{défaut}}$  : Somme des impédances en amont du défaut

$\sum R$ : Somme des résistances

$\sum X$ : Somme des réactances

### II.5.Effets des courants de court-circuit

Les conséquences des courts-circuits sont souvent graves sinon dramatiques [27]:

- le court-circuit perturbe l'environnement du réseau autour du point de défaut par le creux de tension brutal qu'il entraîne.
- Il contraint à mettre hors service, par le jeu des protections appropriées, une partie souvent importante du réseau.
- Tous les matériels et liaisons (câbles, lignes) traversés par le court-circuit subissent une forte contrainte mécanique (efforts électrodynamiques) qui peut entraîner des ruptures, une contrainte thermique pouvant entraîner la fusion des conducteurs et la destruction des isolants.
- Au point de défaut se manifeste le plus souvent un arc électrique de forte énergie, dont les effets destructeurs sont très importants, et qui peut se propager très rapidement. Malgré la probabilité de plus en plus faible d'apparition d'un court-circuit dans les installations modernes, bien conçues et bien exploitées, les conséquences graves qui peuvent en résulter incitent à tout mettre en œuvre pour détecter et éliminer très rapidement tout court-circuit.

### II.6.Importance de calcul des courants de court-circuit

L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation ; Ce calcul n'implique pas seulement la connaissance de ces courants sur les autres lignes et phases du réseau ainsi que leurs conséquences sur les tensions. Ces valeurs permettent ensuite de choisir les protections les plus adaptés pour chaque type de réseau.

Pour choisir et régler convenablement les protections, on utilise les courbes du courant en fonction du temps. Deux valeurs du courant de court-circuit doivent être connues [28]:

- ✓ le courant maximal de court-circuit qui détermine :
  - le pouvoir de coupure -PdC- des disjoncteurs,
  - le pouvoir de fermeture des appareils,
  - la tenue électrodynamique des canalisations et de l'appareillage.

Il correspond à un court-circuit à proximité immédiate des bornes aval de l'organe de protection. Il doit être calculé avec une bonne précision (marge de sécurité).

- ✓ le courant minimal de court-circuit indispensable au choix de la courbe de déclenchement des disjoncteurs et des fusibles, en particulier quand :
  - la longueur des câbles est importante et/ou que la source est relativement impédante (générateurs-onduleurs) ;
  - la protection des personnes repose sur le fonctionnement des disjoncteurs ou des fusibles, c'est essentiellement le cas avec les schémas de liaison à la terre du neutre TN ou IT.

## **II.7.Calcul des courants de court-circuit**

Le calcul des courants de court-circuit peut se faire de différentes manières, néanmoins, dans ce présent chapitre on exposera que la méthode des " composantes symétriques".

### **II.7.1. Intérêt de la méthode des composantes symétriques**

Le calcul à l'aide des composantes symétriques est particulièrement utile lorsqu'un réseau triphasé est déséquilibré car les impédances classiques R et X dites « cycliques » ne sont alors plus normalement utilisables du fait, par exemple, de phénomènes magnétiques. Aussi, ce calcul est nécessaire quand :

- un système de tensions et courants est non symétrique (vecteurs de Fresnel de modules différents et de déphasages différents de  $120^\circ$ ) ; c'est le cas lors d'un court-circuit monophasé (phase-terre), biphasé, ou biphasé-terre ;
- le réseau comporte des machines tournantes et/ou des transformateurs spéciaux

Cette méthode est applicable à tous types de réseaux à distribution radiale quelque soit leurs tensions.

### **II.7.2. Rappel sur les composantes symétriques**

La définition des composantes symétriques repose sur l'équivalence entre un système triphasé déséquilibré, et la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, inverse et homopolaire (figure II.2).

Le principe de superposition est alors exploitable pour le calcul des courants de défaut.

Pour l'explication suivante, le système est défini en prenant le courant I1 comme référence de rotation [29], tel que :



$\bar{I}_d$  : comme sa composante directe,

$\bar{I}_i$  : sa composante inverse,

$\bar{I}_o$  : sa composante homopolaire,

Et en utilisant l'opérateur  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  entre  $I_d, I_i, I_o$ .

Ce principe appliqué à un système de courants se vérifie par construction graphique comme représenté sur la figure II.2, le même principe se fait pour un système de tensions.

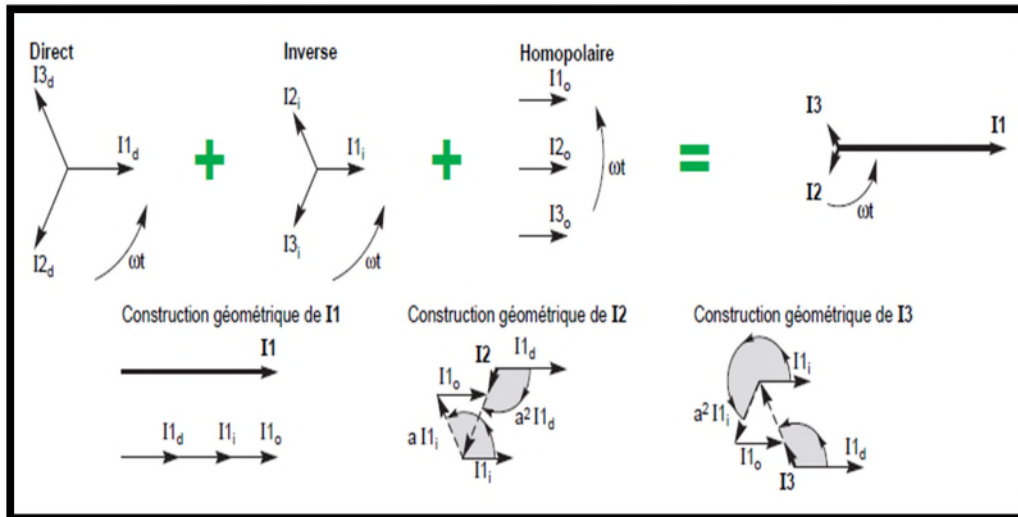


Fig.II.2: construction graphique de la somme de trois systèmes triphasés équilibrés : direct, inverse et homopolaire

L'addition graphique des vecteurs donne bien, le résultat suivant :

$$\begin{cases} I_1 = I_d + I_i + I_o \\ I_2 = a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 = a I_d + a^2 I_i + I_o \end{cases} \quad (II-3)$$

$$\begin{cases} V_1 = V_d + V_i + V_o \\ V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_o \end{cases} \quad (II-4)$$

### II.7.3.Méthode de résolution pratique

La méthode résumée ci-dessous est développée en détail dans l'exemple du paragraphe suivant (défaut monophasé terre) [28-29].

Le réseau est divisé en 2 zones :

- une zone dissymétrique D (réseau déséquilibré),
- une zone symétrique S (réseau équilibré).

On écrit les équations liant courants et tensions :

- dans la zone D (composantes réelles),
- dans la zone S (composantes symétriques),
- continuité à la frontière D-S,
- fonctionnement dans la zone S.

La résolution mathématique des équations permet de calculer les valeurs des composantes symétriques et des composantes réelles des courants et tensions des zones D et S. Il est à noter que les schémas représentatifs des systèmes symétriques offrent la possibilité de calculer directement les valeurs des composantes symétriques (figure II.3).

Pour un réseau comportant une seule f.e.m, les composantes symétriques de tension et de courant étant respectivement  $V_d, V_i, V_o, I_d, I_i, I_o$ , à l'endroit D de la dissymétrie, les relations définissant les 3 régimes sont :

$$\begin{cases} V_d = E - Z_d I_d \\ V_i = -Z_i I_i \\ V_o = -Z_o I_o \end{cases} \quad (II-5)$$

Elles sont schématisées par la figure II.3.

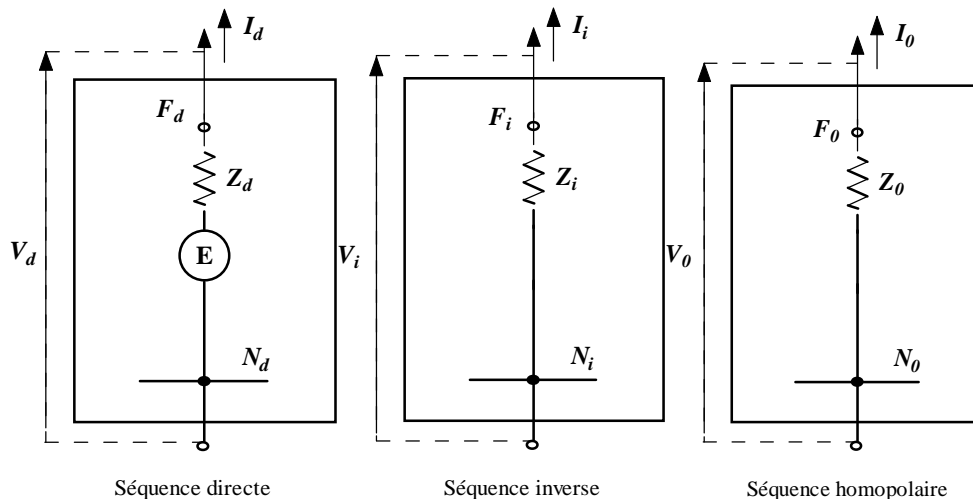


Fig.II.3: Représentation du réseau en séquences directe, inverse et homopolaire

Pour les réseaux comportant plusieurs sources, ces équations restent valables à condition de considérer E et  $Z_d, Z_i, Z_o$ , respectivement comme la f.e.m. et comme les impédances internes du générateur équivalent de Thévenin.

Avec,

$F_d, F_i, F_o$ : Les points de défaut à partir desquels les courants de séquence s'écoulent vers l'extérieur

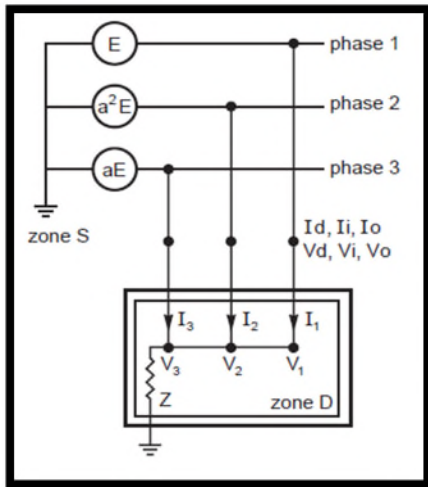
$N_d, N_i, N_o$ : Les bus de neutre

#### II.7.4. formulation des équations générales de court-circuit

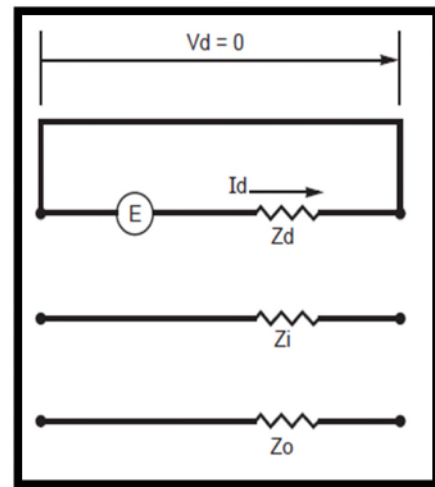
Le développement des équations reliant les courants réels et de séquences ainsi les tensions réelles et de séquence pour différents types de court-circuit a été traité dans plusieurs ouvrages dont les références sont citées dans [29-33]

**A. Court-circuit triphasé**

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases et le schéma équivalent des séquences comme montré sur les figures (II.4.a) et (II.4.b) respectivement.



a) Schéma électrique



b) Schéma de séquence

Fig.II.4 : Cas de court circuit triphasé

**Ecriture des équations**

- Dans la zone (D)  
 $V_1 = V_2 = V_3 = Z(I_1 + I_2 + I_3)$
- Dans la zone (S)  
 On applique les équations (II-3) et (II-4)
- Continuité à la frontière (D) - (S)

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 3I_o = \frac{V_o}{Z} \\ V_d = V_i = 0 \\ V_1 = V_2 = V_3 = V_o \end{cases}$$

- Fonctionnement de (S)  
 On applique l'équation (II-5)

**Résolution des équations**

✓ Les valeurs de séquences des courants et tensions sont données par :

$$\begin{cases} I_d = \frac{E}{Z_d} \\ I_o = 0 \\ I_i = 0 \end{cases} \quad (II-6)$$

$$\{ V_d = V_i = V_o \quad (II-7)$$

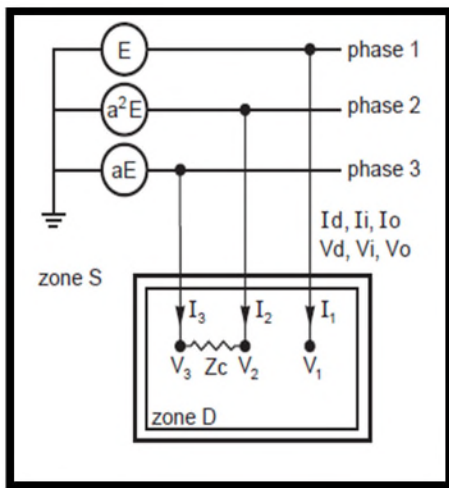
✓ Les valeurs réelles des courants et tensions sont données par :

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E}{Z_d} \\ I_2 = a^2 \frac{E}{Z_d} \\ I_3 = a \frac{E}{Z_d} \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

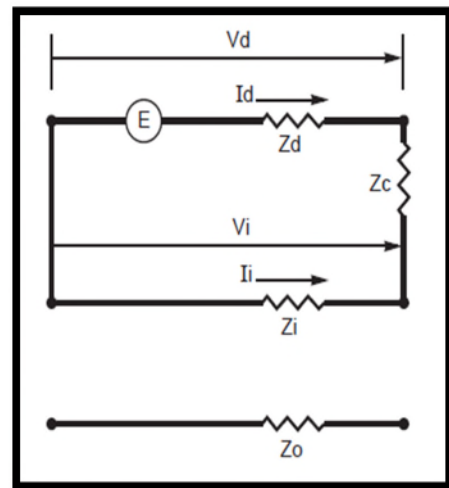
$$\{V_1 = V_2 = V_3 = 0 \quad (\text{II-9})$$

**B. Court-circuit biphase**

C'est le défaut qui correspond à la réunion des deux phases et le schéma équivalent des séquences comme montré sur les figures (II.5.a) et (II.5.b) respectivement.



a) Schéma électrique



b) Schéma de séquence

Fig.II.5 : Cas de court circuit biphase

**Ecriture des équations**

- Dans la zone (D)

$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ V_3 - V_2 = I_3 Z = -I_2 Z \end{cases}$$

- Continuité à la frontière (D) - (S)

$$\begin{cases} I_o = 0 \\ I_d = -I_i \\ V_d - V_i = Z * I_d \end{cases}$$

Résolution des équations

✓ Les valeurs de séquences des courants et tensions sont données par :

$$\begin{cases} I_d = \frac{E}{Z_d+Z_i+Z} \\ I_i = -\frac{E}{Z_d+Z_i+Z} \\ I_o = 0 \end{cases} \quad (II-10)$$

$$\begin{cases} V_d = \frac{E(Z_i+Z)}{Z_d+Z_i+Z} \\ V_i = \frac{E \cdot Z_i}{Z_d+Z_i+Z} \\ V_o = 0 \end{cases} \quad (II-11)$$

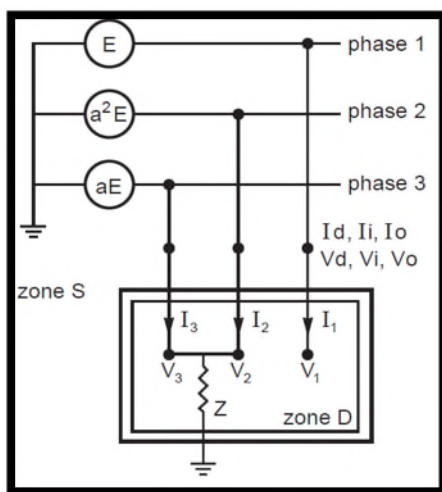
✓ Les valeurs réelles des courants et tensions sont données par :

$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ I_2 = -j \frac{E\sqrt{3}}{Z_d+Z_i+Z} \\ I_3 = j \frac{E\sqrt{3}}{Z_d+Z_i+Z} \end{cases} \quad (II-12)$$

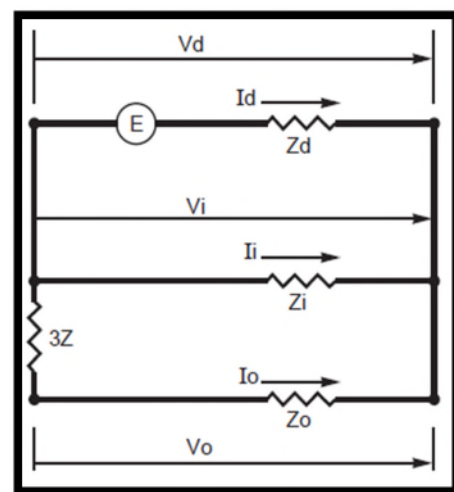
$$\begin{cases} V_1 = \frac{E(2Z_i+Z)}{Z_d+Z_i+Z} \\ V_2 = \frac{E(a^2Z_c-Z_i)}{Z_d+Z_i+Z} \\ V_3 = \frac{E(aZ_c-Z_i)}{Z_d+Z_i+Z} \end{cases} \quad (II-13)$$

C. Court-circuit biphasé à la terre

C'est un défaut qui correspond à la réunion des deux phases à la terre et le schéma équivalent des séquences comme montré sur les figures (II.6.a) et (II.6.b) respectivement.



a) Schéma électrique



b) Schéma de séquence

Fig.II.6 : Cas de court circuit biphasé à la terre

**Ecriture des équations**

- Dans la zone (D)

$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ V_2 = V_3 = Z(I_2 + I_3) \end{cases}$$

- Continuité à la frontière (D) - (S)

$$\begin{cases} I_d + I_i + I_o = 0 \\ V_d = V_i \\ V_o = V_d + 3Z * I_o \end{cases}$$

**Résolution des équations**

- ✓ Les valeurs de séquences des courants sont données par :

$$\begin{cases} I_d = E \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ I_i = \frac{-E(Z_o + 3Z)}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ I_o = \frac{-E * Z_i}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \end{cases} \quad (II-14)$$

- ✓ Les valeurs de séquences des tensions sont données par :

$$\begin{cases} V_d = \frac{E * Z_i (Z_o + 3Z)}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ V_i = \frac{E * Z_i (Z_o + 3Z)}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ V_o = \frac{E * Z_i * Z_o}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \end{cases} \quad (II-15)$$

- ✓ Les valeurs réelles des courants sont données par :

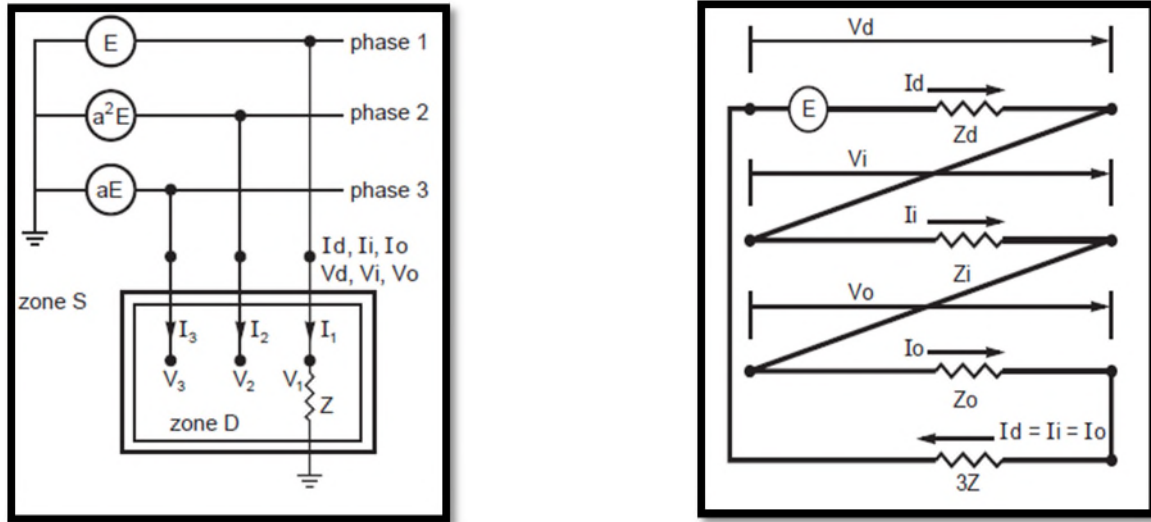
$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ I_2 = -j\sqrt{3} E \frac{Z_o + 3Z - aZ_i}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ I_3 = j\sqrt{3} E \frac{Z_o + 3Z - a^2 Z_i}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \end{cases} \quad (II-16)$$

- ✓ Les valeurs réelles des tensions sont données par :

$$\begin{cases} V_1 = E \frac{3Z_i(Z_o + 2Z)}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ V_2 = E \frac{-3Z * Z_i}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \\ V_3 = E \frac{-3Z * Z_i}{Z_d * Z_i + (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z)} \end{cases} \quad (II-17)$$

**D. Court-circuit monophasé à la terre**

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, le schéma équivalent des séquences comme montré sur les figures (II.7.a) et (II.7.b) respectivement.



a) Schéma électrique

b) Schéma de séquence

Fig.II.7 : Cas de court circuit monophasé à la terre

**Ecriture des équations**

- Equations des composantes réelles dans (D)

$$\begin{cases} I_2 = I_3 = 0 \\ V_1 = Z * I_1 \end{cases}$$

- Continuité à la frontière D-S

$$\begin{cases} I_d = I_i = I_o = \frac{I_1}{3} \\ V_d + V_i + V_o = 3Z * I_o \end{cases}$$

**Résolution des équations**

- ✓ Les valeurs de séquences des courants et tensions

$$\left\{ I_o = I_d = I_i = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \right. \quad (II-18)$$

$$\begin{cases} V_d = E \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \\ V_i = E \frac{-Z_i}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \\ V_o = E \frac{-Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \end{cases} \quad (II-19)$$

✓ Les valeurs réelles des courants et tensions

$$\begin{cases} I_1 = \frac{3E}{Z_d+Z_i+Z_o+3Z} \\ I_2 = 0 \\ I_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

$$\begin{cases} V_1 = 3Z \frac{E}{Z_d+Z_i+Z_o+3Z} \\ V_2 = a^2 E \left( 1 - \frac{Z_d+a^2 Z_i+a Z_o}{Z_d+Z_i+Z_o+3Z} \right) \\ V_3 = a E \left( 1 - \frac{Z_d+a Z_i+a^2 Z_o}{Z_d+Z_i+Z_o+3Z} \right) \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

## II.8.Conclusion

Pour le calcul du courant de court-circuit, ils existent plusieurs méthodes qui ont été conçues de telle sorte que le courant de court-circuit puisse être calculé à la main ou à l'aide d'un moyen informatique. Nous avons présenté dans ce deuxième chapitre, les différents types de court-circuit, leurs causes et leurs conséquences ainsi que leur calcul avec la méthode des composantes symétriques. On conclue alors que les valeurs des courants de court-circuit dépendent des paramètres du réseau et des impédances à la terre.

Le prochain chapitre sera consacré au calcul des courants de court circuit dans un réseau test de structure radial sans et avec présence d'une production décentralisée.



---



# Chapitre III

---

### **III.1. Introduction**

Afin d'évaluer l'impact des productions décentralisées (PD) et les changements qu'elles apportent sur le fonctionnement du réseau électrique, une simulation sera effectuée sur un réseau de distribution simple.

En premier lieu, nous allons évaluer l'état du réseau, c'est-à-dire, les tensions aux nœuds, les courants transités à travers les lignes électriques et les courants de court-circuit. Par la suite, nous allons intégrer une PD dans le réseau. Le but est de faire une analyse paramétrique afin d'étudier l'évolution de ce réseau après l'intégration de la PD. Un nouveau calcul des courants de court-circuit sera effectué afin d'évaluer l'impact causé par cette intégration sur le plan de protection et sur le sens de transit des courants (puissances) dans les lignes.

### **III.2. Modèle du réseau d'application**

Le réseau modélisé comprend un poste source 115/23 kV, 50 MVA alimentant une zone de charge. L'artère principale du réseau est triphasée avec une partie en ligne aérienne et une partie en câble souterrain. Les données des lignes (impédances par unité de longueur et leurs longueurs) ainsi que les charges (puissances actives et réactives) sont résumées dans l'annexe.

Le réseau est constitué de :

- ✓ 21 jeux de barres numérotés de 0 à 20 ;
- ✓ 20 lignes numérotées de 1 à 20 ;
- ✓ 18 charges.

La structure du réseau étudié est représentée dans la figure III.1 [34] :

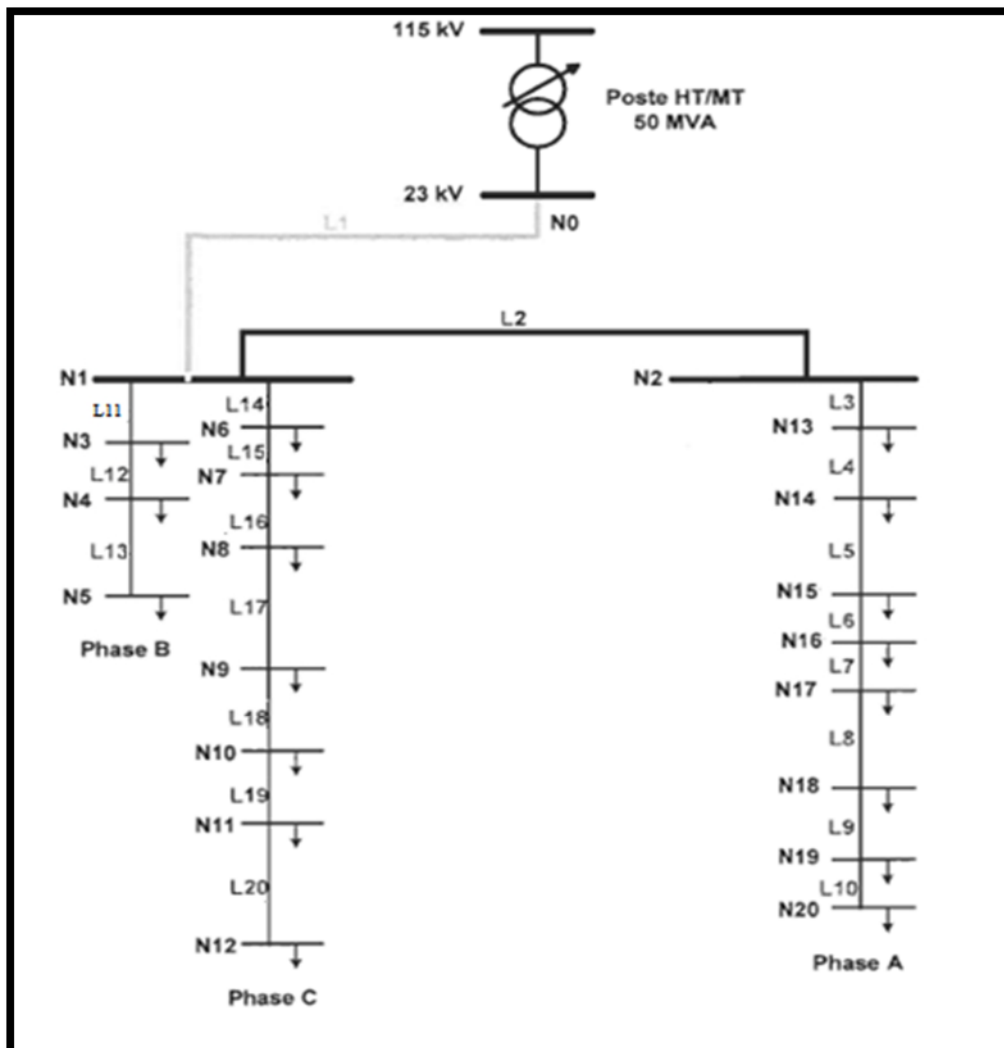


Fig.III.1 : Structure générale du réseau test

### III.3.Résultats de simulation

Afin de montrer l'impact de la production décentralisée sur les courants de court-circuit, cette partie du travail est basée sur la simulation du réseau étudié sans et avec l'insertion de cette PD au réseau.

#### III.3.1.Réseau sans la présence de la production décentralisée

Pour évaluer les grandeurs du réseau à son état initial, nous avons tout d'abord calculé les courants de lignes en se basant sur les puissances demandées par les charges et les chutes de tensions, ce calcul nous permettra aussi de connaître le sens du courant dans les lignes. Par la suite nous avons supposé un défaut au niveau de chaque phase pour avoir une estimation de l'intensité des courants de court-circuit.

*A. Sens de transit de courant et plans de tension*

Pour évaluer le sens de transit de puissance on calcul l'intensité des courants transités à travers les lignes afin d'évaluer les tensions au niveau de chaque nœuds en se basant sur le calcul des chutes de tension. Les résultats trouvés sont représentés dans les tableaux de (III.1) à (III.3) pour les trois phases :

Tab.III.1 : Intensité et sens de transit des courants dans la phase A

Lignes	I(A)		Nœuds	V(V)
L1_A	5.817720 $\angle -0.57108$		N1_A	13272.345 $\angle -0.09140$
L2	5.820661 $\angle -0.66249$		N2	13272.139 $\angle -0.09243$
L3	5.820752 $\angle -0.66351$		N13	13271.637 $\angle -0.09271$
L4	3.987033 $\angle 4.46571$		N14	13271.241 $\angle -0.09308$
L5	3.919275 $\angle 1.42131$		N15	13270.718 $\angle -0.09346$
L6	2.126274 $\angle 12.9116$		N16	13270.472 $\angle -0.09388$
L7	2.032587 $\angle 7.40240$		N17	13270.273 $\angle -0.09412$
L8	0.662012 $\angle 75.1170$		N18	13270.267 $\angle -0.09432$
L9	0.441318 $\angle 75.1418$		N19	13270.260 $\angle -0.09459$
L10	0.220625 $\angle 75.2165$		N20	13270.258 $\angle -0.09468$

Tab.III.2 : Intensité et sens de transit des courants dans la phase B

Lignes	I (A)		Nœuds	V (V)
L1_B	1.958653 $\angle 1.51357$		N1_B	13277.054 $\angle -0.03109$
L11	1.958949 $\angle 1.48247$		N3	13276.225 $\angle -0.03172$
L12	1.908615 $\angle -4.8848$		N4	13276.044 $\angle -0.03177$
L13	0.220580 $\angle 75.1688$		N5	13276.040 $\angle -0.03190$

Tab.III.3 : Intensité et sens de transit des courants dans la phase C

Lignes	I (A)		Nœuds	V (V)
L1_C	9.449439 $\angle -8.80757$		N1_C	13263.354 $\angle -0.14027$
L14	9.460625 $\angle -8.94785$		N6	13262.542 $\angle -0.14022$
L15	7.578173 $\angle -8.28372$		N7	13261.838 $\angle -0.14022$
L16	5.697312 $\angle -7.18080$		N8	13261.338 $\angle -0.14025$
L17	3.820570 $\angle -4.99266$		N9	13261.037 $\angle -0.14032$
L18	3.788523 $\angle -8.28385$		N10	13260.697 $\angle -0.14033$
L19	1.909596 $\angle -4.99143$		N11	13260.288 $\angle -0.14043$
L20	0.220693 $\angle 75.3925$		N12	13260.285 $\angle -0.14059$

**Interprétation**

Dans la ligne aérienne triphasée (LI) les courants total circulant dans les trois phases ne sont pas identiques, il est le plus important dans la phase C par rapport aux phases B et A en raison de la demande importante en puissance des charges qui sont alimentées par cette phase et qui sont évaluées à (124000W) alors que celles des phases A et B sont de (77250W) et (26000W) respectivement. Ce qui fait que le réseau est en état de déséquilibre.

**B. Calcul des courants de court-circuit**

Dans cette partie, le calcul des courants et tensions de séquences ( $I_d$ ,  $I_i$  et  $I_0$ ) ainsi que les courants et tensions réels ( $I_A$ ,  $I_B$  et  $I_C$ ) pour différents types de court-circuit, en appliquant la méthode des composantes symétriques, a été effectué en supposant un court circuit franc à l'extrémité finale (Nœuds 5, 12 et 20) de chaque phase. Pour effectuer ce calcul, les équations développées au chapitre II ont été appliquées comme suit :

- Court-circuit triphasé : les équations de (II-6) à (II-9) ;
- Court-circuit biphasé : les équations de (II-10) à (II-13) ;
- Court-circuit biphasé à la terre : les équations de (II-14) à (II-17) ;
- Court-circuit monophasé à la terre : les équations de (II-18) à (II-21) ;

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux (III.4) à (III.9) pour les trois phases :

✓ **Court-circuit au nœud 20 de la phase A**

Tab .III.4 : Courants de séquences, et réels pour différents types de court-circuit

Type de court circuit	$I_d(A)$	$I_i(A)$	$I_o(A)$	$I_A(A)$	$I_B(A)$	$I_C(A)$
3Φ	$2.4581 \angle -62.331$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$3085.1 \angle -62.331$	$3085.1 \angle 177.668$	$3085.1 \angle 57.668$
2Φ	$1.229 \angle -62.331$	$1.229 \angle 177.668$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$2671.8 \angle -152.331$	$2671.8 \angle 27.668$
2Φ -T	$1.3976 \angle -62.538$	$1.0604 \angle 117.941$	$0.3373 \angle 115.953$	$0 \angle 0$	$2727.6 \angle -165.787$	$2764.6 \angle 40.491$
1Φ -T	$0.4779 \angle -63.546$	$0.4779 \angle -63.546$	$0.4779 \angle -63.546$	$1799.5 \angle -63.546$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$

Tab.III.5 : Tensions de séquences, et réelles pour différents types de court-circuit

Type de court circuit	$V_d(V)$	$V_i(V)$	$V_o(V)$	$V_A(V)$	$V_B(V)$	$V_C(V)$
3Φ	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$
2Φ	$0.5 \angle 0$	$0.5 \angle 0$	$0 \angle 0$	$23000 \angle 0$	$11500 \angle 180$	$11500 \angle 180$
2Φ -T	$0.4314 \angle 0.2727$	$0.4314 \angle 0.2727$	$0.4314 \angle 0.2727$	$29768 \angle 0.2727$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$
1Φ -T	$0.8056 \angle 0.2932$	$0.1944 \angle 178.785$	$0.6113 \angle -179.227$	$0 \angle 0$	$23000 \angle -2.0944$	$23000 \angle 2.0944$

✓ **Court-circuit au nœud 5 de la phase B**

Tab.III.6 : Courants de séquences, et réels pour différents types de court-circuit

Type de court circuit	Id (A)	Ii (A)	Io (A)	IA (A)	IB (A)	IC (A)
3Φ	2.5504 <sup>∠-64.621</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	3201 <sup>∠-64.621</sup>	3201 <sup>∠175.379</sup>	3201 <sup>∠55.379</sup>
2Φ	1.2752 <sup>∠-64.621</sup>	1.2752 <sup>∠115.379</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	2772.2 <sup>∠-154.621</sup>	2772.2 <sup>∠25.379</sup>
2Φ -T	1.4505 <sup>∠-65.084</sup>	1.0999 <sup>∠115.990</sup>	0.3514 <sup>∠111.550</sup>	0 <sup>∠0</sup>	2806.7 <sup>∠-168.224</sup>	2892.7 <sup>∠38.571</sup>
1Φ -T	0.4975 <sup>∠-67.33</sup>	0.4975 <sup>∠-67.33</sup>	0.4975 <sup>∠-67.33</sup>	1873.4 <sup>∠-67.33</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>

Tab .III.7 : Tensions de séquences, et réelles pour différents types de court-circuit

Type de court circuit	Vd (V)	Vi (V)	Vo (V)	VA (V)	VB (V)	VC (V)
3Φ	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>
2Φ	0.5 <sup>∠0</sup>	0.5 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	23000 <sup>∠0</sup>	11500 <sup>∠180</sup>	11500 <sup>∠180</sup>
2Φ -T	0.4313 <sup>∠0.6112</sup>	0.4313 <sup>∠0.6112</sup>	0.4313 <sup>∠0.6112</sup>	29758 <sup>∠0.6112</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>
1Φ -T	0.8052 <sup>∠0.6561</sup>	0.1951 <sup>∠177.291</sup>	0.6106 <sup>∠178.269</sup>	0 <sup>∠0</sup>	29424 <sup>∠-135.688</sup>	28550 <sup>∠137.515</sup>

✓ **Court-circuit au nœud 12 de la phase C**

Tab.III.8 : Courants de séquences, et réels pour différents types de court-circuit

Type de court circuit	Id (A)	Ii (A)	Io (A)	IA (A)	IB (A)	IC (A)
3Φ	2.5002 <sup>∠-62.896</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	3138 <sup>∠-62.896</sup>	3138 <sup>∠177.104</sup>	3138 <sup>∠57.104</sup>
2Φ	1.2501 <sup>∠-62.896</sup>	1.2501 <sup>∠117.104</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	2717.6 <sup>∠-152.896</sup>	2717.6 <sup>∠27.104</sup>
2Φ -T	1.4239 <sup>∠-63.483</sup>	1.0763 <sup>∠117.881</sup>	0.3488 <sup>∠112.301</sup>	0 <sup>∠0</sup>	2741.8 <sup>∠-166.067</sup>	2848.7 <sup>∠40.386</sup>
1Φ -T	0.4922 <sup>∠-66.281</sup>	0.4922 <sup>∠-66.281</sup>	0.4922 <sup>∠-66.281</sup>	1853.4 <sup>∠-66.281</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>

Tab.III.9 : Tensions de séquences, et réelles pour différents types de court-circuit

Type de court circuit	Vd (V)	Vi (V)	Vo (V)	VA (V)	VB (V)	VC (V)
3Φ	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>
2Φ	0.5 <sup>∠0</sup>	0.5 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>	23000 <sup>∠0</sup>	11500 <sup>∠180</sup>	11500 <sup>∠180</sup>
2Φ -T	0.4305 <sup>∠0.7774</sup>	0.4305 <sup>∠0.7774</sup>	0.4305 <sup>∠0.7774</sup>	29705 <sup>∠0.7774</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>
1Φ -T	0.8036 <sup>∠0.829</sup>	0.1969 <sup>∠176.614</sup>	0.6075 <sup>∠-177.806</sup>	0 <sup>∠0</sup>	29459 <sup>∠-135.300</sup>	28353 <sup>∠137.605</sup>

**Interprétation**

Cette partie a pour but d'évaluer les courants de court-circuit sans la présence de la PD. L'analyse par simulation des différents courants de court-circuit a montré le danger de ces derniers à cause de leurs valeurs élevées qui sont évaluées à des kilos Ampère dans toutes les phases, pour les quatre types de court-circuit.

La détermination de la valeur de ces courant de court-circuit est très importante pour le choix des appareilles de protection à installer au départ de chaque ligne et au niveau du poste source, afin d'éviter les surintensités qui peuvent endommager les installations électriques et qui seront très dangereuses pour les individus.

**C. Changement de la position du court circuit**

En modifiant la position du court-circuit dans la phase B, de l'extrémité finale au poste source, on calcul les courants réels pour différents types de court-circuit aux niveaux des nœuds N5, N4, N3, et N1 en appliquant la méthode des composantes symétriques, et en se basant sur les équations développées dans le chapitre II. Les résultats trouvés sont représentés dans les tableaux (III.10) à (III.13).

Tab.III.10 : Intensité des courants réels pour différents types de court-circuit au nœud 5

Type de court circuit	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)
<b>3Φ</b>	3201 <sup>∠-64.6210</sup>	3201 <sup>∠175.3790</sup>	3201 <sup>∠55.3790</sup>
<b>2Φ</b>	0 <sup>∠0</sup>	2772.2 <sup>∠-154.6210</sup>	2772.2 <sup>∠25.3790</sup>
<b>2Φ -T</b>	0 <sup>∠0</sup>	2283.7 <sup>∠-152.8362</sup>	2062.2 <sup>∠43.4608</sup>
<b>1Φ -T</b>	1873.4 <sup>∠-67.3300</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>

Tab.III.11 : Intensité des courants réels pour différent types de court-circuit au nœud 4

Type de court circuit	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)
<b>3Φ</b>	3260.8 <sup>∠-66.2675</sup>	3260.8 <sup>∠173.7325</sup>	3260.8 <sup>∠53.7325</sup>
<b>2Φ</b>	0 <sup>∠0</sup>	2823.9 <sup>∠-156.2675</sup>	2823.9 <sup>∠23.7325</sup>
<b>2Φ -T</b>	0 <sup>∠0</sup>	2313 <sup>∠-155.0945</sup>	2091.5 <sup>∠40.6299</sup>
<b>1Φ -T</b>	1892.3 <sup>∠-68.3143</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>

Tab.III.12 : Intensité des courants réels pour différents types de court-circuit au nœud 3

Type de court circuit	I <sub>A</sub> (A)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>C</sub> (A)
<b>3Φ</b>	3301.2 <sup>∠-67.413</sup>	3301.2 <sup>∠172.587</sup>	3301.2 <sup>∠52.587</sup>
<b>2Φ</b>	0 <sup>∠0</sup>	2858.9 <sup>∠-157.413</sup>	2858.9 <sup>∠22.587</sup>
<b>2Φ -T</b>	0 <sup>∠0</sup>	2333.6 <sup>∠-156.6674</sup>	2112.3 <sup>∠38.6861</sup>
<b>1Φ -T</b>	1905.2 <sup>∠-68.9898</sup>	0 <sup>∠0</sup>	0 <sup>∠0</sup>

Tab.III.13 : Intensité des courants réels pour différents types de court-circuit au nœud 1

Type de court circuit	$I_A$ (A)	$I_B$ (A)	$I_C$ (A)
3 $\Phi$	$3477.2 \angle -72.9458$	$3477.2 \angle 167.0542$	$3477.2 \angle 47.0542$
2 $\Phi$	$0 \angle 0$	$3011.3 \angle -162.9458$	$3011.3 \angle 17.0542$
2 $\Phi$ -T	$0 \angle 0$	$2428.5 \angle -164.2503$	$2209.2 \angle 29.6085$
1 $\Phi$ -T	$1961.7 \angle -72.1584$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$

### Interprétation

D'après les résultats obtenus dans les tableaux (III.10) à (III.13), on constate que lorsque la position du point de défaut s'approche du poste source, les courants de court-circuit par phase augmentent quelque soit le type. Cette augmentation de l'intensité des courants permet d'établir le bon réglage des protections, afin de conserver une bonne sélectivité entre elles.

### III.3.2. Réseau avec production décentralisée

On insère une production décentralisée via un transformateur de séparation, 23kV, 50 MVA au nœud 11 dans la phase C du fait que cette-ci est la plus chargée (la puissance totale demandée par les charges situées dans cette phase et de 124000W). L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact de l'insertion de la production décentralisée sur le sens du courant (équivalent au sens de transit de puissance) et sur l'intensité du courant de court-circuit.

#### A. Impact sur le sens de transit de puissance

En faisant varier le taux d'intégration ( $\tau\%$ ) de la production décentralisée de 5% à 50%, la puissance de cette dernière ' $P_{PD}$ ' et la nouvelle puissance générée par le poste source ' $P'_G$ ' ont été calculées pour chaque taux et sont représentées dans le tableau (III.14) en se basant sur les équations (I-5) et (I-6). Dans ce qui suit, nous allons expliquer le processus de calcul :

- Pour un taux d'intégration variant de 5% à 15%, la puissance injectée par la PD est d'une valeur inférieure à la puissance demandée par la charge qui se trouve au nœud 11 qui est de 24500W. Cette dernière sera alimentée par la PD et par le poste source en même temps. La charge au nœud 12 sera aussi alimentée par le poste source.
- Pour un taux d'intégration de 20%, la puissance injectée par la PD est d'une valeur supérieure à la puissance demandée par la charge qui se trouve au nœud 11 qui est de 24500W. Cette dernière sera alimentée totalement par la PD et la charge au nœud 12 sera alimentée par le poste source.
- Pour un taux d'intégration de 25% à 40%, la PD satisfait la demande des charges qui se trouvent aux nœuds 11 et 12 qui est de 25250W, et la charge au nœud 10 sera alimentée par la PD et par le poste source. On remarque que le sens de transit de la puissance a changé à travers la ligne 19.



- Pour un taux d'intégration de 45% à 50%, la PD satisfait la demande des charges qui se trouvent aux nœuds 11, 12, 9 et 10 qui est de 50500W, et la charge au nœud 8 sera alimentée par la PD et par le poste source. On remarque que le sens de transit de la puissance a changé à travers les lignes 19, 18, et 17.

Tab (III.14) : Puissance de la production décentralisée et de poste source en fonction du taux d'intégration

$\tau$ %	$P_{PD}$ (W)	$P'_G$ (W)
5%	6200	117800
10%	12400	111600
15%	18600	105400
20%	24800	99200
25%	31000	93000
30%	37200	86800
35%	43400	80600
40%	49600	74400
45%	55800	68200
50%	62000	62000

### *Interprétation*

L'un des premiers impacts liés à l'intégration massive de la PD dans un réseau de distribution qui vient à l'esprit concerne la modification du sens de transit de la puissance. Ces productions qui sont connectées au réseau de distribution qui a été conçu, à la base, pour faire transiter des flux de puissance unidirectionnels, malheureusement, suivant les conditions de charge et de production, l'apparition de ces productions engendre des flux bidirectionnels et peut causer de nombreux problèmes sur la destruction de matériel et sur la sécurité des personnes.

#### ***B. Impact sur les courants de court-circuit***

Dans cette partie, on va supposer deux endroits différents d'apparition d'un court circuit monophasé, le premier endroit est au nœud 8 qui est en amont du nœud de connexion de la PD, et le deuxième est au nœud 12 qui est situé en aval de celui-ci. Comme montré sur la figure III.2.

Deux exemples de calcul du courant de court-circuit monophasé sans et avec la présence de la production décentralisée sont donnés en détail dans ce qui suit :

*B.1. Sans l'insertion de la production décentralisée*

Le réseau est présenté dans la figure III.2 où les flèches en bleu représentent le sens de circulation du courant de court-circuit issu du poste source, et les flèches en rouge représentent le point de défaut.

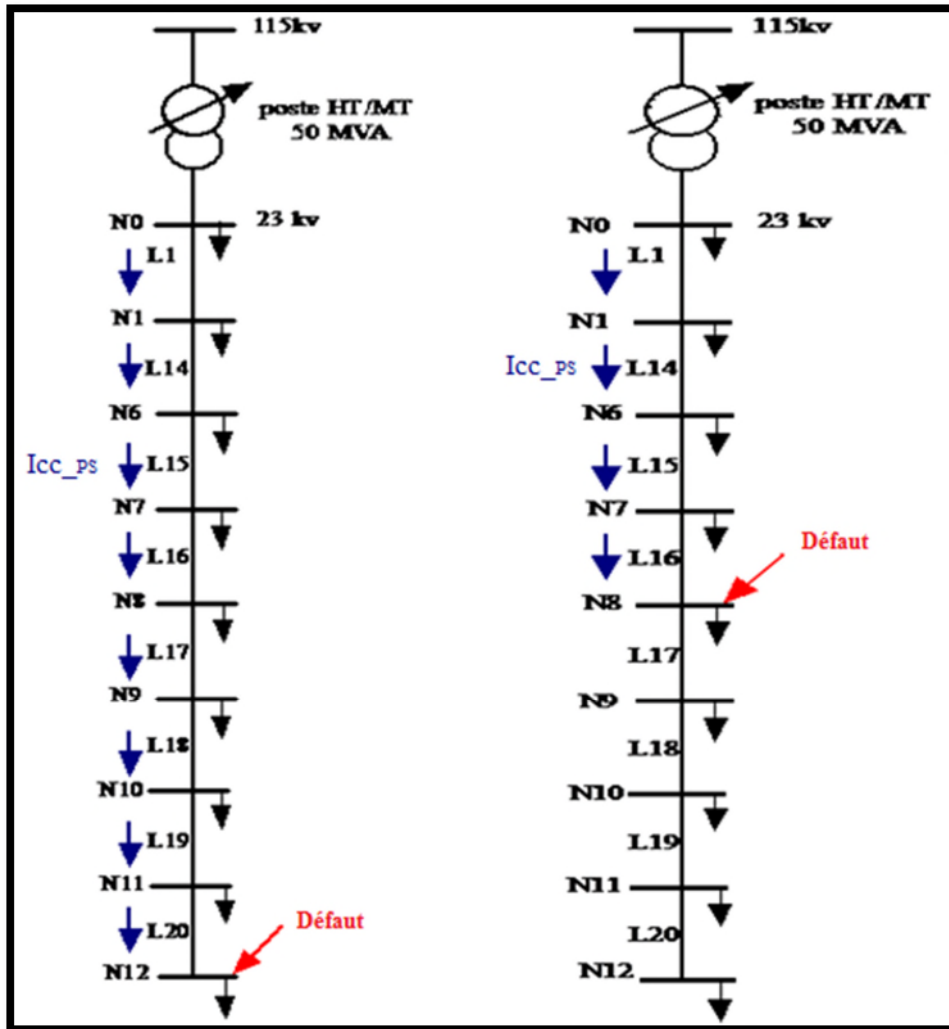


Fig.III.2 : Sens du courant de court-circuit sans production décentralisée pour un défaut au nœud 8 à droite et au nœud 12 à gauche

➤ **Calcul de l'intensité du courant de court-circuit au nœud 12**

Le courant de court-circuit issu du poste source traverse les impédances des lignes (L1 à L20). L'impédance de défaut  $Z_{\text{déf\_PS}}$  représente la somme de toutes les impédances en amont du défaut. Un exemple de calcul est donné dans ce qui suit :

$$Z_{\text{déf\_PS}} = \sum Z_{\text{d\_ligne}} + \sum Z_{\text{i\_ligne}} + \sum Z_{\text{o\_ligne}} + \sum Z_{\text{amont\_PS}} + \sum Z_{\text{trf\_PS}}$$

Avec,

$$|Z_{d\_amont}| = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{529}{125} = 4.232 \Omega$$

Les impédances directe, inverse et homopolaire du réseau amont sont données par :

$$\begin{cases} Z_{d\_amont\_PS} = 1.338 + j 4.015 \Omega \\ Z_{i\_amont\_PS} = 1.338 + j 4.01 \Omega \\ Z_{o\_amont\_PS} = 4.014 + j 12.045 \Omega \end{cases}$$

D'après les équations (I.2) à (I.4), la résistance et la réactance du transformateur du poste source sont égales à:

$$R_T = 0.02116 \Omega \quad \text{et} \quad X_T = 1.058 \Omega$$

Alors, on obtient :

$$\begin{cases} Z_{d\_trf\_PS} = 0.02116 + j 1.058 \Omega \\ Z_{i\_trf\_PS} = 0.02116 + j 1.058 \Omega \\ Z_{o\_trf\_PS} = 0.06348 + j 3.174 \Omega \end{cases}$$

La valeur de l'impédance de défaut est de :

$$Z_{d\acute{e}f\_PS} = 15.4418 + j 45.044 \Omega$$

Sachant que le courant de court-circuit issu du poste source peut être calculé en appliquant

$$\text{l'expression : } I_{cc\_PS} = \frac{3V}{Z_{d\acute{e}f\_PS}}$$

$$\text{Alors, } |I_{cc\_PS}| = \mathbf{836.6105 A}$$

#### ➤ Calcul de l'intensité du courant de court-circuit au nœud 8

Dans ce cas le courant de court-circuit issu du poste source traverse les impédances des lignes (L1, L14, L15 et L16). Avec le même principe de calcul effectué pour le cas du court-circuit au nœud 12 on obtient pour le nœud 8 les valeurs suivantes :

La valeur de l'impédance de défaut est de :

$$Z_{d\acute{e}f\_PS} = 13.8098 + j 44.807 \Omega$$

$$\text{Alors, } |I_{cc\_PS}| = \mathbf{849.6446 A}$$

### B.2. Avec l'insertion de la production décentralisée

Le réseau est présenté dans la figure (fig. III.3) où les flèches en bleu représentent le sens de circulation du courant de court-circuit issu du poste source, alors que les flèches en vert

représentent le sens du courant de court-circuit issu de la PD et les flèches en rouge représentent le point de défaut.

➤ **Calcul de l'intensité du courant de court-circuit au nœud 12**

Le courant de court-circuit issu de la production décentralisée traverse l'impédance de la ligne (L12), donc l'impédance de défaut  $Z_{\text{déf\_PD}}$  est donnée par :

$$Z_{\text{déf\_PD}} = \sum Z_{\text{ligne\_PD}} + \sum Z_{\text{PD}} + \sum Z_{\text{trf\_PD}}$$

Avec,

$$\begin{cases} \sum Z_{\text{ligne\_PD}} = \sum Z_{\text{d-ligne}} + \sum Z_{\text{i-ligne}} + \sum Z_{\text{o-ligne}} \\ \sum Z_{\text{PD}} = Z_{\text{d\_PD}} + Z_{\text{i\_PD}} + Z_{\text{o\_PD}} \\ \sum Z_{\text{trf\_PD}} = Z_{\text{d\_trf\_PD}} + Z_{\text{i\_trf\_PD}} + Z_{\text{o\_trf\_PD}} \end{cases}$$

$$|Z_{\text{d\_PD}}| = \frac{U_n^2}{S_{\text{cc}}} = \frac{529}{50} = 10.58 \Omega$$

Les impédances directe, inverse et homopolaire de la PD sont données par :

$$\begin{cases} Z_{\text{d\_PD}} = 3.346 + j 10.037 \Omega \\ Z_{\text{i\_PD}} = 3.346 + j 10.037 \Omega \\ Z_{\text{o\_PD}} = 10.038 + j 30.111 \Omega \end{cases}$$

L'impédance du transformateur est donnée par :

$$Z_{\text{d\_trf\_PD}} = j \cdot X_{\text{cc}} = \frac{1}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = j \cdot 0.529 \Omega$$

Alors on obtient :

$$\begin{cases} Z_{\text{d\_trf\_PD}} = j \cdot 0.529 \Omega \\ Z_{\text{i\_trf\_PD}} = j \cdot 0.529 \Omega \\ Z_{\text{o\_trf\_PD}} = j \cdot 1.587 \Omega \end{cases}$$

La valeur de l'impédance de défaut est alors de :

$$Z_{\text{déf\_PD}} = 17.225 + j 52.902 \Omega$$

Sachant que le courant de court-circuit issu de la production décentralisée peut être calculé en

$$\text{appliquant l'expression : } I_{\text{cc\_PD}} = \frac{3V}{Z_{\text{déf\_PD}}}$$

$$\text{Alors, } |I_{\text{cc\_PD}}| = \mathbf{716.0371 \text{ A}}$$

➤ **Calcul de l'intensité du courant de court-circuit au nœud 12**

Le courant de court-circuit issu de la production décentralisée transite à travers les impédances des lignes (L19, L18 et L17).

Avec le même principe de calcul que dans le cas du court-circuit nœud 12, on obtient les valeurs de l'impédance de défaut ainsi que le courant de court-circuit issu de la PD pour un défaut au nœud 8.

La valeur de l'impédance de défaut est alors de :

$$Z_{\text{déf\_PD}} = 17.867 + j 52.995 \Omega$$

Alors,  $|I_{\text{cc\_PD}}| = 712.3213 \text{ A}$

➤ **Calcul de l'intensité du courant de court-circuit total au point de défaut**

Au point de défaut, le courant de court-circuit est la somme du courants de court-circuit issu du poste source ' $I_{\text{cc\_PS}}$ ' et celui issu de la production décentralisée ' $I_{\text{cc\_PD}}$ '.

Avec,  $\overline{I_{\text{cc}}} = \overline{I_{\text{cc\_PS}}} + \overline{I_{\text{cc\_PD}}}$

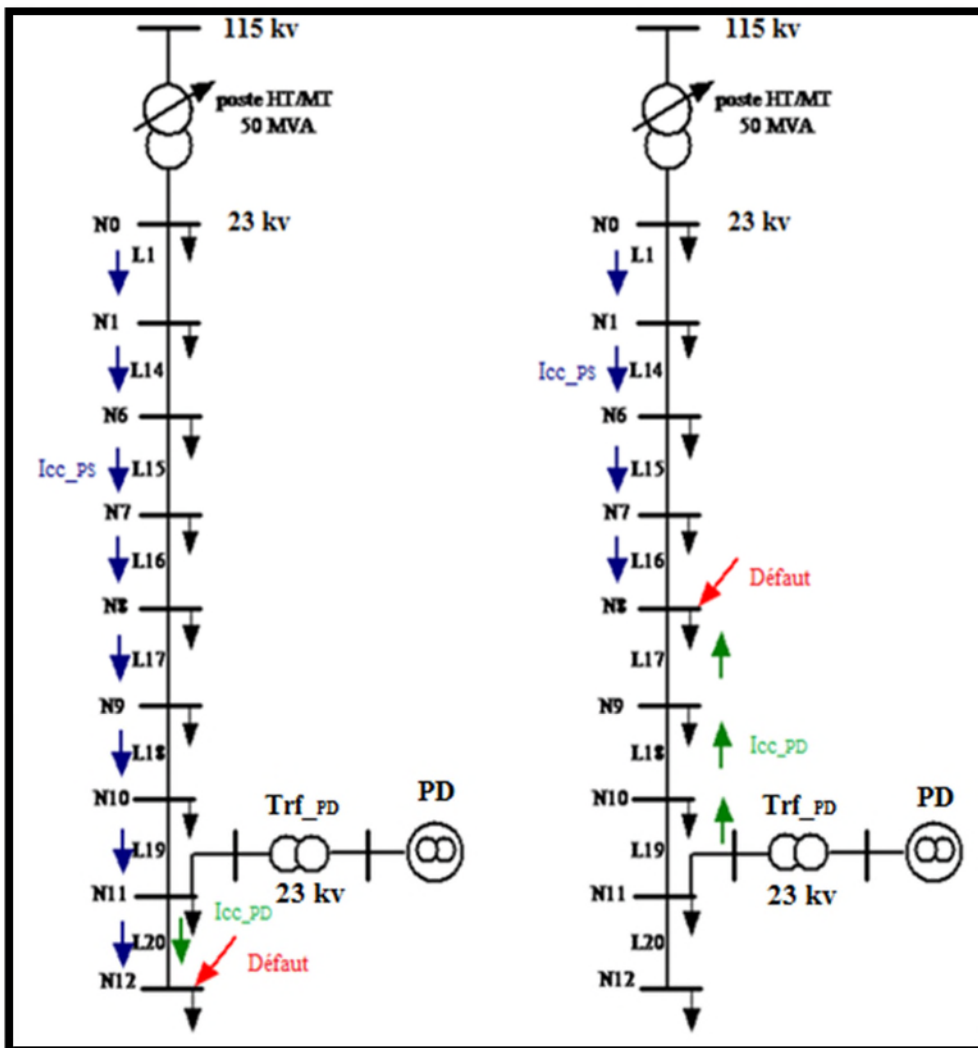


Fig.III.3 : Sens de transit du courant dans le cas d'un court circuit aux nœuds 8 et12

Les résultats trouvés pour les deux endroits supposés de court-circuit sont regroupés dans le tableau (III.15).

Tab (III.15) : Intensité du courant de court-circuit aux points de défaut

Nœuds	$ I_{cc\_PS} $ (A)	$ I_{cc\_PD} $ (A)	$ I_{cc} $ (A)
N8	849.6446	712.3213	1561.8328
N12	836.6105	716.0371	1552.6013

### *Interprétation*

A partie des résultats obtenus, on remarque que pour le court-circuit situé en aval de la PD (au nœud 12), le courant maximal est de 836.6105 A et avec la contribution de la PD, le courant augmente jusqu'à 1552.6013 A. Pour le court-circuit situé en amont de la PD (au nœud 8), l'intensité du courant est de 849.6446 A et avec la contribution de la PD, le courant augmente à 1561.8328 A.

En analysant les résultats donnés dans le tableau (III.15), on peut conclure que la PD a contribué dans l'augmentation au point de défauts de la valeur du courant de court-circuit. Cette contribution a modifié l'intensité du courant de court-circuit et a causé un dysfonctionnement du plan de protection.

La connexion de nouvelles productions (à un fort taux d'intégration) à un effet néfaste sur le fonctionnement du réseau, du fait qu'elle modifie également le réglage des seuils des protections, d'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection.

### **III.4.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'impact sur les courants de court-circuit lorsqu'une production décentralisée est intégrée dans un réseau de distribution. Nous nous sommes intéressés au court-circuit monophasé car ils sont les plus fréquents à apparaître dans ce type de réseau.

Quand l'effet de l'insertion de la PD n'est plus marginal, notamment au niveau des élévations des courants de court-circuit, les protections devront être changées (bidirectionnelles) ou modifiées (réglage des seuils).

Avant la connexion d'une nouvelle PD, une étude doit être menée pour vérifier si les protections existantes ne doivent pas être modifiées afin de conserver une bonne sélectivité. L'impact de la PD sur le plan de protection est très important. Le réglage des protections dans un réseau de distribution comportant de la PD nécessite une étude approfondie du fait de la complexité du problème.

---

A decorative scroll frame with a red border and rounded corners, containing the text. The frame has a vertical bar on the left side and a small circular detail at the top right corner.

# CONCLUSION GENERALE

---

# CONCLUSION GENERALE

---

Depuis l'apparition des réseaux électriques, ceux-ci ont toujours connu des évolutions, ces dernières avaient pour but majeur d'améliorer le fonctionnement des réseaux. Avec le vaste mouvement de dérégulation que connaissent actuellement les réseaux électriques dans de nombreux pays et qui trouve notamment son origine dans une volonté politique d'ouverture du marché électrique ou dans des problèmes liés aux sociétés électriques, une autre évolution apparaît. Il s'agit de la dérégulation des sociétés électriques, qui a pour conséquence l'introduction de nouveaux moyens de production dans les réseaux existants. Comme nous l'avons montré, cette introduction de moyen d'énergie modifie de façon importante le fonctionnement de ces réseaux.

L'introduction, des productions décentralisées sur les réseaux de distribution est devenu un fait établi et remet en cause à moyen terme le schéma d'exploitation traditionnel des réseaux de distribution. La décentralisation des unités de production électrique influence sur le comportement des systèmes de puissance par interaction avec la production conventionnelle et les charges.

L'insertion massive d'une nouvelle source d'énergie électrique dans un réseau HTA qui est généralement non dimensionné pour accueillir des sources d'énergie a des conséquences sur l'exploitation du réseau électrique. Cette présence touche essentiellement le plan de tension et les courants de court-circuit. Ce travail a porté sur l'influence de la production décentralisée sur les courants de court-circuit dans les réseaux de distribution HTA.

Dans le premier chapitre du mémoire, nous avons défini les différentes structures et architectures du réseau électrique. Nous avons présenté deux moyens de productions décentralisées à base de ressources renouvelables et les impacts liés à l'introduction de ces moyens d'énergie dispersés dans les réseaux d'énergie existants.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit la particularité du courant de court circuit et ses conséquences. Nous nous sommes penchés sur la détermination du courant des différents types de court –circuit en utilisant la méthode des composantes symétriques, car ces valeurs jouent un rôle déterminant dans le choix des seuils de fonctionnement des appareils de protections et dans l'amélioration de leur sensibilité.

Le chapitre trois a été consacré au calcul et à la simulation des courants de court-circuit, sans et avec la présence de la production décentralisée. Les résultats obtenus ont mis en évidence le problème lié à la contribution de la nouvelle source d'énergie électrique sur l'augmentation de l'intensité du courant de court-circuit. Enfin, on a évalué l'impact de l'intégration de cette dernière dans un réseau de distribution sur l'intensité des courants de court-circuit et sur le plan de protection, ainsi que la sélectivité et le sens de transit de puissance.



# CONCLUSION GENERALE

---

Parmi les solutions qui pourront être apportées pour remédier à l'impact de la production décentralisée sur les courants de court-circuit, c'est de travailler sur le plan de protection. En effet, le fait d'insérer ce type de protection aura pour effet d'aveugler certaines protections et aveugler d'autres. Un nouveau schéma de protection devra être proposé dans ce nouveau contexte.

Cependant, notre étude reste modeste et d'autres recherches doivent être explorées concernant l'impact du raccordement de la production décentralisée au réseau électrique sur les courants de court-circuit. Il ressort donc de ce travail de nouvelles perspectives.

# *Bibliographie*

---

- [1] D. Labeledl, « Production décentralisée et couplage au réseau » Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Année 2008 ;
- [2] G. RAMI «Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution» Thèse de Doctorat L'INP Grenoble, le 09 Novembre 2006 ;
- [3] J.F.CANARD, «Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, 2000 ;
- [4] Site Internet : <http://www.enedis.fr/fonctionnement-du-reseau> ;
- [5] J.F.CANARD, «Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution», Thèse de doctorat de l'INPG, 2000 ;
- [6] G. Rami, « Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergie connectées au réseau électrique de distribution », thèse Grenoble INP/G2ELAB, 2006.
- [7] J.C. Sabonnadière, N. Hadjsaid, « Lignes et réseaux électriques 1, lignes d'énergie électrique », LAVOISIER, 2007 ;
- [8] N. Hadjsaid, «La distribution d'énergie électrique en présence de production décentralisée», LAVOISIER, 2010 ;
- [9] I. Noui, «Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC », mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2015 ;
- [10] N.Lahaçani Aouzellag, «Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 2011 ;
- [11]D. DAS, «Electrical power systems », édition: NEW AGE INTERNATIONAL, 2006;
- [12] Aurélien Mercier, «Pilotage de la production décentralisée et des charges non conventionnelles dans le contexte Smart Grid et simulation hybride temps réel», Thèse de doctorat de l'université GRENOBLE ALPES, 28 septembre 2015 ;
- [13] «Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique », Journal Officiel de la République Française, Avril 2008 ;
- [14] A. ABDELLI, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Thèse de doctorat DE L'INPT, 2007 ;
- [15] H. G. Arantzamendi « Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro- réseaux », Thèse de doctorat INPG, 2006 ;
-

# *Bibliographie*

---

- [16] Frédéric POITIERS, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE».Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 19 décembre 2003 ;
- [17] [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net), consulter le 30/06/2019 ;
- [18] R.Caire, «Gestion et Stratégies de conduite de la Production Décentralisée».Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004 ;
- [19] J.F. Canard. «Impact de la génération d'Energie Dispersée dans les réseaux de distribution», Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [20] Schneider Electric, «Protection des réseaux électriques », Guide de la protection, 2008 ;
- [21] A.R. Bergen, V. Vittal, «Power systems analysis», Prentice Hall, 2ème édition, 2000.
- [22] Westinghouse Electric Corporation, «Electric Transmission and Distribution Reference Book», Westinghouse Electric Corporation, 4ème édition, East Pittsburgh, 1964;
- [23] R. L. Sullivan «Power System Planning», McGraw-Hill,1977;
- [24] A.H Knable, «Electrical Power Systems Engineering: Problems and Solutions», 1967, McGraw-Hill ;
- [25] R. PELISSIER, "Les réseaux d'énergie électrique (2ème partie) », 1974Dunod éditeur ;
- [26] C.D. PHAM « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée » Thèse de doctorat INPG, 2005 ;
- [27] B.M. NOBLAT, F. DUMAS, C. POULAIN, «Calcul des courants de court-circuit», Cahier Technique Schneider Electric, septembre 2005 ;
- [28] J.C. DAS, «Power system analysis: Short-circuit load flow and harmonics», edition:MARCEL DEKKER, 2002;
- [29] B. DE METZ-NOBLAT, F. DUMAS et G. THOMASSET, „Calcul des courants de court-circuit“, cahier technique Schneider N°: 158, 2000 ;
- [30]B.M. NOBLAT, «Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'ide des composantes symétriques», cahier technique Schneider N°18, 2002 ;
- [31] N. GHANEMI, «Etude de la tenue aux courant de court-circuit pour le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT», Thèse de magister en Electrotechnique, Université Mentouri Constantine, 2008 ;
-

# *Bibliographie*

---

[32] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, „Lignes et réseaux électriques 2 : méthodes d’analyse des réseaux électriques“, édition : HERMES - LAVOISIER , 2007 ;

[33] LABED Djamel, «PRODUCTION DECENTRALISEE ET COUPLAGE AU RESEAU», Thèse Doctorat, 2008 ;

[34] T.K.V. DUNG, «Interconnexion des sources d’énergie renouvelable au réseau de distribution électrique», Thèse Doctorat, Université du Québec à trois-rivières, 2009.

---

---



**ANNEXE**

---

# Annexe

---

## Annexe - Données du réseau d'application

Tableau A-1. Données des lignes (impédances)

Lignes	Départ	Arrivé	Z_direct ( $\Omega$ )	Z_inverse ( $\Omega$ )	Z_homopolaire( $\Omega$ )
1	0	1	1.12+3.651i	1.12+3.651i	3.982+12.029i
2	1	2	0.035+0.041i	0.035+0.041i	0.164+0.047i
3	2	13	0.0861+0.012i	0.0861+0.012i	0.0861+0.012i
4	13	14	0.1008+0.014i	0.1008+0.014i	0.1008+0.014i
5	14	15	0.134+0.019i	0.134+0.019i	0.134+0.019i
6	15	16	0.123+0.018i	0.123+0.018i	0.123+0.018i
7	16	17	0.1008+0.014i	0.1008+0.014i	0.1008+0.014i
8	17	18	0.072+0.010i	0.072+0.010i	0.072+0.010i
9	18	19	0.141+0.021i	0.141+0.021i	0.141+0.021i
10	19	20	0.086+0.012i	0.086+0.012i	0.086+0.012i
11	1	3	0.425+0.063i	0.425+0.063i	0.425+0.063i
12	3	4	0.094+0.014i	0.094+0.014i	0.094+0.014i
13	4	5	0.139+0.02i	0.139+0.02i	0.139+0.02i
14	1	6	0.085+0.012i	0.085+0.012i	0.085+0.012i
15	6	7	0.092+0.013i	0.092+0.013i	0.092+0.013i
16	7	8	0.087+0.012i	0.087+0.012i	0.087+0.012i
17	8	9	0.078+0.011i	0.078+0.011i	0.078+0.011i
18	9	10	0.089+0.013i	0.089+0.013i	0.089+0.013i
19	10	11	0.212+0.031i	0.212+0.031i	0.212+0.031i
20	11	12	0.165+0.024i	0.165+0.024i	0.165+0.024i

---

# Annexe

---

Tableau A-2. Données des lignes du réseau d'application (longueurs)

<b>Lignes</b>	<b>Nœuds de départ</b>	<b>Nœuds d'arrivée</b>	<b>Distances (m)</b>
<b>L1</b>	N0	N1	8790
<b>L2</b>	N1	N2	401
<b>L3</b>	N2	N13	80
<b>L4</b>	N13	N14	100
<b>L5</b>	N14	N15	124
<b>L6</b>	N15	N16	115
<b>L7</b>	N16	N17	90
<b>L8</b>	N17	N18	72
<b>L9</b>	N18	N19	129
<b>L10</b>	N19	N20	85
<b>L11</b>	N1	N3	395
<b>L12</b>	N3	N4	87
<b>L13</b>	N4	N5	128
<b>L14</b>	N1	N6	78
<b>L15</b>	N6	N7	90
<b>L16</b>	N7	N8	79
<b>L17</b>	N8	N9	80
<b>L18</b>	N9	N10	250
<b>L19</b>	N10	N11	218
<b>L20</b>	N11	N12	100

---

# Annexe

---

Tableau C-2. Données des charges

Nœuds	S_A (VA)	S_B (VA)	S_C (VA)
3		750-2831i	
4		24500+4975i	
5		750-2831i	
6			24500+4975i
7			24500+4975i
8			24500+4975i
9			750-2831i
10			24500+4975i
11			24500+4975i
12			750-2831i
13	24500+4975i		
14	750-2831i		
15	24500+4975i		
16	750-2831i		
17	24500+4975i		
18	750-2831i		
19	750-2831i		
20	750-2831i		

---



# Annexe

---

- **Réseau amont**

$$U_n = 23 \text{ KV}, S_{cc} = 125 \text{ MVA}, X/R = 3$$

$$Z_{d\_amont\_PS} = Z_{i\_amont\_PS} \quad \text{Et} \quad Z_{o\_amont\_PS} = 3 \cdot Z_{d\_amont\_PS}$$

- **Transformateur de poste source**

$U_n = 23 \text{ KV}$ ,  $S_n = 10 \text{ MVA}$ , présentant une tension de court-circuit de 10% et des pertes cuivre à pleine charge de 100 kW.

$$Z_{d\_trf\_PS} = Z_{i\_trf\_PS} \quad \text{Et} \quad Z_{o\_trf\_PS} = 3 \cdot Z_{d\_trf\_PS}$$

- **Transformateur de séparation**

$$U_n = 23 \text{ KV}, S_n = 10 \text{ MVA}, X_{cc} = 1 \%$$

$$Z_{d\_trf\_PD} = Z_{i\_trf\_PD} \quad \text{Et} \quad Z_{o\_trf\_PD} = 3 \cdot Z_{d\_trf\_PD}$$

- **Production décentralisée**

$$U_n = 23 \text{ KV}, S_{cc} = 50 \text{ MVA}, X/R = 3$$

$$Z_{d\_PD} = Z_{i\_PD} \quad \text{Et} \quad Z_{o\_PD} = 3 \cdot Z_{d\_PD}$$

---