

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE**

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

**THEME**

---

**Calcul de courant de court-circuit dans les réseaux  
électriques**

---

**Proposé et dirigé par :**  
- M. BAHIEDDINE Miloud

**Présenté par :**  
- ABDELBAKI Ali  
- BELKHIRI Djamal Eddine  
- LAHOUASSA Yacine

**Année universitaire : 2011/2012**

## *Remerciements*

*Avant tout on remercie Allah le tout puissant pour sa générosité de nous donner la santé, la volonté et la patience tout au long de la vie universitaire.*

*Ensuite, nous adressons nos sincères remerciements à nos enseignants notamment à notre promoteur Mr. Bahieddine Miloud. Qui franchement nous a donné son maximum en vue d'élaborer un très bon mémoire ; sans oublier aussi ses conseils permanents, ses orientations efficaces et sa grande patience.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude aux membres de jury.*

*Nous remercions avec sincérité toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à réussir ce travail.*

# Dédicace

A tous ceux dont le  
cœur vibre au rythme de  
mes succès comme mes  
échecs.

Ali

Djamal

Yacine

# TABLE DES FIGURES

## CHAPITRE I : LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

<b>Figure I.1</b> : Exemple d'un réseau radial	06
<b>Figure I.2</b> : Exemple d'un réseau magistral	07
<b>Figure I.3</b> : Schéma d'un réseau bouclé	07
<b>Figure I.4</b> : Présentation d'un réseau maillé	08

## CHAPITRE II : LES DÉFAUTS DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.

<b>Figure II.1</b> : Procédure de calcul d' $I_{cc}$ pour la conception d'une installation électrique basse tension	21
<b>Figure II.2</b> : Types des courts-circuits	25
<b>Figure II.3</b> : Forme générale d'un courant de court-circuit	26
<b>Figure II.4</b> : Schéma simplifié d'un réseau	27
<b>Figure II.5</b> : Présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en un point éloigné d'un alternateur	29
<b>Figure II.6</b> : Relais électromagnétique à induction par disque simple	33
<b>Figure II.7</b> : Relais électromagnétique à induction par disque cylindrique	34
<b>Figure II.8</b> : Courbe de fusion et de limitation des fusibles	40

## **CHAPITRE III : CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT**

<b>Figure III.1</b> : Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés	44
<b>Figure III.2</b> : Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés.	46
<b>Figure III.3</b> : Les différents courants de court-circuit	57

## **CHAPITRE IV : ETUDE ET ANALYSE D'UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE LORS DE COURT-CIRCUIT.**

<b>Figure IV.1</b> : Schéma unifilaire du réseau d'étude	62
<b>Figure IV.2</b> : Schéma d'une distribution électrique	71
<b>Figure IV.3</b> : La disposition d'un réseau de distribution de moyenne ou basse tension	72

## **LES TABLEAUX**

## **CHAPITRE IV : ETUDE ET ANALYSE D'UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE LORS DE COURT-CIRCUIT**

<b>Tableau IV.1</b> : Différentes impédances vue par les barres	69
<b>Tableau IV.2</b> : Courant de court-circuit	70

# TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : LES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition d'un réseau électrique.....	4
I.3 Les différents types des réseaux.....	5
I.3.1 Classification d'après la topographie.....	5
I.3.1.1 Réseaux aériens.....	5
I.3.1.2 Réseaux souterrains.....	5
I.3.1.3 Réseaux radiaux.....	5
I.3.1.4 Réseaux magistraux.....	6
I.3.1.5 Réseau bouclé.....	7
I.3.1.6 Réseau maillé.....	8
I.3.2 Classification d'après le niveau de tension.....	8
I.3.2.1 Le réseau de transport et d'interconnexion.....	8
I.3.2.2 Le réseau de répartition.....	9
I.3.2.3 Le réseau de distribution.....	9
a. Le réseau de distribution moyenne tension (MT).....	10
b. Le réseau de distribution basse tension (BT).....	10
I.4 Les composants d'un réseau électrique.....	10
I.4.1 Les conducteurs.....	11
I.4.2 Les supports.....	11
I.4.3 Les isolateurs.....	12
I.4.4 Les postes de transformation.....	13
I.4.5 Les dispositifs de protection.....	13
I.4.6 Les appareille de commande.....	13
I.5 Problèmes survenant sur le réseau.....	14
I.5.1 Chute de tension.....	14
I.5.2 Déséquilibre de tension.....	14
I.5.3 Creux de tension.....	14
I.5.4 Surtension.....	15
I.5.5 Variation de fréquence.....	15
I.5.6 Présence d'harmoniques.....	15
I.5.7 Défauts de ligne.....	16

I.6 Conclusion.....	17
---------------------	----

## **CHAPITRE II : LES DEFAUTS DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES**

II.1 Introduction.....	19
II.2 Définition .....	22
II.3 Différents types des défauts.....	22
II.4 Le court-circuit.....	22
II.4.1 Définition.....	22
II.4.2 Caractéristiques des courts-circuits .....	22
II.4.2.1 Durée .....	23
II.4.2.2 Origines .....	23
II.4.2.3 Localisation.....	24
II.4.2.4 Types des courts-circuits .....	24
II.4.3 Le courant de court-circuit .....	25
II.4.3.1 Définition du courant de court-circuit.....	25
II.4.3.2 Intensité du courant de court-circuit .....	26
II.4.3.3 Etablissement du courant de court-circuit.....	26
II.4.4 Les conséquences des courts-circuits .....	29
II.4.4.1 Fonctionnement des réseaux électriques.....	29
II.4.4.2 Tenue des matériels.....	30
II.4.4.3 Qualité de la fourniture .....	30
II.4.4.4 Circuits de télécommunications.....	31
II.4.4.5 Sécurité des personnes .....	31
II.5 Les appareils d'élimination des défauts .....	31
II.5.1 Les relais de protection : .....	31
II.5.1.1 Définition.....	31
II.5.1.2 Les types des relais .....	32
A. Les relais électromécaniques .....	32
B. Les Relais statique.....	34
C. Les Relais numériques.....	35
II.5.2 Les disjoncteurs .....	36
II.5.2.1 Le disjoncteur à huile .....	36
II.5.2.2 Disjoncteur à air comprimé .....	37
II.5.2.3 Disjoncteur à haute tension au SF <sub>6</sub> (Hexafluorure de soufre) .....	37
II.5.2.4 Disjoncteur à vide.....	38
II.5.3 Les fusibles .....	39
II.6 Conclusion .....	40

## **CHAPITRE III : CALCUL DU COURANT DE COURT-CIRCUIT**

III.1 Introduction .....	42
III.2 Les hypothèses de base .....	42
III.3 Les méthodes pour le calcul du courant de court-circuit.....	43
III.4 La méthode des composantes symétriques .....	44
III.4.1 Introduction .....	44
III.4.2 La méthode des composantes symétriques .....	44
III.4.3 Circuit équivalent des séquences.....	46
III.4.4 Calcul des courants de court-circuit par la méthode des composantes symétriques .....	47
III.4.4.1 Court-circuit triphasé symétrique .....	47
III.4.4.2 Court-circuit biphasé isolé .....	48
III.4.4.3 Court-circuit biphasé terre .....	49
III.4.4.4 Court-circuit monophasé.....	51
III.4.4.5 Court-circuit monophasé avec impédance.....	52
III.5 La méthode des impédances.....	54
III.5.1 Introduction .....	54
III.5.2 Détermination des diverses impédances de court-circuit .....	54
III.5.2.1 L'impédance du réseau amont.....	54
III.5.2.2 L'impédance interne du transformateur.....	55
III.5.2.3 L'impédance des liaisons .....	55
III.5.3 Calcul de courant de court-circuit par la méthode des impédances .....	56
III.5.3.1 Court-circuit triphasé .....	56
III.5.3.2 Court-circuit biphasé isolé .....	58
III.5.3.3 Court-circuit monophasé isolé .....	58
III.5.3.4 Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé).....	58
III.6 Conclusion .....	59

## **CHAPITRE IV : ETUDE ET ANALYSE D'UN RESEAU ELECTRIQUE LORS DE COURT-CIRCUIT**

IV.1 Description et calcul de courant de court-circuit d'un réseau proposé .....	61
IV.2 Détermination du courant de court-circuit par la méthode des composantes symétriques .....	61
IV.2.1 Introduction .....	61
IV.2.2 Court-circuit triphasé.....	62

IV.2.2.1 Court-circuit triphasé dans la barre 1 .....	63
IV.2.2.2 Court-circuit triphasé dans la barre 2 .....	63
IV.2.2.3 Court-circuit triphasé dans la barre 3 .....	64
IV.2.3 Court-circuit biphasé isolé .....	64
IV.2.3.1 Court-circuit biphasé dans la barre 1.....	65
IV.2.3.2 Court-circuit biphasé dans la barre 2.....	65
IV.2.3.3 Court-circuit biphasé dans la barre 3.....	65
IV.2.4 Court-circuit biphasé terre .....	66
IV.2.4.1 Court-circuit biphasé terre dans la barre 1.....	66
IV.2.4.2 Court-circuit biphasé terre dans la barre 2.....	67
IV.2.4.3 Court-circuit biphasé terre dans la barre 3.....	67
IV.2.5 Court-circuit monophasé.....	68
IV.2.5.1 Court-circuit monophasé terre dans la barre 1.....	68
IV.2.5.2 Court-circuit monophasé terre dans la barre 2.....	68
IV.2.5.3 Court-circuit monophasé terre dans la barre 3.....	69
IV.2.6 Les résultats obtenus .....	69
IV.3 Détermination du courant de court-circuit par la méthode à base des tableaux et d'abaques.....	71
IV.3.1 Introduction .....	71
IV.3.2 Protection contre le courant de court-circuit maximal.....	71
IV.3.2.1 Courants de court-circuit au secondaire d'un transformateur HT / BT .....	72
IV.3.2.2 Courants de court-circuit à l'extrémité d'un câble.....	73
IV.3.3 Protection contre le courant de court-circuit minimal (en bout de ligne) .....	76
IV.4 Détermination du courant de court-circuit par un logiciel .....	81
IV.5 Conclusion.....	83
Conclusion générale .....	84

## Bibliographie

# **INTRODUCTION**

## **GÉNÉRALE**

### Introduction générale

Tout fonctionnement d'un réseau électrique peut être sujet à l'apparition de défauts se manifestant souvent par des courants élevés de « court-circuit ». Le court-circuit est l'un des incidents majeurs qui peuvent affecter les réseaux électriques et avec de lourdes conséquences qu'il est nécessaire de savoir gérer au mieux.

Le savoir-faire en matière de construction et de dimensionnement des réseaux d'énergie électrique exige la connaissance du comportement lors d'un court-circuit. Les contraintes thermique et mécanique des conducteurs doivent être vérifiées non seulement avec le courant maximal d'emploi mais, le conducteur doit supporter un courant de court-circuit qui peut atteindre plusieurs kilo-ampères dans les réseaux électriques.

Toutes les installations électriques doivent être protégées contre les courants de courts-circuits et ceci, sauf exception, chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique.

L'objectif poursuivi est de bien faire connaître les méthodes de calcul pour déterminer en toute connaissance de cause les courants de court-circuit.

En matière de protection et de bon fonctionnement des réseaux électriques, l'élément de base chargé de cette fonction est le disjoncteur. Pour qu'un disjoncteur fonctionne correctement, il faut que son pouvoir de coupure doit être supérieur au courant maximum d'un court-circuit.

# **CHAPITRE I :**

# **LES RÉSEAUX**

# **ÉLECTRIQUES**

## I.1 Introduction

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 (type centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques).

L'énergie est ensuite acheminée vers les grands centres de consommation à travers un réseau de lignes aériennes et de câbles, souvent à de grandes distances et à des niveaux de tension plus au moins importants. Cette structure a été construite sur des bases économiques, de sécurité du système et de qualité de fourniture de l'énergie. [01]

## I.2 Définition d'un réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. [02]

## I.3 Les différents types des réseaux

Un réseau électrique est tout d'abord défini par le type de courant électrique utilisé pour une bonne distribution économique et offrant une sécurité totale.

On distingue différents types de réseaux :

- ❖ D'après la topographie.
- ❖ D'après le niveau de tension.

### I.3.1 Classification d'après la topographie

#### I.3.1.1 Réseaux aériens

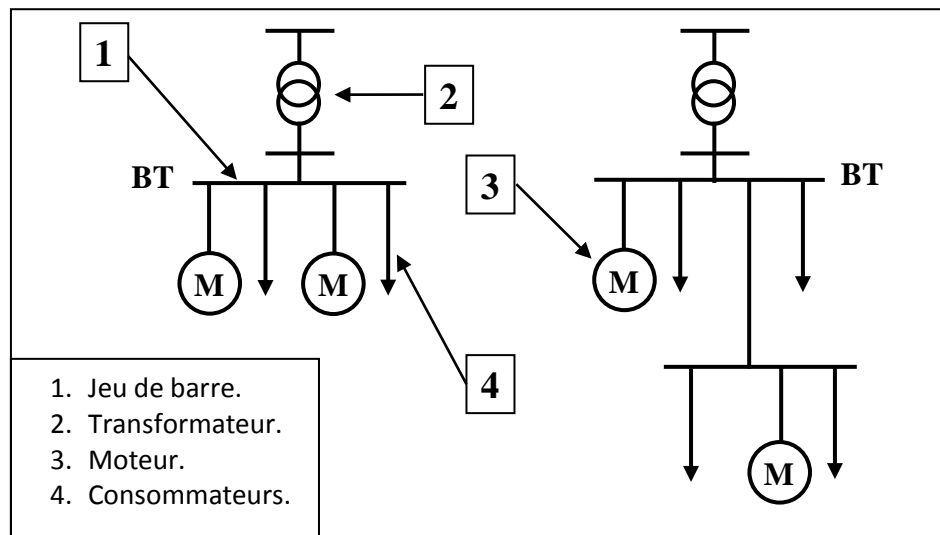
Ce sont des conducteurs nus de transport aérien suspendu sur des supports (poteaux, pylônes) afin d'acheminer l'énergie électrique en haute, moyenne ou basse tension.

#### I.3.1.2 Réseaux souterrains

On les trouvent surtout dans les régions à forte densité de population, ils sont constitués par des câbles isolés par du papier imprégné ou immergé, de caoutchouc ou des composants chimique, le tout étant recouvert d'une enveloppe étanche en plomb ou en aluminium. Ces câbles sont placés dans des tranchés caniveaux ou galeries.

#### I.3.1.3 Réseaux radiaux

Le transport d'énergie s'effectue vers un client par un seul parcours comme le montre le schéma ci-dessous, la distribution radiale, de par son nom est un réseau disposé en rayon de la source aux clients. En plus il a une bonne sécurité d'alimentation et une augmentation de la commodité, il nécessite des postes de distribution en basse tension, en plus il ne tient pas compte du changement de la technologie. (**Figure I.1**)



**Figure I.1 : Exemple d'un réseau radial.**

On utilise les réseaux radiaux dans les cas suivants :

- ❖ Pour les récepteurs importants du point de vue de la catégorie d'alimentation.
- ❖ Pour les armoires de forces.
- ❖ Pour les récepteurs dont les locaux contiennent des explosifs.

### I.3.1.4 Réseaux magistraux

Le réseau magistral est représenté dans le schéma ci-dessous, rend les postes de distribution très simple et il tient compte des changements de processus technologique. (**Figure I.2**)

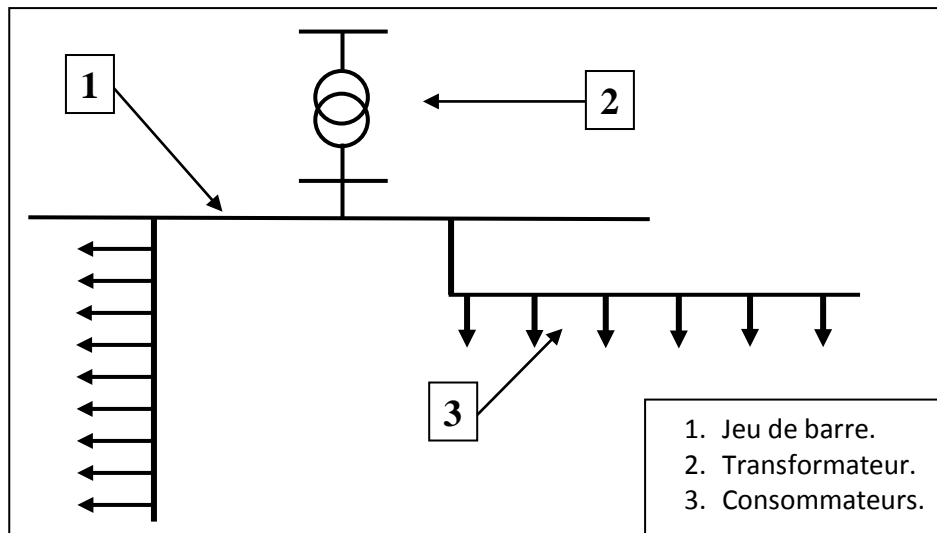


Figure I.2 : Exemple d'un réseau magistral.

### I.3.1.5 Réseau bouclé

Les distributions bouclées sont constituées par une ou plusieurs canalisations qui, partant d'une source et reviennent après avoir alimenté les divers abonnés. On peut constituer des boucles complexes ou maillées, comportant des transversales qui permettant de réaliser des boucles successives. (Figure 1.3)

Le réseau bouclé a une réduction des pertes joules, et il a une connexion spéciale aux dérivations et que chaque dérivation peut au maximum alimenter deux circuits.

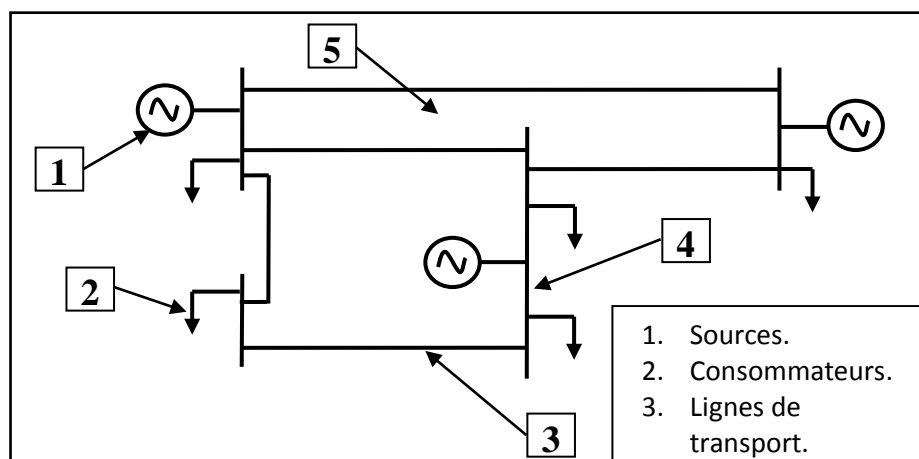
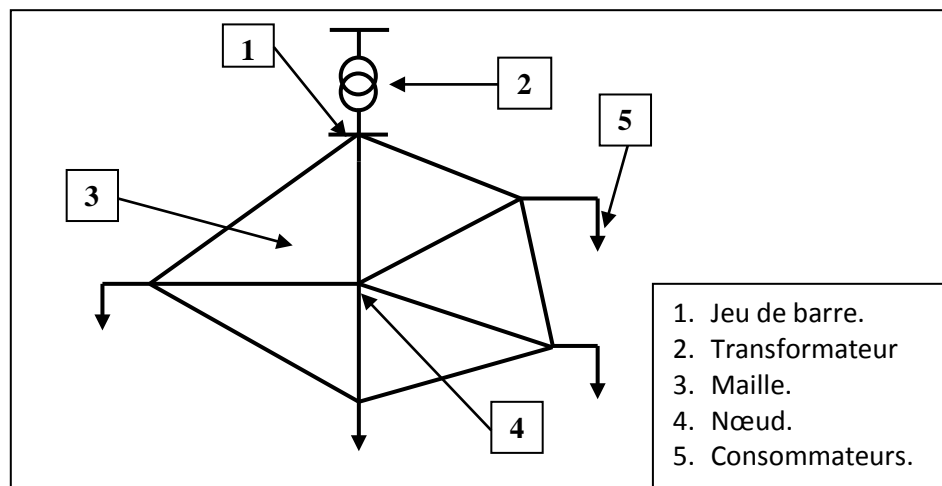


Figure I.3 : Schéma d'un réseau bouclé.

### I.3.1.6 Réseau maillé

Ce réseau se compose d'un ensemble de nœuds reliés par des lignes de transport d'énergie permettant le choix entre plusieurs routes d'une entrée du réseau vers une sortie. (**Figure I.4**)

Pour ce réseau on peut trouver des branches dont l'ouverture nous amène à un réseau radial, ce réseau radial est appelé arbre du réseau maillé, il est représenté par le schéma suivant : [02]



**Figure I.4 : Présentation d'un réseau maillé.**

## I.3.2 Classification d'après le niveau de tension

### I.3.2.1 Le réseau de transport et d'interconnexion

- Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour mission :
  - De collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport),
  - De permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion),

- La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 420 kV,
- Neutre directement mis à la terre,
- Réseau maillé. [01],[04]

### I.3.2.2 Le réseau de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions.

Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation [03].

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres.

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- La tension est 90 kV ou 63 kV,
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre,
- Limitation courant neutre à 1500 A pour le 90 kV,
- Limitation courant neutre à 1000 A pour le 63 kV,
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

### I.3.2.3 Le réseau de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou

des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [05],[06].

### **a. Le réseau de distribution moyenne tension (MT)**

Résultants des réseaux de haute tension HT, les réseaux de distribution moyenne tension sont de 30kV aérien et 10kV souterrain en Algérie. Ce sont des réseaux généralement arborescents souterrains ou aériens en vue de la zone de la population qu'ils traversent.

Contrairement aux réseaux haute et basse tension, on trouve dans les réseaux MT plus d'appareils de commande ou de protection et un système de commande, conçus par les exploitants afin de mieux gérer la distribution d'électricité.

### **b. Le réseau de distribution basse tension (BT)**

Ils viennent après c'est-à-dire à basse tension la structure des réseaux MT. Généralement comprends La structure arborescente est là aussi de loin la plus répandue, car elle est à la fois simple, bon marché, et permet une exploitation facile.

En Amérique du Nord les réseaux monophasés c'est-à-dire à basse tension Généralement comprends deux fil 1 neutre et 1 phase, tandis qu'en Algérie la distribution triphasée avec fil de neutre est très majoritaire (1 neutre + 3 phases).

## **I.4 Les composants d'un réseau électrique**

Un réseau électrique est composé généralement d'une source, des conducteurs et des éléments de consommation, auxquels il faut ajoutés d'autres éléments comme les dispositifs de protection, de commandes, de réglages ou la transformation.

### I.4.1 Les conducteurs

En électricité, un conducteur est un matériau qui contient des porteurs de charge électrique mobiles, et offrant une faible résistance au passage du courant électrique.

Il faut remarquer que lorsque ce conducteur n'est soumis à aucun champ électrique ou, plus généralement, dans la situation décrite par la théorie de l'électrostatique, les porteurs de charge sont animés d'un mouvement aléatoire, ce qui fait qu'on n'observe aucun courant électrique, on dit que le conducteur est en équilibre électrostatique.

Par extension, un conducteur est un composant électrique ou électronique de faible résistance, servant à véhiculer le courant d'un point à un autre. Par cette faible résistance on distingue les bons matériaux de conduction telle que l'or, le cuivre et l'aluminium.

Dans le réseau de transport on utilise en générale des conducteurs en aluminium ou en alliage aluminium acier.

Parmi les raisons d'utiliser l'aluminium c'est un bon conducteur d'énergie, moins coûteux et léger pour être porté par les supports (pylônes, poteaux).

### I.4.2 Les supports

Les supports sont utilisés dans le réseau électrique pour porter les conducteurs d'énergie. Il existe deux principaux types de support :

- ❖ Support bouts soudé en acier (BS).
- ❖ Support en béton.

De ces deux types on distingue les supports d'après leurs rôles dans le réseau que ça soit dans le niveau de la tension transporté, dans l'architecture du réseau ou dans la géographie de l'entourage.

En haute tension les supports utilisés sont appelés pylônes, qui sont en acier constitué par un assemblage de bouts métallique par des boulons et des écrous généralement, assembler en formes géométriques pour mieux se tenir sur la terre à cause de leurs hauteurs.

Dans les réseaux MT et BT les supports utilisés sont en acier ou bétonné, en Algérie les supports du réseau MT sont en acier généralement parce qu'ils sont moins chère que les supports bétonnés, et ces derniers sont utilisés en BT dans les zones urbaines pour éviter la chute des lignes en cas d'accident.

### I.4.3 Les isolateurs

L'isolation entre les conducteurs et les supports est assurée par des isolateurs connus sous le nom de CTV (capot tige verre). Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique ou en matériau synthétique. Les isolateurs verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette, et associée entre eux pour former une chaîne isolante. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre de CTV dans la chaîne est important. Pour 30kv on utilise 3 CTV pour une seule phase et entre 20 à 25 pour les réseaux de 220kv.

En plus dans les types d'isolation utilisés dans le réseau, il y a l'isolation des câbles souterrains. Il existe plusieurs types de câbles souterrains en vue du niveau de la tension, et notamment de leurs types d'isolement.

En Algérie le câble souvent utilisé est de type CPI (Câble Papier Imprégné). L'isolement de ce câble se fait par un papier immergé dans l'huile, des feuillages de papier métallisé, de plomb et de caoutchouc pour solidifier le câble afin d'assurer la long vie du câble sous la terre.

### I.4.4 Les postes de transformation

Un poste de transformation se compose d'un élément essentiel qui est le dispositif d'élévation ou d'abaissement de la tension transporté par le réseau vers les zones de consommation, et qui sont généralement des transformateurs abaisseurs qu'on les trouve sous deux types de postes.

❖ **Poste maçonné** : C'est une construction maçonnée qui contient un transformateur, un jeu de barre pour donner un départ vers une autre zone de consommation et un répartiteur ou une armoire pour donner plusieurs voies de distribution BT avec un dispositif de protection.

❖ **Poste aérien accroché (ACC)** : C'est un transformateur aérien accroché à un support MT avec un disjoncteur. On trouve ces types de postes dans les zones de consommation rurales ou MT.

### I.4.5 Les dispositifs de protection

La parfaite maîtrise des réseaux électriques exige la possession de tous les moyens nécessaires de la commande, le contrôle et la protection. Ces dernières ont pour mission de préserver les éléments du réseau des avaries survenus. Parmi les appareils de protections à installer dans un réseau d'énergie électrique, on trouve les disjoncteurs, les fils de gardes et les éclateurs.

### I.4.6 Les appareils de commande

Les appareils de commande et d'interruption sont en partie des dispositifs de protection, ils ont un fonctionnement manuel, automatique ou télécommandé comme les IAT, (Interrupteur Aérien Télécommandé) et les IATCT (Interrupteur Aérien Télécommandé à Creux de Tension). [02]

## **I.5 Problèmes survenant sur le réseau**

### **I.5.1 Chute de tension**

Les chutes de tension apparaissent lors du transit de puissance dans une ligne. Lorsque celui-ci est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

### **I.5.2 Déséquilibre de tension**

Il est caractérisé par les asymétries d'amplitude ou de déphasage des tensions triphasées en régime permanent. Il se produit dans les systèmes de distributions lorsque les impédances des lignes du réseau sont asymétriques, ou lorsque des branches alimentent un équipement monophasé ou un récepteur triphasé déséquilibré.

### **I.5.3 Creux de tension**

Les creux de tension sont des réductions soudaines de plus de 10% de la tension nominale, suivies de son rétablissement après une courte durée variant entre 8 millisecondes et une minute. Ces derniers sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle [07].

Ils sont caractérisés par leur amplitude et leur durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se

chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

### **I.5.4 Surtension**

Les surtensions sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute.

Les surtensions temporaires peuvent être attribuables à des défauts, à des délestages de charge ou à des phénomènes de résonance et de ferrorésonance. Le plus souvent, elles résultent des fluctuations qui se manifestent sur les phases saines lors de courts-circuits monophasés à la terre, par exemple [09].

### **I.5.5 Variation de fréquence**

La fréquence nominale de la tension alternative fournie par le réseau est de 50 ou 60 Hz. Cette valeur est déterminée par la vitesse des alternateurs des centrales.

Le maintien de la fréquence d'un réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la production. Cette variation de la fréquence et sa durée dépend principalement de la charge et de la puissance de production. Cette variation peut se prolonger dans le cas de défaut [08].

### **I.5.6 Présence d'harmoniques**

Les harmoniques sont des perturbations qui affectent la forme de la tension. Elles sont caractérisées par des composantes multiples de la fréquence fondamentale. Le courant consommé par les charges connectées au réseau présente une forme de sinusoïde distordue. Cette distorsion de

courant implique une distorsion de tension. Les harmoniques sont dues à l'introduction de charges non-linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs...) [09].

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer :

- Des vibrations et bruits,
- Des échauffements des condensateurs,
- Des échauffements dus aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs,
- Des échauffements des câbles et équipements,
- Des perturbations sur le fonctionnement de certains appareils électroniques.

### **I.5.7 Défauts de ligne**

Les défauts (ou courts-circuits) sont des mises en connexion de deux points de tensions différentes par un conducteur de faible résistance. Cette connexion donne naissance à un courant de court-circuit. Dans les réseaux électriques, les courts-circuits sont dus à un défaut d'isolement qui provoque l'apparition d'un arc électrique.

Durant le court-circuit, l'impédance de la branche en défaut diminue. Cette diminution est fonction de la position du point de court-circuit.

- Le défaut le plus fréquent est le défaut unipolaire à la terre causé par la mise accidentelle à la terre d'un fil de phase du réseau.
- Il peut se produire aussi un défaut entre phases appelé défaut bipolaire qui est le contact accidentel entre deux phases (avec ou sans contact avec la terre).

- Plus rarement, il peut se produire un défaut tripolaire dû à un court-circuit entre les trois phases de la ligne. C'est un défaut symétrique [10].

## **I.6 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, on a donné une idée générale et brève sur les réseaux électriques en les définissant et en donnant leurs types et leurs composants. Ensuite, on a expliqué les différents problèmes et perturbations qui peuvent survenir dans un réseau électrique.

**CHAPITRE II :**  
**LES DÉFAUTS**  
**DANS LES**  
**RÉSEAUX**  
**ÉLECTRIQUES**

## II.1 Introduction

Toute installation électrique doit être protégée contre les courts-circuits et ceci, sauf exception, chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique, ce qui correspond le plus généralement à un changement de section des conducteurs.

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 défectueux.

L'organigramme de la (**Figure II.1**) montre l'approche qui conduit aux différents courants de court-circuit et les paramètres qui en résultent pour les différents dispositifs de protection d'une installation.

Deux valeurs du courant de court-circuit doivent être connues :

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 :

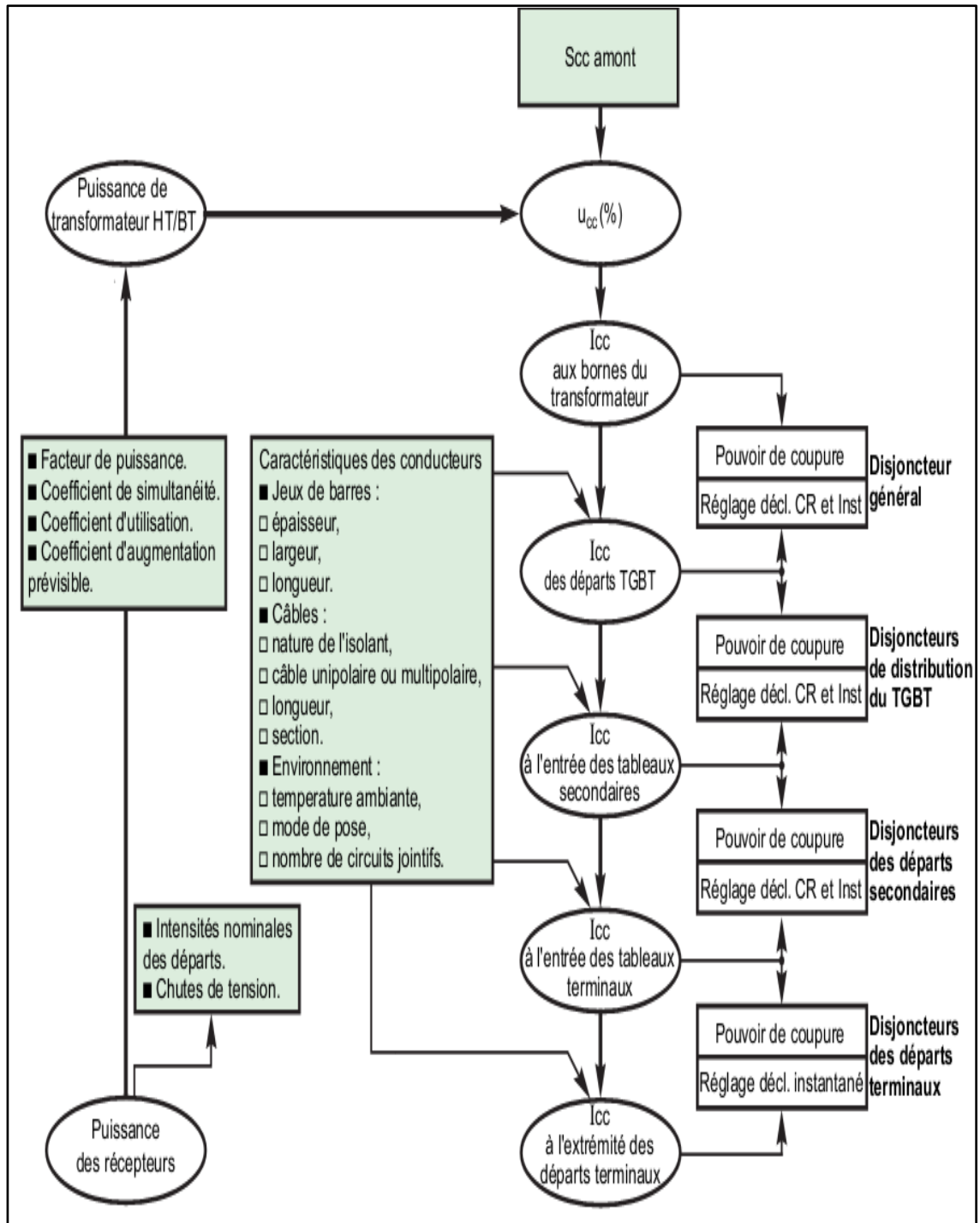
- la longueur des câbles est importante et/ou que la source est relativement impudente (générateurs-onduleurs).
- la protection des personnes repose sur le fonctionnement des disjoncteurs ou des fusibles, c'est essentiellement le cas avec les schémas de liaison à la terre du neutre TN ou IT.

Pour mémoire, le courant de court-circuit minimal correspond à un défaut de court-circuit à l'extrémité de la liaison protégée lors d'un défaut biphasé et dans les conditions d'exploitation les moins sévères (défaut à l'extrémité d'un départ et non pas juste derrière la protection, un seul transformateur en service alors que deux sont couplables ...).

Rappelons que dans tous les cas, quel que soit le courant de court-circuit (du minimal au maximal), la protection doit éliminer le court-circuit dans un temps ( $t_c$ ) compatible avec la contrainte thermique que peut supporter le câble protégé :

$$\int i^2 \cdot dt < k^2 \cdot S^2 \quad (\text{II.1})$$

Où  $S$  est la section des conducteurs, et  $k$  une constante calculée à partir de différents facteurs de correction en fonction du mode de pose, de circuits contigus, nature du sol... [11]



**Figure II.1 : Procédure de calcul d' $I_{cc}$  pour la conception d'une installation électrique basse tension (CR = court retard ; Inst=instantané).**

## II.2 Définition

Les défauts sont définis comme étant des évènements qui contribuent à la violation des limites de conception des composants du réseau électrique du point de vue isolants, isolation galvanique, niveau de tension et de courant etc [12].

## II.3 Différents types des défauts

- ✓ Les défauts triphasés **PPP** : entre les trois phases du réseau avec ou sans liaison à la terre.
- ✓ Les défauts biphasés **PP**: entre deux phases du réseau.
- ✓ Les défauts biphasés à la terre **PPT** : entre deux phases du réseau et la terre.
- ✓ Les défauts monophasés **PT**: entre une phase du réseau et la terre.

## II.4 Le court-circuit

### II.4.1 Définition

Le court-circuit est défini comme étant une connexion anormale (relativement de bas impédance) entre deux points de potentiels différents, produite accidentellement ou intentionnellement. Le terme défaut ou court-circuit est souvent utilisé pour décrire un court-circuit.

### II.4.2 Caractéristiques des courts-circuits

Les courts-circuits sont caractérisés par leurs durées, leurs origines, leur localisation et leurs types.

### II.4.2.1 Durée

Un défaut est toujours le résultat d'un manque d'isolement ; Si ce manque d'isolement est durable, le court-circuit est dit permanent dans le cas contraire est appelé fugitif.

Un court-circuit peut être :

- **Intermittent** : Lorsqu'il se répète à intervalle très rapproché, c'est le cas par exemple d'un court-circuit dû au balancement des conducteurs ou de branches sous l'effet d'un vent violent.
- **Semi -permanent** : Lorsqu'il persiste pendant un certain temps puis disparaît avec sa cause, c'est le cas, par exemple, d'un défaut dû à la croissance de la végétation, il disparaît lorsque celle-ci est consommée, un bon élagage permet d'éviter ce type d'incident.
- **Auto -extincteur** : Lorsqu'il disparaît de lui-même. on rencontre ce type de court-circuit sur les réseaux HTA en cas de défaut monophasé.
- **Evolutif** : Il arrive également que la nature du court-circuit change rapidement à cause des mouvements désordonnés des conducteurs provoqués par la chute d'un arbre ou par les forces électrodynamiques dues aux courants de court-circuit ; C'est ainsi qu'en l'espace de quelques secondes on peut passer d'un défaut PT à PPT, PPPT, PPP et finalement à PP. Une évaluation correcte des phénomènes successifs d'un défaut évolutif est difficile.

### II.4.2.2 Origines

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. [13],[14]

### II.4.2.3 Localisation

Interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique. [11]

### II.4.2.4 Types des courts-circuits

- **Triphasé** : 05 % seulement dès l'origine.
- **Biphasé** : 15 % des cas. Ces défauts dégénèrent souvent en défauts triphasés ; deux cas sont possibles :
  - biphasé isolé.
  - biphasé à la terre.
- **Monophasé** : 80 % des cas.

Ces différents courants de court-circuit sont présentés sur la (Figure II.2). [11]

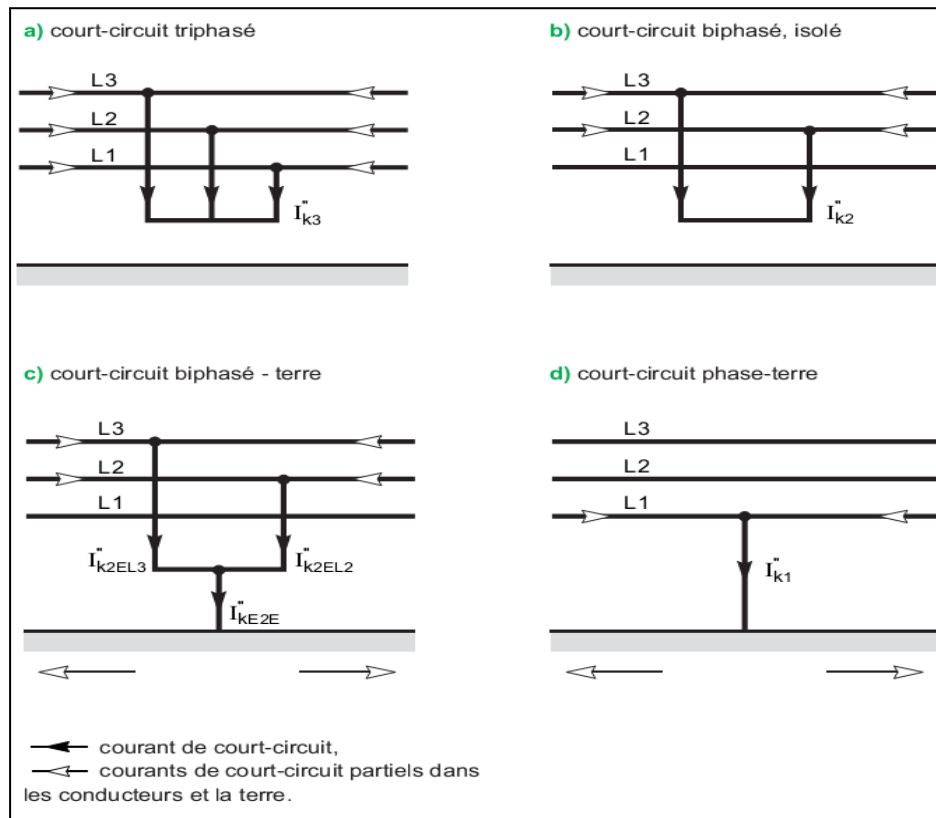


Figure II.2 : Types des courts-circuits.

## II.4.3 Le courant de court-circuit

### II.4.3.1 Définition du courant de court-circuit

Lors de l'apparition d'un court-circuit, et du fait de la nature inductive du réseau, la valeur à fréquence industrielle ne s'établit pas immédiatement (**Figure II.3**) [15]. Le courant peut approximativement être considéré comme la somme de deux termes :

- ✓ Composante transitoire aperiodique qui décroît rapidement de la forme :

$$I\sqrt{2} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot \cos(\beta), \text{ où } \beta \text{ l'instant du court-circuit.}$$

- ✓ Composante sinusoïdal ( $f = 50\text{hz}$ ) correspondant au régime établi de la forme :  $I\sqrt{2} \cdot \cos(\omega.t + \beta)$ . [16]

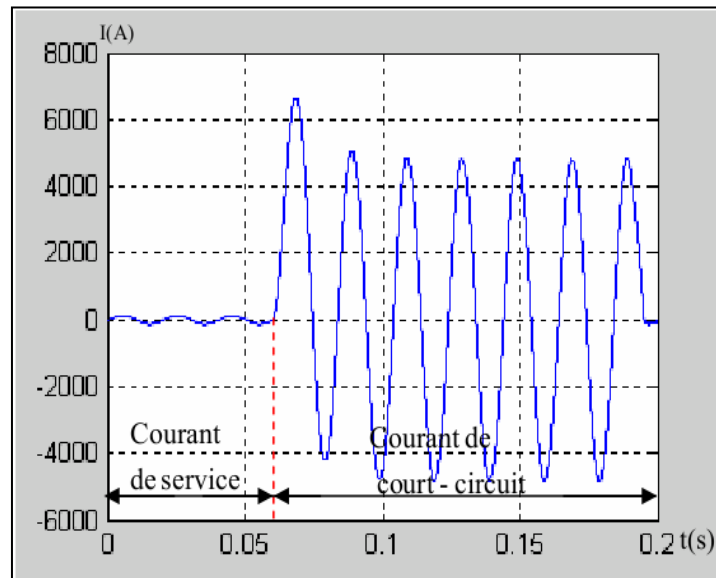


Figure II.3 : Forme générale d'un courant de court-circuit.

### II.4.3.2 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. [17]

### II.4.3.3 Etablissement du courant de court-circuit

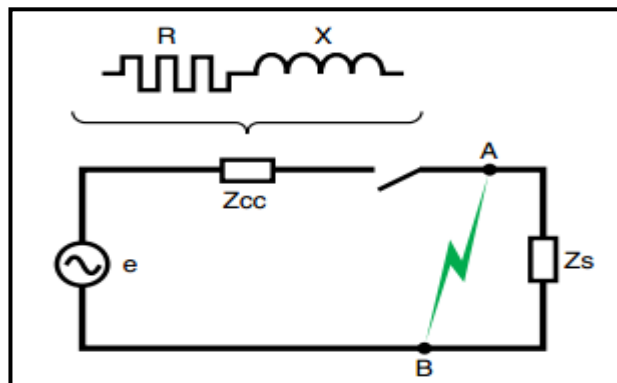
Un réseau simplifié se réduit à une source de tension alternative constante, un interrupteur et une impédance  $Z_{cc}$  représentant toutes les impédances situées en amont de l'interrupteur, et une impédance de charge  $Z_s$ .

Dans la réalité, l'impédance de la source est composée de tout ce qui est en amont du court-circuit avec des réseaux de tensions différentes (HT, BT) et des canalisations en série qui ont des sections et des longueurs différentes.

Sur le schéma de la (**Figure II.4**), l'interrupteur étant fermé, hors défaut l'intensité  $I_s$  du courant de service circule dans le réseau.

Un défaut d'impédance négligeable apparaissant entre les points A et B donne naissance à une intensité de court-circuit très élevée  $I_{cc}$ , limitée uniquement par l'impédance  $Z_{cc}$ . L'intensité  $I_{cc}$  s'établit suivant un régime transitoire en fonction des réactances X et des résistances R composant l'impédance  $Z_{cc}$  :

$$Z_{cc} = \sqrt{X^2 + R^2} \quad (\text{II.2})$$



**Figure II.4 : Schéma simplifié d'un réseau.**

En distribution de puissance, la réactance  $X = L.\omega$  est généralement bien plus élevée que la résistance R, et le rapport  $R / X$  se situe entre 0,1 et 0,3. Il est pratiquement égal pour ces faibles valeurs au  $\cos \varphi$  (en court-circuit) soit :

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (\text{II.3})$$

Cependant, le régime transitoire d'établissement du courant de court-circuit diffère suivant l'éloignement du point de défaut par rapport aux alternateurs. Cet éloignement n'implique pas nécessairement une distance

géographique, mais sous-entend que les impédances des alternateurs sont inférieures aux impédances de liaison entre ces derniers et le point de défaut.

○ **Défaut éloigné des alternateurs :**

C'est le cas le plus fréquent. Le régime transitoire est alors celui résultant de l'application à un circuit self-résistance d'une tension :

$$e = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha) \quad (\text{II.4})$$

L'intensité  $i$  est alors la somme des deux composantes :

$$i = i_{CA} + i_{CC} \quad (\text{II.5})$$

- L'une ( $i_{CA}$ ) est alternative et sinusoïdale :

$$i_{CA} = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) ; \text{Où} : I = \frac{E}{Z_{cc}} \quad (\text{II.6})$$

$\alpha$  = angle électrique qui caractérise le décalage entre l'instant initial du défaut et l'origine de l'onde de tension.

- L'autre ( $i_{CC}$ ) est une composante continue :

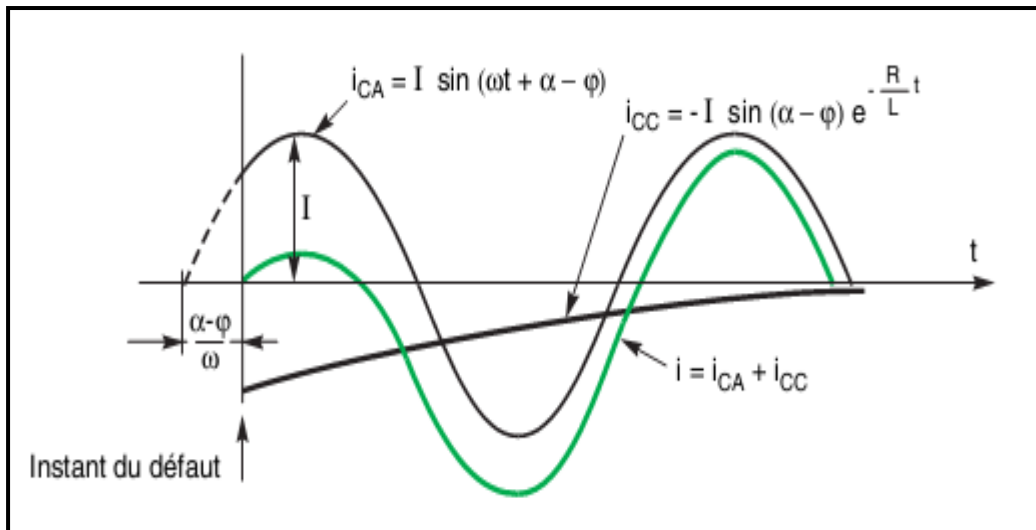
$$i_{CC} = -I\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (\text{II.7})$$

Sa valeur initiale dépend de  $\alpha$ , et son amortissement est d'autant plus rapide que  $R / L$  est élevé.

A l'instant initial du court-circuit,  $i$  est nulle par définition (l'intensité de service  $I_s$  étant négligée), d'où :

$$i = i_{CA} + i_{CC} = 0. \quad (\text{II.8})$$

La (Figure II.5) montre la construction graphique de  $i$  par l'addition algébrique des ordonnées de ses 2 composantes  $i_{CA}$  et  $i_{CC}$ . [11]



**Figure II.5 : présentation graphique et décomposition du courant d'un court-circuit s'établissant en un point éloigné d'un alternateur.**

#### II.4.4 Les conséquences des courts-circuits

Les défauts dans les réseaux électriques ont des effets néfastes [18] :

##### II.4.4.1 Fonctionnement des réseaux électriques

Les effets néfastes des courts-circuits sont surtout à redouter sur les réseaux électriques HTB sur lesquels débitent des groupes générateurs de forte puissance.

Les courts-circuits, surtout polyphasés et proches des centrales de production, entraînent une diminution du couple résistant ( $C_r$ ) des machines et donc une rupture de l'équilibre entre celui-ci et le couple moteur ( $C_m$ ), s'ils ne sont pas éliminés rapidement, ils peuvent conduire à la perte de stabilité de groupes générateurs et à des fonctionnements hors synchronisme préjudiciables aux matériels.[19]

Des temps d'élimination des courts-circuits de l'ordre de 100 à 150ms sont en générale considérée comme des valeurs à ne pas dépasser sur les réseaux électriques HTB.

#### II.4.4.2 Tenue des matériels

Les courts-circuits provoquent des surintensités, dans le cas un défaut triphasés le courant de court-circuit peut être dépasse 20 à 30 fois le courant nominale ( $I_n$ ), Ces surintensité amènent deux types de contraintes : [20]

- Contraintes Thermiques : dues au dégagement de chaleur par effet Joule ( $RI^2$ ) dans les conducteurs.
- Contraintes Mécaniques : dues aux efforts électrodynamiques, ceux-ci entraînent notamment le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs, ces efforts s'ils dépassent les limites admises lors de la construction sont souvent à l'origine d'avaries graves.

De plus l'arc électrique consécutif à un court-circuit met en jeu un important dégagement local d'énergie pouvant provoquer un important dégât au matériel et être dangereux pour le personnel travaillant à proximité.

#### II.4.4.3 Qualité de la fourniture

Dans la plut part des cas, les courts-circuits se traduisent pour les utilisateurs par une chute de tension dont l'amplitude et la durée sont fonction de différents facteurs tels que la nature du court-circuit, structure du réseau affecté, mode d'exploitation du réseau, mode de mise à la terre du neutre, performances des protection etc... ; Ces perturbations peuvent aller du creux ; de tension ou de la coupure jusqu'à l'interruption complète de fourniture.

#### **II.4.4.4 Circuits de télécommunications**

La présence d'un court-circuit dissymétrique entre une ou deux phases d'une ligne d'énergie électrique et la terre entraîne la circulation d'un courant homopolaire qui s'écoule à la terre par les points neutres des réseaux.

Une tension induite longitudinale, proportionnelle à ce courant, apparaît sur les lignes de télécommunication qui ont un trajet parallèle à la ligne d'énergie électrique. Cette tension peut atteindre des valeurs dangereuses pour le personnel et les installations de télécommunication [20], [21].

#### **II.4.4.5 Sécurité des personnes**

La mise sous tension accidentelle des masses, les élévations de potentiel liées à l'écoulement des courant de défaut à la terre, les conducteurs tombés au sol etc ... ; Sont autant de situations pouvant présenter des risques pour la sécurité des personnes, Le mode de mise à la terre des points neutres joue de ce fait un rôle essentiel [20].

### **II.5 Les appareils d'élimination des défauts**

#### **II.5.1 Les relais de protection**

##### **II.5.1.1 Définition**

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

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

### II.5.1.2 Les types des relais

Un relais de protection électrique, elle partagé en trois types :

#### A. Les relais électromécaniques

Ces relais sont basés sur le principe d'un disque d'induction actionné par des bobines alimentées par des variables électriques du réseau via des transformateurs de courant et de tension. Un ressort de rappel réglable détermine la limite de l'action du disque sur un déclencheur (points de réglage) [19],[20].

Les équipements électromécaniques sont des assemblages de fonctions: détection de seuils et temporisation. Ils avaient l'avantage d'être robustes, de fonctionner sans source d'énergie auxiliaire et d'être peu sensibles aux perturbations électromagnétiques.

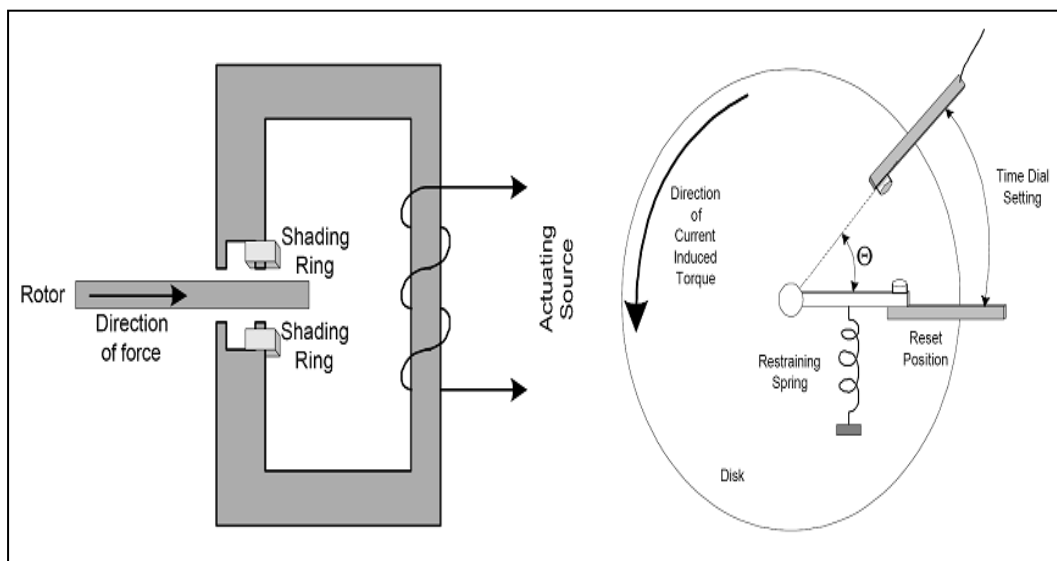
Ces relais se démarquent par leur solidité et leur grande fiabilité, pour cette raison, leur entretien est minime. Ils sont réputés pour leur fiabilité dans les environnements de travail les plus délicats. Il est néanmoins souhaitable de les contrôler régulièrement, et la périodicité d'inspection dépend des conditions d'exploitation (**Figures II.6, II.7**).

Les inconvénients de ces dispositifs, qui demeurent néanmoins largement rencontrés, sont :

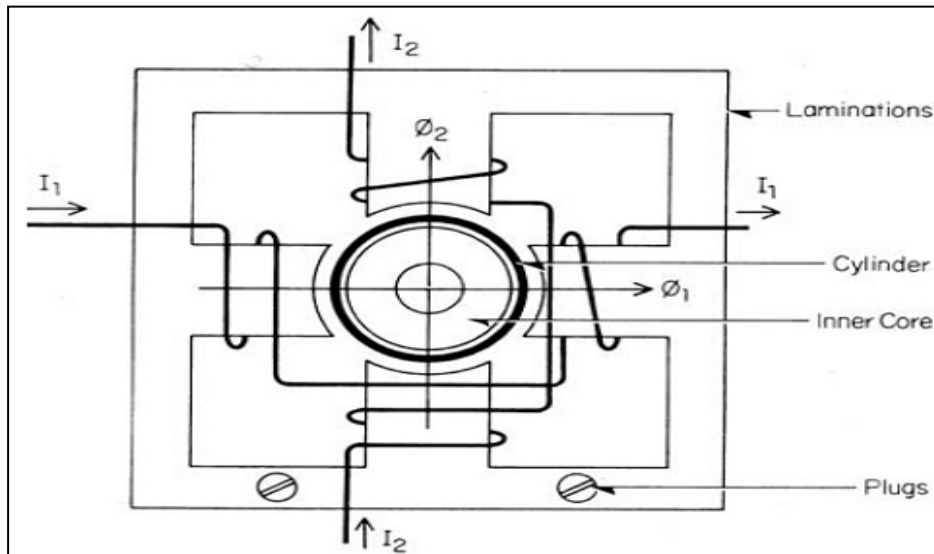
- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de maintenance,

- Le manque de précision, le dispositif étant sensible à son environnement et aux phénomènes d'usure,
- Il est aussi difficile d'obtenir des réglages adaptés aux faibles courants de court-circuit,
- Son coût de fabrication est élevé,
- Des performances insuffisantes et n'autorisent l'emploi que de fonctions élémentaires simples, en nombre limité et sans redondance,

A cause de ces inconvénients, ce type de protection tend à disparaître à l'heure actuelle.



**Figure II.6 :** Relais électromagnétique à induction par disque simple.



**Figure II.7 : Relais électromagnétique à induction par disque cylindrique.**

## B. Les Relais statique

Le développement de l'électronique a poussé les protections vers l'utilisation des composants électroniques discrets et les relais statiques. Ces protections, apparues sur le marché dans les années 1970, sont basées sur le principe de la transformation de variables électriques du réseau, fournies par des transformateurs de courant et de tension, en signaux électriques de faible voltage qui sont comparés à des valeurs de référence (points de réglage).

Les circuits de comparaison fournissent des signaux temporisations qui actionnent des relais de sortie à déclencheurs. Ces dispositifs nécessitent en général une source d'alimentation auxiliaire continue :

- Ils procurent une bonne précision et permettent la détection des faibles courants de court-circuit.
- Chaque unité opère comme une fonction unitaire et plusieurs fonctions sont nécessaires pour réaliser une fonction de protection complète.

Les inconvénients de ces dispositifs demeurent :

- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de tests,

- La grande puissance consommée en veille,
- La faible sécurité de fonctionnement (pas de fonction d'autocontrôle).

### **C. Les Relais numériques**

La technologie numérique a fait son apparition au début des années 1980. Avec le développement des microprocesseurs et des mémoires, les puces numériques ont été intégrées aux équipements de protection.

Les protections numériques, sont basées sur le principe de la transformation de variables électriques du réseau, fournies par des transformateurs de mesure, en signaux numériques de faible voltage. L'utilisation de techniques numériques de traitement du signal permet de décomposer le signal en vecteurs, ce qui autorise un traitement de données via des algorithmes de protection en fonction de la protection désirée. En outre, ils sont équipés d'un écran d'affichage à cristaux liquides sur la face avant pour le fonctionnement local.

Ces dispositifs nécessitant une source auxiliaire, offrent un excellent niveau de précision et un haut niveau de sensibilité. Ils procurent de nouvelles possibilités, comme :

- Intégration de plusieurs fonctions pour réaliser une fonction de protection complète dans une même unité,
- Le traitement et le stockage de données,
- L'enregistrement des perturbations du réseau (perturbographe),
- Le diagnostic des dispositifs connectés (disjoncteurs, ....etc.).

Ces modèles intègrent des possibilités d'autotest et d'autocontrôle qui augmentent leur continuité de fonctionnement tout en réduisant la durée et la fréquence des opérations de maintenance.

En plus des fonctions de protection, ces équipements disposent également de fonctions complémentaires facilitant leur fonctionnement. Les liaisons séries permettent de les paramétrer depuis un micro-ordinateur et de les connecter à un système de contrôle commande au niveau local et central. Ils permettent aussi de bénéficier des récentes découvertes dans le domaine de l'intelligence artificielle, comme les réseaux neuronaux et la logique floue [23].

## II.5.2 Les disjoncteurs

### II.5.2.1 Le disjoncteur à huile

La coupure dans l'huile s'est imposée en haute tension après avoir été développée en moyenne tension (ou Haute tension A). Sous l'action de l'arc électrique, l'huile est décomposée, plusieurs types de gaz sont produits (essentiellement de l'hydrogène et de l'acétylène) lors de cette décomposition.

L'énergie de l'arc est utilisée pour décomposer et évaporer l'huile, ceci permet de refroidir le milieu entre les contacts et par suite d'interrompre le courant à son passage par zéro

- Disjoncteurs à faible volume d'huile.
- Disjoncteurs à grand volume d'huile. [7]

#### ➤ Inconvénient

- Dimensions plus grandes.
- Pouvoir de coupure influencé par la présence des cloisons métalliques de la cellule contenant l'appareil et par l'humidité de l'air.
- Coût et bruit.

Cette technique de coupure a été très employée dans tous les

domaines, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Progressivement, elle est supplantée par les techniques de coupure dans le vide et dans le SF6. [7]

### II.5.2.2 Disjoncteur à air comprimé

Le gaz contenu dans les disjoncteurs à air comprimé est maintenu sous haute pression (20 à 35 bars) à l'aide d'un compresseur. Cette haute pression permet d'assurer la tenue diélectrique et de provoquer le soufflage de l'arc pour la coupure.

Le soufflage intense exercé dans ces disjoncteurs a permis d'obtenir de très hautes performances (courant coupé jusqu'à 100 kA sous haute tension) et avec une durée d'élimination du défaut très courte permettant d'assurer une bonne stabilité des réseaux en cas de défaut. [7]

#### ➤ Inconvénients

- Nécessité d'une station d'air comprimé,
- Bruit violent,
- Appareil plus Cher

### II.5.2.3 Disjoncteur à haute tension au SF<sub>6</sub> (Hexafluorure de soufre)

- La suprématie des appareils SF<sub>6</sub> dans la gamme 7,2 kV à 245 kV. Sur le plan technique, plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF<sub>6</sub> peuvent expliquer leur Succès.
- La simplicité de la chambre de coupure qui ne nécessite pas de chambre auxiliaire pour la coupure.
- L'autonomie des appareils apportée par la technique auto-pneumatique (sans compresseur de gaz).

- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63kA.
- Le nombre de chambres de coupure est réduit (01 chambre en 245kV, 02 chambres en 420 kV, 03 chambres pour la ligne de 550 kV et 04 en 800 kV).
- Une durée d'élimination de court-circuit court, de 2 à 2,5 cycles en réseau TH.
- La durée de vie d'au moins de 25 ans.
- Faible niveau de bruit.
- Zéro maintenance (régénération du gaz SF6 après coupure).
- Eteint l'arc dix fois mieux que l'air.
- L'un des inconvénients de ce type d'appareil est son prix élevé. [3]

#### II.5.2.4 Disjoncteur à vide

En principe, le vide est un milieu diélectrique idéal : il n'y a pas de matière donc pas de conduction électrique. Cependant, le vide n'est jamais parfait et de toute façon a une limite de tenue diélectrique. Malgré tout, le «vide » réel a des performances spectaculaires à la pression de 6-10 bar, la rigidité diélectrique en champ homogène peut atteindre une tension crête de 200 kV pour une distance inter électrodes de 12 mm.

Tous les constructeurs ont été confrontés aux mêmes exigences:

- Réduire le phénoménal d'arrachement de courant pour limiter les surtensions,
- Evader l'érosion précoce des contacts pour obtenir une endurance élevée,
- Retarder l'apparition du régime d'arc concentré pour augmenter le pouvoir de coupure,
- Limiter la production de vapeurs métalliques pour éviter les

reclaquages,

- Conserver le vide, indispensable pour garder les performances de coupure, pendant la durée de vie de l'appareil.

C'est en MT que cette technique est la plus employée : des disjoncteurs d'usage général sont maintenant disponibles pour les différentes applications avec tous les pouvoirs de coupure habituels (jusqu'à 63 kA). Ils sont utilisés pour la protection et la commande [3].

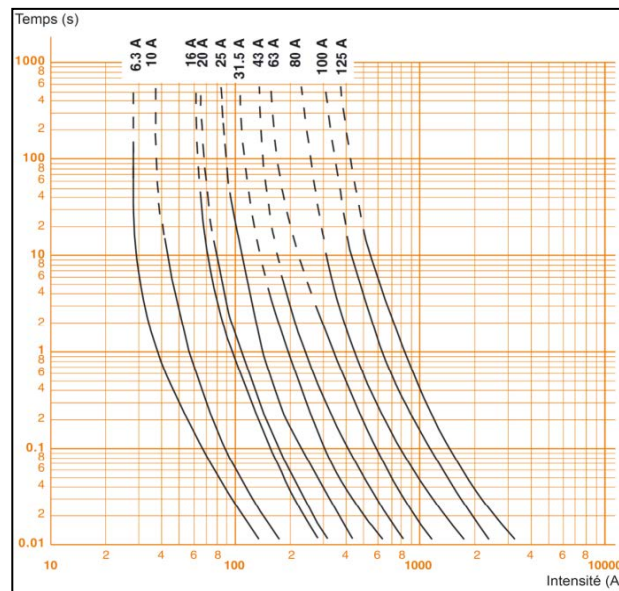
### II.5.3 Les fusibles

Les fusibles permettent d'interrompre automatiquement un circuit parcouru par une surintensité pendant un intervalle de temps donné. L'interruption du courant est obtenue par la fusion d'un conducteur métallique calibré. Ils sont surtout efficaces pour la protection contre les courts circuits, vis-à-vis desquels ils agissent, le plus souvent, en limiteurs de la valeur crête du courant de défaut.

Le fusible est ainsi un excellent dispositif pour l'élimination des défauts mais il présente un certain nombre d'inconvénients qui limitent son utilisation:

- Ils sont assez souvent générateurs de surtensions à la coupure ;
- Ils exigent malheureusement d'être remplacés après chaque fonctionnement
- En régime triphasé, ils n'éliminent que les phases parcourues par un courant de défaut, ce qui peut présenter un danger pour le matériel et le personnel ;
- Leur calibre doit être bien adapté pour éviter un fonctionnement intempestif en cas de surcharge momentanée.

Les fusibles sont des appareils monophasés, pour pallier cet inconvénient potentiel, les fusibles peuvent être associés à des interrupteurs ou à des contacteurs avec lesquels ils constituent des combinés capables d'assurer automatiquement la coupure des phases saines lors du fonctionnement de l'un d'eux de façon à éviter la marche monophasée dangereuse. Les combinés présentent, en outre, l'avantage d'interrompre en triphasé en cas de fusion d'un seul ou de deux fusibles [24].



**Figure II.8 :** Courbe de fusion et de limitation des fusibles.

## II.6 Conclusion

Dans le second chapitre, on a abordé les défauts dans les réseaux électriques. On a détaillé le défaut de court-circuit qui est le sujet de notre travail, en citant ses caractéristiques. Ensuite on a passé vers le courant de court-circuit en le définissant et en établissant son intensité. Puis on a donné des exemples des conséquences des courts-circuits. En fin du chapitre, on a parlé des appareils d'élimination de ces défauts électriques.

**CHAPITRE III :**

**CALCUL DU**

**COURANT DE**

**COURT-CIRCUIT**

### III.1 Introduction

Le savoir-faire en matière de construction et de dimensionnement des réseaux d'énergie électrique exige la connaissance du comportement lors d'un court-circuit. Les contraintes thermique et mécanique des conducteurs doivent être vérifiées non seulement avec le courant maximal d'emploi [25] mais, le conducteur doit supporter un courant de court-circuit qui peut atteindre plusieurs kilo ampères dans les réseaux moyens tension [26]. En matière de protection et de bon fonctionnement des réseaux électriques, l'élément de base chargé de cette fonction est le disjoncteur. Pour qu'un disjoncteur fonctionne correctement, il faut que son pouvoir de coupure doive être supérieur au courant maximum d'un court-circuit :  $PDC > I_{cc\ tri}$  [25].

### III.2 Les hypothèses de base

Pour ces calculs de courants de court-circuit, des hypothèses précisant le domaine de validité des formules données sont nécessaires.

Souvent simplificatrices et accompagnées d'approximations justifiées, ces hypothèses rendent plus aisée la compréhension des phénomènes physiques et ainsi le calcul des courants de court-circuit, tout en gardant une précision acceptable et par excès.

Les hypothèses retenues sont :

- Le réseau considéré est radial et sa tension nominale va de la BT à la HT (ne dépassant pas 550 kV, limite donnée par la norme CEI 60909) ;
- Le courant de court-circuit, lors d'un court-circuit triphasé est supposé s'établir simultanément sur les trois phases ;
- Pendant la durée du court-circuit, le nombre de phases concernées n'est pas modifié: un défaut triphasé reste triphasé, de même un défaut phase-terre reste phase-terre ;

- Pendant toute la durée du court-circuit, les tensions qui ont provoqué la circulation du courant et l'impédance de court-circuit ne changent pas de façon significative ;
- Les régleurs ou changeurs de prises des transformateurs sont supposés être en position principale (dans le cas d'un court-circuit éloigné des alternateurs, on peut ignorer les positions réelles des changeurs de prises des transformateurs) ;
- Les résistances d'arc ne sont pas prises en compte ;
- Toutes les capacités de ligne sont négligées ;
- Les courants de charge sont négligés ;
- Toutes les impédances homopolaires sont prises en compte.

### III.3 Les méthodes pour le calcul du courant de court-circuit

Deux méthodes sont particulièrement étudiées pour le calcul des courants de court-circuit dans les réseaux:

- l'une dont l'usage est surtout réservé aux réseaux BT, il s'agit de la méthode des impédances. Elle a été retenue pour la précision qu'elle permet d'obtenir, et pour son aspect didactique puisqu'elle nécessite la prise en compte de la quasi-totalité des caractéristiques du circuit concerné.
- l'autre, surtout utilisée en HT, est celle de la CEI 60909, retenue pour sa précision et pour son aspect analytique. Plus technique, elle exploite le principe des composantes symétriques. [11]

### III.4 La méthode des composantes symétriques

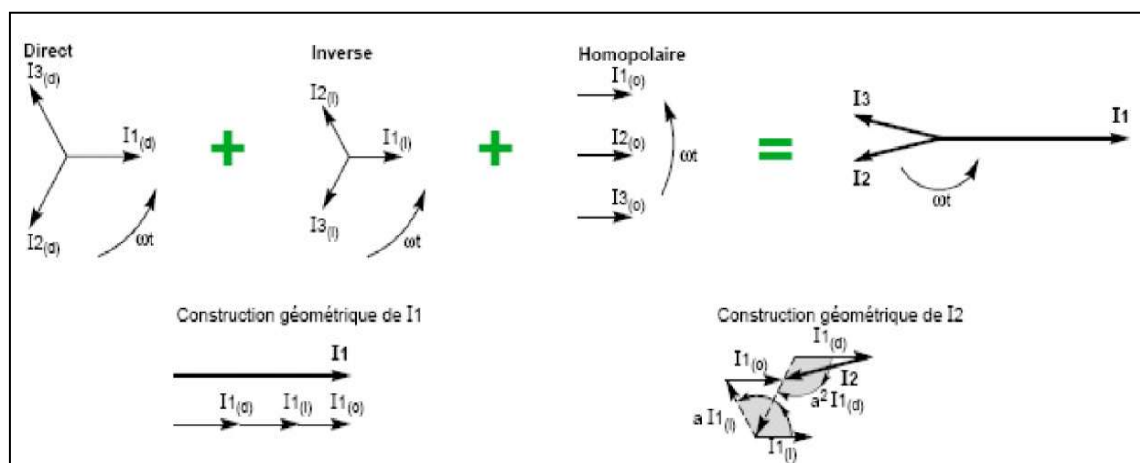
#### III.4.1 Introduction

La théorie des composantes symétriques s'applique tout aussi bien à des vecteurs tournants tels que des courants et des tensions qu'à des vecteurs fixes tels que des impédances ou des admittances ; même si la théorie sera développée pour des tensions, elle aurait tout aussi pu être démontrée pour des courants ou des impédances dont on ne mentionnera que les équations intéressantes.

Les composantes symétriques permettent surtout d'étudier le fonctionnement d'un réseau polyphasé de constitution symétrique lorsque l'on branche en un de ses points un récepteur déséquilibré ; soit parce qu'il s'agit effectivement d'une charge non équilibrée ; soit plus fréquemment lorsque se produit un court-circuit.

#### III.4.2 La méthode des 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, indirect et homopolaire (**Figure III.1**).



**Figure III.1 : Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés.**

- **Le système Direct (Positif ou de séquence d'ordre 1)**

Consiste en trois vecteurs de même module déphasé de  $120^\circ$  et ayant la même séquence que le système d'origine.

En prenant le vecteur  $V_a$  comme référence et sachant que l'opérateur (**a**):

$$a = -0,5 + j 0,866 = 1^{\perp+120^\circ},$$

il vient alors :

$$\begin{cases} V_{a1} = V_1 \\ V_{b1} = V_1^{\perp 240^\circ} = a^2 \cdot V_1 \\ V_{c1} = V_1^{\perp 120^\circ} = a \cdot V_1 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

- **Le système Inverse (Négatif ou de séquence d'ordre 2)**

Consiste en trois vecteurs de même module déphasé de  $120^\circ$  mais de séquence opposée au système d'origine.

$$\begin{cases} V_{a2} = V_2 \\ V_{b2} = V_2^{\perp 120^\circ} = a \cdot V_2 \\ V_{c2} = V_2^{\perp 240^\circ} = a^2 \cdot V_2 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

- **Le système homopolaire (Zéro ou de séquence d'ordre 0)**

Ce système est formé de trois vecteurs ayant la même amplitude et le même angle de phase, ils tournent aussi dans le même sens et à la même vitesse que les vecteurs du système original, on leur attribue l'indice « 0 ».

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} = V_0 \quad (\text{III.3})$$

Autrement dit un système triphasé déséquilibré constitué de trois vecteurs  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  peut s'écrire en fonction des trois systèmes direct, inverse, homopolaire selon :

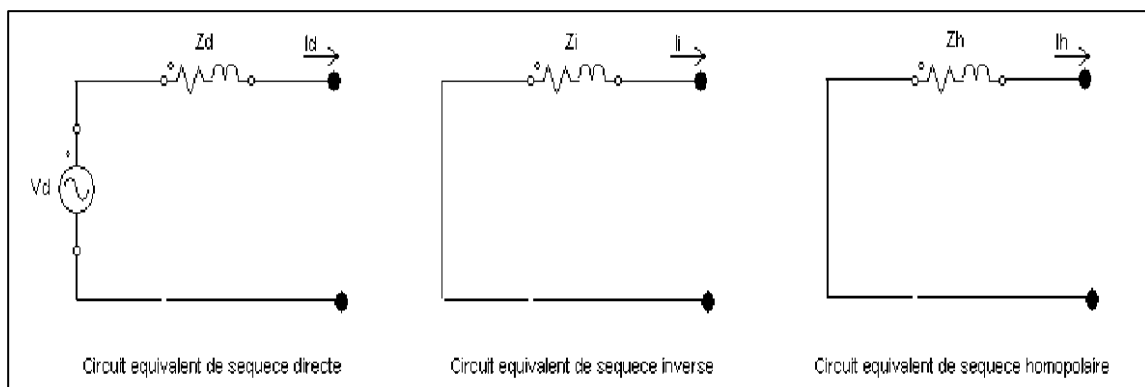
$$\begin{cases} V_a = V_1 + V_2 + V_0 \\ V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \\ V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \end{cases} \quad (III.4)$$

Pour déterminer  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_0$  en fonction de  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  on a deux méthodes : [28]

- **1<sup>ère</sup> méthode** : On utilise la matrice inverse  $[T]^{-1}$
- **2<sup>ème</sup> méthode** : On utilise  $1 + a + a^2 = 0$  on aura :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{3} [V_a + a V_b + a^2 V_c] \\ V_2 = \frac{1}{3} [V_a + a^2 V_b + a V_c] \\ V_0 = \frac{1}{3} [V_a + V_b + V_c] \end{cases} \quad (III.5)$$

### III.4.3 Circuit équivalent des séquences



**Figure III.2 : Système déséquilibré triphasé obtenu en additionnant les trois systèmes équilibrés.**

$$\begin{cases} V_d = V_d^p - Z_d \cdot I_d \\ V_i = 0 - Z_i \cdot I_i \\ V_h = 0 - Z_h \cdot I_h \end{cases} \quad (III.6)$$

Où :

$V_d^p$  : La tension préexistante au point de défaut.

$Z_d, Z_i, Z_h$  : Les impédances équivalentes au réseau dans les trois systèmes.

### III.4.4 Calcul des courants de court-circuit par la méthode des composantes symétriques

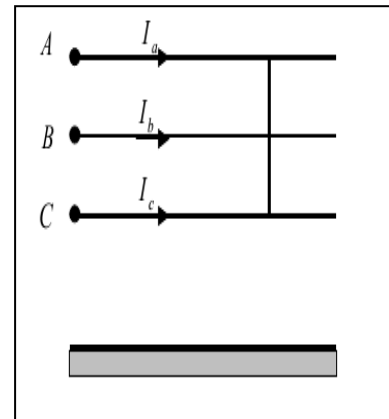
#### III.4.4.1 Court-circuit triphasé symétrique

- Expression du défaut :

$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad (\text{Phases en défaut}).$$

- Traduction en grandeurs symétriques :

$$V_d = V_i = V_h = 0$$

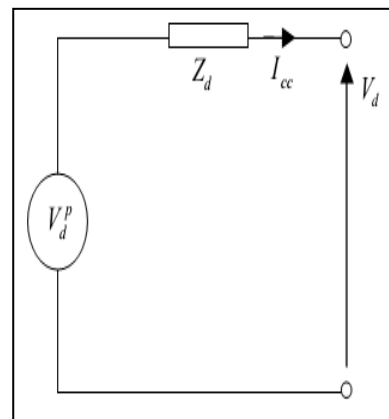


- Soit d'après (III.6) :

$$I_d = \frac{V_d^p}{Z_d}, \quad I_i = I_h = 0$$

- Valeur du courant de défaut triphasé :

$$I_{IIIcc} = I_{3\phi cc} = I_d = \frac{V_d^p}{Z_d}$$



- Retour aux grandeurs de phase :

$$V_a = V_b = V_c = 0 \tag{III.7}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = \frac{V_d^p}{Z_d} \end{array} \right. \tag{III.8}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_d} \end{array} \right. \tag{III.9}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_d} \end{array} \right. \tag{III.10}$$

### III.4.4.2 Court-circuit biphasé isolé

- Expression du défaut:

$V_b = V_c, V_{bc} = 0, I_b = -I_c$  (phases en défaut),

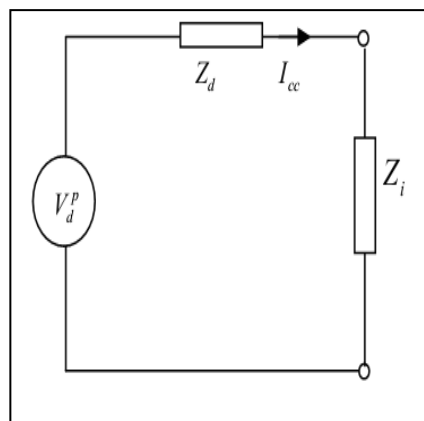
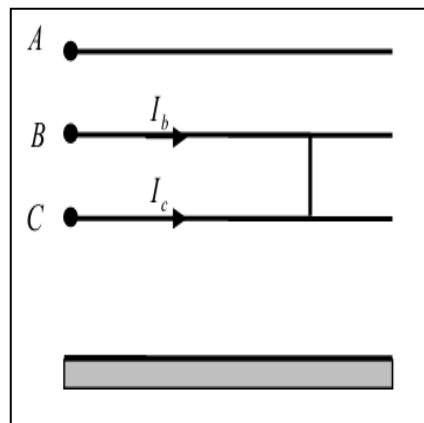
$I_a = 0$  (phase saine)

- Traduction en grandeurs symétriques :

$$V_{bc} = V_{bn} + V_{nc} = (a^2 V_d + a V_i + V_h) - (a V_d + a^2 V_i + V_h) = 0$$

$$V_{bc} = V_d (a^2 - a) + V_i (a - a^2) + V_h (1 - 1) = 0$$

$$\Rightarrow V_d (a^2 - a) = V_i (a^2 - a) \Rightarrow V_d = V_i$$



Implique que:  $V_d^p - Z_d \cdot I_d = -Z_i \cdot I_i$

- Soit d'après (III.5) :

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{3} (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) = \frac{1}{3} (a - a^2) I_b = j \frac{1}{\sqrt{3}} I_b \\ I_i = \frac{1}{3} (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) = -\frac{1}{3} (a - a^2) I_b = -j \frac{1}{\sqrt{3}} I_b \\ I_h = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = 0 \end{cases}$$

Donc :  $I_d = -I_i$

- Soit d'après (III.6) :

$$V_d^p - Z_d \cdot I_d = -Z_i \cdot I_i \Rightarrow I_d = \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

- Retour aux grandeurs de phase:

$$\begin{cases} I_a = 0 \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

$$\begin{cases} I_b = -j \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i} \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

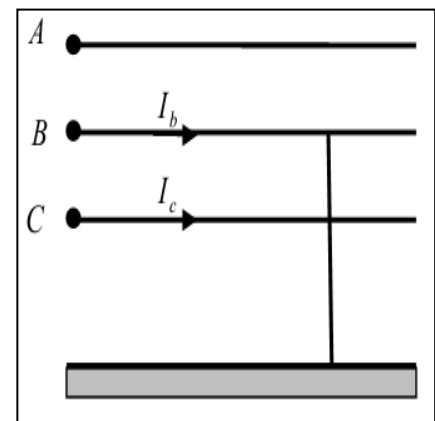
$$\begin{cases} I_c = j \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i} \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

### III.4.4.3 Court-circuit biphasé terre

- Expression du défaut:

$$V_b = V_c = 0, I_b = -I_c \quad (\text{phases en défaut}),$$

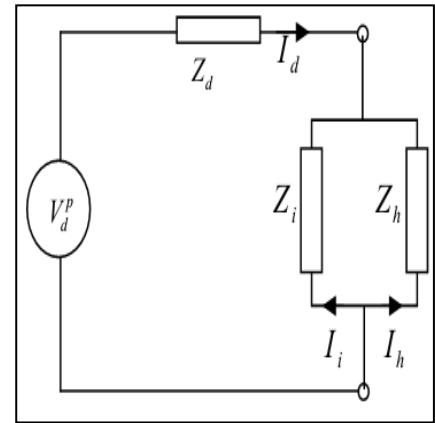
$$I_a = 0 \quad (\text{phase saine})$$



- Traduction en grandeurs symétriques :

$$\begin{cases} V_d = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) = \frac{1}{3} V_a \\ V_i = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) = \frac{1}{3} V_a \\ V_h = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3} V_a \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_d = V_i = V_h$$



- Soit d'après (III.6) :

$$I_i = -\frac{V_i}{Z_i} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_h}{Z_h}$$

$$I_h = -\frac{V_h}{Z_h} = -\frac{V_d}{Z_d} = -\frac{V_i}{Z_i}$$

Donc :

$$\begin{cases} I_i = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i} \\ I_h = -\frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h} \\ I_a = I_d + I_i + I_h = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_a = I_d - \frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_i} - \frac{(V_d^p - Z_d \cdot I_d)}{Z_h} = 0$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_d^p \cdot (Z_i + Z_h)}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \\ I_i = -\frac{V_d^p \cdot Z_h}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \\ I_h = -\frac{V_d^p \cdot Z_i}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \end{cases}$$

- Retour aux grandeurs de phase:

$$I_b = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_h \Rightarrow I_b = \frac{\sqrt{3} V_d^p \cdot (Z_h \cdot 1^{L-90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L-150^\circ})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \quad (III.14)$$

$$I_c = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_h \Rightarrow I_c = \frac{\sqrt{3} V_d^p \cdot (Z_h \cdot 1^{L+90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L+150^\circ})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \quad (III.15)$$

Le courant dans le neutre est :  $I_n = I_b + I_c = \left| \frac{3 V_d^p}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h} \right| \quad (III.16)$

### III.4.4.4 Court-circuit monophasé

- Expression du défaut:

$$V_a = 0 \quad (\text{phase en défaut}),$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (\text{phases saines})$$

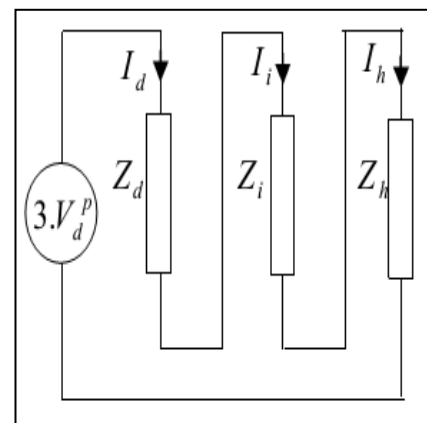
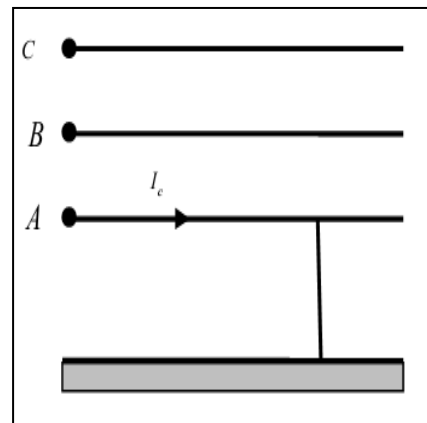
- Traduction en grandeurs symétriques :

$$V_d + V_i + V_h = 0, \quad I_d = I_i = I_h$$

- Soit d'après (III.6) :

$$I_d = I_i = I_h = \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h}$$

$$\begin{cases} V_d = \frac{Z_i + Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^p \\ V_i = -\frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^p \\ V_h = -\frac{Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^p \end{cases}$$



- Retour aux grandeurs de phase:

$$\begin{cases} V_a = 0 \\ V_b = \frac{(a^2 - a) \cdot Z_i + (a^2 - 1) \cdot Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^p \\ V_c = \frac{(a - a^2) \cdot Z_i + (a - 1) \cdot Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h} \cdot V_d^p \end{cases}$$

$$I_a = \frac{3 V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad I_b = I_c = 0 \quad (III.17)$$

### III.4.4.5 Court-circuit monophasé avec impédance

Dans ce cas la tension au point du défaut n'est pas nulle.

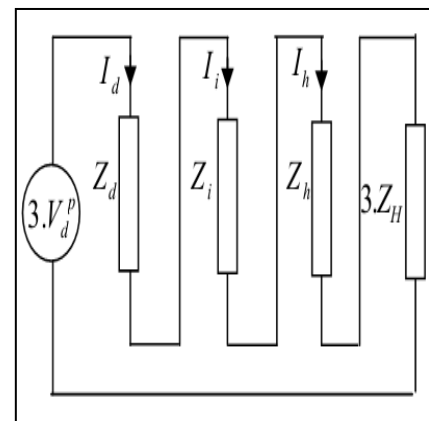
- Expression du défaut:

$$V_a \neq 0 \quad (\text{phase en défaut}),$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (\text{phases saines})$$

- Traduction en grandeurs symétriques :

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{3} (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) = \frac{1}{3} I_a \\ I_i = \frac{1}{3} (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) = \frac{1}{3} I_a \\ I_h = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_a \end{cases}$$



$$\Rightarrow I_d = I_i = I_h$$

$$\text{Avec: } V_a = V_d + V_i + V_h = Z_H \cdot I_a$$

$$\Rightarrow V_d = - (V_i + V_h) + Z_H \cdot I_a$$

- Soit d'après (III.6) :

$$V_d^p - Z_d \cdot I_d = \frac{1}{3} Z_h \cdot I_a + \frac{1}{3} Z_i \cdot I_a + Z_H \cdot I_a$$

- Retour aux grandeurs de phase:

$$I_a = \frac{3 V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h + 3Z_H} \quad I_b = I_c = 0 \quad (\text{III.18})$$

**Remarque :** toutes les grandeurs utilisées sont en valeur complexe.

## III.5 La méthode des impédances

### III.5.1 Introduction

Le principe de cette méthode consiste à déterminer les courants de court-circuit à partir de l'impédance que représente le «circuit» parcouru par le courant de court-circuit. Cette impédance se calcule après avoir totalisé séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source d'alimentation du circuit, jusqu'au point considéré.[11]

### III.5.2 Détermination des diverses impédances de court-circuit

#### III.5.2.1 L'impédance du réseau amont

Dans la plupart des calculs, on ne remonte pas au-delà du point de livraison de l'énergie. La connaissance du réseau amont se limite alors généralement aux indications fournies par le distributeur, à savoir uniquement la puissance de court-circuit  $S_{cc}$  (en MVA).

L'impédance équivalente du réseau amont est :

$$Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}} \quad (\text{III.19})$$

$U$  : est la tension composée du réseau non chargé. La résistance et la réactance amont se déduisent à partir de  $R_a / Z_a$  en HT par :

$$R_a / Z_a \approx 0,3 \text{ en } 6 \text{ kV,}$$

$$R_a / Z_a \approx 0,2 \text{ en } 20 \text{ kV,}$$

$$R_a / Z_a \approx 0,1 \text{ en } 150 \text{ kV.}$$

Or,  $X_a = \sqrt{(Z_a)^2 - (R_a)^2}$ , d'où :

$$\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{Z_a}\right)^2} \quad (\text{III.20})$$

### III.5.2.2 L'impédance interne du transformateur

L'impédance se calcule à partir de la tension de court-circuit  $u_{cc}$  exprimée en % :

$$Z_T = \frac{u_{cc}}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n}, \text{ avec :} \quad (\text{III.21})$$

$U$  = tension composée à vide du transformateur,

$S_n$  = puissance apparente du transformateur.

$U \cdot \frac{u_{cc}}{100}$  = la tension qu'il faut appliquer au primaire du transformateur pour que le secondaire soit parcouru par l'intensité nominale  $I_n$ , les bornes secondaires BT étant court-circuitées.

En général  $R_T \ll X_T$ , de l'ordre de 0,2  $X_T$ , et l'impédance interne des transformateurs peut être assimilée à la réactance  $X_T$ .

Cependant pour les petites puissances le calcul de  $Z_T$  est nécessaire car le rapport  $R_T/X_T$  est plus élevé. Cette résistance se calcule alors à partir des pertes joules (W) dans les enroulements :

$$W = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{W}{3 I_n^2} \quad (\text{III.22})$$

### III.5.2.3 L'impédance des liaisons

L'impédance des liaisons  $Z_L$  dépend de leur résistance et réactance linéiques, et de leur longueur.

- o La résistance linéique  $R_L$  des lignes aériennes, des câbles et des jeux de barres se calcule avec l'équation :

$$R_L = \frac{\rho}{S}, \text{ avec :}$$

$S$  = section du conducteur ;

$\rho$  = sa résistivité, mais dont la valeur à adopter n'est pas la même selon le courant de court-circuit calculé, maximum ou minimum.

- o La réactance linéique des lignes aériennes, des câbles et des jeux de barres se calcule par :

$$X_L = L \cdot \omega = [15,7 + 144,44 \text{ Log} \left( \frac{d}{r} \right)], \text{ exprimée en } m\Omega/\text{km} \text{ pour un}$$

système de câbles monophasé ou triphasé en triangle, avec en mm :

$r$  = rayon des âmes conductrices ;

$d$  = distance moyenne entre les conducteurs.

**NB** : ici, Log = logarithme décimal.

Pour les lignes aériennes, la réactance croît légèrement avec l'espacement des conducteurs.

Les valeurs moyennes suivantes sont à retenir :

$$X=0,3 \Omega/\text{km} \text{ (lignes BT ou HTA),}$$

$$X=0,4 \Omega/\text{km} \text{ (lignes HTA ou HTB). [11]}$$

### III.5.3 Calcul de courant de court-circuit par la méthode des impédances

#### III.5.3.1 Court-circuit triphasé

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases. L'intensité de court-circuit  $I_{cc3}$  est :

$$I_{cc3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}} \quad (\text{III.23})$$

avec  $U$  (tension composée entre phases) correspondant à la tension à vide du transformateur, laquelle est supérieure de 3 à 5% à la tension aux bornes en charge. Par exemple, dans les réseaux 390 V, la tension composée adoptée est  $U = 410$  V, avec comme tension simple  $U / 3 = 237$  V.

Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de l'impédance  $Z_{cc}$ , impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par

le courant de court-circuit du générateur jusqu’au point de défaut – de la source et des lignes – (Figure III.3). C’est en fait l’impédance «directe» par phase :

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R^2) + (\sum X^2)} \tag{III.24}$$

avec

$\sum R$  = somme des résistances en série,

$\sum X$  = somme des réactances en série.

Le défaut triphasé est généralement considéré comme celui provoquant les courants de défaut les plus élevés. En effet, le courant de défaut dans le schéma équivalent d’un système polyphasé, n’est limité que par l’impédance d’une phase sous la tension simple du réseau. Le calcul d’ $I_{cc3}$  est donc indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).

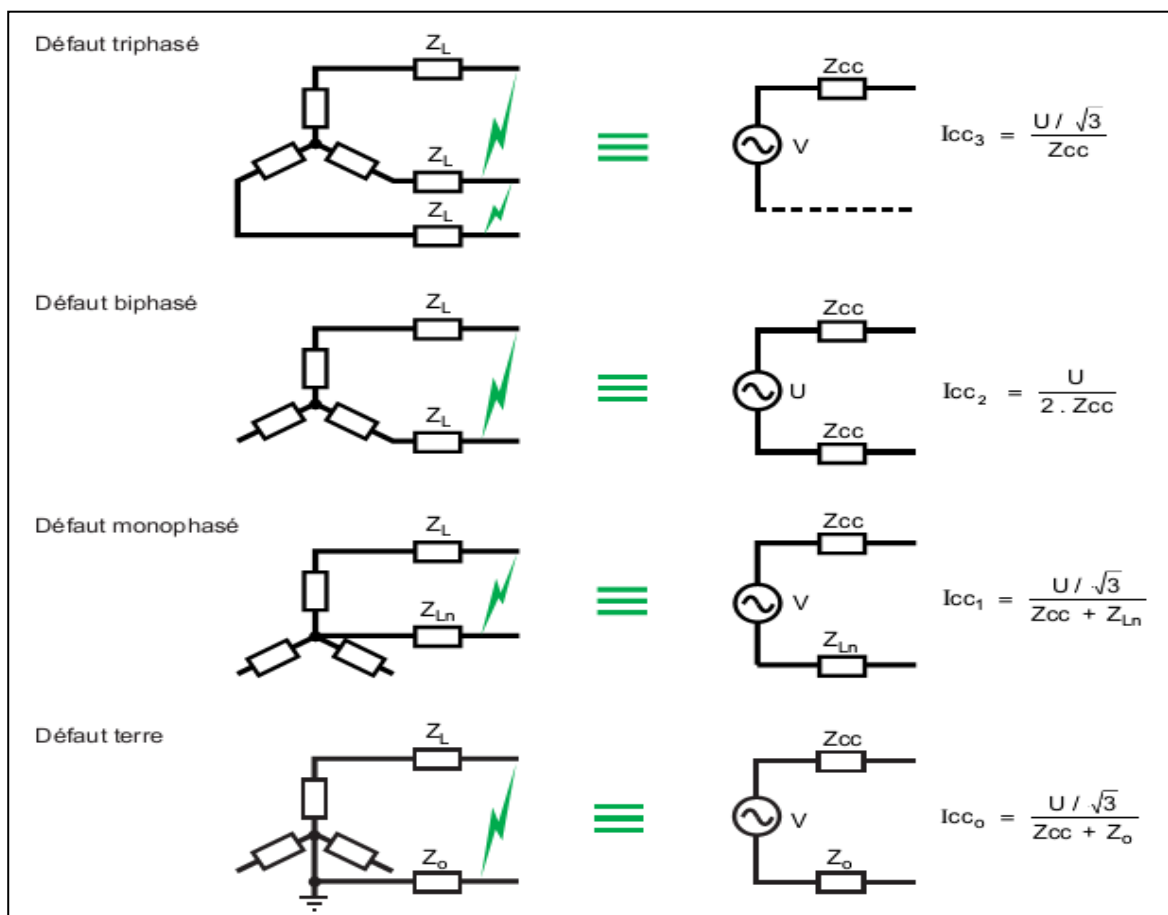


Figure III.3 : Les différents courants de court-circuit.

### III.5.3.2 Court-circuit biphasé isolé

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée  $U$ . L'intensité  $I_{cc2}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé:

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3} \quad (\text{III.25})$$

Dans le cas d'un défaut proche des machines tournantes, les impédances de celles-ci sont telles que  $I_{cc2}$  est proche de  $I_{cc3}$ .

### III.5.3.3 Court-circuit monophasé isolé

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, alimenté sous une tension simple :

$$V = U / \sqrt{3}.$$

L'intensité  $I_{cc1}$  débitée est alors :

$$I_{cc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}} \quad (\text{III.26})$$

Dans certains cas particuliers de défaut monophasé l'impédance homopolaire de la source est plus faible que  $Z_{cc}$ . L'intensité monophasée peut être alors plus élevée que celle du défaut triphasé.

### III.5.3.4 Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé)

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire  $Z_0$ . Sauf en présence de machines tournantes où l'impédance homopolaire se trouve réduite, l'intensité  $I_{cco}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé.

Son calcul peut être nécessaire, selon le régime du neutre (schéma de liaison à la terre), pour le choix des seuils de réglage des dispositifs de protection homopolaire (HT) ou différentielle (BT). [11]

### III.6 Conclusion

Ce troisième chapitre donne les méthodes de calcul du courant de court-circuit : la méthode des impédances et celle des composantes symétriques, démarrant par les hypothèses de base qui simplifient le calcul, puis en calculant le courant de court-circuit pour chaque type (triphasé, biphasé, ...).

**CHAPITRE IV :**

**ETUDE ET**

**ANALYSE D'UN**

**RÉSEAU**

**ÉLECTRIQUE LORS**

**DE COURT-CIRCUIT**

## IV.1 Description et calcul de courant de court-circuit d'un réseau proposé

Ce calcul permet d'aborder les aspects liés aux méthodes de calcul et au fonctionnement des grands réseaux d'énergie électrique, il a pour but l'amélioration et l'optimisation de système de protection et le choix des paramètres des équipements de ce système.

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination des courants de court-circuit  $I_{cc}$  :

- Par calcul.
- Par abaques.
- Par logiciel.

## IV.2 Détermination du courant de court-circuit par la méthode des composantes symétriques

### IV.2.1 Introduction

Le réseau électrique dont on va déterminer les différents courants de court-circuit, est d'une architecture radiale (**Figure IV.1**) avec des caractéristiques suivantes :

- Réseau amont

$$U_n = 20 \text{ KV}, S_{cc} = 125 \text{ MVA}, X/R = 3.$$

$$Z_d = Z_i = 3Z_h.$$

$$\text{Donc : } |Z_d| = |Z_i| + |Z_{cc}| = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{400}{125} = 3,2 \Omega \Rightarrow Z_{cc} = 1,012 + j. 3,036.$$

$$Z_{d_{cc}} = 1,012 + j. 3,036.$$

$$Z_{h_{cc}} = 3,036 + j. 9,108.$$

- Lignes

Ligne 1 et 2 de 6 Km,  $R=0,46 \Omega/\text{Km}$ ,  $X=0,408 \Omega/\text{Km}$ .

$$Z_d = Z_i = 3 \cdot Z_h$$

$$Z_d = 2,76 + j \cdot 2,448.$$

$$Z_h = 8,28 + j \cdot 7,344.$$

- Transformateur de separation

$U_n = 20\text{KV}$ ,  $S_n = 10 \text{ MVA}$ ,  $X_{cc} = 1\%$ .

$$Z_d = Z_i = 3 \cdot Z_h \Rightarrow j \cdot X_{cc} = \frac{1}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = j \cdot 0,4$$

$$Z_d = j \cdot 0,4$$

$$Z_h = j \cdot 1,2$$

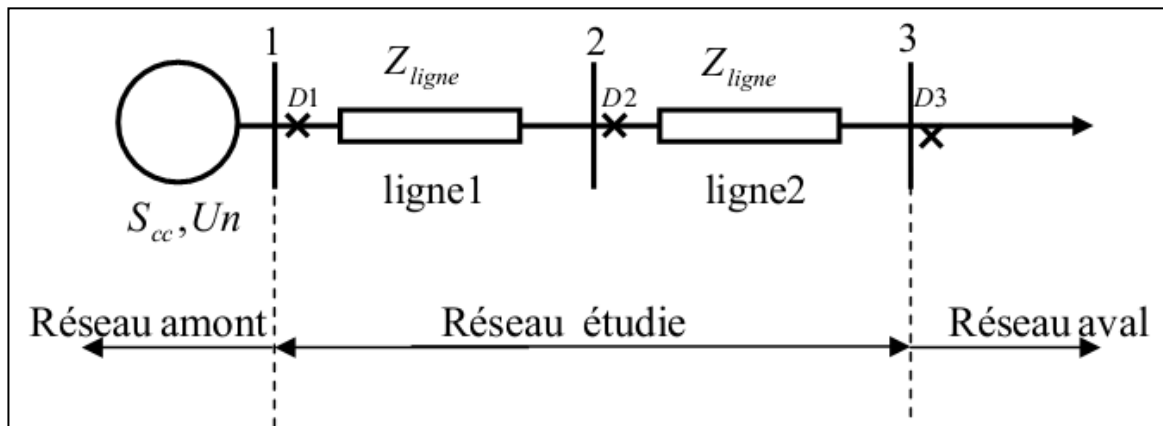


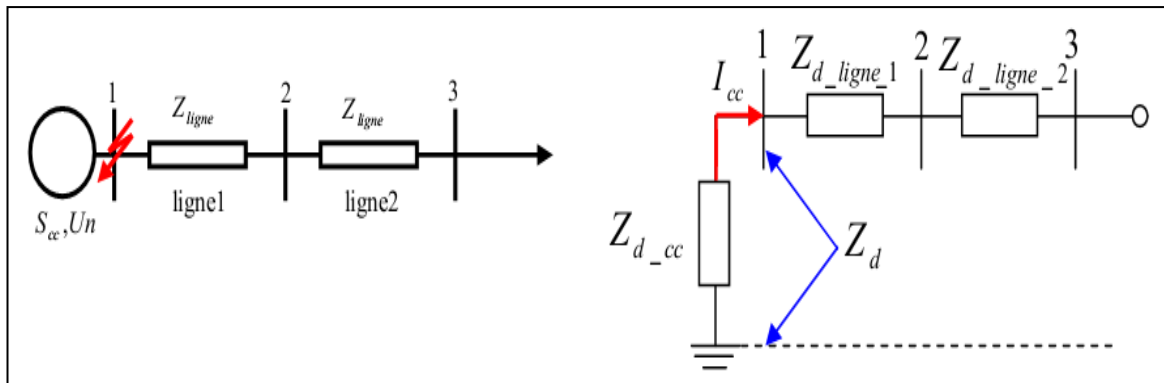
Figure IV.1 : Schéma unifilaire du réseau d'étude.

### IV.2.2 Court-circuit triphasé

Le courant de court-circuit triphasé est donné par : [d'après (III.8), (III.9) et (III.10)]

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_d} \quad I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_d}$$

### IV.2.2.1 Court-circuit triphasé dans la barre 1



L'impédance directe vue entre la barre (1) et la terre est :  $Z_d = Z_{d\_cc}$

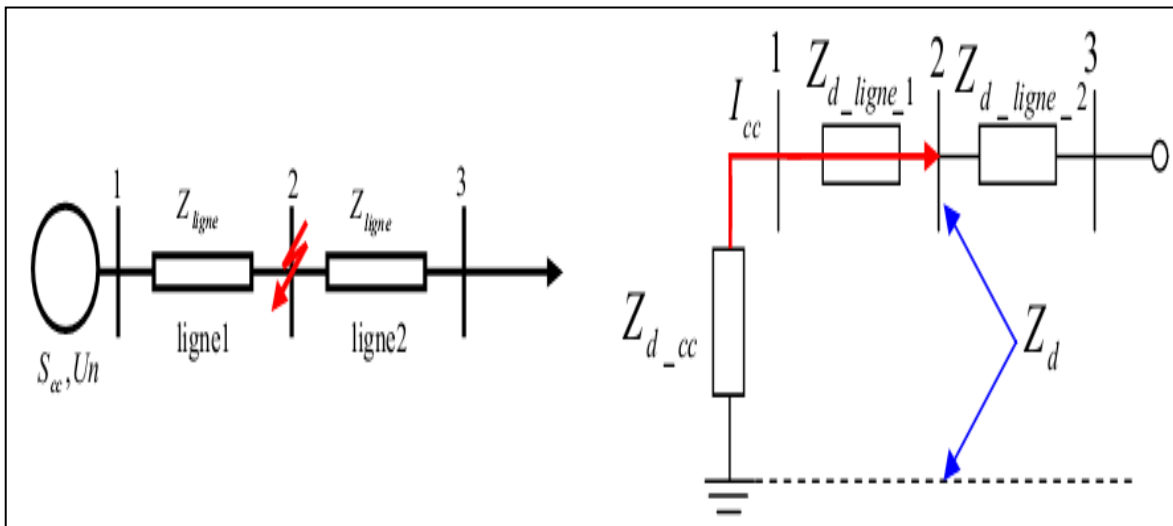
Implique que :

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc}} \quad I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc}} \quad I_c = a \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc}}$$

**Remarque :**

Les valeurs des impédances et des courants calculés sont mises dans deux tableaux à la fin de cette partie.

### IV.2.2.2 Court-circuit triphasé dans la barre 2



L'impédance directe vue entre la barre (2) et la terre est :

$$Z_d = Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}$$

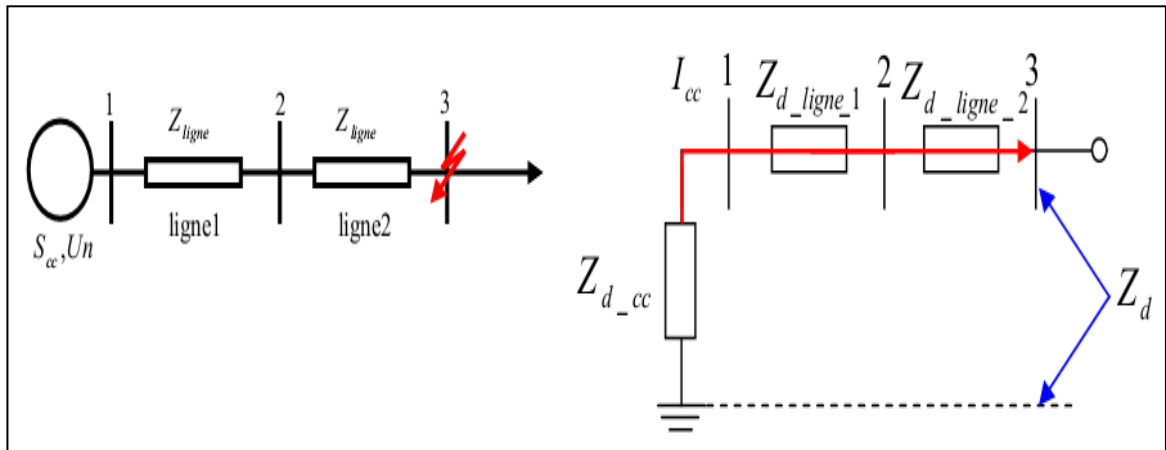
Implique que :

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}}$$

$$I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}}$$

$$I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}}$$

### IV.2.2.3 Court-circuit triphasé dans la barre 3



L'impédance directe vue entre la barre (3) et la terre est :

$$Z_d = Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}$$

Implique que :

$$I_a = \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}}$$

$$I_b = a^2 \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}}$$

$$I_c = a \cdot \frac{V_d^p}{Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}}$$

### IV.2.3 Court-circuit biphasé isolé

Le courant de court-circuit biphasé isolé (entre la phase B et C) est donné par : [d'après (III.11), (III.12) et (III.13)]

$$I_a = 0 \qquad I_b = -j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i} \qquad I_c = j\sqrt{3} \frac{V_d^p}{Z_d + Z_i}$$

En général, l'impédance inverse est égale à l'impédance directe, donc :

$$I_a = 0 \quad I_b = -j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_d} \quad I_c = j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_d}$$

En outre, l'impédance directe pour un court-circuit triphasé est la même pour un court-circuit biphasé ou monophasé.

#### IV.2.3.1 Court-circuit biphasé dans la barre 1

$$Z_d = Z_{d\_cc}$$

$$I_a = 0 \quad I_b = -j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_{d\_cc}} \quad I_c = j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_{d\_cc}}$$

#### IV.2.3.2 Court-circuit biphasé dans la barre 2

$$Z_d = Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = -j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}}$$

$$I_c = j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}}$$

#### IV.2.3.3 Court-circuit biphasé dans la barre 3

$$Z_d = Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = -j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}}$$

$$I_c = j \frac{\sqrt{3} V_d^p}{2 Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1} + Z_{d\_ligne\_2}}$$

### IV.2.4 Court-circuit biphasé terre

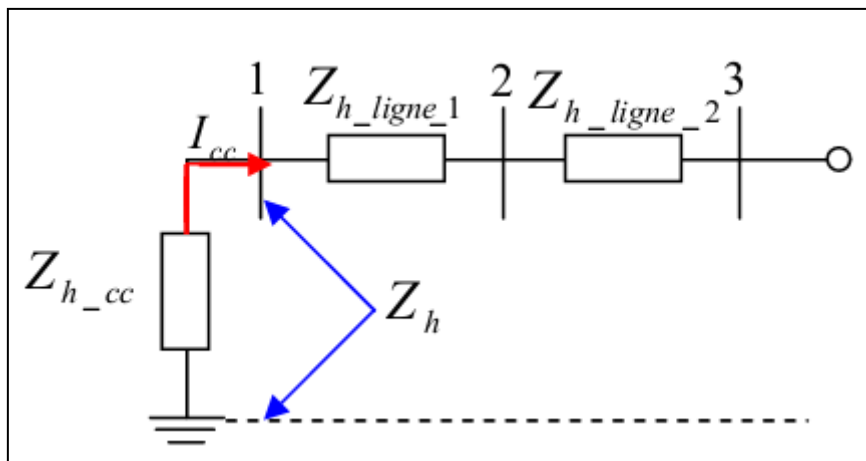
Le courant de court-circuit biphasé terre est donné par : [d'après (III.14), (III.15) et (III.16)]

$$I_a = 0$$

$$I_b = \sqrt{3} \cdot \frac{V_d^p (Z_h \cdot 1^{L-90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L-150^\circ})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_h \cdot Z_i}$$

$$I_c = \sqrt{3} \cdot \frac{V_d^p (Z_h \cdot 1^{L+90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L+150^\circ})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_h \cdot Z_i}$$

#### IV.2.4.1 Court-circuit biphasé terre dans la barre 1



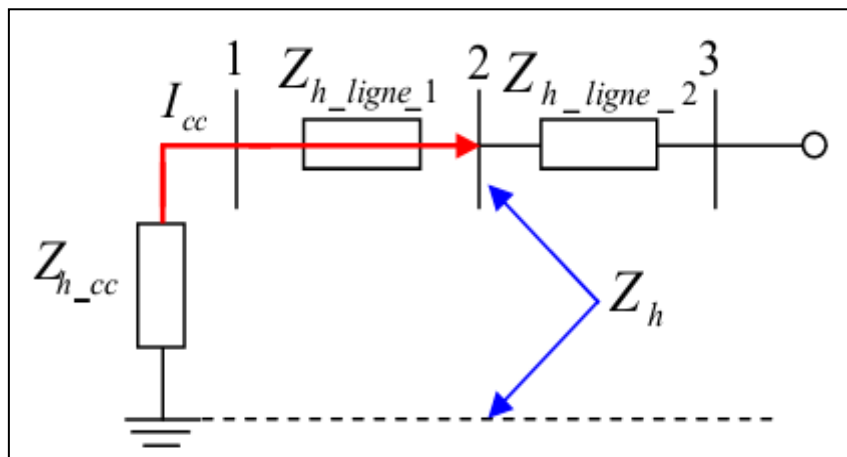
$$Z_h = Z_{h\_cc}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_{h\_cc} \cdot 1^{L-90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L-150^\circ})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_{h\_cc} + Z_{h\_cc} \cdot Z_i}$$

$$I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p (Z_{h\_cc} \cdot 1^{L+90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L+150^\circ})}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_{h\_cc} + Z_{h\_cc} \cdot Z_i}$$

IV.2.4.2 Court-circuit biphasé terre dans la barre 2



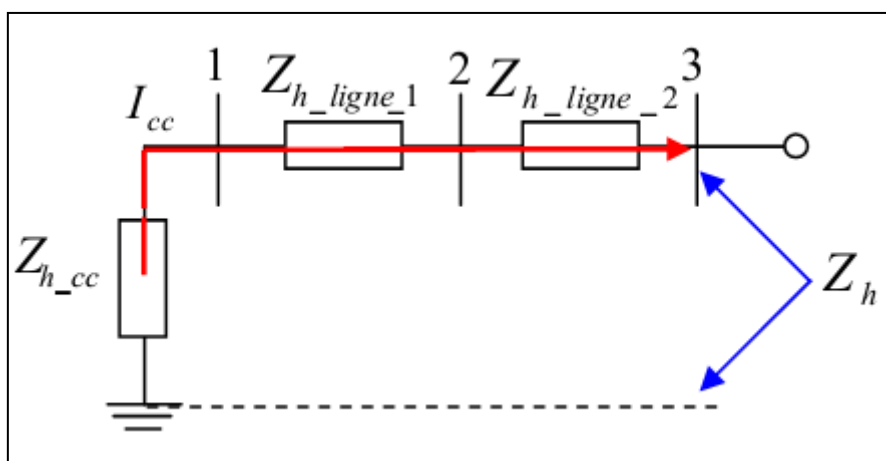
$$Z_h = Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p \{ (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}) \cdot 1^{L-90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L-150^\circ} \}}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}) + (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}) \cdot Z_i}$$

$$I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p \{ (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}) \cdot 1^{L+90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L+150^\circ} \}}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}) + (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1}) \cdot Z_i}$$

IV.2.4.3 Court-circuit biphasé terre dans la barre 3



$$Z_h = Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}$$

$$I_b = \sqrt{3} \frac{V_d^p \{ (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}) \cdot 1^{L-90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L-150^\circ} \}}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}) + (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}) \cdot Z_i}$$

$$I_c = \sqrt{3} \frac{V_d^p \{ (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}) \cdot 1^{L+90^\circ} + Z_i \cdot 1^{L+150^\circ} \}}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}) + (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1} + Z_{h\_ligne\_2}) \cdot Z_i}$$

Les impédances directe et inverse sont égales, et elles se déduisent de la même manière qu'un court-circuit triphasé.

### IV.2.5 Court-circuit monophasé

Le courant de court-circuit monophasé est donné par : [d'après (III.17)]

$$I_a = \frac{3V_d^p}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad I_b = I_c = 0$$

#### IV.2.5.1 Court-circuit monophasé terre dans la barre 1

$$I_a = \frac{3V_d^p}{2Z_{d\_cc} + Z_{h\_cc}}$$

Si le court-circuit s'effectue à travers une impédance  $Z_H$ , le courant sera :

$$I_a = \frac{3V_d^p}{2Z_{d\_cc} + Z_{h\_cc} + 3Z_H}$$

#### IV.2.5.2 Court-circuit monophasé terre dans la barre 2

$$I_a = \frac{3V_d^p}{2(Z_{d\_cc} + Z_{d\_ligne\_1}) + (Z_{h\_cc} + Z_{h\_ligne\_1})}$$

Si le court-circuit s'effectue à travers une impédance  $Z_H$ , le courant sera :

$$I_a = \frac{3V_d^p}{2(Z_{d_{cc}} + Z_{d_{ligne_1}}) + (Z_{h_{cc}} + Z_{h_{ligne_1}}) + 3Z_H}$$

### IV.2.5.3 Court-circuit monophasé terre dans la barre 3

$$I_a = \frac{3V_d^p}{2(Z_{d_{cc}} + Z_{d_{ligne_1}} + Z_{d_{ligne_2}}) + (Z_{h_{cc}} + Z_{h_{ligne_1}} + Z_{h_{ligne_2}})}$$

Si le court-circuit s'effectue à travers une impédance  $Z_H$ , le courant sera :

$$I_a = \frac{3V_d^p}{2(Z_{d_{cc}} + Z_{d_{ligne_1}} + Z_{d_{ligne_2}}) + (Z_{h_{cc}} + Z_{h_{ligne_1}} + Z_{h_{ligne_2}}) + 3Z_H}$$

### IV.2.6 Les résultats obtenus

Barre en court- circuit	$Z_d$		$Z_i$		$Z_h$	
	Mod[Ω]	Arg[deg]	Mod[Ω]	Arg[deg]	Mod[Ω]	Arg[deg]
<b>1</b>	<b>3.2</b>	<b>71.56</b>	<b>3.2</b>	<b>71.56</b>	<b>9.6</b>	<b>71.56</b>
<b>2</b>	<b>6.66</b>	<b>55.5</b>	<b>6.66</b>	<b>55.5</b>	<b>19.98</b>	<b>55.5</b>
<b>3</b>	<b>10.27</b>	<b>50.5</b>	<b>10.27</b>	<b>50.5</b>	<b>30.81</b>	<b>50.5</b>

**Tableau IV.1** : Différentes impédances vue par les barres.

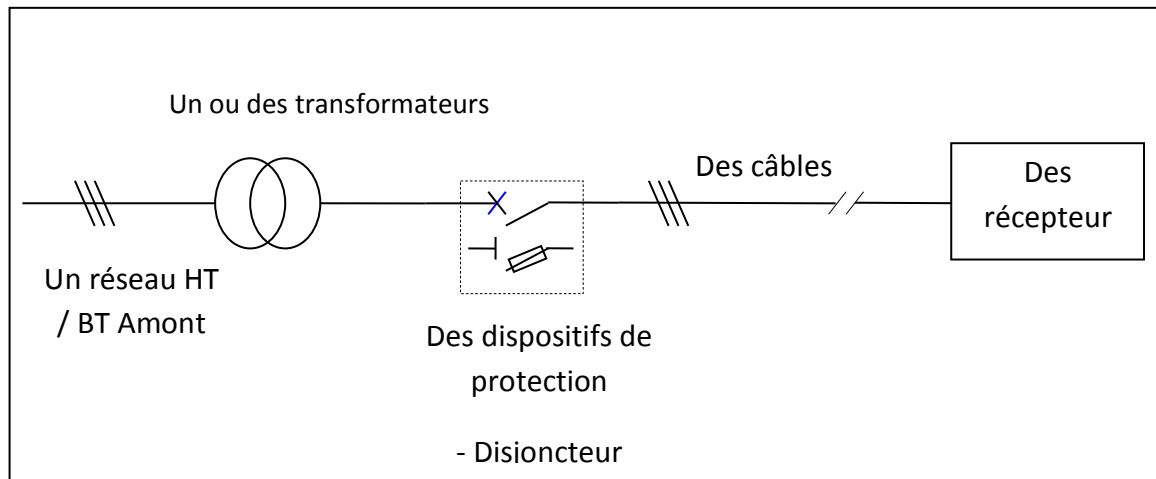
Types de court-circuit	Courant de court-circuit	Barre en court-circuit					
		1		2		3	
		Mod[ $\Omega$ ]	Arg[deg]	Mod[ $\Omega$ ]	Arg[deg]	Mod[ $\Omega$ ]	Arg[deg]
3 $\Phi$	Ligne 1	0	--	1733.8	-55.5	1124.3 4	-50.5
	Ligne 2	0	--	0	--	1124.3 4	-50.5
	I <sub>cc</sub> barre	3608	-71.8	1733.8	-55.5	1124.3 4	-50.5
2 $\Phi$	Ligne 1	0	--	1501.5	-55.5	973.7	-50.5
	Ligne 2	0	--	0	--	973.7	-50.5
	I <sub>cc</sub> barre	3125	-71.8	151.5	-55.5	973.7	-50.5
2 $\Phi$ – T	Ligne 1	0	--	1543	-20.6	1000.7	-25.6
	Ligne 2	0	--	0	--	1000.7	-25.6
	I <sub>cc</sub> barre	3211	-4.3	1543	-20.6	1000.7	-25.6
1 $\Phi$ – T	Ligne 1	0	--	1040	-55.5	674.6	-50.5
	Ligne 2	0	--	0	--	674.6	-50.5
	I <sub>cc</sub> barre	2165	-71.8	1040	-55.5	674.6	-50.5

Tableau IV.2 : Courant de court-circuit.

## IV.3 Détermination du courant de court-circuit par la méthode à base des tableaux et d'abaques

### IV.3.1 Introduction

Le schéma d'une distribution électrique comprend toujours :

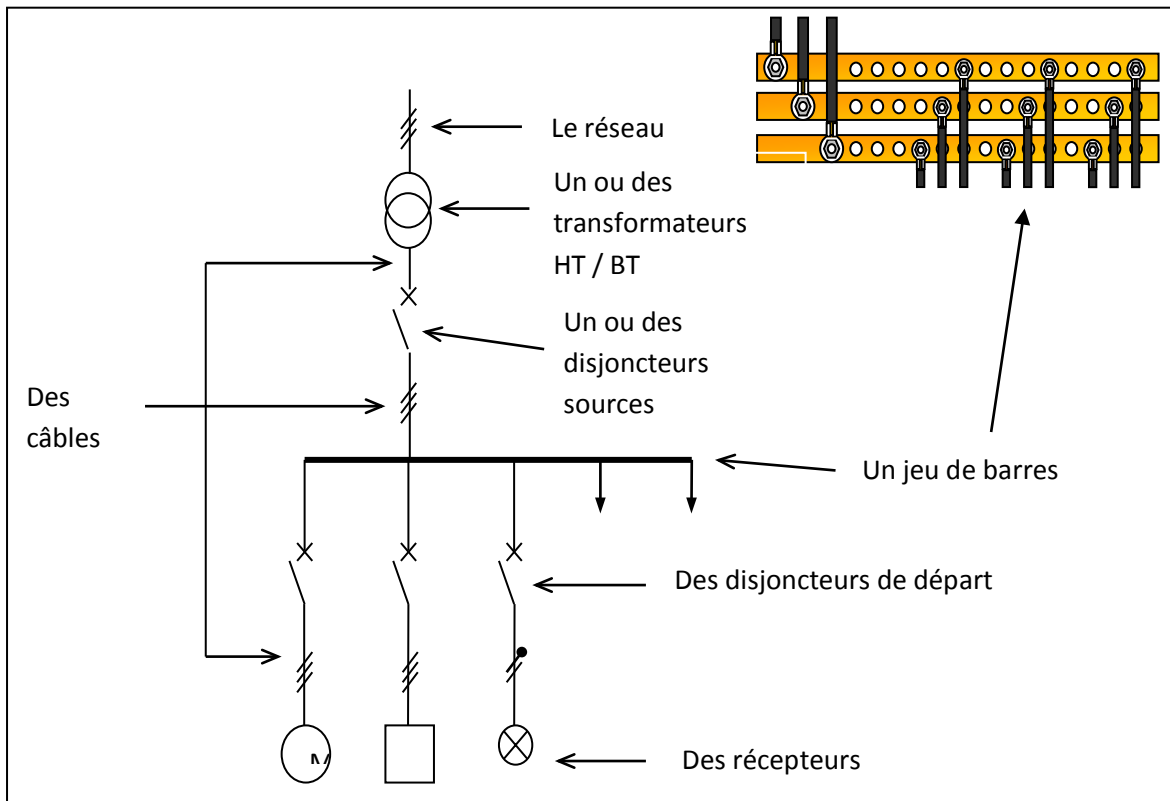


**Figure IV.2 : Schéma d'une distribution électrique**

Les dispositifs de protection sont chargés de protéger : les récepteurs, les câbles et le transformateur contre tout court-circuit qui aurait lieu en aval de l'endroit où il est placé.

### IV.3.2 Protection contre le courant de court-circuit maximal

La disposition d'un réseau de distribution de moyenne ou basse tension peut être généralisée selon le schéma ci-dessous dans lequel on retrouve toujours les éléments suivant :



**Figure IV.3 : La disposition d'un réseau de distribution de moyenne ou basse tension**

A chaque emplacement des dispositifs de protection correspond une valeur maximale du courant de court-circuit susceptible de se produire.

Dans tous les cas ce courant de court-circuit doit rester inférieur au pouvoir de coupure (PdC) de la protection.

### IV.3.2.1 Courants de court-circuit au secondaire d'un transformateur HT / BT

La valeur du courant de court-circuit au secondaire d'un transformateur est donnée par des tableaux (voir ci-dessous).

**Tableau I (transparent)**

$U_{20}$  = tension au secondaire à vide      Exemple n°2      Récapitulatif      Exemple n°2

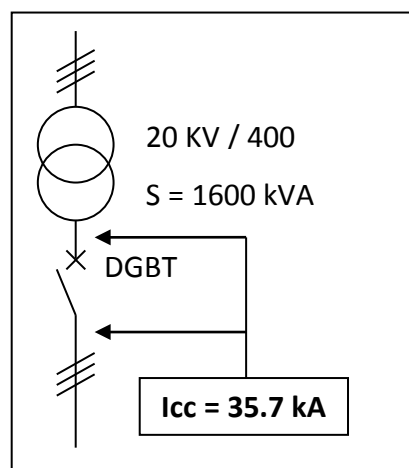
		Puissance du transformateur en KVA																			
		16	25	40	50	63	80	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
$U_{20} = 237\text{ V}$	$I_n\text{ (A)}$	39	61	97	122	153	195	244	390	609	767	974	1218	1535	1949	2436	3045	3899	4872	6090	7673
	$I_{cc}\text{ (A)}$	973	1521	2431	3038	3825	4853	6060	9667	15038	18887	23883	29708	37197	41821	42738	48721	57151	65840	76127	94337
$U_{20} = 410\text{ V}$	$I_n\text{ (A)}$	25	35	56	70	89	113	141	225	352	444	563	704	887	1127	1408	1760	2253	2816	3520	4435
	$I_{cc}\text{ (A)}$	563	879	1403	1756	2210	2803	3503	5388	8692	10917	13806	17173	21501	24173	27080	30612	35650	40817	46949	58136

En fonction de la puissance du transformateur on peut lire la valeur du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) au secondaire d'un transformateur.

### Exemple n°1

L'usine de la compagnie IBM France installée à Montpellier est alimentée par un transformateur HT / BT de 1600 kVA. La puissance de court-circuit du réseau EDF est  $S = 500$  MVA.

⇒ Que doit être le pouvoir de coupure du disjoncteur général placé juste en aval du secondaire du transformateur ?



A l'aide du tableau I, déterminons le courant de court-circuit au secondaire du transformateur.

On lit que pour une puissance  $S = 1600$  kVA et une tension BT de 400 V le  $I_{cc}$  est de 35650 A.

On peut estimer que le  $I_{cc}$  juste en dessous du DGBT est égal au  $I_{cc}$  au secondaire du transformateur. Donc le Pouvoir de coupure du DGBT doit être  $\geq 35650$  A.

#### IV.3.2.2 Courants de court-circuit à l'extrémité d'un câble

On connaît désormais le courant de court-circuit en tête d'installation (c'est le courant de court-circuit maximal).



**Remarques :**

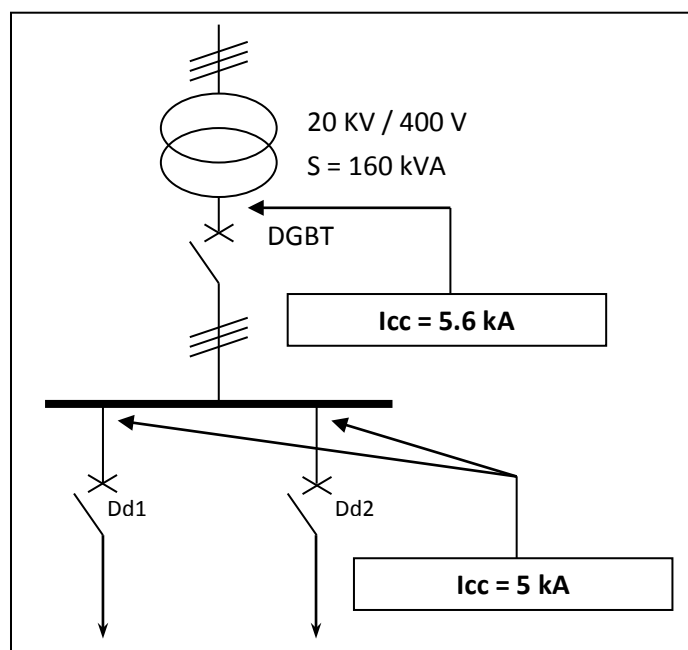
\* Si la longueur exacte de votre câble n'est pas dans le tableau il faut choisir Une longueur inférieure.

\* Si le réseau d'alimentation est en 230 V triphasé (230 V entre phases) Il faut diviser les longueurs du tableau par  $\sqrt{3} = 1.732$ .

**Exemple n°2**

L'usine HARIBO de Marseille est alimentée par un transformateur HT/BT de 160 KVA. On trouve au secondaire un disjoncteur général suivi d'un câble en cuivre de 120 mm<sup>2</sup> et d'une longueur de 80 m qui alimente le jeu de barres de distribution. La puissance de court-circuit du réseau EDF est  $S = 500$  MVA.

⇒ Déterminer le pouvoir de coupure minimum des disjoncteurs de "départ" (Dd1 et Dd2) placés juste en dessous du jeu de barres.



1. A l'aide du tableau I, déterminons le courant de court-circuit au secondaire du transformateur. (Comme dans l'exemple n°1)

$$S = 160 \text{ kVA} \Rightarrow I_{cc} = 5588\text{A}$$

$$I_{cc} = 5.6 \text{ kA}$$

2. A l'aide du tableau II, déterminons le courant de court-circuit au bout du câble de 80 m.

Cuivre	Section	Longueur de la canalisation
230 400		
	120	75
$I_{cc}$	$I_{cc}$ amont	Courant de court-circuit au niveau considéré
	7 kA	5 kA

Prendre la valeur juste au-dessus du  $I_{cc}$  calculé

Le PdC des disjoncteurs "départ" doit être  $\geq$  à 5 KA

### IV.3.3 Protection contre le courant de court-circuit minimal (en bout de ligne)

Dans le cas d'un défaut en bout de ligne, le disjoncteur ou le fusibles placés en amont doit "ouvrir" le circuit pour cette valeur de courant de court-circuit qui est minimal (puisqu'il a lieu loin de la source).

En utilisant la méthode à base de tableaux et d'abaques (vu précédemment), on ne prend pas en compte le calcul de ce courant de court-circuit minimal.

D'autres tableaux donnent, en fonction du calibre et du type pour un fusible, du type de courbe de déclenchement du disjoncteur, et de la section des conducteurs, les longueurs maximales des câbles triphasés 400 V protégés contre les courts-circuits.

Ces tableaux sont donnés. Ils ont été établis dans les conditions suivantes :

- Réseau triphasé 400 v,
- sans neutre et avec conducteur en cuivre

Lorsque les conditions d'utilisation sont différentes de celles précédemment énoncées ( $3 \times 400 \text{ V}$  en Cu), on applique des facteurs de correction ci-dessous.

**Tableau III**

Circuit	Tension	Longueur à multiplier par
3 Ph + N (avec $S_N = S_{Ph}$ )	230 / 400 V	K1 = <b>0.58</b>
3 Ph + N (avec $S_N = 0.5 \times S_{Ph}$ )	230 / 400 V	K1 = <b>0.77</b>
1 Ph + N (avec $S_N = S_{Ph}$ )	230 V	K1 = <b>0.58</b>
1 Ph + N (avec $S_N = 0.5 \times S_{Ph}$ )	230 V	K1 = <b>0.77</b>
2 Ph	400 V	K1 = <b>0.86</b>

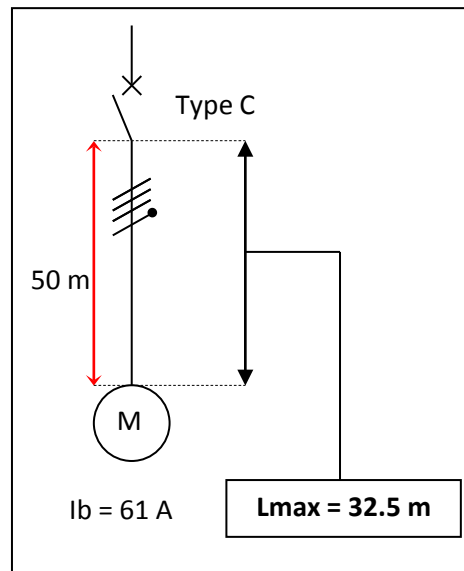
Lorsque les conducteurs sont en **aluminium** on multiplie (en plus de K1 si il est nécessaire) par un facteur K2.

Conducteur en <b>aluminium</b> protégé par un <b>fusible</b>	K2 = <b>0.41</b>
Conducteur en <b>aluminium</b> protégé par un <b>disjoncteur</b>	K2 = <b>0.62</b>

### Exemple n°3

On trouve dans l'un des ateliers de l'usine LAFARGE de Marseille un moteur asynchrone triphasé dont le courant nominal est de 61 A. Ce moteur se trouvant à une distance de 50 m est protégé par un disjoncteur de type C. Le réseau est un  $3 \times 400 \text{ V} + \text{N} + \text{T}$  et le câble d'alimentation comporte 5 conducteurs ayant tous une section de  $6 \text{ mm}^2$ .

⇒ Vérifier que le circuit est bien protégé contre les courants de court-circuit minimaux. Conclure.



1. A l'aide du tableau VII, déterminons la longueur maximale protégé par le disjoncteur de type C.

$$\left. \begin{array}{l} S_{Ph} = SN = 6 \text{ mm}^2 \\ \text{Disjoncteur de type C} \\ \text{Courant assigné} = 63 \text{ A} \end{array} \right\} L_{\max} \text{ avant correction} = 56 \text{ m}$$

2. Mais il faut multiplier cette longueur par 0.58 cars le neutre est distribué (réseau  $3 \times 400 \text{ V} + \text{N}$ ).

$$L_{\max} \text{ après correction} = 56 \times 0.58 = 32.48 \text{ m}$$

**Conclusion :** Le circuit n'est pas protégé contre les courts-circuits en bout de ligne.

### Solutions :

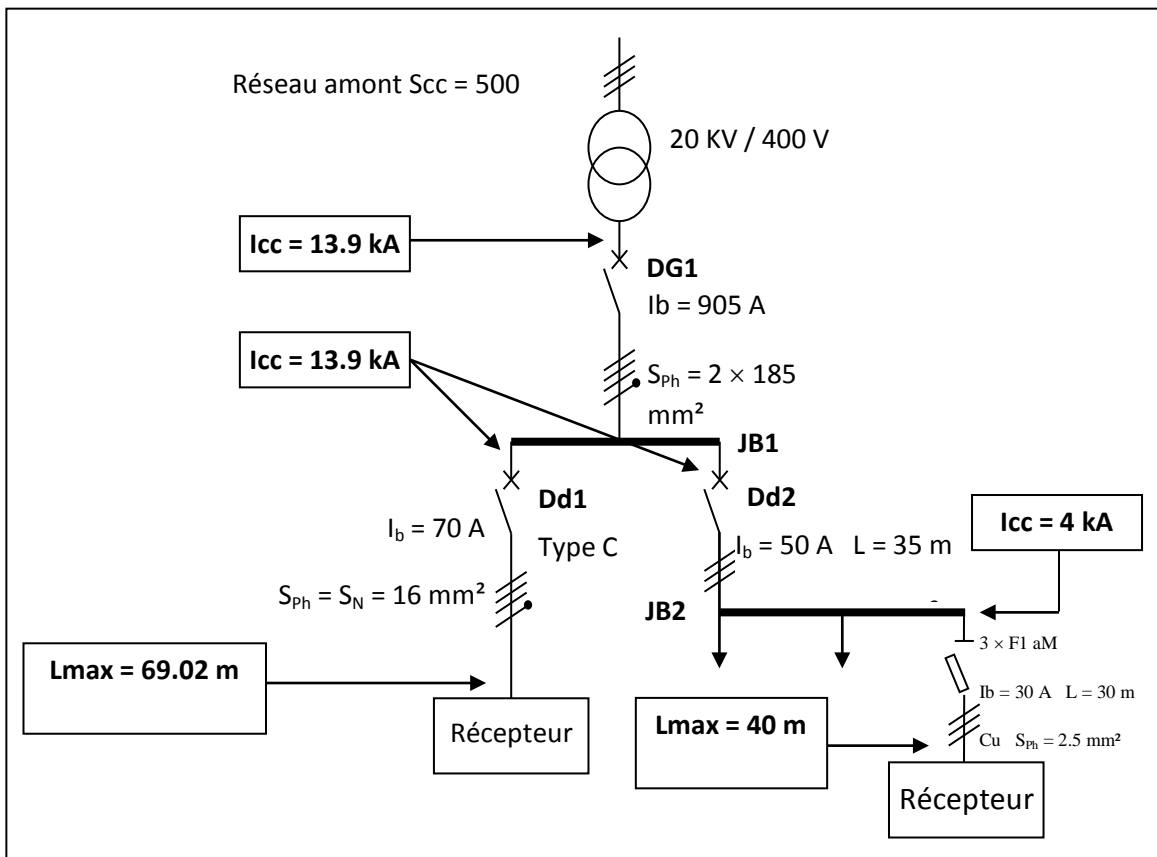
- On pourrait augmenter la section de câble jusqu'à  $10 \text{ mm}^2$  ( $94 \times 0.58 = 54.52 \text{ m}$ ),
- Ou on pourrait prendre un disjoncteur de type B si le récepteur le permet. ( $113 \times 0.58 = 65.54 \text{ m}$ ).

## Exercice récapitulatif

Une entreprise de La Ciotat est alimentée en basse tension  $3 \times 400 \text{ V}$  par un transformateur de puissance apparente de 400 kVA. Une partie du schéma de l'installation vous est donnée ci-dessous.

⇒ Déterminer le pouvoir de coupure minimum des différents disjoncteurs de "départ" (ne pas tenir compte des jeux de barres).

⇒ Vérifier que le disjoncteur Dd1 et que le fusible F1 protègent bien les lignes contre les courts circuits minimaux et conclure.



1. A l'aide du tableau I, déterminons le courant de court-circuit au secondaire du transformateur.

$$S = 400 \text{ kVA} \Rightarrow I_{cc} = 13806 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 13.9 \text{ kA}$$

2. A l'aide du tableau II, déterminons le courant de court-circuit au niveau du Jeu de barres n°1.

$$\text{On trouve un } I_{cc} \text{ aval de } 13 \text{ kA}$$

$$I_{cc} = 13 \text{ kA}$$

3. A l'aide du tableau II, déterminons le courant de court-circuit au niveau du Jeu de barres n°2.

On trouve un  $I_{cc}$  aval de 4 kA       $I_{cc} = 4 \text{ kA}$

4. A l'aide du tableau VII, vérifions que le disjoncteur Dd1 protège bien la ligne contre les courts-circuits minimaux en bout de ligne.

$L_{max} = 119 \times 0.58 = 69.02 \text{ m} < 80 \text{ m}$       **Le circuit n'est pas protégé**

**1<sup>ère</sup> solution :**

Augmenter la section des câbles à 25 mm<sup>2</sup> →  $L_{max} = 185 \times 0.58 = 107.3 \text{ m}$

**2<sup>ème</sup> solution :**

Utiliser un disjoncteur de type B →  $L_{max} = 237 \times 0.58 = 137.46 \text{ m}$

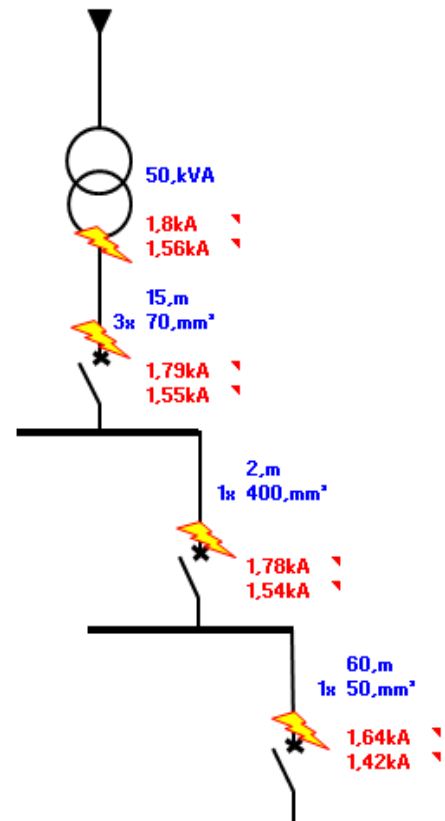
5. A l'aide du tableau IV, vérifions que les fusibles F1 protègent bien la ligne contre les courts-circuits minimaux en bout de ligne.

$L_{max} = 40 \text{ ou } 49 \text{ m}$       Que l'isolant soit du PVC ou du PR, le circuit est protégé

### IV.4 Détermination du courant de court-circuit par un logiciel

Calcul du courant de court-circuit par la méthode des impédances

<b>Source</b>	
Puissance de court-circuit du réseau haute tension en MVA	500, MVA
<b>Transformateur</b>	
Puissance assignée du transformateur	50, kVA
Type de refroidissement du transformateur	Immergé
Tension nominal entre phases de l'installation	400, V
<b>Niveau protection transformateur</b>	
Longueur de la canalisation en m	15, m
Section des conducteurs de phase	3x 70, mm <sup>2</sup>
Nature de l'âme conductrice	Aluminium
Nombre de conducteurs en parallèle par phase	3
Type de canalisation	En nappe
<b>Niveau IGBT</b>	
Longueur de la canalisation en m	2, m
Section des conducteurs de phase	1x 400, mm <sup>2</sup>
Nature de l'âme conductrice	Cuivre
Nombre de conducteurs en parallèle par phase	1
Type de canalisation	En barres
<b>Niveau coffret divisionnaire</b>	
Longueur de la canalisation en m	60, m
Section des conducteurs de phase	1x 50, mm <sup>2</sup>
Nature de l'âme conductrice	Cuivre
Nombre de conducteurs en parallèle par phase	1
Type de canalisation	En tréfle



## Résultats des calculs du courant de court-circuit

### Niveau source

Un en V	400, V	$Zq = \frac{(m \cdot Un)^2}{Skq}$
Skq en MVA	500	
Rq en mΩ	0,035	$Xq = 0.995 \cdot Zq$
Xq en mΩ	0,351	
Zq en mΩ	0,353	$Rq = 0.100 \cdot Xq$

### Niveau transformateur

Un en V	400, V	IK3 max	1,8kA	$Zt = \frac{(m \cdot Un)^2}{St} \cdot \frac{Ucc}{100}$
Ucc en %	4, %	IK2/IK1 max	1,56kA	
St en KVA	50, kVA	ΣR en mΩ	43,782	$Xt = 0.95 \cdot Zt$
Rt en mΩ	43,75	ΣX en mΩ	134,42	
Xt en mΩ	134,06	Z en mΩ	141,366	$Rt = 0.31 \cdot Zt$
Zt en mΩ	141,12			

### Niveau protection transformateur

Longueur en m	15, m	IK3 max	1,79kA	$Zc1 = \sqrt{Rc^2 + Xc^2}$
Section en mm <sup>2</sup>	70, mm <sup>2</sup>	IK2/IK1 max	1,55kA	
Nbr de conducteurs	3	ΣR en mΩ	45,882	$Xc1 = \lambda \cdot \frac{L}{Nph}$
ρ en Ω mm <sup>2</sup> /m	0,0294	ΣX en mΩ	134,87	
λ en mΩ	0,090	Z en mΩ	142,456	$IK3 = \frac{c.m. \cdot Un}{Z \cdot \sqrt{3}}$
Rc1 en mΩ	2,100			$Rc1 = \rho \cdot \frac{L}{S \cdot Nc}$
Xc1 en mΩ	0,450			
Zc1 en mΩ	2,148			$IK2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot IK3 \max$

### Niveau TGBT

Longueur en m	2, m	IK3 max	1,78kA	$Zc2 = \sqrt{Rc^2 + Xc^2}$
Section en mm <sup>2</sup>	400, mm <sup>2</sup>	IK2/IK1 max	1,54kA	
Nbr de conducteurs	1	ΣR en mΩ	45,975	$Xc2 = \lambda \cdot \frac{L}{Nph}$
ρ en Ω mm <sup>2</sup> /m	0,0185	ΣX en mΩ	135,17	
λ en mΩ	0,150	Z en mΩ	142,770	$IK3 = \frac{c.m. \cdot Un}{Z \cdot \sqrt{3}}$
Rc2 en mΩ	0,093			$Rc2 = \rho \cdot \frac{L}{S \cdot Nc}$
Xc2 en mΩ	0,300			
Zc2 en mΩ	0,314			$IK2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot IK3 \max$

### Niveau coffret divisionnaire

Longueur en m	60, m	IK3 max	1,64kA	$Zc3 = \sqrt{Rc^2 + Xc^2}$
Section en mm <sup>2</sup>	50, mm <sup>2</sup>	IK2/IK1 max	1,42kA	
Nbr de conducteurs	1	ΣR en mΩ	68,187	$Xc3 = \lambda \cdot \frac{L}{Nph}$
ρ en Ω mm <sup>2</sup> /m	0,0185	ΣX en mΩ	139,97	
λ en mΩ	0,080	Z en mΩ	155,691	$IK3 = \frac{c.m. \cdot Un}{Z \cdot \sqrt{3}}$
Rc3 en mΩ	22,212			$Rc3 = \rho \cdot \frac{L}{S \cdot Nc}$
Xc3 en mΩ	4,800			
Zc3 en mΩ	22,725			$IK2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot IK3 \max$

<i>Puissance en kVA du transformateur triphasé immergé dans l'huile (410 v)</i>										
	50	100	160	250	400	630	800	1000	1250	1600
In (A)	70	141	225	352	563	887	1127	1408	1760	2253
Icc (kA)	1,76	3,5	5,59	8,69	13,81	21,5	18,29	22,71	28,16	35,65
Ucc (%)	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6
Perte cuivre	1,35	2,15	2,35	3,25	4,6	6,5	10,7	13	16	20

<i>Puissance en kVA du transformateur triphasé enrobé TRIHAL (410 v)</i>										
	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250
In (A)	141	225	352	444	563	704	887	1127	1408	1760
Icc (kA)	2,34	3,74	5,82	7,32	9,2	11,54	14,48	18,29	22,71	28,14
Ucc (%)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Perte cuivre	2,05	2,7	3,6	4,6	5,5	6,5	7,8	9,4	11	13,1

## IV.5 Conclusion

La détermination du courant de court-circuit se fait par :

- Le calcul : en utilisant les formules obtenues à partir des deux méthodes.
- Les abaques et les tableaux.
- Les logiciels.

Dans la première partie on a appliqué la méthode des composantes symétriques sur un réseau proposé.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion générale

Ce travail décrit les courants de court-circuit, leurs effets sur les réseaux et leurs interactions sur les matériels.

Il donne également l'approche méthodologique pour calculer les courants de courts-circuits, et indique les formules essentielles.

Pour cela, on a dans une première étape donné des généralités sur les réseaux électriques, leurs types, et les problèmes survenant dans ces réseaux.

On a aussi donné une définition au court-circuit, ses causes et ses effets, avec ses catégories.

On a effectué en seconde étape le calcul en considérant les différents paramètres des éléments du réseau conforme à la méthode utilisée. Le calcul analytique pour déterminer les courants de court-circuit est possible.

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. Le choix de la méthode dépend :

- Des courants dont la connaissance est nécessaire (courts-circuits maximaux, courts-circuits minimaux, courants de défaut),
- Des caractéristiques connues de l'alimentation et des différents paramètres,
- De l'importance de l'installation,
- Des moyens de calcul dont le concepteur ou l'installateur peut disposer.

Il existe plusieurs méthodes de calcul des courants de court-circuit triphasés symétriques. Parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode des impédances.
- Méthodes des composantes symétriques.

Ces méthodes de calcul permettent de déterminer les caractéristiques de chaque circuit d'une installation et ses conditions de protection.

L'impact de ce calcul a pour objectif d'améliorer la sécurité et les protections des équipements des réseaux électriques et la fiabilité des réseaux. Il vise l'augmentation de la capacité de fonctionnement du matériel de protection et la réduction du taux des défauts techniques des réseaux.

# **BIBLIOGRAPHIE**

**Bibliographie :**

- [01] P. Bornard & M. Pavard, « Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et fonctionnement », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique D 4090, 1993.
- [02] Mediazza Med Lamin & Saïdani Nabil, « La maintenance des réseaux électriques MT », Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique option Maintenance, Université de Batna, 2011.
- [03] Siemens, « Power engineering guide: Transmission and Distribution », 4<sup>th</sup> Edition, 2005.
- [04] J.M. Delbarre, « Postes à HT et THT : Rôle et structure », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique D 4570, 2004.
- [05] Schneider Electric, « Architecture de réseau de distribution », 2007.
- [06] Groupe Sonelgaz, « Guide technique de distribution », Document technique de Groupe SONELGAZ, 1984.
- [07] Rachida Haimour, « Contrôle des puissances réactives et des tensions par des dispositifs facts dans un réseau électrique », Mémoire de Magister, ENSET Oran, 2009.
- [08] Foued Kouadra, « Étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [09] B. Belmessaoud & T. Mahni, « Évaluation de la stabilité statique en tension utilisant la méthode de load flow continu », Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, ENP, Juin 2009.
- [10] Michel Crappe, « Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques », Lavoisier, 2006.
- [11] Benoît de Metz-Noblat, Frédéric Dumas & Christophe Poulain, « Calcul des courants de court-circuit », Cahier technique 158, Schneider Electric, 2005.
- [12] Mladen Kezunovic, « Fundamentals of power system protection », Academic Press, 2005.

- [13] A.H Knable, "Electrical power systems engineering: Problems and solutions", McGraw-Hill, 1967.
- [14] R. Pelissier, « Les réseaux d'énergie électrique (2ème partie) », Dunod, 1974.
- [15] Jean-Paul Barret, « Simulation des réseaux électrique ». Edition Eyrolles, 1997.
- [16] Nadir Ghanemi, « Etude de la tenue aux courant de court-circuit pour le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mentouri, Constantine, 2008.
- [17] Labeled Djamel, « Production décentralisée et couplage au réseau », Mémoire de Doctorat en Electrotechnique, Université de Mentouri, Constantine, 2008.
- [18] D. Beeman, « Industrial power systems handbook », Edition McGraw-Hill, 1999
- [19] C. Russell Mason, « The art and science of protective relaying », New York, 1956.
- [20] C. Claude & D. Pierre, « Protection des réseaux de transport et de répartition », Direction de la Production et du Transport d'Electricité (EDF), Octobre 2005.
- [21] C. prévé, « Protection des réseaux électriques », Edition Hermes, Paris, 1998.
- [22] A. Greenwood, "Electrical transients in power systems", 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley, Avril 1991.
- [23] Zellagui Mohamed, « Etude des protections des réseaux électriques MT (30 & 10 kv) », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Mentouri, Constantine, 2010.
- [24] Muhammad H. Rashid, « Protective relaying principles and applications », 3<sup>rd</sup> Edition, Taylor & Francis Group, LLC, Advisory Editor, University of West Florida Pensacola, Florida, 2006.
- [25] Merlin Gerin, « Protection des réseaux électrique », Guide de la protection 2002.

[26] Christian Puret, « Les réseaux de distribution publique MT dans le monde », Cahier technique Merlin Gerin No. 155, 1991.

[27] « Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif », CEI 60909.

[28] B. De Metz-Noblat, « Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques », Cahier Technique n°18, Schneider Electric.