



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
UNIVERSITE ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI - TEBESSA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



DOMAINE DE FORMATION : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

# Support de Cours

## Réseaux Electriques

**Dr. BOUKADOUM Aziz**

<b>Filière</b>	<b>Electrotechnique</b>
<b>Spécialité</b>	<b>Electrotechnique</b>
<b>Niveau</b>	<b>Licence 3<sup>émé</sup> Electrotechnique</b>

**Année universitaire : 2021/2022**

**Semestre: 5**  
**Unité d'enseignement: UEF 3.1.1**  
**Matière 1: Réseaux Electriques**  
**VHS: 67h30 (Cours: 3h00, TD: 1h30)**  
**Crédits: 6**  
**Coefficient: 3**

**Objectifs de l'enseignement:**

Donner un aperçu sur la gestion et le dimensionnement du réseau d'énergie électrique (transport et distribution).

**Connaissances préalables recommandées:**

Cours de base d'électrotechnique fondamentale (électricité et circuit, champ électrique et magnétique, puissance, régime triphasé, alternateur, moteur, transformateur).

**Contenu de la matière:**

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

**(1 semaine)**

- Organisation du réseau électrique
- Centrales électriques
- Postes électriques (transformateurs de puissance, transformateurs de mesure (courant et tension), disjoncteurs, sectionneurs, Autres appareillage d'un poste,...)
- Autres éléments du réseau (supports, câbles conducteurs, lignes aériennes, lignes souterraines, câbles de garde, jeux de barres, isolateurs) ; Centre de dispatching.

**Chapitre II : Modes de transport, répartition et distribution de l'énergie électrique (2 semaines)**

- Description des réseaux électriques (structure des réseaux électriques, Niveau de tension) ;
- Topologie des réseaux électriques (postes sources HT/MT, réseaux MT, postes HTA/BT, réseaux BT).

**Chapitre III : Modélisation des lignes électriques**

**(5 semaines)**

- Caractéristiques longitudinales (résistance, réactance longitudinale, notion de rayon moyen géométrique et distance moyenne géométrique) ;
- Caractéristiques transversales (réactance transversale, conductance dû à l'effet couronne) ;
- Calcul des réseaux électriques (Equations générales de fonctionnement, Circuits équivalents, Calcul de la chute de tension, Effet FERRANTI) ;
- Puissance transmises et compensation du facteur de puissance dans les lignes.

**Chapitre IV : Transformateurs et système d'unité relative**

**(2 semaines)**

- Rappels (transformateurs monophasé et triphasé, modélisation et détermination des paramètres du transformateur, couplage des transformateurs (différents modes, choix du couplage)) ;
- Mise en parallèle des transformateurs triphasés (intérêt, conditions, indice horaire) ;
- Principaux types de transformateurs (mesure de courant, mesure de tension, régleur en charge, déphaseur, à trois enroulements et autotransformateur) ;
- Système d'unité relative (grandeurs de base (puissance, tension, impédance), choix de la base, Changement de base).

**Chapitre V : Calcul des courants de court-circuit**

**(5 semaines)**

- Calcul des courants de court-circuit (causes, conséquences, différents types, notion de court circuit symétrique et asymétrique, ...) ;
- Calcul des courants de court-circuit à l'aide des composantes symétriques (méthode des composantes symétriques, construction de réseaux séquentiels,...) ;
- Impédances équivalentes des éléments du réseau.

### **Avant-propos**

Cours de réseaux électriques est un support de cours destiné aux étudiants en troisième année Licence électrotechnique, il est structuré en cinq (05) chapitres complétés par des travaux dirigés conformément au contenu du programme de réseaux électriques.

Dans **le premier chapitre** on commence par des généralités sur les réseaux électriques ; Organisation du réseau électrique ; Centrales électriques ; Postes électriques (transformateurs de puissance, transformateurs de mesure (courant et tension), disjoncteurs, sectionneurs, Autres appareillage d'un poste,...) ; Autres éléments du réseau (supports, câbles conducteurs, lignes aériennes, lignes souterraines, câbles de garde, jeux de barres, isolateurs) ; Centre de dispatching.

**Le deuxième chapitre** nous présenterons les modes de transport, répartition et distribution de l'énergie électrique ; Description des réseaux électriques (structure des réseaux électriques, Niveau de tension) ; Topologie des réseaux électriques (postes sources HT/MT, réseaux MT, postes HTA/BT, réseaux BT) .

**Le troisième chapitre** se focalisera essentiellement sur les lignes électriques : La modélisation des lignes électriques ; Caractéristiques longitudinales (résistance, réactance longitudinale, notion de rayon moyen géométrique et distance moyenne géométrique) ; Caractéristiques transversales (réactance transversale, conductance dû à l'effet couronne) ; Calcul des réseaux électriques (Equations générales de fonctionnement, Circuits équivalents, Calcul de la chute de tension, Effet FERRANTI) ; Puissance transmises et compensation du facteur de puissance dans les lignes.

**Le quatrième chapitre** sera réservé à l'étude des transformateurs et système d'unité relative : Rappels (transformateurs monophasé et triphasé, modélisation et détermination des paramètres du transformateur, couplage des transformateurs (différents modes, choix du couplage)) ; Mise en parallèle des transformateurs triphasés (intérêt, conditions, indice horaire) ; Principaux types de transformateurs (mesure de courant, mesure de tension, régleur en charge, déphaseur, à trois enroulements et autotransformateur) ; Système d'unité relative (grandeurs de base (puissance, tension, impédance), choix de la base, Changement de base).

**Le cinquième chapitre:** nous présenterons une étude sur le calcul des courants de court-circuit (causes, conséquences, différents types, notion de court circuit symétrique et asymétrique, ...); Calcul des courants de court-circuit à l'aide des composantes symétriques (méthode des composantes symétriques, construction de réseaux séquentiels,...); Impédances équivalentes des éléments du réseau.

SOMMAIRE	
Avant propos	
Sommaire	
Introduction générale	
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES</b>	
1.1 Introduction	10
1.2 Organisation du réseau électrique	10
1.3 Centrales électriques	11
1.3.1 Centrales thermiques	13
1.3.2 Centrales nucléaires	14
1.3.3 Centrales hydroélectriques	14
1.3.4 Centrales solaires ou photovoltaïques	14
1.3.5 Centrales éoliennes	15
1.4 Types de réseaux électriques	15
1.5 Postes électriques	16
1.5.1 Transformateurs de puissance	17
1.5.2 Transformateurs de mesure de courant et de tension	17
1.5.3 Disjoncteurs	18
1.5.4 Sectionneurs	18
1.5.4 Jeux de barres	18
1.5.5 Isolateurs	19
1.5.6 Autres appareillage d'un poste	20
1.5.6.1 Parafoudres	20
1.5.6.2 Eclateurs	21
1.5.6.3 Supports	22
1.5.6.4 Câbles conducteurs	22

1.5.6.4.1 Lignes aériennes	22
1.5.6.4.2 Lignes souterraines	22
1.5.6.4.3 Câbles de garde	23
1.5.6.4.4 Centre de dispatching (centre de conduite réseau)	23
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>MODES DE TRANSPORT, REPARTITION ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE</b>	
2.1 Description des réseaux électriques (structure des réseaux électriques, Niveau de tension)	25
2.1.1 Réseaux hiérarchisés selon des normes	26
2.1.2 Gamme des tensions utilisées par le groupe SNELGAZ	26
2.3.3 Niveaux de tension d'alimentation en fonction de la puissance souscrite	27
2.3 Structure générale d'un réseau privé de distribution	27
2.4 Topologie des réseaux électriques	29
2.5 Types des postes	30
2.5.1 Équipements d'un poste	31
2.6 Architectures des postes	32
2.6.1 Qualités recherchées d'un poste	33
2.6 Postes sources HT/MT	37
2.6.1 Réseaux MT	37
2.6.1.1 Réseaux MT souterrains	38
2.7 Postes HTA/BT	38
2.7.1 Poste sur poteau	41
2.7.2 Poste bas simplifié sous capot	41
2.7.2 Poste de type urbain raccordé en souterrain	
2.7.3 Réseaux BT	42
2.7.3.1 Alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation	42
2.7.3.2 Alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage	43
2.8 Réseaux ruraux	43
2.9 Remarques importantes	44

2.9 Exercices de chapitre 2	44
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>MODELISATION DES LIGNES ELECTRIQUES</b>	
3.1 Introduction	48
3.2 Paramètres d'un ligne électrique	48
3.2.1 Les paramètres longitudinaux	48
3.2.1.1 La résistance de la ligne	38
3.2.1.2 Inductance de la ligne	48
3.2.1.2.1 Inductance d'un conducteur	50
3.2.1.2.2 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant	53
3.2.1.2.3 Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés	55
3.2.1.2.4 Inductance des lignes triphasées	55
3.2.1.2.5 Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux	55
3.2.1.2.6 Inductance linéique d'une ligne triphasée à deux ternes	55
3.2.2 Les paramètres transversaux	55
2.2.2.1 Conductance	55
3.2.2.2 La capacité de la ligne	59
3.2.2.2.1 Capacité d'une ligne monophasée	59
3.2.2.2.2 Capacité d'une ligne triphasée	59
2.2.2.2.3 capacité des conducteurs en faisceaux	59
3.2.2.2.4 Effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée	82
3.3 Ligne de transport d'énergie électrique	82
3.4 Type de ligne:	62
3.4.1 Ligne courtes	65
3.4.2 Ligne moyenne	65
3.4.3 Ligne longue	67
3.5 Exercices de chapitre 3	69
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>TRANSFORMATEURS ET SYSTEME D'UNITE RELATIVE</b>	

4.1 Introduction	70
4.2 Transformateur monophasé parfait	70
4.3 Equation d'un transformateur monophasé	71
4.5 Transformateur triphasé	72
4.5.1 Grandeurs nominales et autres caractéristiques:	72
4.6 Modélisation du transformateur	
4.8 Couplages usuels des transformateurs triphasés	74
4.9 Choix du couplage	93
4.10 Détermination des paramètres du transformateur.	95
4.12 Indice horaire de couplage	77
4.14 Mise en parallèle des transformateurs triphasés	79
4.14. 1 Conditions à satisfaire pour coupler des transformateurs	80
4.15 Transformateurs spéciaux	82
4.15.1. Transformateur de mesure de courant	82
4.15.3. Transformateurs avec régleur en charge	83
4.15.4 Autotransformateur	85
4.15.6 Transformateur déphaseur	86
4.16 Système d'unité relative (pu)	87
4.16.1 Impédance et admittance de base	88
4.16.2 Changement de base	88
4.17 Exercices chapitre 4	89
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT</b>	
5.1 Introduction	91
5.2 Les défauts électriques	92
5.3 Caractéristiques des défauts monophasés	91
5.4 Les effets des défauts	92
5.4 Composantes symétriques	93
5.5 Transformation des composantes symétriques	94
5.7 Court-circuit monophasé	99
5.10 Court-circuit biphasé	102
5.11 Court-circuit biphasé terre	103



5.12 Court-circuit triphasé	104
5.13 Exercice du chapitre 5	105
<b>Conclusion générale</b>	108
<b>Références</b>	109

## INTRODUCTION GENERAL

Depuis l'antiquité, l'énergie est sans doute une nécessité incontournable de tous les besoins de l'homme. Cette énergie est utilisée sous diverses formes parmi lesquelles la forme électrique. L'énergie électrique, produite dans des centrales thermiques, nucléaires, hydrauliques,...., doit être transportée et distribuée grâce à un réseau électrique hautement planifié. Ce transport d'énergie électrique peut se faire par deux voies de transmission à savoir : la voie aérienne et la voie souterraine.

Les lignes de transport de l'énergie électrique sont devenues une partie importante de la société moderne. Elles transportent l'énergie électrique dans les foyers et les entreprises. La vie ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui sans cet important système. La ligne de transport de l'énergie électrique se compose à la fois de composantes électriques et structurales. Dans la conception de lignes de transmission électrique, les charges verticales induites par la gravité et les charges transversales induites par le vent sont les deux plus importantes charges à prendre en considération.

Cependant, la construction d'une ligne électrique aérienne assurant le transport de l'énergie n'est pas une chose facile car dépendant de beaucoup de paramètres tels que la puissance à transporter, la tension en ligne, la distance sur laquelle s'effectue le transport, ceux-ci imposent des choix et des calculs judicieux des matériaux et éléments entrant dans sa réalisation. Ces faits nous ont donc incités à des études plus approfondies plus précisément à la connaissance de tous ces paramètres pour faire les calculs nécessaires sur les lignes aériennes.

Le rôle fondamentale d'une ligne est de transporter l'énergie électrique. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute tension (HT) : type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante,

...etc. (que ce appelle dimensionnement à la modélisation par la description du système d'unités relatives, le calcul des courants de défauts (triphases, monophasé, biphasé et biphasé-terre) après avoir introduit la théorie des composantes symétriques. On discute également de la technique des composantes symétriques qui résolvent le problème d'un circuit déséquilibré en une solution de nombre de circuits équilibrés.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

## CHAPITRE I

### GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

#### 1.1 Introduction

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles 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.

#### 1.2 Organisation du réseau électrique

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques,... etc. avec les centres de consommation (villes, usines...etc.). L'énergie électrique est transportée en haute tension et/ou très haute tension pour limiter les pertes à effet Joule (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité du courant électrique), puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final.

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées (figure 1.1).

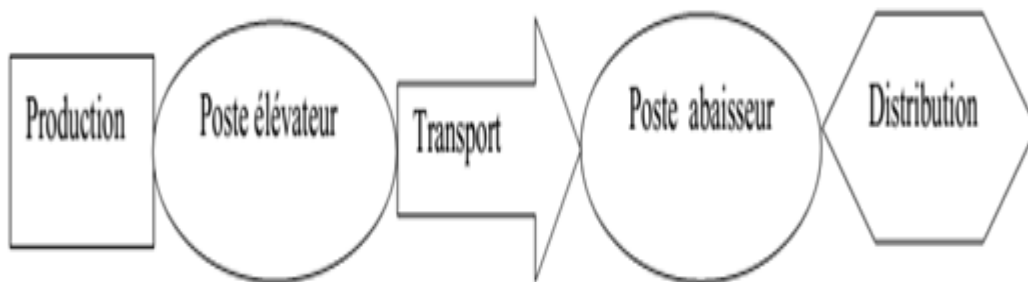


Figure 1.1 Structure générale d'un réseau électrique

*Le bloc production électrique*, regroupant l'ensemble des éléments des unités de production, tels que les alternateurs, les moteurs, les turbines,..., etc.

*Les blocs poste élévateur abaisseur* regroupant l'ensemble des éléments pouvant transformer l'énergie par changement de niveau de tension.

*Les blocs transport et distribution* regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie électrique vers les consommateurs. (Voir Figure 1.2).

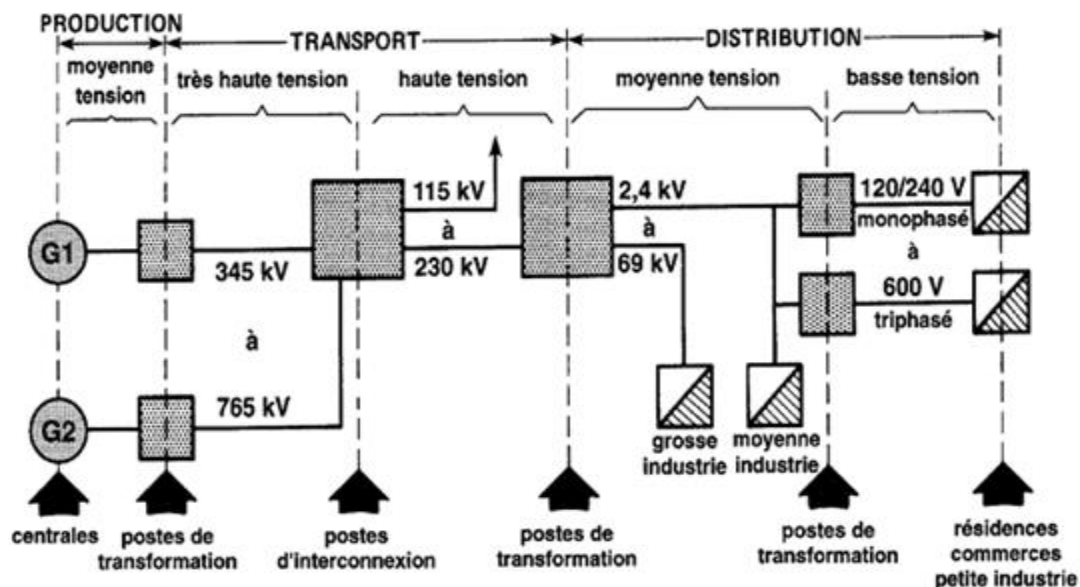


Figure 1.2 Organisation d'un réseau électrique

### 1.3 Centrales électriques

La production d'énergie électrique est assurée par des centrales électriques, ayant des alternateurs qui souvent, produisent des tensions et des courants électriques. Deux éléments de base qui constituent la majorité des centrales électriques sont :

#### Turbine

C'est un moyen qui convertit l'énergie d'un courant d'eau, de vapeur ou de gaz en énergie mécanique. Dans le domaine de la production on peut donner à titre d'exemple, Figure 1.3.



Figure 1.3 Turbine Pelton et Turbine à Vapeur

### Alternateur

C'est l'organe qui transforme l'énergie de la rotation en une énergie électrique. Figure 1.4. Généralement, l'alternateur fournit une ligne tri filaire (signal triphasé) dont les tensions sont des sinusoïdes déphasées de  $120^\circ$  et dont la valeur efficace est de 20kV. La fréquence des tensions est de 50Hz. Cette fréquence ( $f$ ) est fixée par la vitesse de rotation de la turbine ( $n$ ) et le nombre de pôles ( $P$ ) de l'alternateur selon la relation :

$$f = p.n \quad (1.1)$$

Avec :

$f$  : en Hz (Hertz)

$n$  : en trs/s (tours/seconde)



Figure 1.4. Alternateur

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- 1 Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- 2 les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- 3 les centrales hydroélectriques (hydraulique)
- 4 les centrales solaires ou photovoltaïques,
- 5 les centrales éoliennes.

### 1.3.1 Centrales thermiques

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. On les trouve souvent près des rivières, lac et mer, car une quantité importante d'eau est requise pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines.

La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière (voir figure I.5).

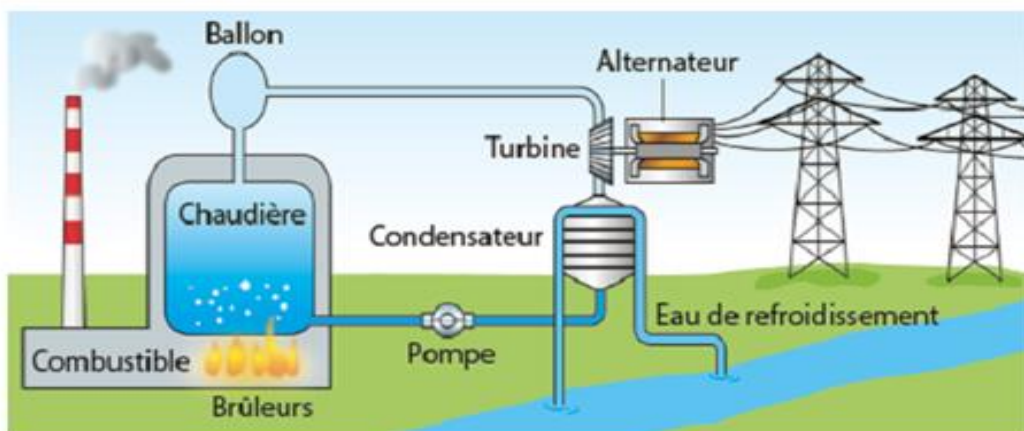


Figure 1.5 Centrale thermique à flamme

### 1.3.2 Centrales nucléaires

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire (figure I.6). L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident.

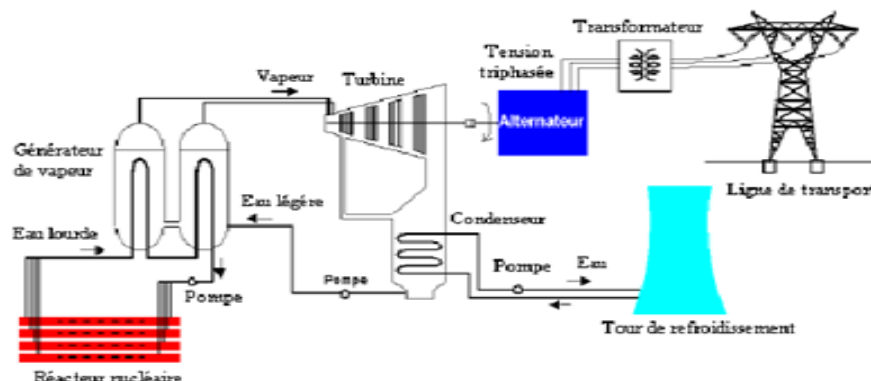


Figure 1.6 Centrale nucléaire

### 1.3.3 Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (figure I.7).

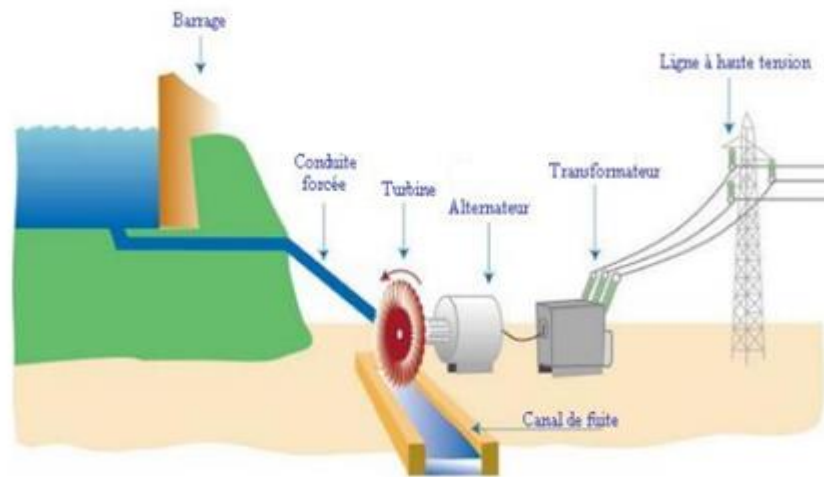


Figure 1.7 Centrale hydroélectrique

### 1.3.4 Centrales solaires ou photovoltaïques

Un premier processus consiste à fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire en utilisant les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des Cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité.

Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux (figure I.8). Un autre procédé utilise des miroirs pour concentrer le flux d'énergie vers un foyer où de l'eau est vaporisée pour entraîner un alternateur.

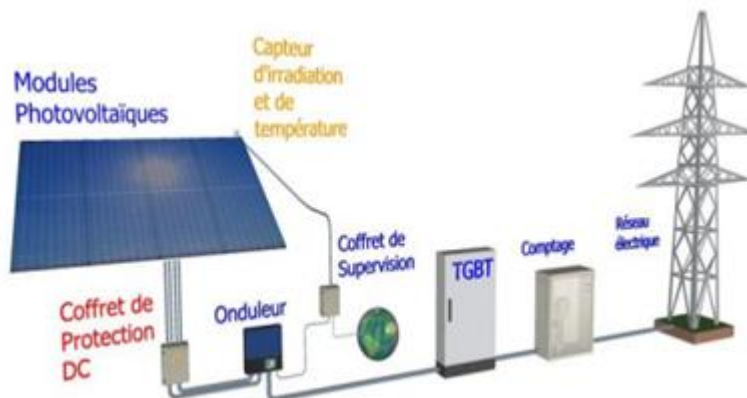


Figure 1.8 Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque



### 1.3.5 Centrales éoliennes

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, disponible partout (en quantités différentes) et bien sûr sans rejet polluant dans l'atmosphère. L'éolienne transforme la puissance de translation du vent en puissance de rotation. Un alternateur est mécaniquement couplé à l'axe des pales (rotor) pour produire les tensions triphasées. Un dispositif de régulation permet d'obtenir une vitesse de rotation constante compatible avec la fréquence du réseau (50Hz), (figure I.9).

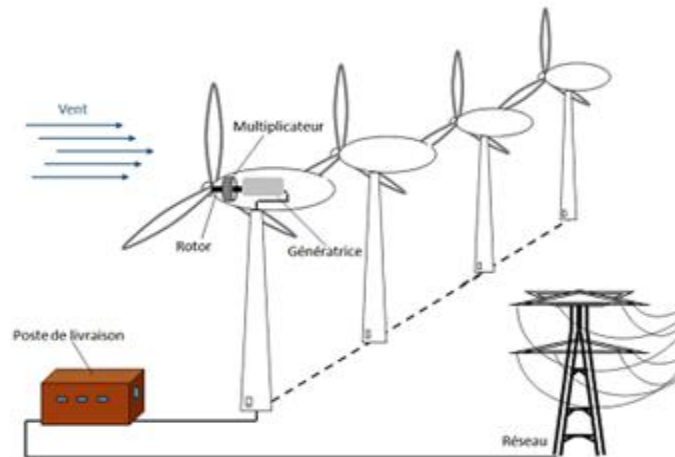


Figure 1.9 Schéma de principe d'une production éolienne

### 1.4 Types de réseaux électriques

Les réseaux en trois grandes catégories comme suit :

- **réseau d'interconnexion et de transport** : ces réseaux assurent le transport et l'interconnexion en très haute tension et en haute tension vers les points de consommation et de répartition. Ces réseaux comprennent les centrales de production ainsi que les lignes et les postes de transformation, leurs rôles sont : Collecter l'énergie produite par les centrales et de l'acheminer vers les zones de consommation (fonction transport). Permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production, et assurer une compensation des différents manques (fonction interconnexion).
- **Réseau de répartition** : Ces réseaux comprennent les lignes de transport et les postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport et le réseau de distribution. Ce sont des réseaux haute tension, dont le rôle est de répartir l'énergie électrique au niveau régional. Ils peuvent être aériens ou souterrains.
- **Réseau de distribution MT et de livraison BT** : Ils ont pour rôle de fournir aux réseaux d'utilisation la puissance dont ils ont besoin. Ils utilisent deux tensions : Des lignes à moyenne tension (MT ou HTA) alimentées par des postes HT/MT et

fournissant de l'énergie électrique, soit directement aux consommateurs importants soit aux différents postes MT/BT. Des lignes à basse tension qui alimentent les usagers soit en monophasé soit en triphasé. Les réseaux MT font pratiquement partie, dans leur totalité des réseaux de distribution.

### 1.5 Postes électriques

Les postes électriques permettent d'adapter la tension en fonction des lignes et des réseaux, mais aussi à transformer l'électricité et à la "surveiller" à distance sur les différentes lignes qu'elle emprunte. On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent : les postes d'interconnexion, les postes de transformation et les postes mixtes. (Voir Figure 1.10).

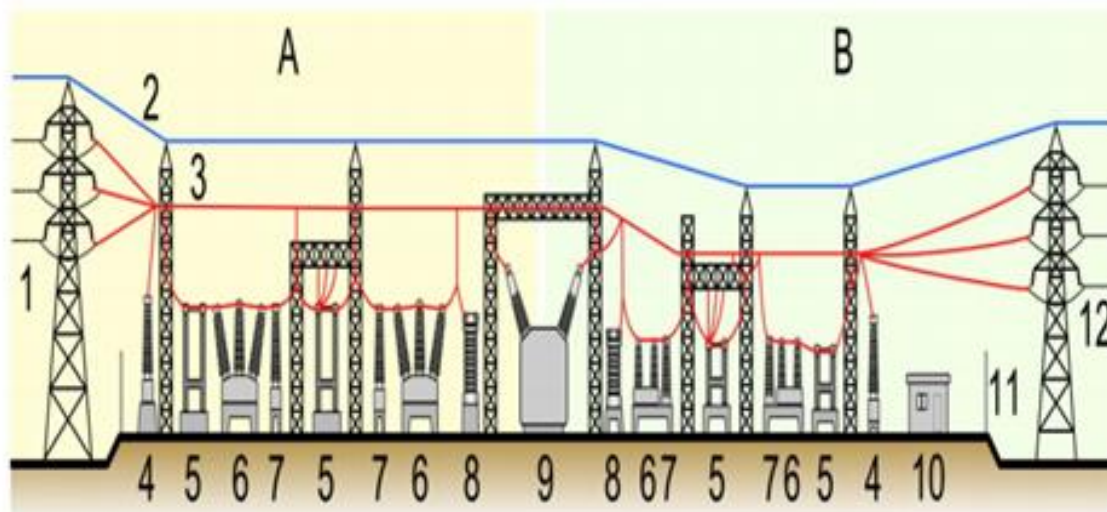


Figure 1.10 Appareils électriques dans un poste (A : Coté primaire, B : Coté secondaire)  
*Les postes contiennent un certain nombre d'appareils électriques qui participent au bon fonctionnement du réseau :*

1. Ligne électrique primaire ;
2. Câble de garde ;
3. Ligne électrique ;
4. Transformateur de tension ;
5. Sectionneur ;
6. Disjoncteur ;
7. Transformateur de courant ;
8. Parafoudre ;
9. Transformateur de puissance ;
10. Bâtiment secondaire ;
11. Clôture ;
12. Ligne électrique secondaire.

### 1.5.1 Transformateurs de puissance

Ils modifient la tension électrique à la hausse (par exemple de 20 kV à 400 kV en sortie de centrales) ou à la baisse (par exemple de 63 kV à 20 kV pour livrer l'énergie aux réseaux de distribution) (figure 1.11).



Figure 1.11 Transformateur de puissance triphasé

### 1.5.2 Transformateurs de mesure de courant et de tension

Ils sont utilisés pour permettre la mesure de la tension ou du courant quand ceux-ci ont une valeur trop élevée pour être mesurée directement. Ils doivent transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage. Ils sont destinés à alimenter des appareils de mesure, des compteurs, des relais et autres appareils analogues (figure I.12).



(a) Transformateur de courant



(b) Transformateur de tension

Figure 1.12 Transformateur de mesure

### 1.5.3 Disjoncteurs

Ils protègent le réseau contre d'éventuelles surcharges dues à des courants de défaut (foudre, amorçage avec branche d'arbre) en mettant des portions de circuit sous ou hors tension (figure I.13).



Figure 1.13 Disjoncteur

### 1.5.4 Sectionneurs

Ils assurent la coupure visible d'un circuit électrique et aiguillent le courant dans le poste (figure I.14).



Figure 1.14 Sectionneur

### 1.5.4 Jeux de barres

Dans la distribution électrique un jeu de barres désigne un conducteur de cuivre ou d'aluminium qui conduit de l'électricité dans un tableau électrique, à l'intérieur de l'appareillage électrique ou dans un poste électrique. Les jeux de barres sont typiquement soit des barres plates, soit des tubes (figure I.15). Ils sont considérés comme des

conducteurs de faible impédance auquel peuvent être reliés plusieurs circuits électriques en des points séparés.



Figure 1.15 Jeux de barres

### 1.5.5 Isolateurs

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Ils sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension : il faut compter environ 6 isolateurs en 63 kV, 9 en 90 kV, 12 en 225 kV et 19 en très haute tension de 400 kV. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige ou du givre (figure 1.16).



Figure 1.16 Isolateur

### 1.5.6 Autres appareillage d'un poste

Outre la transformation, Les postes assurent la jonction entre les différents réseaux électriques pour pouvoir "aiguiller" l'énergie du lieu de production vers le lieu de consommation. Par ailleurs, grâce à leur appareillage électrique très performant, les postes éliminent très rapidement (généralement en moins d'une seconde) les incidents (courts-circuits) qui peuvent survenir sur les lignes ou dans le poste lui même.

#### 1.5.6.1 Parafoudres

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter les surtensions imposées aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne à protéger et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance, généralement de moins d'un Ohm (figure I.17).



Figure 1.17 Parafoudre

#### 1.5.6.2 Eclateurs

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel (figure I.18).



Figure 1.18 Eclateurs

### 1.5.6.3 Supports

Le rôle des supports (pylônes) est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs. On a recours à des pylônes composés d'un treillis en acier. Plus la tension est élevée, plus l'envergure est grande et plus les poteaux sont élevés (figure I.19).

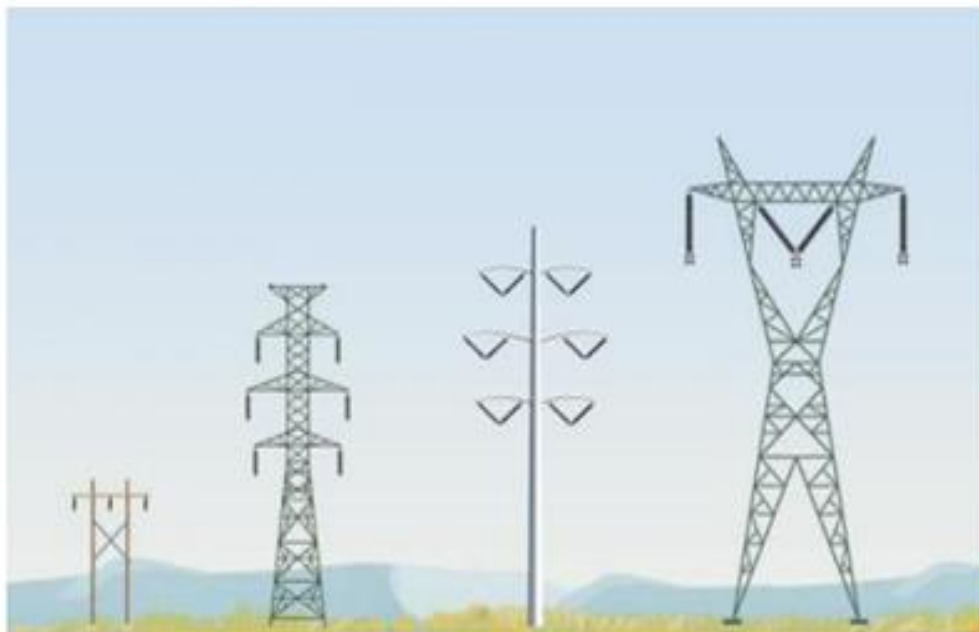


Figure 1.19 Quelques structures de pylônes

### 1.5.6.4 Câbles conducteurs

#### 1.5.6.4.1 Lignes aériennes

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par les pylônes. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes). Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Les câbles conducteurs sont « nus » c'est -à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension. Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium (figure 1.20) .



Figure 1.20 Conducteur d'une ligne aérienne

#### 1.5.6.4.2 Lignes souterraines

Un câble électrique à haute tension est un câble utilisé pour le transport d'électricité, que ce soit en courant alternatif ou en courant continu. Il est composé de différentes parties assemblées de manière concentrique, les principales sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, entouré d'une couche semi-conductrice interne, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une protection extérieure qui assure de bonne propriété mécaniques et le protéger des agressions extérieures (figure 1.21).





Figure 1.21 Coupe d'un câble souterrain

#### 1.5.6.4.3 Câbles de garde

Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de lignes aériennes à haute tension. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier (figure 1.22).

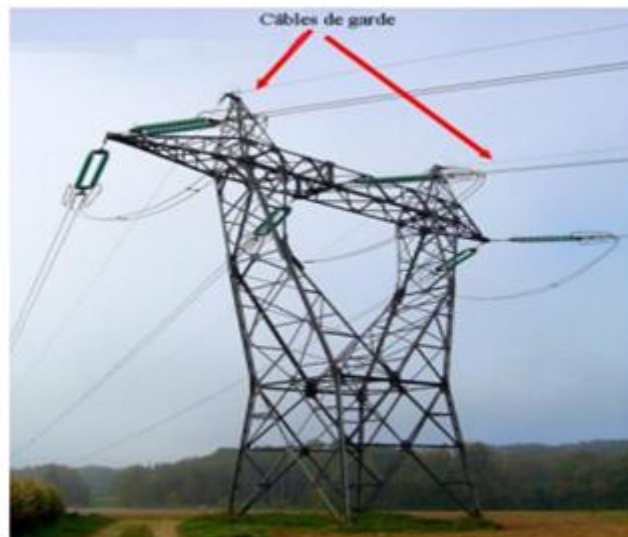


Figure 1.22 Câble de garde

#### 1.5.6.4.4 Centre de dispatching (centre de conduite réseau)

Le système de transport et de fourniture d'énergie électrique est exploité par un centre de conduite réseau également appelé dispatching. Le Dispatching est responsable de l'équilibre

entre la demande et la fourniture d'énergie électrique, la maîtrise du plan de tension et du transit sur le réseau interconnecté. Les équipes du dispatching se relaient 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 pour veiller à cet équilibre en supervisant en temps réel l'état du réseau haute tension (figure I.23). Il est aussi responsable des réseaux de répartition, et veille particulièrement à la continuité de l'alimentation des réseaux de distribution et des consommateurs raccordés en haute tension HTB.



Figure 1.23 Centre dispatching

## CHAPITRE II

### MODES DE TRANSPORT, REPARTITION ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

#### 2.1 Description des réseaux électriques (structure des réseaux électriques, Niveau de tension)

Le problème majeur de l'exploitant est de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle. Etant entendu que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire pour le fonctionnement du réseau. Pour cet effet la topologie des réseaux sera différente selon leurs fonctions car les conditions d'exploitation vont exiger les caractéristiques du fonctionnement des réseaux. Dans ce contexte, le système électrique est alors composé de trois segments de base : la production, le réseau et les consommateurs. Au niveau du réseau on parle d'un réseau de transport et d'un réseau de distribution car ils diffèrent dans leur topologies, niveaux de tension, dimension, exploitation, etc. Ils diffèrent également dans leur objectifs et donc par les acteurs qui vont intervenir dans l'un ou l'autre. L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension. Généralement, le réseau est composé dans le sens du transit de l'énergie comme montré sur la figure 2.1.

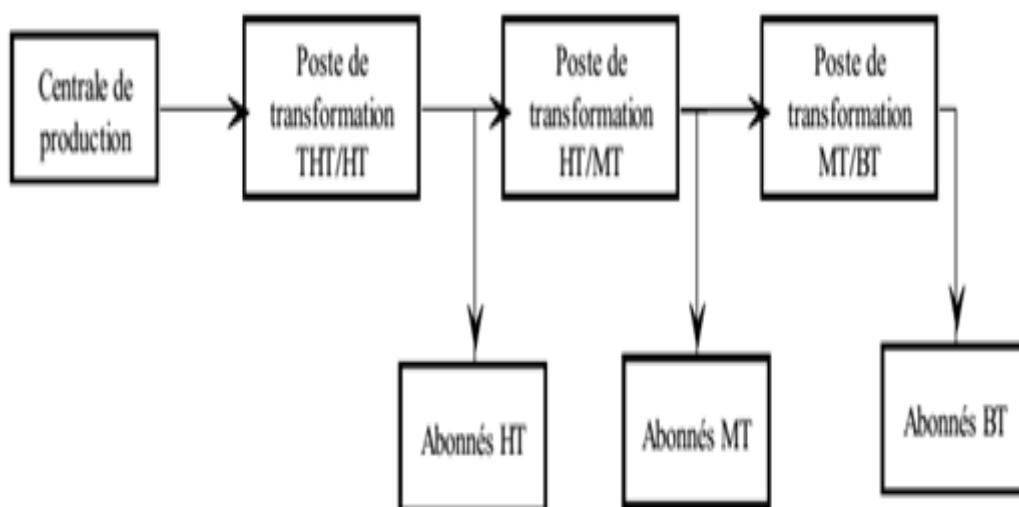


Figure 2.1 Chemin de l'énergie électrique

### 2.1.1 Réseaux hiérarchisés selon des normes

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en œuvre (selon CEI) :

- ✓ Un réseau de transport THT 220 ..... 800 kV
- ✓ Un réseau de répartition HT 60 ..... 170 kV
- ✓ Un réseau de distribution MT 5 ..... 36 kV
- ✓ Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit :

- HTB ⇒ pour une tension composée supérieure à 50 kV
- HTA ⇒ pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- BTB ⇒ pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- BTA ⇒ pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- TBT ⇒ pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

Les notations de la norme CEI38 seront parfois utilisées dans ce document avec les définitions suivantes :

- HT ⇒ pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V  
Les valeurs normalisées sont : 45 kV - 66 kV - 110 kV - 132 kV - 150 kV - 220 kV
- MT ⇒ pour une tension composée comprise entre 1000 V et 35 kV  
Les valeurs normalisées sont : 3,3 kV - 6,6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV
- BT ⇒ pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V  
Les valeurs normalisées sont : 400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz)

### 2.1.2 Gamme des tensions utilisées par le groupe SNELGAZ

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONALGAZ) définit les niveaux de tension comme suit :

Symboles	TBT	BTA	BTB	HTA	HTB
Tension	Très Basse tension	Basse Tension A	Basse Tension B	Haute Tension A	Haute Tension B
Courant alternatif	$U \leq 50 \text{ V}$	$50 < U \leq 500 \text{ V}$	$500 < U \leq 1000 \text{ V}$	$1000 < U \leq 50 \text{ kV}$	$U > 50 \text{ kV}$
Courant continu	$U \leq 120 \text{ V}$	$120 < U \leq 750 \text{ V}$	$750 < U \leq 1500 \text{ V}$	$1500 < U \leq 75 \text{ kV}$	$U > 75 \text{ kV}$
Sécurité du voisinage	Aucun danger	$D \geq 30 \text{ cm}$	$D \geq 30 \text{ cm}$	$D \geq 2 \text{ mètres}$	$D \geq 3 \text{ mètres}^{**}$

Tableau 2.1 Niveau de tension d'exploitation dans les réseaux SONELGAZ

### 2.3.3 Niveaux de tension d'alimentation en fonction de la puissance souscrite

Le tableau 2.2 indique les niveaux de tensions d'alimentation usuellement choisis en France en fonction de la puissance souscrite.

tension d'alimentation	puissance de livraison			
	0	250 kVA	10000 kVA	40000 kVA
BTA				
HTA				
HTB 63 kV ou 90 kV				
HTB 225 kV				

Tableau 2.2 Niveaux de tension d'alimentation en fonction de la puissance souscrite

### 2.3 Structure générale d'un réseau privé de distribution

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau privé de distribution comporte (voir figure 2.2) :

- Un poste de livraison HTB alimenté par une ou plusieurs sources, il est composé d'un ou plusieurs jeux de barres et de disjoncteurs de protection
- une source de production interne
- un ou plusieurs transformateurs HTB / HTA
- un tableau principal HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres
- un réseau de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA / BT
- des récepteurs HTA
- des transformateurs HTA / BT
- des tableaux et des réseaux basse tension
- des réceptrices basses tensions.

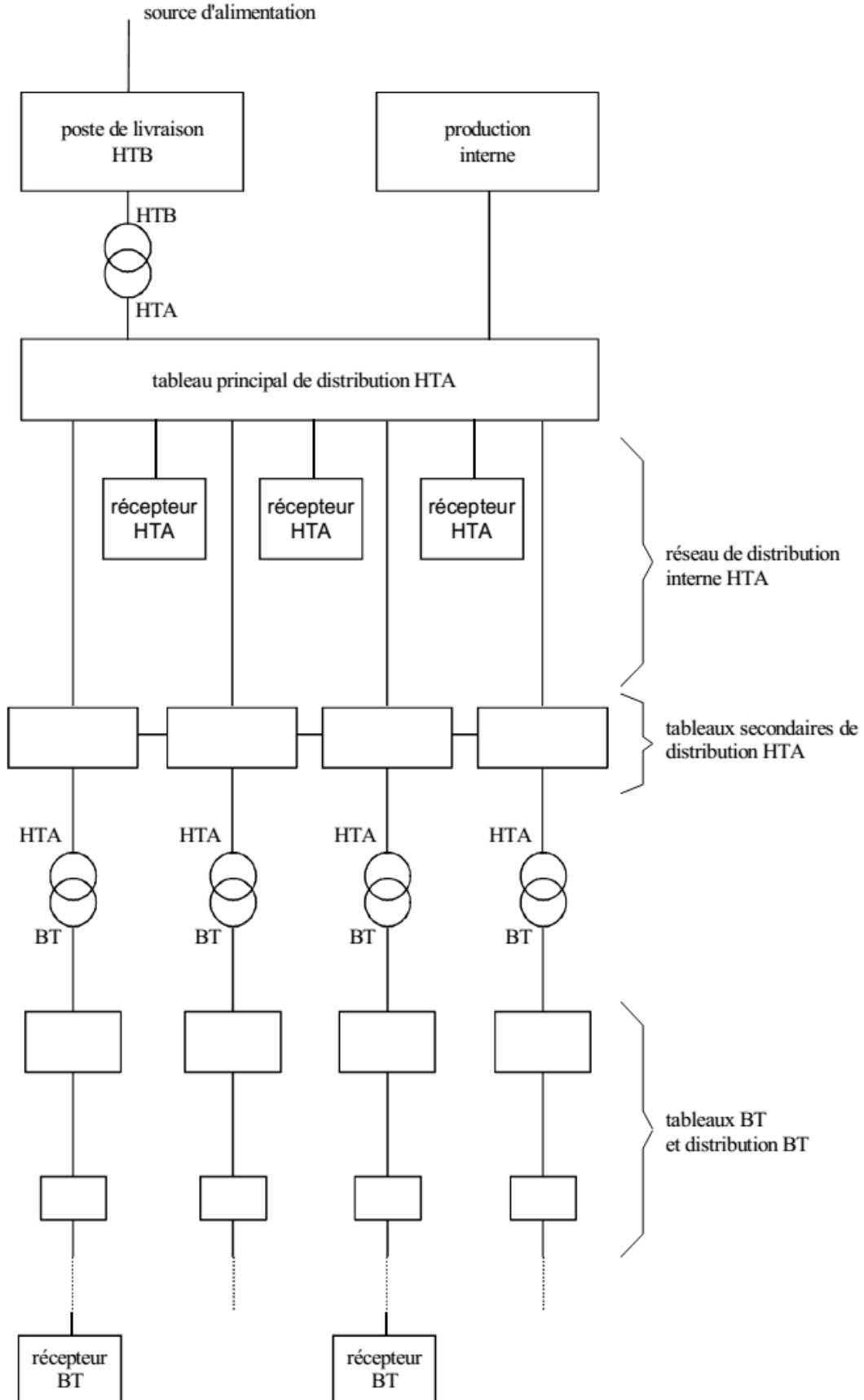


Figure 2.2 Structure générale d'un réseau privé de distribution

## 2.4 Topologie des réseaux électriques

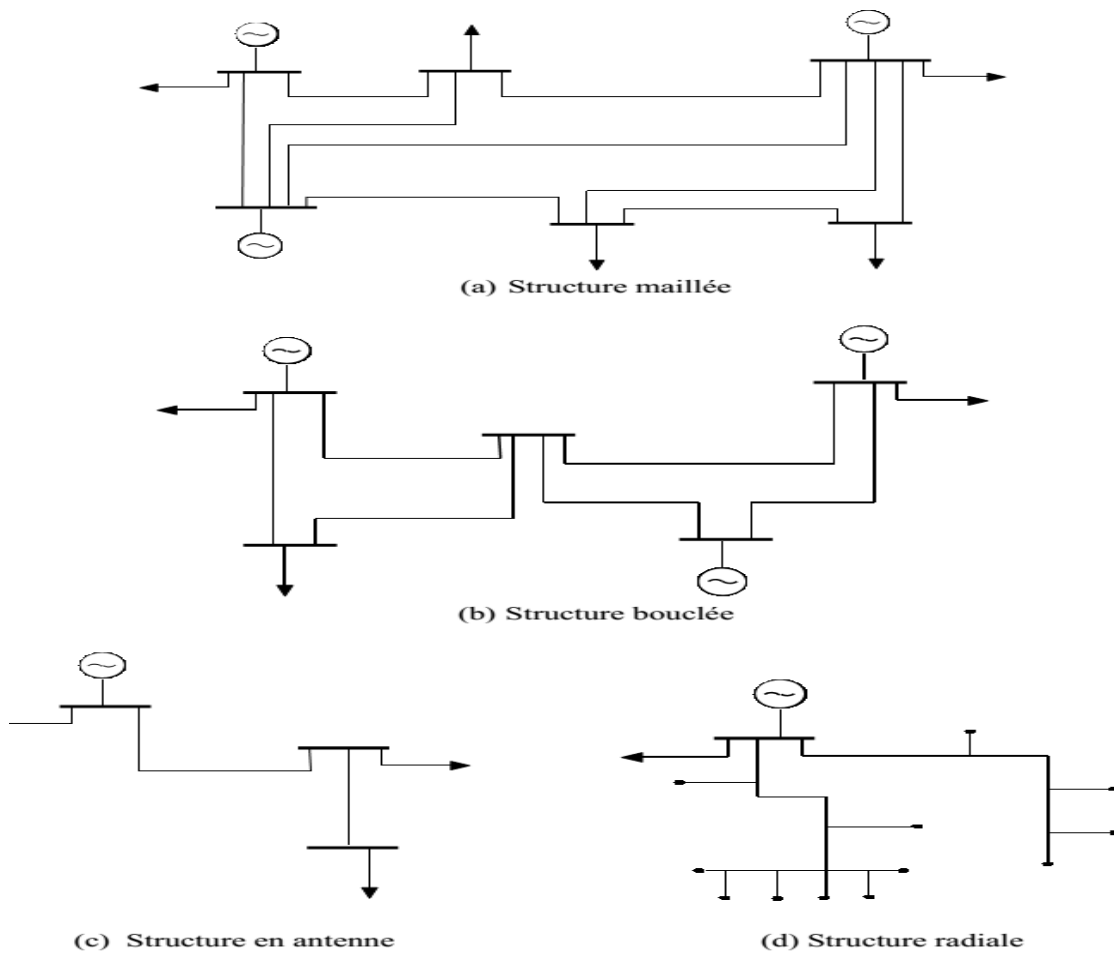


Figure 2.3 Topologies des réseaux électriques

### Eclaircissement

<p><b>structure maillée</b> : les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation.</p>	<p><b>structure radiale ou bouclée</b> (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.</p>	<p><b>structure arborescente</b> (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval.</p>

#### ❖ Réseau maillé

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

#### ❖ Réseau bouclé

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

#### ❖ Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT.

Réseau arborescent

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

### 2.5 Types des postes

Le poste source est un ouvrage électrique permettant de relier le réseau public de transport d'électricité au réseau public de distribution d'électricité. Il sert à : transformer une très haute tension en haute tension, diriger l'énergie électrique vers plusieurs canalisations haute tension, appelées « départs ». La tension de l'électricité apportée par le réseau est modifiée par un ou plusieurs transformateurs qui sont abrités dans un poste de transformation. La tension à la sortie de la source de production est de 400 000 volts, puis elle est successivement abaissée d'un niveau de tension à un autre, jusqu'à la tension d'utilisation. Figure 3.4.



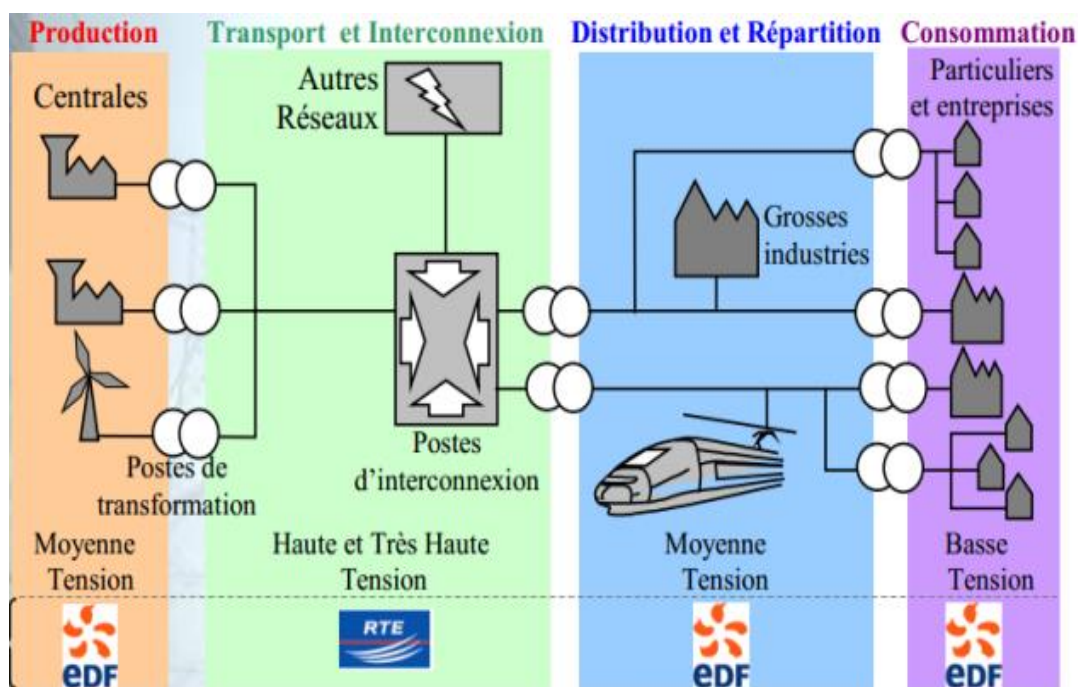


Figure 2.4 Organisation d'un réseau

Suivant leurs localisations et leurs tailles, il existe plusieurs types de postes électriques :

**Postes de sortie de centrale** : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;

**Postes d'interconnexion** : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques ;

**Postes éleveurs** : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur ;

**Postes de distribution** : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

### 2.5.1 Équipements d'un poste

Dans une analyse globale d'un réseau électrique un poste est considéré comme une barre ou tout simplement un nœud où transitent des flux de puissances. Pour le design et la planification du réseau, ce poste constitue une pièce majeure dans le système de répartition ou de distribution, dans la mesure où c'est à ce niveau qui est organisée la configuration de la topologie du réseau, et c'est aussi un point de surveillance de contrôle et de protection. Un poste électrique est un ensemble d'appareillage arrangé de sorte à : Faire transiter la puissance d'un niveau de tension à un autre, en général s'il s'agit d'un poste de répartition ou de distribution, le poste sert à baisser la tension ; Réglage de la tension, comptage de puissance, surveillance, . . .etc.

Cet ensemble d'appareillage comporte :

- ✓ Des jeux de barres ;

- ✓ Des transformateurs ;
- ✓ Des disjoncteurs et sectionneurs (appareillage de coupure) ;
- ✓ Des compensateurs ;
- ✓ Appareillage de mesure et de comptage de puissance ;
- ✓ autres.

## 2.6 Architectures des postes

Le choix de l'architecture d'un poste dépend de plusieurs paramètres technico-économiques (Fiabilité, flexibilité, maintenance, les coûts d'investissement et de maintenance). La fiabilité et la flexibilité d'un poste sont déterminées par son architecture, et plus précisément du nombre et disposition des jeux de barres, nombre et disposition des appareils de coupure (disjoncteurs), et éventuellement des lignes qui alimentent le poste.

Les postes peuvent être classés en fonction de leurs architectures indépendamment de leurs types en deux familles ;

- **Poste à couplage de barres** où les jeux de barres couplent en eux les différents départs ;
- **Poste à couplage de disjoncteurs** où les disjoncteurs couplent entre eux les différents départs.

La Figure 2.5 montre la différence entre ces deux familles de postes. De point de vue fiabilité, on peut remarquer qu'un défaut sur le départ F1 par exemple nécessitera l'ouverture du disjoncteur D1 pour l'architecture à couplage de barre, alors que pour l'autre architecture il faudra ouvrir D1 et D2 pour isoler le départ en défaut. Cependant, en cas de maintenance de disjoncteur D1 le départ est F1 est condamné pour l'architecture à couplage de barre, mais peut rester en service grâce à D2 pour l'architecture à couplage de disjoncteurs. Donc, à la lumière de cette exemple, on peut dire que l'architecture à couplage de disjoncteur est plus fiable, cependant de point de vue coût, il est évident qu'elle revient plus chère du fait qu'il nécessite plus de disjoncteurs pour protéger le même nombre de départ (exemple : trois disjoncteurs pour trois départs dans une architecture à couplage de barres, le même nombre de disjoncteurs pour deux départs pour une architecture à couplage de disjoncteurs.).

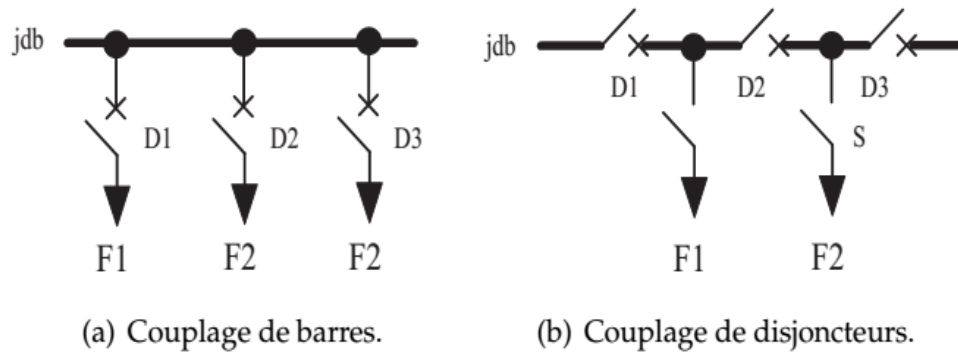


Figure 2.5 Les deux principales architectures des postes.

**D** : Disjoncteur, **S** : Sectionneur.

### 2.3.4 Qualités recherchées d'un poste

Les qualités recherchées lors d'un choix d'architecture d'un poste électrique sont :

- ❖ **La sécurité** qui est l'aptitude à conserver un maximum de dérivations (départs) saines en service, en cas de non ouverture du disjoncteur chargé d'isoler une partie en défaut.
- ❖ **La souplesse** ou l'aptitude d'un poste à réaliser plusieurs découplages et y raccorder n'importe quel départ.
- ❖ **La maintenabilité** permettant la poursuite de l'exploitation d'une dérivation malgré l'indisponibilité d'un disjoncteur, et finalement,
- ❖ **La simplicité** de sorte à pouvoir changer de configuration en manœuvrant le minimum d'appareils.

En règle générale, les postes THT et HT couvrent de très larges zones, c'est pourquoi on favorise avant tout la sécurité. Pour les postes MT, la charge couverte est beaucoup moins importante, alors on favorise plutôt l'économie.

### 2.5 Les postes de livraison HTB

Ils concernent généralement les puissances supérieures à 10MVA. L'installation du poste de livraison est comprise entre :

- *d'une part, le point de raccordement au réseau de distribution HTB*
- *d'autre part, la borne aval du ou des transformateurs HTB / HTA*

Les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés sont les suivants :

❖ **Simple antenne** (voir figure 2.6)

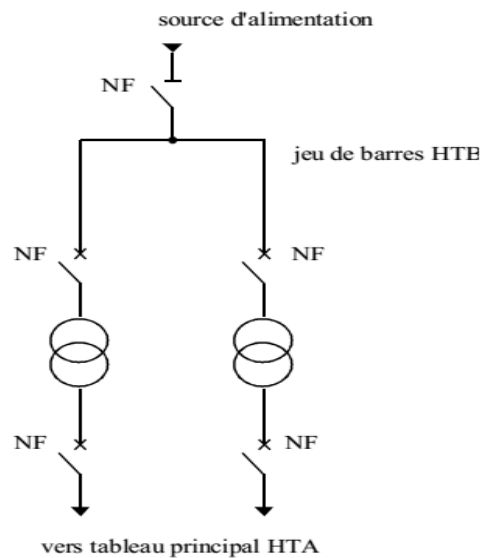


Figure 2.6 Alimentation simple antenne d'un poste de livraison HTB

Avantage : Coût minimal

Inconvénient : Disponibilité faible

Nota : les sectionneurs d'isolement associés aux disjoncteurs HTB ne sont pas représentés.

❖ **Double antenne** (voir figure 2.6)

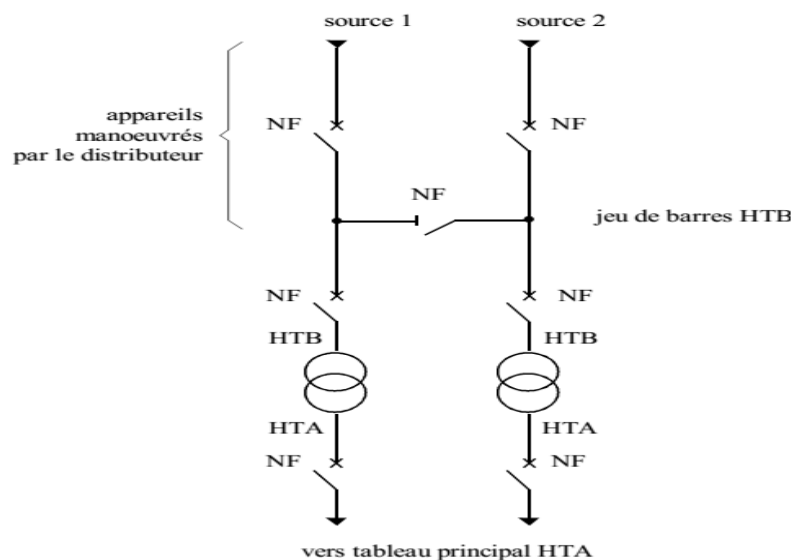


Figure 2.6 Alimentation double antenne d'un poste de livraison HTB

**Mode d'exploitation :**

- Normal : Les deux disjoncteurs d'arrivée des sources sont fermés, ainsi que le sectionneur de couplage. Les transformateurs sont donc alimentés par les 2 sources simultanément.

- Perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

Avantage :

- bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau
- maintenance possible du jeu de barres, avec un fonctionnement partiel de celui-ci

Inconvénients :

- solution plus coûteuse que l'alimentation simple
- ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance de celui-ci

Nota: les sectionneurs d'isolement associés aux disjoncteurs HTB ne sont pas représentés

❖ **double antenne - double jeu de barres** (voir figure 2.7)

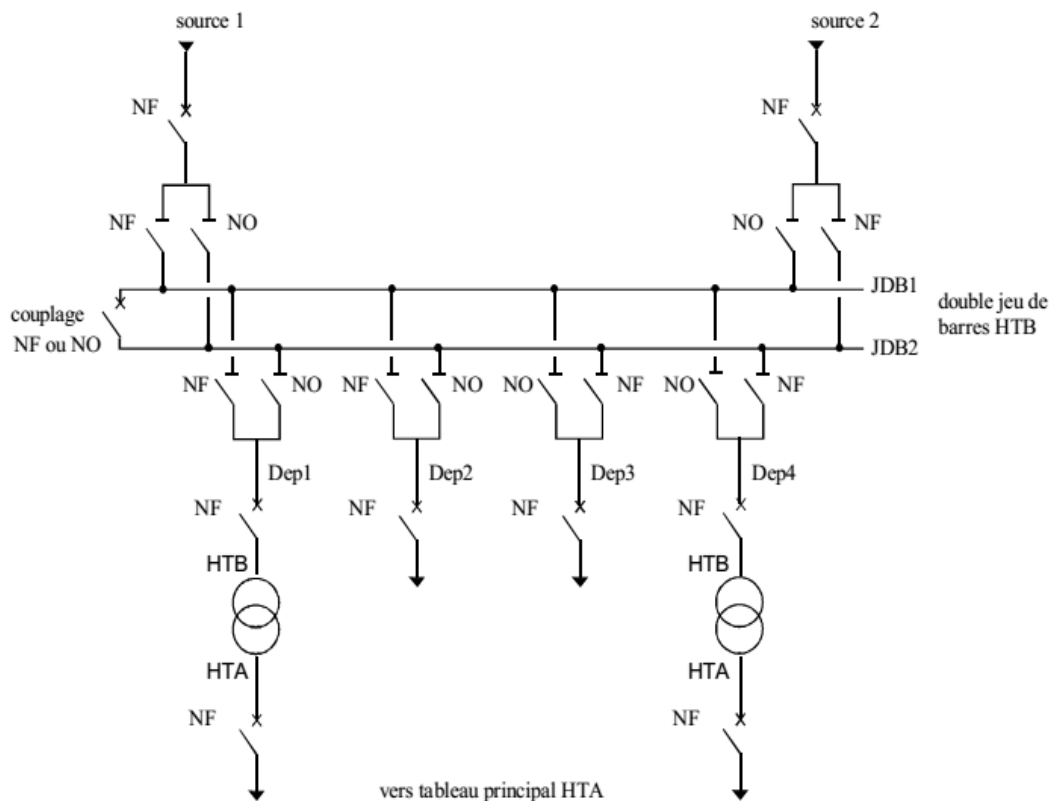


Figure 2.7 Alimentation double antenne - double jeu de barres d'un poste de livraison HTB

**Mode d'exploitation :**

- Normal : La source 1 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB1 et les départs Dep1 et Dep2.

La source 2 alimente, par exemple, le jeu de barres JDB2 et les départs Dep3 et Dep4.

Le disjoncteur de couplage peut être maintenu fermé ou ouvert.

- Perturbé : En cas de perte d'une source, l'autre source assure la totalité de l'alimentation.

En cas de défaut sur un jeu de barres (ou maintenance de celui-ci), le disjoncteur de couplage est ouvert et l'autre jeu de barres alimente la totalité des départs.

Avantage :

- bonne disponibilité d'alimentation
- très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges, et pour la maintenance des jeux de barres
- possibilité de transfert de jeu de barres sans coupure (lorsque les jeux de barres sont couplés, il est possible de manœuvrer un sectionneur si son sectionneur adjacent est fermé).

**Inconvénient :**

- surcoût important par rapport à la solution simple jeu de barres

Nota: les sectionneurs d'isolement associés aux disjoncteurs HTB ne sont pas représentés.

## 2.6 Postes sources HT/MT

Le réseau de distribution moyenne tension commence à partir du poste source HT/MT d'où partent plusieurs départs MT constitués d'un ensemble de conducteurs et d'appareils de coupure qui alimentent les charges moyenne tension ou les postes de distribution publique (MT/BT).

Ce type de poste (figure II.4) est constitué d'un transformateur (T1) alimenté par une ligne HT (HT1). Avec l'augmentation des charges à desservir, on peut y adjoindre un deuxième (T2), puis, en stade final, un troisième transformateur (T3) généralement en double attache.

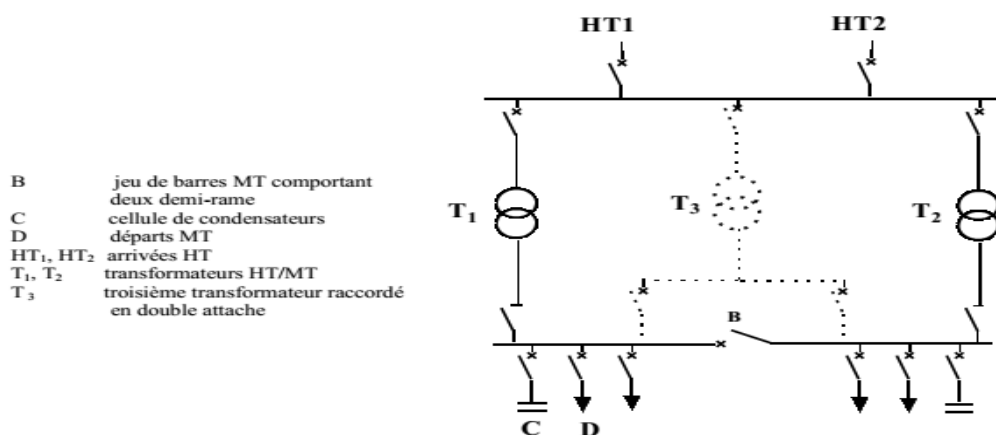


Figure 2.8 Schéma d'un poste HT/MT

En même temps que le deuxième transformateur, on raccorde généralement une deuxième arrivée HT (HT2), dite garantie ligne, opérant en cas de défaut sur la première. Le ou les transformateurs débitent sur un tableau MT qui forme un jeu de barres composé de rames. Chaque rame est un ensemble d'une dizaine de cellules environ, organisée en deux demi-rames reliées entre elles par un organe de couplage, en sectionnement de barre (figure 2.9). La demi-rame élémentaire comprend :

- une arrivée de transformateur ;
- plusieurs départs MT ;
- une cellule de condensateurs (compensation de l'énergie réactive) ;
- éventuellement, un disjoncteur shunt.

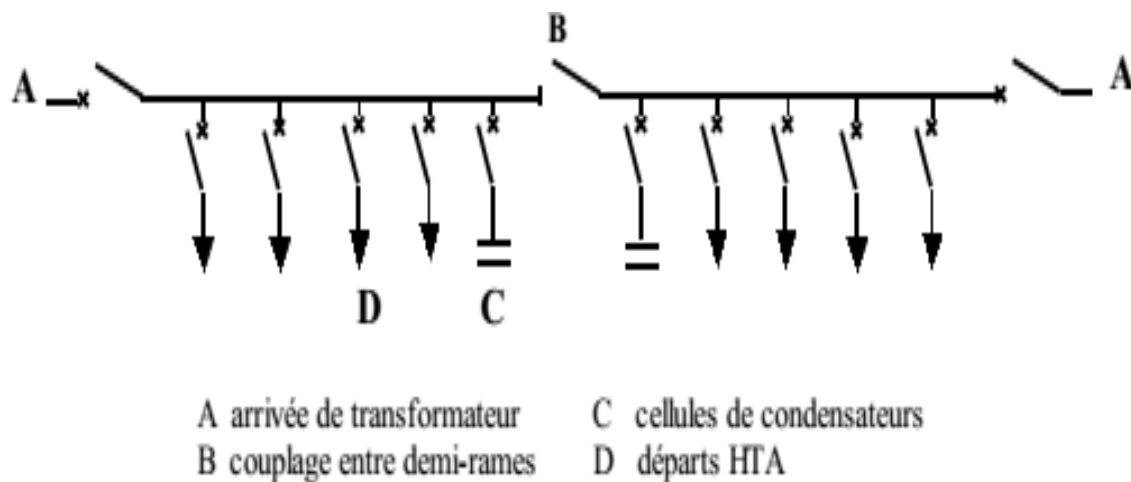


Figure 2.9 Schéma du principe d'une rame MT

### 2.6.1 Réseaux MT

Les réseaux MT (figure 2.10) sont, soit réalisés avec des câbles souterrains quasiment toujours bouclables mais exploités en radial (réseaux urbains principalement), soit réalisés avec des lignes aériennes, elles aussi le plus souvent bouclables (réseaux ruraux). Il reste quelques structures aériennes en antenne sans secours possible. Les réseaux construits avec des lignes aériennes ont des contraintes liées à l'esthétique, à la fiabilité et à l'encombrement ce qui a poussé au développement des câbles souterrains. Par ailleurs, des techniques modernes de pose mécanisée des câbles souterrains ont rendu leur utilisation plus compétitive.

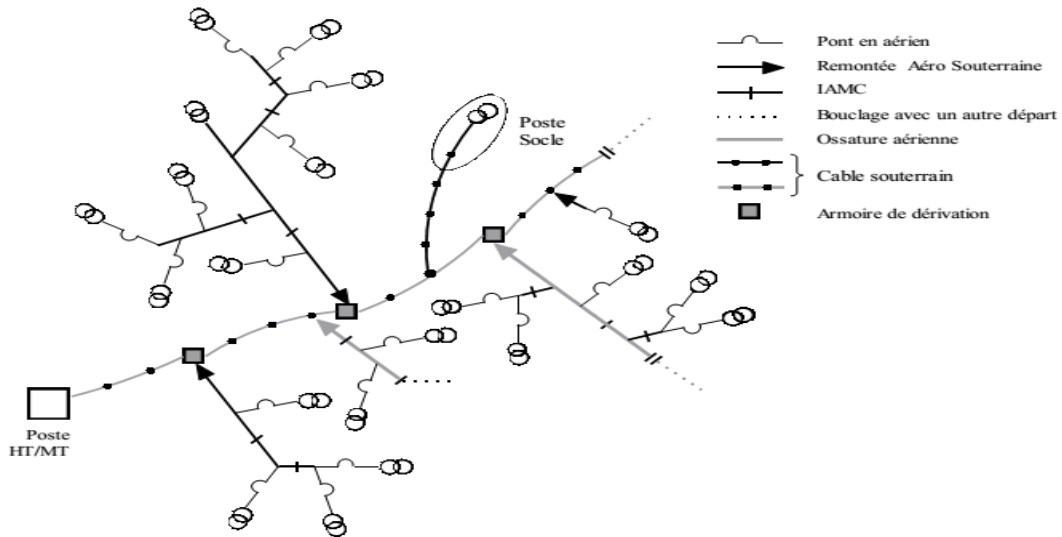


Figure 2.10 Structure d'un départ MT

Ainsi deux doctrines sont nées:

- la doctrine nord-américaine, à neutre distribué ;
- la doctrine française et, en général, européenne, à trois fils, le neutre n'étant pas distribué.

### 2.6.1.1 Réseaux MT souterrains

Les différences de structures entre réseaux aériens et souterrains proviennent essentiellement, par nature, de la nécessité de faire face à des indisponibilités beaucoup plus longues en système souterrain, pour localiser une avarie éventuelle et en effectuer la réparation ou bien pour réaliser des travaux programmés. Une caractéristique fondamentale d'un réseau MT souterrain est le nombre de voies d'alimentation utilisables pour desservir une même charge (poste MT/BT) :

- ❖ la structure à une voie d'alimentation, c'est-à-dire purement radiale en antenne, est simple et économique, mais n'offre pas de possibilité de reprise de service en cas d'incident ; c'est pourquoi, sauf cas particuliers rares, elle est proscrite en souterrain ;
- ❖ les structures à deux voies d'alimentation sont les plus fréquentes ; on y distingue deux grandes familles :
  - les réseaux en double dérivation et les réseaux ;
  - les réseaux coupure d'artère ;

Les structures à voies d'alimentation multiples sont plus rares, mais assurent une qualité de service encore meilleure.



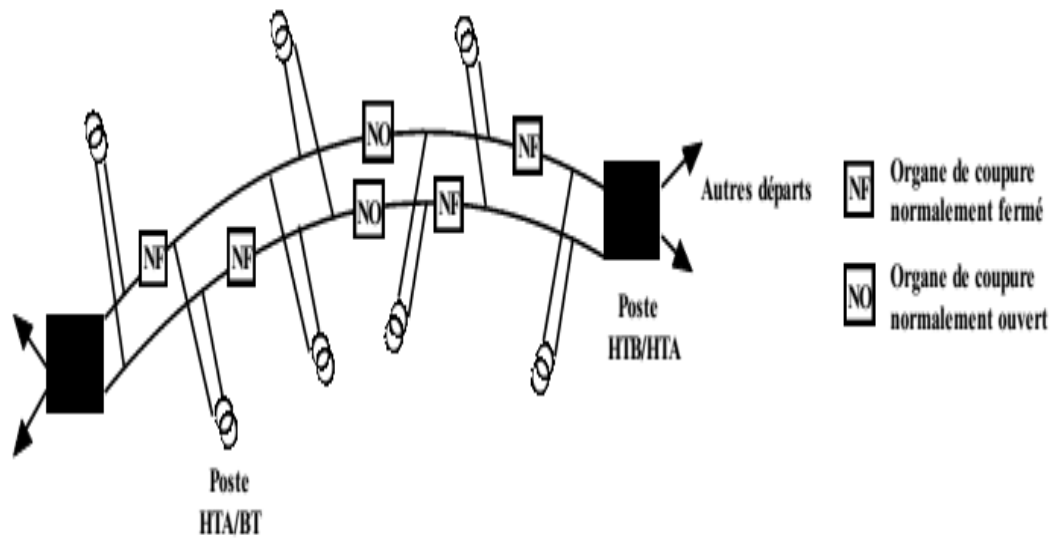


Figure 2.11 Réseaux en double dérivation

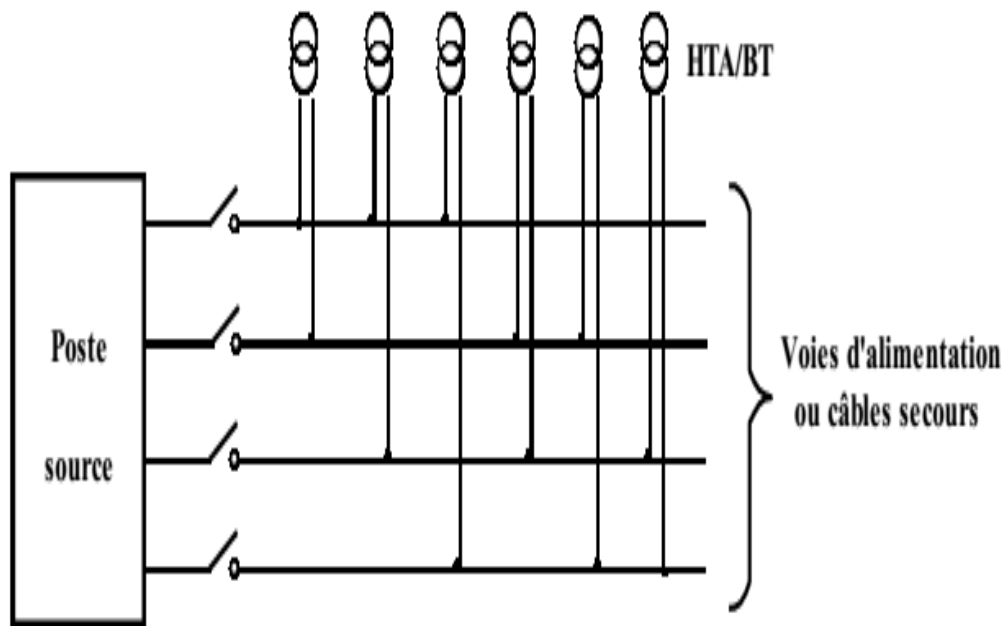


Figure 2.12 Alimentation par voies multiples

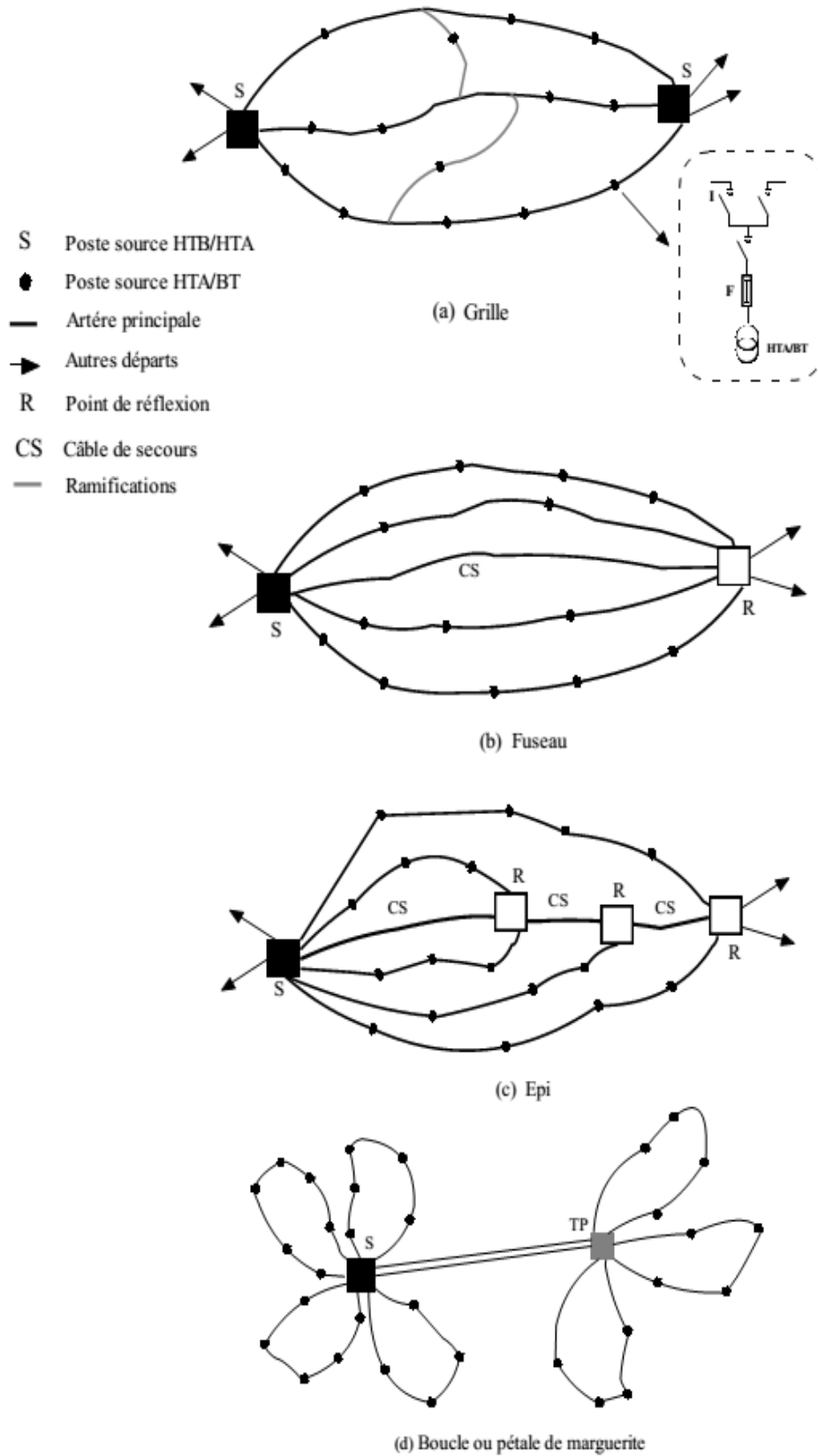


Figure 2.13 Réseaux en coupure d'artère

## 2.7 Postes HTA/BT

Ils sont l'interface entre les réseaux HTA et BT. Ils ont essentiellement un rôle de transformation HTA/BT auquel peuvent éventuellement être associées une fonction d'exploitation HTA et une fonction de répartition BT, suivant la charge à desservir.

Une des caractéristiques essentielles des postes HTA/BT est leur puissance nominale. On rencontre à travers le monde des puissances comprises entre quelques kilovoltampères et plusieurs mégavoltampères. On peut citer plusieurs types de postes HTA/BT de niveau de complexité croissante (figure 2.14).

### 2.7.1 Poste sur poteau

C'est le plus simple, utilisé en réseau aérien. Son principe de conception est de considérer qu'il fait partie intégrante de la ligne. Sur le même poteau sont supportés l'arrivée HTA, un transformateur apparent et une sortie BT avec un disjoncteur BT en milieu de poteau (figure 2.14.a). Ce type de poste, simple et peu coûteux, a permis dans le passé l'électrification rapide des écarts ruraux grâce à la grande souplesse de distribution des charges. Les puissances normalisées du transformateur sont : 63 ; 100 ; 160 Kva.

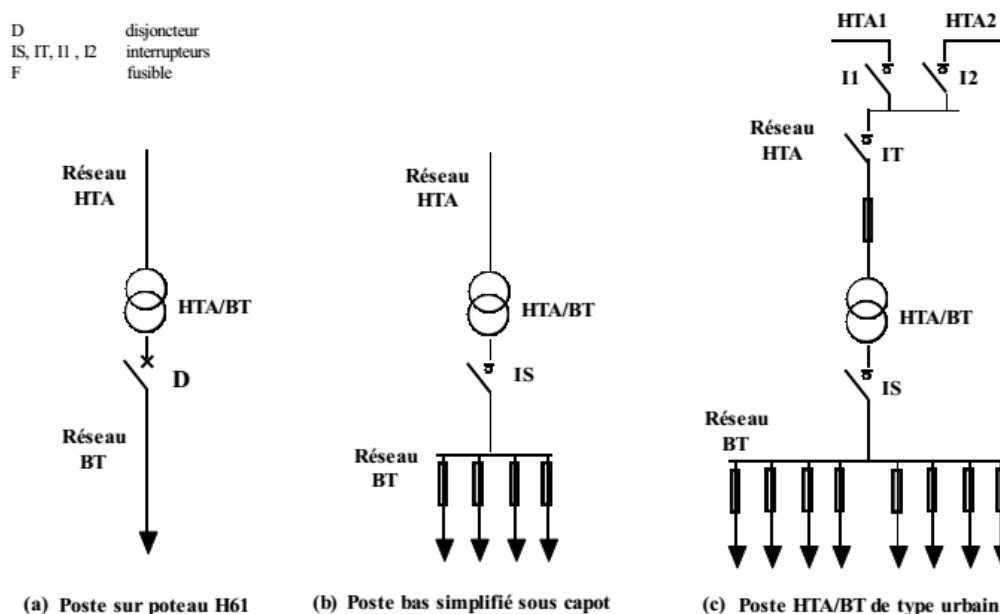


Figure 2.14 Structures de postes HTA/BT

### 2.7.2 Poste bas simplifié sous capot

Généralement préfabriqué, raccordé exclusivement sur des réseaux aériens MT, ce type de poste permet de délivrer des puissances (160; 250; 400kVA) supérieures à celles du H61, dans des conditions encore économiques. La liaison avec le réseau MT s'effectue par descente aérosouterraine sans organe de coupure (figure 2.14. b), le raccordement au transformateur étant réalisé par prise embrochable. L'énergie BT peut être répartie par un

ensemble comportant un organe de coupure et jusqu'à quatre départs protégés par fusibles.

### 2.7.2 Poste de type urbain raccordé en souterrain

Du fait des structures de réseau MT en coupure d'artère ou en double dérivation, ils comportent un appareillage MT composé en général de deux arrivées MT (MT1, MT2) avec cellules interrupteur en technique protégée, et une cellule de protection du transformateur avec fusible et éventuellement un interrupteur (figure 3.14.c). Le poste est prévu en général pour un seul transformateur, mais dans certains cas, il peut y en avoir plusieurs pour faire face à des charges ponctuelles importantes. Les puissances normalisées de transformateur sont : 250; 400; 630 et 1000 kVA

### 2.7.3 Réseaux BT

Il existe plusieurs modes d'alimentations des tableaux BT, avec une ou plusieurs sources d'alimentation. Dans ce qui suit nous citerons deux exemples.

#### 2.7.3.1 Alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation

Les tableaux T1, T2, T3 bénéficient d'une seule source d'alimentation. Le réseau est dit de type radial arborescent. En cas de perte de la source d'alimentation d'un tableau, celui-ci est hors service jusqu'à l'opération de réparation (figure 2.15).

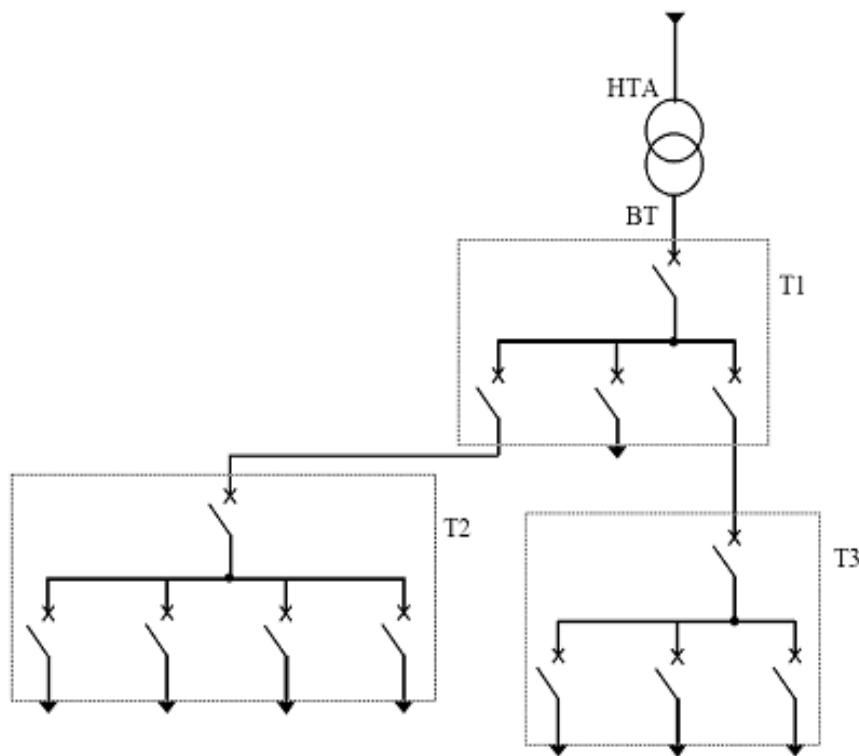


Figure 2.15 Alimentation des tableaux BT avec une seule source d'alimentation

### 2.7.3.2 Alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage

Le tableau T1, de la figure 2.16, bénéficie d'une double alimentation sans couplage par 2 transformateurs HTA/BT:

- les deux sources alimentent T1 en parallèle ;
- en fonctionnement normal, les deux disjoncteurs sont fermés (D1 et D2).

Le tableau T2 bénéficie d'une double alimentation sans couplage par un transformateur HTA/BT et par un départ issu d'un autre tableau BT:

- ✓ une source alimente le tableau T2, la seconde assure le secours ;
- ✓ en fonctionnement normal, un seul disjoncteur est fermé (D3 ou D4)

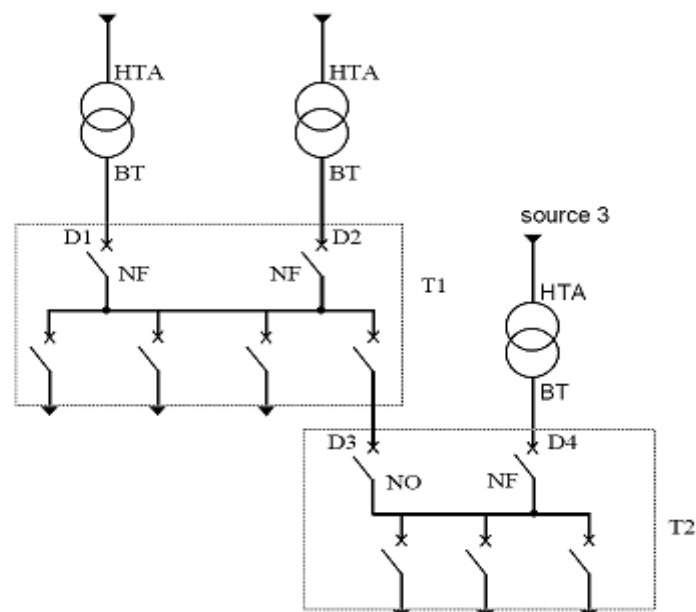


Figure 2.16 Alimentation des tableaux BT par une double alimentation sans couplage

## 2.8 Réseaux ruraux

Le milieu rural se caractérise par une densité de charge faible répartie sur une grande zone. On a donc de grandes longueurs de conducteurs, souvent aériens. Ainsi, les problèmes qui peuvent intervenir dans les réseaux ruraux sont principalement liés aux chutes de tension admissibles en bout de ligne. Les réseaux ruraux ont des architectures arborescentes bouclables mais souvent exploitées en radial (Figure 2.17)

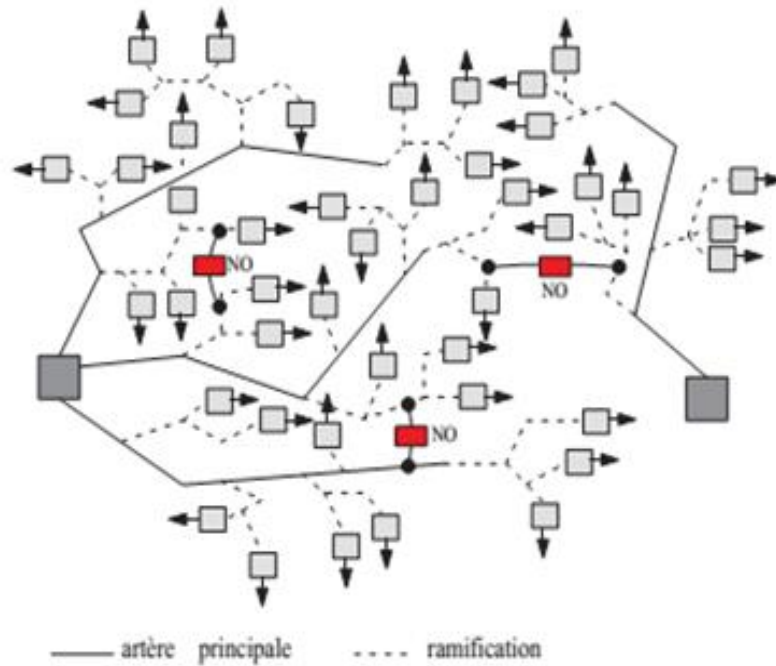


Figure 2.17 Réseaux rural

## 2.9 Remarques importantes

On peut noter que les points essentiels à retenir sur l'architecture des réseaux peuvent être résumés comme suit :

- ✓ L'architecture d'un poste électrique est dictée par les nombres et les dispositions des jeux de barres et des disjoncteurs ;
- ✓ Plusieurs jeux de barres ou tronçons de barres améliore la fiabilité du poste mais augmente ses coûts de réalisation et de maintenance ;
- ✓ Il y a deux architectures principales pour les postes électriques ; Architecture à couplage de barres, et architecture à couplage de disjoncteurs. Celle-ci est meilleure de point de vue fiabilité mais elle coûte souvent cher ;
- ✓ Le réseau de transport est souvent maillé, alors que le réseau de distribution MT est souvent bouclé.
- ✓ Néanmoins, on peut trouver des structures radiales simples ;
- ✓ La distribution MT se fait souvent en double dérivation ou en coupure d'artère pour les milieux urbains et en simple dérivation pour les zones rurales ;

## 2.9 Exercices de chapitre 2

### Exercice 1

Donner la structure générale et la composition d'un réseau privé de distribution avec une alimentation en HTB

**Solution**

Dans le cas général avec une alimentation en HTB, un réseau privé de distribution comporte (voir fig. 1-1) :

- ✓ un poste de livraison HTB alimenté par une ou plusieurs sources, il est composé d'un ou plusieurs jeux de barres et de disjoncteurs de protection
- ✓ une source de production interne
- ✓ un ou plusieurs transformateurs HTB / HTA
- ✓ un tableau principal HTA composé d'un ou plusieurs jeux de barres
- ✓ un réseau de distribution interne en HTA alimentant des tableaux secondaires ou des postes HTA / BT
- ✓ des récepteurs HTA
- ✓ des transformateurs HTA / BT
- ✓ des tableaux et des réseaux en basse tension
- ✓ des récepteurs en basse tension.

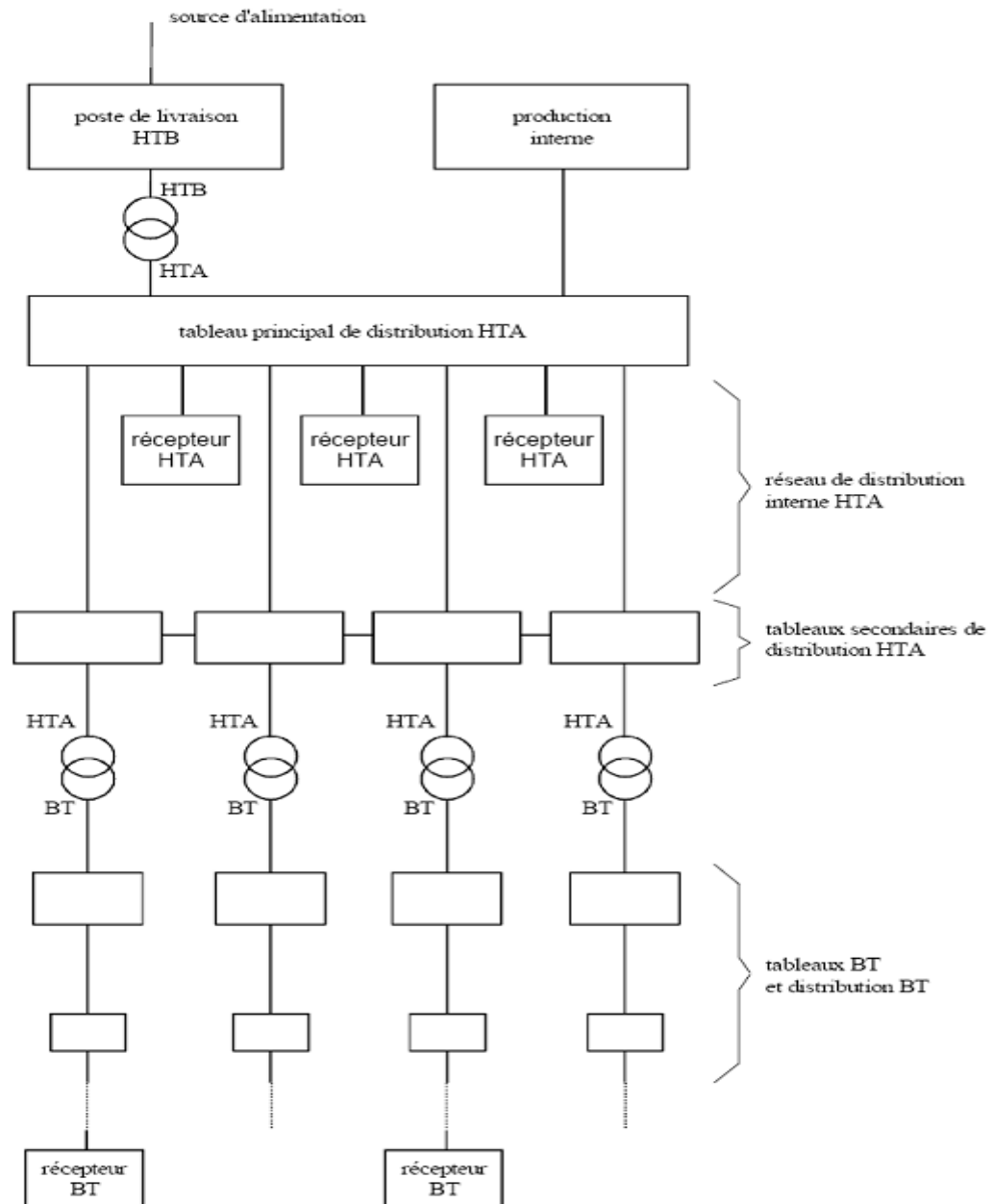


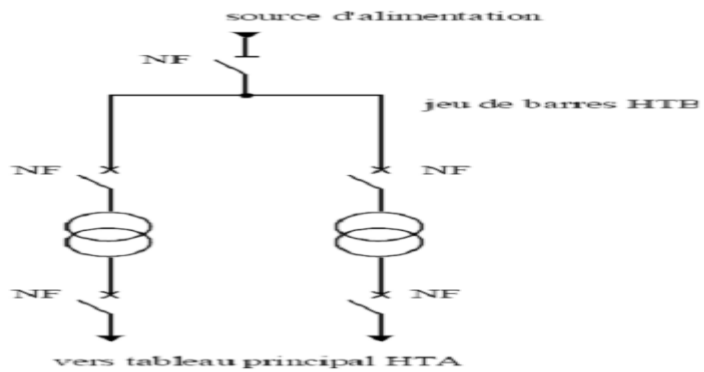
Figure 1-1 : structure générale d'un réseau privé de distribution

**Exercice 2**

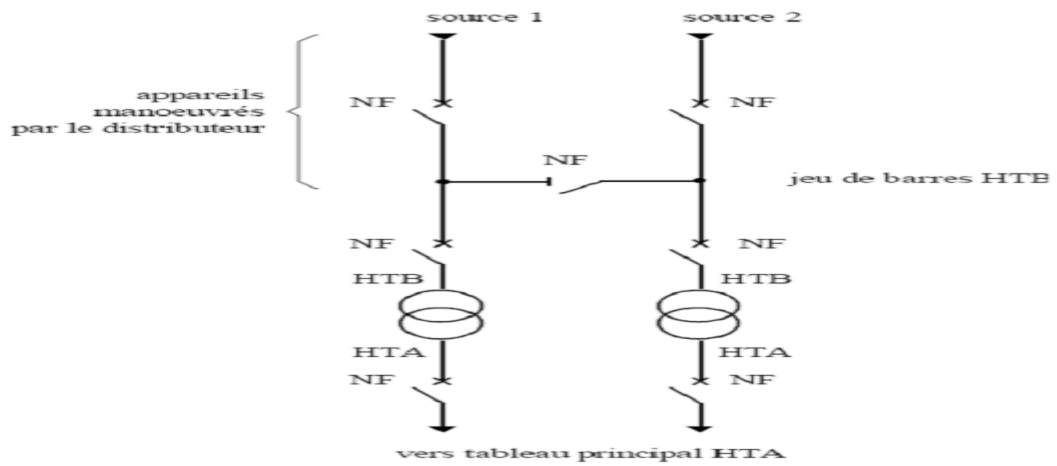
Citer les schémas électriques des postes de livraison HTB les plus couramment rencontrés.

**Solution**

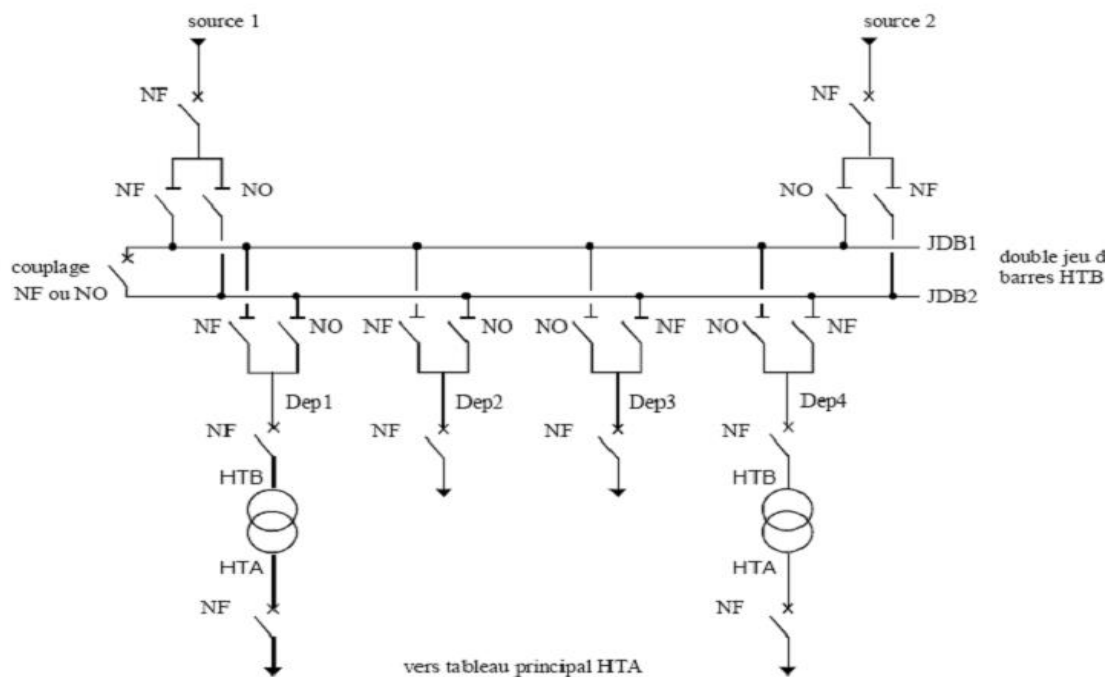
❖ simple antenne



❖ double antenne



❖ double antenne - double jeu de barres





### Exercice 3

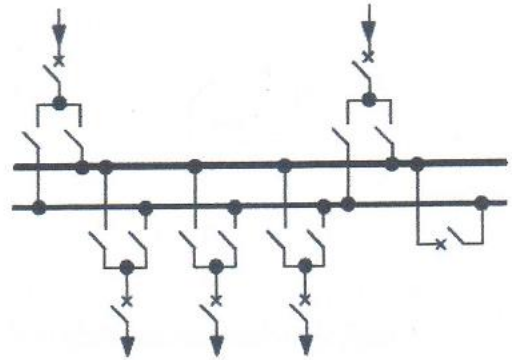
Schématiser et expliquer l'architecture d'un poste électrique HT à couplage de barre double antenne, double jeu de barres et citer ces avantages

#### Solution

Architecture de poste électrique à couplage de barres (double antenne-double jeu de barres):

- Une arrivée alimente normalement un seul jeu de barres ; Un départ est normalement alimenté par un seul jeu de barres ; - Les jeux de barres couplés par un disjoncteur NO.

Avantages : Très bonne stabilité , seul la perte de toutes les arrivées ou la perte de deux jeux de barres entrainera la perte du poste.



## CHAPITRE III

### MODELISATION DES LIGNES ELECTRIQUES

#### 3.1 Introduction

L'énergie produite dans les centrales électriques doit être transférée de lieux de Production vers les lieux des consommations ; d'autre part les réseaux d'énergie électrique ont pour mission essentiel de véhiculer et répartir le produit que constitue l'électricité. Cette énergie électrique est transportée par des lignes aériennes et souterraines, ces dernières constituent le moyen actuel le plus économique de transport de l'énergie électrique à grande distance [7].

#### 3.2 Paramètres d'un ligne électrique

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmissions des réseaux triphasés reliant le générateur aux charges. Chaque ligne possède ses propres paramètres (R, L, C, G) les paramètres séries longitudinaux (R, L) et paramètres parallèles transversaux (C, G) [8].

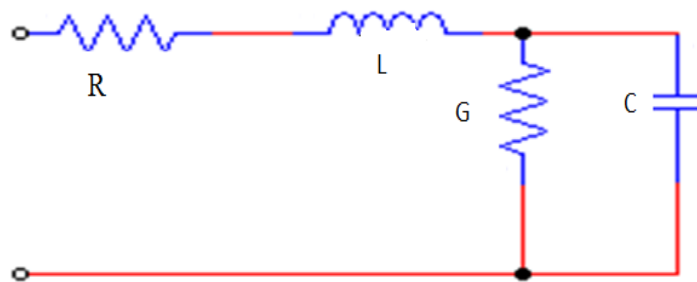


Figure 3.1 Paramètres de la ligne.

#### 3.2.1 Les paramètres longitudinaux

##### 3.2.1.1 La résistance de la ligne

La résistance a courant continu d'un conducteur homogène de longueur  $l$  en (Km), de section uniforme  $s$  en ( $\text{mm}^2$ ) et de résistivité  $\rho$  a 20 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ) est donnée par la formule:

$$R = \rho \frac{l}{s} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad (3.1)$$

##### a. Effet de spiralage du conducteur

La valeur de la résistance en courant continu peut être modifiée par l'effet de spiralage du conducteur et par l'effet température. L'effet de spiralage du conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à trois brins et de 2% environ pour les conducteurs a nombre de brins supérieur.

##### b. Effet de température

La résistance du matériau croit avec la température selon la loi :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{T+t_1}{T+t_2} \quad (3.2)$$

$t_1$  et  $t_2$  sont les températures en °C à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.

$R_1$  et  $R_2$  sont les résistances du conducteur respectivement aux températures  $t_1$  et  $t_2$  .

$T$  est une température paramétrique en °C lie à la nature du matériau du conducteur.

Tab 3.1: les températures de certain conducteur

T(°C)	Nature de conducteur
234.5	Pour le cuivre recuit ayant 100% de conductivité
241	Pour le cuivre étiré ayant 97.3% de la conductivité du cuivre recuit
228	Pour l'aluminium étiré (et ses alliages) ayant 61% de la conductivité du recuit

### c. Effet pelliculaire ou effet Kelvin:

En courant alternatif, la densité de courant dans un conducteur n'est pas uniforme à travers la section du conducteur.

La densité de courant va en croissant vers la périphérie du conducteur ce phénomène appelle effet pelliculaire, ou « effet kelvin ».

Ou « effet de peau », modifie la valeur de la résistance et l'inductance du conducteur.

Le facteur de Kelvin est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$q = \pi \cdot d \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}{\rho}} \quad (3.3)$$

$d$  : diamètre de conducteur en cm.

$f$  : fréquence du réseau en Hz.

$\rho$  : résistivité du métal ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ).

### 3.2.1.2 Inductance de la ligne

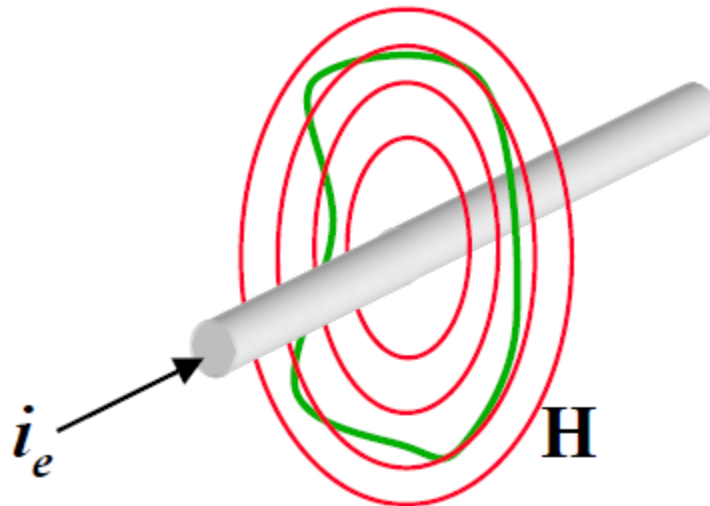
L'inductance est la grandeur du circuit qui relie la tension induite à la vitesse de la variation du courant. La variation de l'intensité de courant dans les conducteurs fait changer le nombre de ligne du champ magnétique et l'intensité de celui-ci dans le circuit. Tout variation du flux couple induit une tension proportionnel à la vitesse de variation du flux:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

### 3.2.1.2.1 Inductance d'un conducteur

#### a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur

Un courant électrique d'intensité  $I$ , parcourant un fil conducteur, crée un champ magnétique autour de celui –ici. D'après la loi de Maxwell, l'intégrale linéique de l'intensité de champ magnétique est égale au courant entouré.



Soit un conducteur de rayon  $r$  parcouru par un courant  $I$ , considérant le champ magnétique  $H$  créée à l'intérieur de ce conducteur a une distance  $x$  du centre .soit  $I_x$  le courant entoure par un cercle de rayon  $x$ .  $H$  constant à chaque point du cercle.

$$\int_0^{2\pi x} H \cdot dx = I_x \quad (3.5)$$

$$H \cdot 2\pi x = I_x \quad (3.6)$$

$$H = \frac{I_x}{2\pi x} \text{ (At/m)} \quad (3.7)$$

$$B = \mu_0 \cdot H \text{ (wb/m}^2\text{)} \quad (3.8)$$

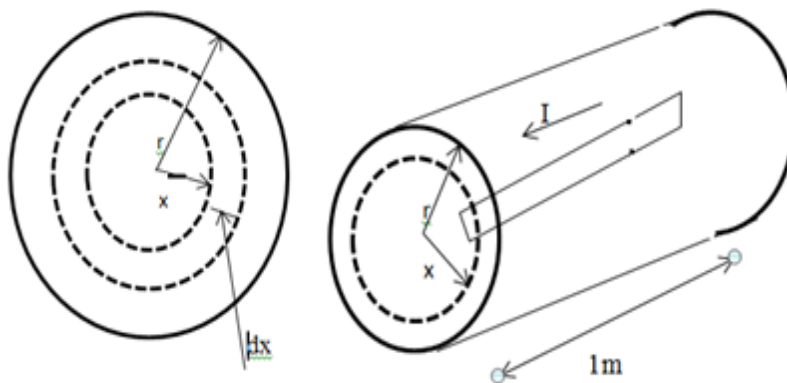


Figure 2.2 Un conducteur massif

$$B = \mu_0 \frac{I_X}{2\pi x} \quad (3.9)$$

Le flux travers une section d'épaisseur dx et de longueur de 1m est :

$$d\phi = B \cdot ds = B \cdot dx \cdot 1 \quad (3.10)$$

Supposant que la densité du courant est uniforme :

$$\frac{I_X}{\pi x^2} = \frac{I}{\pi r^2} \Rightarrow I_X = \frac{x^2}{r} I \quad (2.11)$$

Le flux intérieur entoure seulement une partie du conducteur, donc comme le courant, il constitue une portion du flux total.

$$d\psi = \frac{x^2}{r^2} d\phi$$

$$d\psi = \frac{x^2}{r^2} B dx = \frac{x^2}{r^2} \mu_0 \frac{1}{2\pi x} \frac{x^2}{r^2} dx$$

$$d\psi = \mu_0 \cdot I \frac{x^2}{2\pi r^4} dx$$

$$\psi_{int} = \int_0^r dx = \frac{I\mu_0}{2\pi r^2} \int_0^r x^3 dx$$

$$\psi_{int} = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = \frac{1}{2} 10^{-7} I \text{ (wb. t/m)} \quad (3.12)$$

$\mu_0$ : La permittivité du vide ou de l'air ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ ).

$$L_{int} = \frac{\psi_{int}}{I} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (3.13)$$

### b. Inductance d'un conducteur due au flux extérieur:

Pour déterminer le flux extérieur entre deux contours situés respectivement à la distance  $D_1$  et  $D_2$  du centre du conducteur, considérant un élément d'épaisseur dx entre  $D_1$  et  $D_2$ .

$$\int_0^{2\pi} H \cdot dx = I \quad (3.14)$$

$$H \cdot 2\pi x = I \quad (3.15)$$

$$H = \frac{I}{2\pi x} \text{ (At/m)} \quad (3.16)$$

$$B = \mu_0 H \text{ (wb/m}^2\text{)} \quad (3.17)$$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi x} \quad (3.18)$$

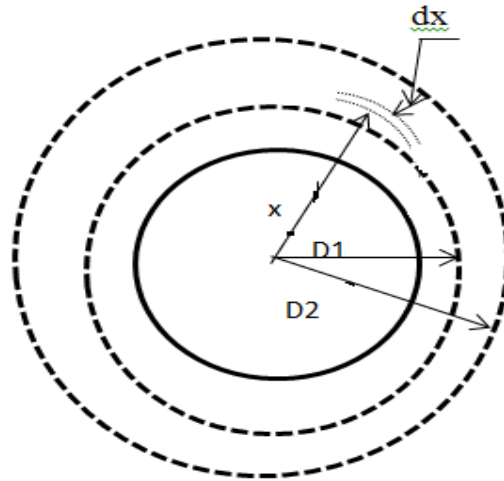


Figure 3.3 Conducteur de section circulaire plein.

Le flux à travers un cylindre d'épaisseur  $dx$  et de longueur de 1m est:

$$d\Phi = B \cdot dS = B \cdot dx \cdot 1 \quad (3.19)$$

$$d\Phi = \mu_0 I \cdot \frac{dx}{2\pi x} \quad (2.20)$$

$$d\Phi = 2 \cdot 10^{-7} I \cdot \frac{dx}{x} \quad (3.21)$$

Le flux crée entre deux contours  $D_1$  et  $D_2$

$$\psi_{12} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ (wb. } \frac{\text{t}}{\text{m}}) \quad (2.22)$$

si  $D_1 = r$  et  $D_2 = D$

$$\psi_{ext} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r} \quad (2.23)$$

L'inductance d'un conducteur due au flux extérieure

$$L_{ext} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r} \text{ (H/m)} \quad (3.24)$$

### c. L'inductance d'un conducteur due au flux total

Le flux de liaison total est :

$$\psi = \psi_{int} + \psi_{ext} \quad (3.25)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} I + 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r} \quad (3.26)$$

Sachant que:

$$2 \ln e^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2} \quad (3.27)$$

$$\Psi = 2 \cdot 10^{-7} I \left[ \ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{D}{r} \right] \quad (3.28)$$

$$\Psi = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r e^{\frac{1}{4}}} \quad (2.29)$$

En posant:

$$re^{-\frac{1}{4}} = r'(2.30)$$

Le flux crée par un conducteur est :

$$\psi = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{wb. t/m})(2.31)$$

L'inductance du conducteur est:

$$L = \frac{\psi}{I} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{H/m}). \quad (3.32)$$

### 3.2.1.2 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant

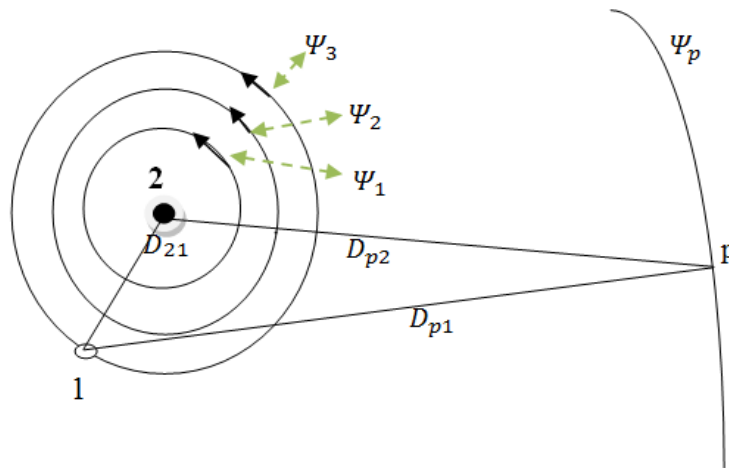


Figure 3.4 flux d'un ensemble de conducteurs en parallèle

Considérons n conducteurs parallèles parcourus chacun par un courant ( $I_1; I_2; \dots I_n$ ) et considérons que le système est équilibré

$$(I_1 + I_2 + \dots I_n = 0).$$

On a calculé le flux du au conducteur 1 seul et on a ajouté la contribution des flux des conducteurs 2,3,.....n, en faisant la superposition.

Soit le flux crée par le conducteur 2, les lignes de ce flux sont des cercles concentriques.

La ligne  $\psi_1$  du flux, n'entoure pas le conducteur 1.

Les lignes  $\psi_2$  et  $\psi_3$  et  $\psi_p$  du flux crée par le conducteur 2 entourent le conducteur 1.

La ligne  $\psi_2$  et  $\psi_p$  du flux crée par le conducteur 2 marque les limite extrêmes du flux due au conducteur 2 entourant le conducteur 1.

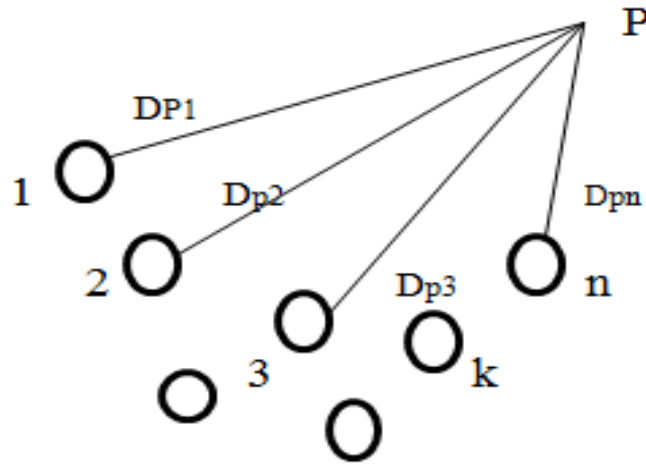
D'après la relation, le flux a un point p par le conducteur 1 est :

$$\psi_{12} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{p2}}{D_{12}} \quad (3.33)$$

De la même manière, le flux crée par le conducteur3 autour du

$$\psi_{13} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{p3}}{D_{13}} \quad (3.34)$$

$$\psi_{1n} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{pn}}{D_{1n}} \quad (3.35)$$



Le flux total crée autour du conducteur 1 a un point p distant de du centredu conducteur 1 est :

$$\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12} + \dots + \psi_{1n} \quad (3.36)$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{1j}} \quad (3.37)$$

D'une manière générale, le flux total crée autour d'un conducteur k a un point p disant de  $D_{pk}$  du centre du conducteur k est :

$$\psi_k = \psi_{k1} + \psi_{k2} + \dots + \psi_{kj} + \dots + \psi_{kk} + \dots + \psi_{kn} \quad (3.38)$$

$\psi_{k1}$  est le flux crée par le conducteur j autour de k, c'est le flux mutuel.

$$\psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{kj}} \quad (3.39)$$

$D_{jk} = D_{KJ}$  est la distance entre deux conducteurs j et k.

$D_{KK} = r'_k$  est le rayon du conducteur k.

$$\psi_K = 2 \cdot 10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{JK}} + \sum_{j=1}^n I_j \ln D_{jp} \right] \quad (2.40)$$

$$I_n = -(I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1}) = -\sum_{j=1}^{n-1} I_j \quad (3.41)$$

D'où

$$\psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{JK}} + \sum_{j=1}^{n-1} I_j + I_n \ln \frac{D_{pj}}{D_{pn}} \right] \quad (2.42)$$

Comme le point p est supposé très loin des conducteur, les valeurs :

$$\frac{D_{p1}}{D_{pn}} \cong \frac{D_{p2}}{D_{pn}} \cong \frac{D_{pn-1}}{D_{pn}} \cong 1 \quad (3.43)$$



$$\psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} \text{ (wb. t/m)} \quad (3.44)$$

### 3.2.1.2.3 Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés

Pour les conducteurs toronnés, les valeurs de RMG peuvent être calculées à partir de la section utile S du conducteur et du nombre de brins.

Tab 3.2: valeurs du RMG selon le nombre de brins

Type	$g_{11}$ RMG
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 3brins sans âme centrale	$0.4750S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{\frac{1}{2}}$

### 3.2.1.2.4 Inductance des lignes triphasées

#### a. Disposition triangle équilatéral (espacements égaux)

Les trois conducteurs de la ligne sont de rayon r et espacés de la distance D .

Les courants dans les conducteurs satisfont la relation:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

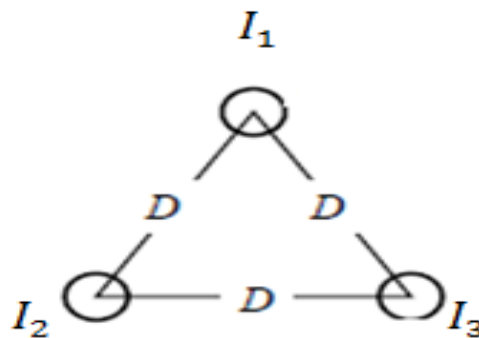


Figure 3.5 Disposition des conducteurs en triangle équilatéral

En appliquant la relation , on peut déterminer le flux du conducteur 1 du au courants  $I_1, I_2$  et  $I_3$

$$\psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^3 I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} \quad (2.45)$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{D_{11}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \quad (2.46)$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + (I_2 + I_3) \ln \frac{1}{D} \right) \quad (2.47)$$

On à :  $I_1 = -(I_2 + I_3)$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_1 \ln \frac{1}{D} \right) \quad (2.48)$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \ln \frac{D}{r'} \quad (2.49)$$

L'inductance du conducteur 1 est :

$$L_1 = \frac{\psi_1}{I_1} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad (H/m) \quad (2.50)$$

A cause de la symétrie, les trois inductances sont égales.

L'inductance linéique par phase de la ligne est :

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{g_{11}} \quad H/m \quad (2.51)$$

$r' = g_{11}$  est le rayon moyen géométrique du conducteur (RMG ).

### b. Disposition quelconque

Si les conducteurs des phases de la ligne ne sont pas régulièrement espacés, les capacités et les inductances des phases sont différentes. Ce problème peut être résolu par la transposition de la ligne.

La transposition de la ligne est la permutation des conducteurs de phase à des intervalles réguliers le long de la ligne telle que chaque conducteur occupera sa position originale.

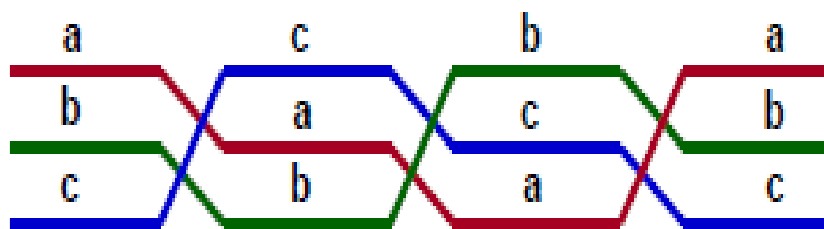


Figure 3.6: Transposition de la ligne

Les trois conducteurs de la ligne sont de rayon  $r$  et les courants dans les conducteurs satisfont la relation  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

Les distances  $D_{12} \neq D_{23} \neq D_{31}$  les inductances des phases sont différentes, cela conduit à des chutes de tension différentes dans chaque phase par conséquent les tensions à la sortie de

la ligne sont différentes. En appliquant la relation on peut déterminer le flux du conducteur 1 du aux courants  $I_1, I_2$  et  $I_3$  dans les positions I, II et III.

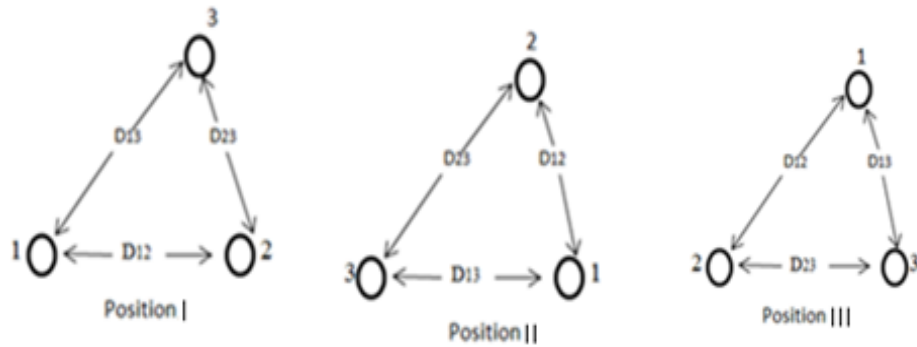


Figure 2.7 Liaisons triphasé à disposition quelconque.

$$\begin{cases} \psi_{1I} = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ \psi_{1II} = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_2 \ln \frac{1}{D_{23}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{12}} \right) \\ \psi_{1III} = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_2 \ln \frac{1}{D_{13}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \end{cases} (2.52)$$

Le flux moyen de la phase 1 on utilise les équations :

$$\psi_1 = \frac{\psi_{1I} + \psi_{1II} + \psi_{1III}}{3} \quad (3.53)$$

$$\psi_1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-7} \left( 3 \cdot I_1 \ln \frac{1}{r'} + (I_2 + I_3) \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{13}} \right) (2.54)$$

Comme  $I_1 = -(I_2 + I_3)$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} - I_1 \ln \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}} \right) (2.55)$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{r'} \right) (2.56)$$

L'inductance linéique d'une phase de la ligne est :

$$L' = \frac{\psi_1}{I}$$

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{g_{11}} \quad (H/m) \quad (3.57)$$

Avec  $D_{\text{éq}} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}$  la distance moyenne géométrique (DMG) Donc

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}}}{g_{11}} \quad (H/m) \quad (3.58)$$

### 3.2.1.2.5 Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux

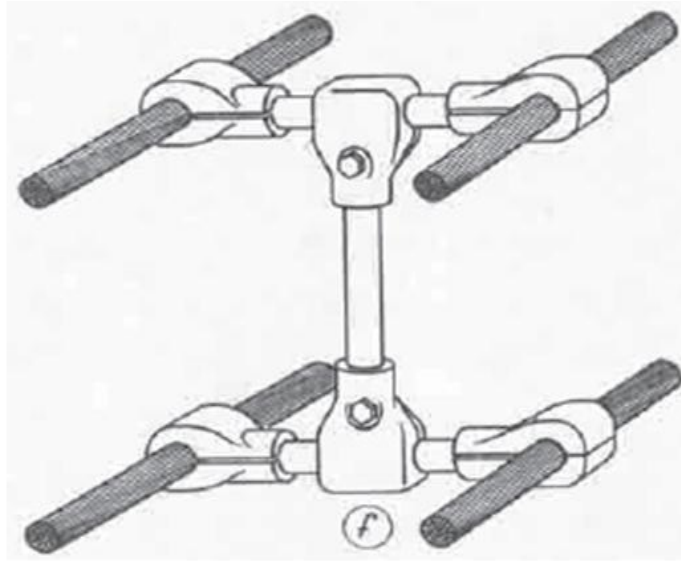


Figure 3.8 Conducteurs en faisceaux.

Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, l'inductance linéique est :

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}}}{G_{11}} \quad (3.59)$$

$$\text{Avec } G_{11} = \sqrt[n]{n \cdot g_{11} r_T^{n-1}}$$

$G_{11}$  Rayon moyen géométrique du faisceau.

$g_{11}$  Rayon moyen géométrique d'une corde.

$n$  Nombre de corde dans un faisceau

Rayon du cercle passant par les centres des cordes.  $r_T$

### 3.2.1.2.6 Inductance linéique d'une ligne triphasée à deux ternes

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}} D'_n}{g_{11} D_n} \text{ (H/m)} \quad (3.60)$$

$$\text{Avec } D_n = \sqrt[3]{D_{Aa} D_{Bb} D_{Cc}} \quad (3.61)$$

$$D'_n = \sqrt[3]{D_{Aa} D_{Bb} D_{Cc}}$$

## 3.2.2 Les paramètres transversaux

### 2.2.2.1 Conductance

Le terme  $G$ , en effet, dû aux courants superficiels au long des chaînes d'isolateurs et à l'effet couronne des conducteurs est, par temps sec,  $G$  est inférieur à  $0.005 C\omega$  ; ce n'est que sous très forte pluie, lorsque les courants superficiels et les pertes par effet couronne sont les plus

élevés, que G peut atteindre 0.1 Cω. Ces conditions étant particulièrement rares, il est donc généralement admis de négliger la conductance transversale G des lignes.

### 3.2.2.2 La capacité de la ligne

Les charges superficielles sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique perpendiculaire à la surface du conducteur et un courant capacitif. Ce phénomène est représenté par la capacité linéique C' de la ligne .pour son calcul, le fait qu' ; un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre a la périphérie (loi de faraday).

#### 3.2.2.2.1 Capacité d'une ligne monophasée

$$v_{xy} = \frac{q}{\pi \times \epsilon} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}} \quad (3.62)$$

$$c_{xy} = \frac{\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}} \quad (3.63)$$

$$v_{xn} = v_{yn} = \frac{v_{xy}}{2} \quad (3.64)$$

$$c_{xy} = \frac{\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}} (f/m) \quad (3.65)$$

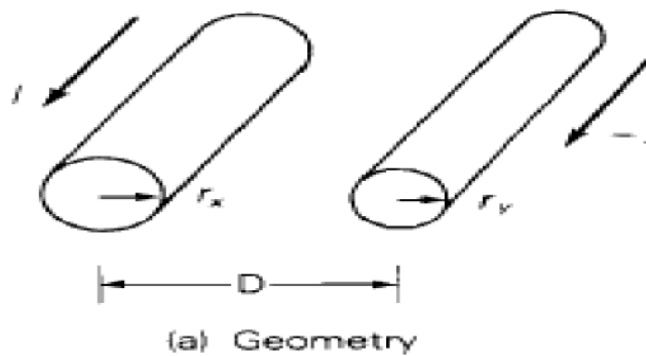


Figure 3.9 Liaison monophasée

#### 3.2.2.2.2 Capacité d'une ligne triphasée

On montre les trois conducteurs A, B et C de la ligne triphasée de transport aérienne ayant des charges QA, QB et QC par mètre de longueur, respectivement. Que les conducteurs soient équidistants (mètres d) de l'autre. Nous allons trouver la capacité de conducteur de ligne à neutre dans cette ligne espacés symétriquement. En se réfèrent à la (Figure 9)

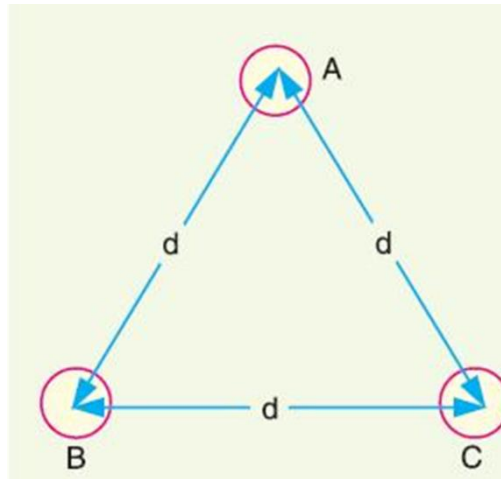


Figure 3.10 Liaison triphasée avec espacement de phase égal.

$$D_{ab} = D_{ba} = D_{ca} = D_{cb} = D$$

$$D_{aa} = D_{bb} = r$$

$$\begin{cases} V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D}{r} + q_a \ln \frac{r}{D} \right] \\ V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \\ V_{an} = \frac{q_a \ln \frac{D}{r}}{2 \times \pi \times \epsilon} \end{cases} \quad (3.66)$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} F/m \quad (3.67)$$

**b. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase inégal**

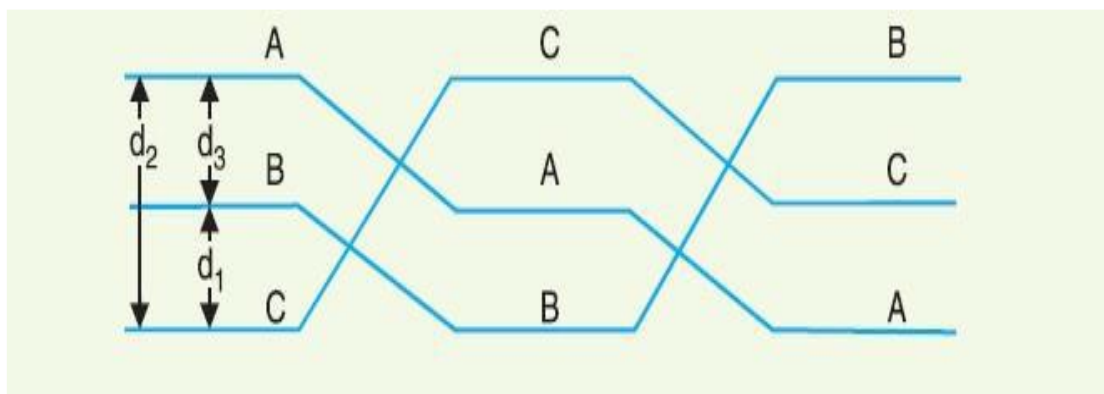


Figure 2.11 Liaison triphasée avec espacement de phase inégal.

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_a \ln \frac{r}{D_{eq}} \right]$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \quad (3.68)$$

$$V_{an} = \frac{q_a \ln \frac{D_{eq}}{r}}{2 \times \pi \times \epsilon}$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{r}} \text{ F/m}$$

Ou ,

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}; \quad (3.69)$$

$D_{eq}$ : Distance géométrique moyenne (GMD)

### 2.2.2.3 capacité des conducteurs en faisceaux

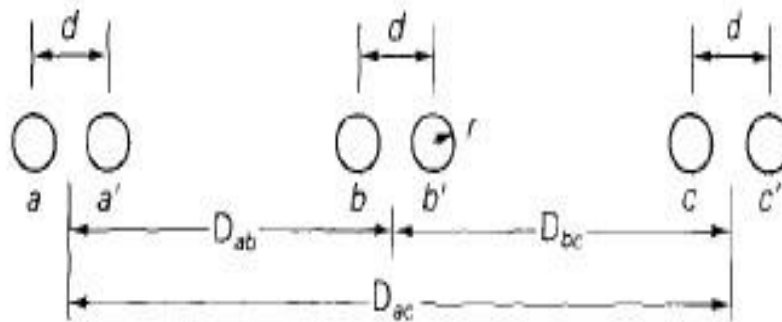


Figure 3.12 Ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux

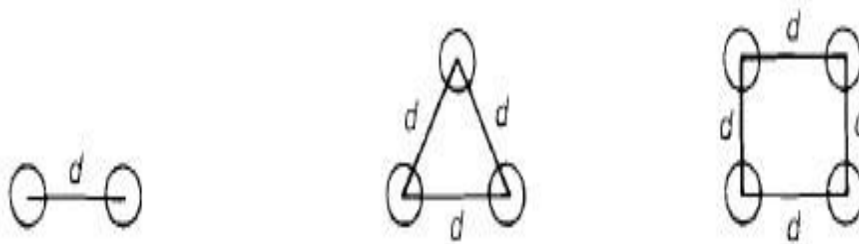


Figure 3.13 La configuration des conducteurs en faisceaux.

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{ba}}{\sqrt{rd}} + q_a \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right] \quad (3.70)$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{D_{sc}}} \text{ F/m} \quad (3.71)$$

Ou:

$D_{sc} = \sqrt{rd}$  Pour deux conducteurs en faisceaux.

$D_{sc} = \sqrt[3]{rd^2}$  Pour trois conducteurs en faisceaux.

$D_{sc} = 1.091 \times \sqrt[4]{rd^3}$  Pour quatre conducteurs en faisceaux.

### 3.2.2.2.4 Effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée

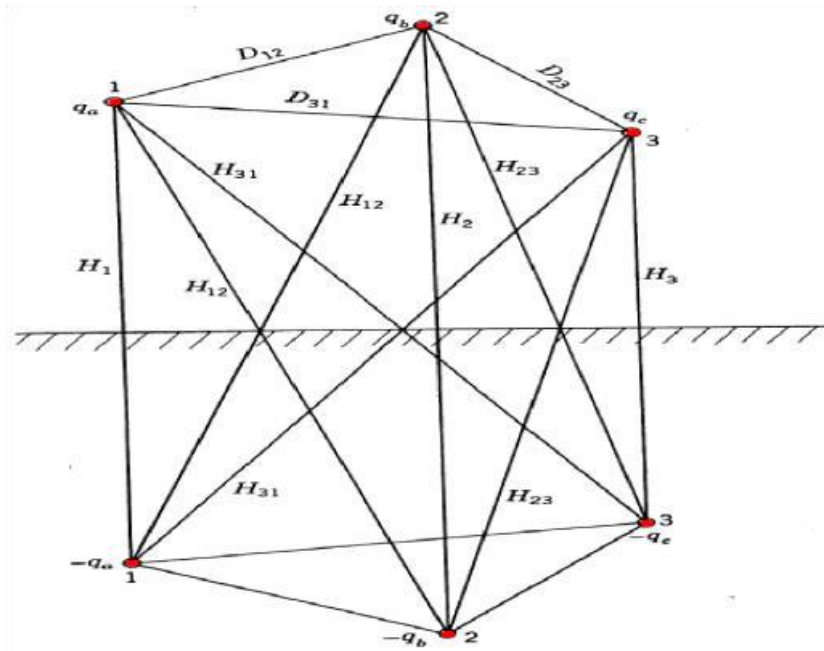


Figure 3.14 effet partielle à la terre

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{Deq}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{13}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}}\right)} \quad (3.72)$$

### 3.3 Ligne de transport d'énergie électrique

Le transport d'énergie électrique est le mouvement massif d'énergie électrique d'un site de production, tel qu'une centrale, à un poste électrique. Les lignes interconnectées qui facilitent ce mouvement sont appelées réseau de transport. Ceci est distinct du câblage local entre les sous-stations à haute tension et les clients, ce qui est généralement appelé la distribution d'énergie électrique. Le réseau de transport et de distribution combiné est connu sous le nom de « power grid », réseau électrique en Amérique du Nord , ou simplement « the grid », le réseau. Au Royaume-Uni , en Inde , en Malaisie et en Nouvelle-Zélande, le réseau est connu sous le nom de « National Grid ».

### 3.4 Type de ligne:

Les ligne sont classés par leur longueur, ces classifications sont :

- La ligne courte qui est à moins de 80 km de long.
- La ligne moyenne dont la longueur de 80 km à 250 km.
- La ligne longue qui est plus de 250 km [10].



❖ Paramètres de transfert de la ligne (Equation de la ligne)

Tout réseau électrique comporte généralement deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie. Si nous considérons tout réseau électrique complexe dans une boîte noire, il aura deux bornes d'entrée et des bornes de sortie. Ce réseau s'appelle un réseau à deux ports. Le modèle à deux ports d'un réseau simplifie la technique de résolution du réseau [11].

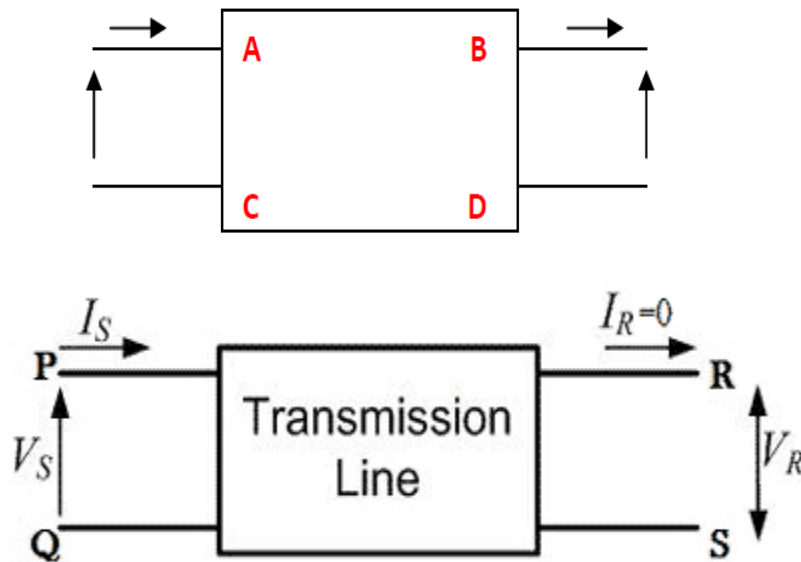


Figure 3.15 : Modèle de réseau en quadripôle

Mathématiquement, un réseau à deux ports peut être résolu par une matrice 2 par 2. Par conséquent, deux réseaux de port de ligne de transmission peuvent être représentés comme 2 par 2 matrices. Ici, le concept des paramètres ABCD vient. La tension et les courants du réseau peuvent être représentés sous forme de système d'équations :

$$\begin{cases} V_S = AV_R + BI_R \\ I_S = CV_R + DI_R \end{cases} \quad (3.73)$$

Ou par la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_S} \\ \overline{I_S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{V_R} \\ \overline{I_R} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Pour donner un sens physique aux éléments ( paramètres) du quadripôle ABCD, on peut l'assimiler à un circuit électrique , par exemple si on donne zéro à la tension de réception (  $V_R=0$ ) on peut calculer B comme suit :

$$V_S = A \cdot 0 + BI_R \Rightarrow V_S = 0 + BI_R$$

$$B = \left. \frac{V_S}{I_R} \right|_{V_R=0} \quad (3.75)$$

Par conséquent B peut représenter l'impédance de court circuit car  $V_R = 0$

De la même manière on peut donner des spécifications pour chaque paramètre représentées dans le tableau suivant :

Tab 3.3: Spécification des paramètres ABCD

Paramètre	Spécification
$A = V_S / V_R$	Rapport des tensions
$B = V_S / I_R$	Impédance de court-circuit
$C = I_S / V_R$	Conductance du circuit ouvert
$D = I_S / I_R$	Rapport des courants

### 3.4.1 Ligne courtes

Les lignes de transmission dont la longueur est inférieure à 50 km sont généralement appelées lignes de transmission courtes . Pour une longueur courte, la capacité de dérivation de ce type de ligne est négligée et d'autres paramètres comme la résistance électrique et l'inductance de ces lignes courtes sont groupés, d'où le circuit équivalent est représenté comme indiqué ci-dessous [11].

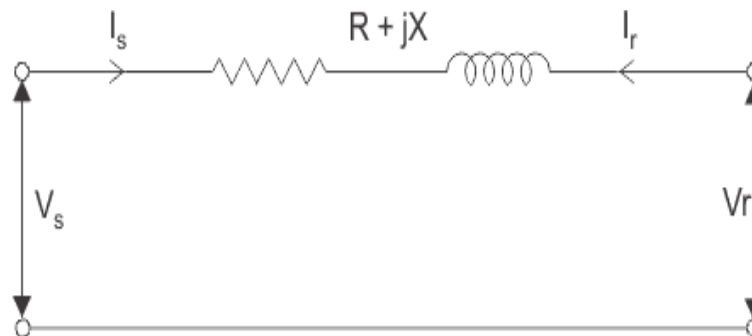


Figure 3.16 Modèle d'une ligne courtes

Dans ce type de ligne, la longueur est courte ce qui empêche l'apparition de l'effet capacitif donc le modèle de cette ligne est simple et contient seulement la composante série de la ligne représentée par son impédance  $L$  où la résistance  $R$  est plus grande que la réactance  $X$ .

$$\begin{bmatrix} \overline{V_S} \\ \overline{I_S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \overline{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_R} \\ \overline{I_R} \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Ainsi  $A= 1$  ,  $B= Z$  ,  $C= 0$  et  $D= 1$

Remarque : la relation suivante entre les paramètres doit être toujours vérifiée :

$$AD-BC= 1$$

### 3.4.2 Ligne moyenne

La ligne de transmission ayant sa longueur effective supérieure à 80 km mais inférieure à 250 km est généralement appelée ligne de transmission moyenne. Étant donné que la longueur de la ligne est considérablement élevée, l'entrée Y du réseau joue un rôle dans le calcul des paramètres du circuit effectif, contrairement au cas des lignes de transmission courtes. Pour cette raison, la modélisation d'une ligne de transmission de longueur moyenne se fait en utilisant une admittance de dérivation groupée ainsi que l'impédance groupée en série sur le circuit.

Ces paramètres groupés d'une ligne de transmission de longueur moyenne peuvent être représentés en utilisant trois modèles différents, à savoir

- Représentation nominale  $\Pi$ .
- Représentation nominale T.

#### Représentation d'une ligne moyenne modèle en $\pi$

Dans le cas d'une représentation nominale  $\Pi$ , l'impédance de série groupée est placée au milieu du circuit où, lorsque les admittances de dérivation sont aux extrémités. Comme on peut le voir sur le schéma du réseau  $\Pi$  ci-dessous, l'admittance de dérivation totale est divisée en 2 moitiés égales, et chaque moitié avec la valeur  $Y / 2$  est placée à la fois dans l'envoi et dans la réception, tandis que l'impédance totale du circuit se situe entre les deux. La forme du circuit ainsi formé ressemble à celle d'un symbole  $\Pi$  et, pour cette raison, elle est connue comme la représentation nominale  $\Pi$  d'une ligne de transmission moyenne. Il est principalement utilisé pour déterminer les paramètres généraux du circuit et effectuer l'analyse du débit de charge.

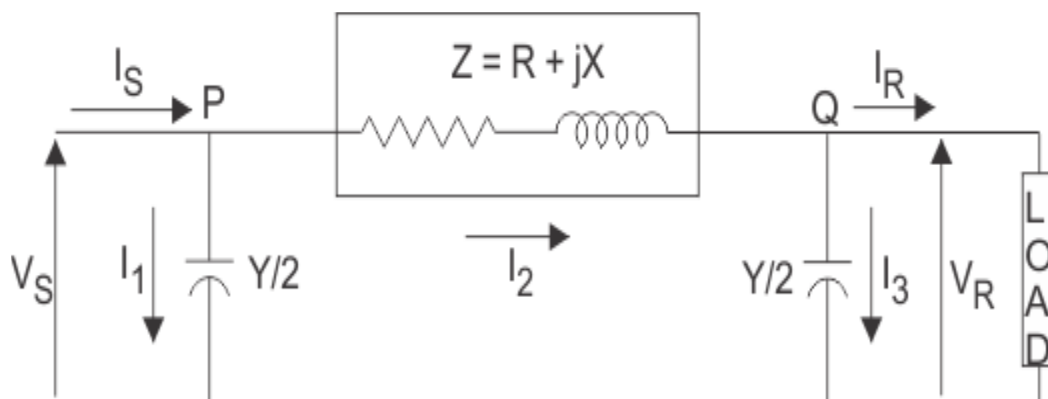


Figure 3.17 Modèle de ligne moyenne en  $\pi$ .

On peut voir ici, VS et VR sont respectivement les tensions d'alimentation et de réception, et c'est le courant qui traverse l'extrémité d'alimentation.

$I_R$  est le courant qui traverse l'extrémité de réception du circuit.

$I_1$  et  $I_3$  sont les valeurs des courants traversant les admittances. Et  $I_2$  est le courant par l'impédance Z.

En appliquant maintenant KCL, au nœud P, nous obtenons.  $I_S = I_1 + I_2 \dots \dots \dots (1)$

D'une façon similaire, au nœud Q :  $I_2 = I_3 + I_R \dots \dots \dots (2)$

Remplaçons l'équation (2) dans l'équation (1) :  $I_S = I_1 + I_3 + I_R$

$$= \frac{y}{2} v_s + \frac{y}{2} v_r + I_R \dots \dots \dots (3)$$

En appliquant la loi des mailles ( Kirchhoff) :

$$V_S = V_R + ZI_2 \tag{3.77}$$

Nous trouverons :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_S} \\ \overline{I_S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\overline{Y}\overline{Z}}{2}\right) & \overline{Z} \\ \overline{Y}\left(1 + \frac{\overline{Y}\overline{Z}}{4}\right) & \left(1 + \frac{\overline{Y}\overline{Z}}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_R} \\ \overline{I_R} \end{bmatrix} \tag{3.78}$$

En comparant la représentation matricielle précédente avec la forme standard de la matrice des paramètres ABCD:

$$V_S = AV_R + BI_R \tag{3.79}$$

$$I_S = CV_R + DI_R \tag{3.80}$$

On peut déterminer les paramètres ;

$$A = \left(\frac{Y}{2}Z + 1\right) \tag{3.81}$$

$$B = Z \tag{3.82}$$

$$C = Y\left(\frac{Y}{4}Z + 1\right) \tag{3.83}$$

$$D = \left(\frac{Y}{2}Z + 1\right) \tag{3.84}$$

### Représentation d'une ligne moyenne modèle en T:

Dans le modèle T nominal d'une ligne de transmission moyenne, l'admittance de dérivation groupée est placée au milieu, tandis que l'impédance de série nette est divisée en deux moitiés

égales et est placée de part et d'autre de l'admission de shunt. Le circuit ainsi formé ressemble au symbole d'un T principal, et est donc connu sous le nom de réseau T nominal d'une ligne de transmission de longueur moyenne et est représenté dans le diagramme ci-dessous.

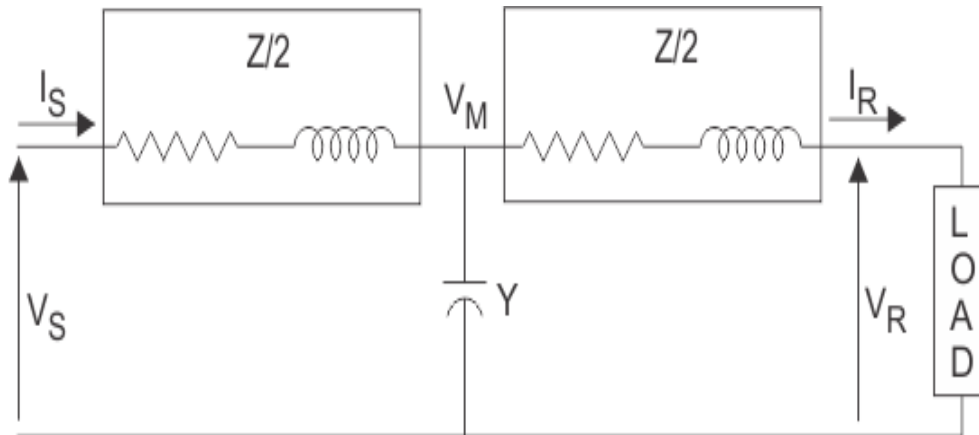


Figure 3.18 Modèle de ligne moyenne en T

Ici aussi  $V_S$  et  $V_R$  sont respectivement les tensions d'alimentation et de réception, et  $I_R$  est le courant qui traverse l'extrémité réceptrice du circuit.

Soit M un nœud au point milieu du circuit,

De la même manière on peut trouver les paramètres de la ligne moyenne

$$A = \left(\frac{Y}{2}Z + 1\right) \quad (3.85)$$

$$B = Z \left(\frac{Y}{4}Z + 1\right) \quad (3.86)$$

$$C = Y \quad (3.87)$$

$$D = \left(\frac{Y}{2}Z + 1\right) \quad (3.88)$$

### 3.4.3 Ligne longue

Une ligne de transmission d'énergie avec sa longueur effective d'environ 250 Kms ou plus est appelée une longue ligne de transmission. Les constantes de ligne sont uniformément réparties sur toute la longueur de la ligne. Les calculs liés aux paramètres du circuit (paramètres ABCD) d'une telle transmission de puissance ne sont pas simples, comme c'était le cas pour une courte ligne de transmission ou une ligne de transmission moyenne.

La raison en est que, la longueur du circuit effectif dans ce cas est beaucoup plus élevée que ce qu'il était pour les anciens modèles (ligne longue et moyenne) et excluant ainsi les approximations considérées comme telles. Plutôt, pour toutes les raisons pratiques, nous

devrions considérer l'impédance du circuit et l'admittance à distribuer sur toute la longueur du circuit comme indiqué dans la figure ci-dessous.

Les calculs des paramètres de circuit pour cette raison vont être légèrement plus rigoureux que nous le verrons ici. Pour une modélisation précise pour déterminer les paramètres du circuit, considérons le circuit de la ligne de transmission longue comme indiqué dans le schéma ci-dessous.

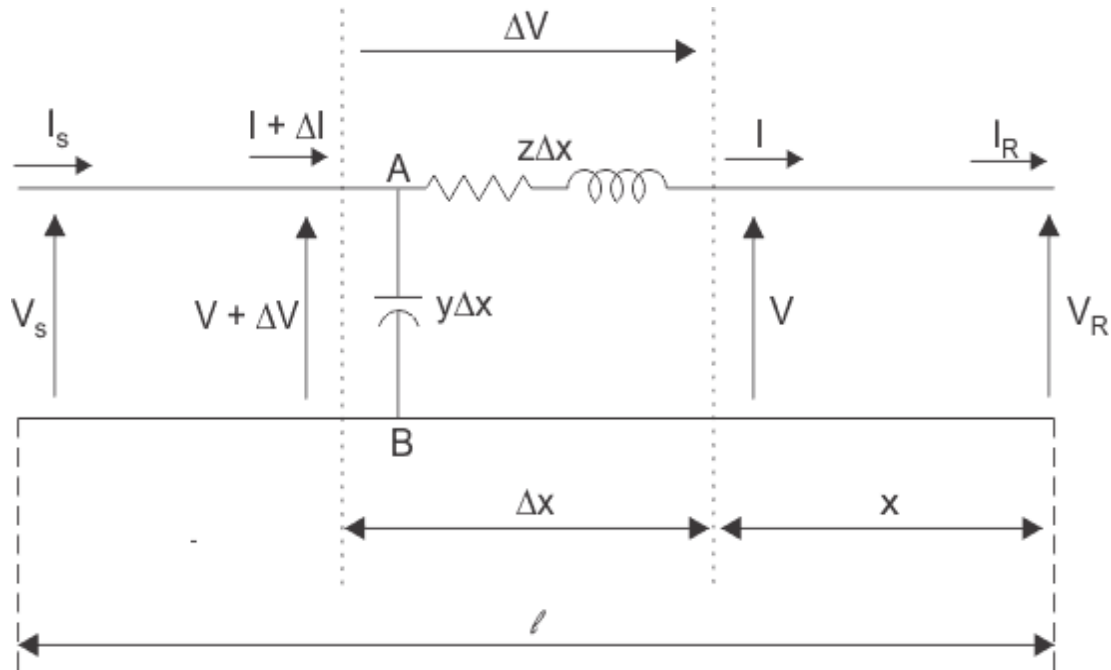


Figure 3.19 Modèle de longue ligne.

Ici, une ligne de longueur de  $l > 250$  km est fournie avec une tension d'extrémité d'émission et un courant de  $V_S$  et  $I_S$  respectivement, où  $V_R$  et  $I_R$  sont les valeurs de tension et de courant obtenues à partir de l'extrémité de réception. Considérons maintenant un élément de longueur infinie  $\Delta X$  à une distance  $X$  de l'extrémité réceptrice comme indiqué sur la figure où.

$V$  = valeur de la tension juste avant d'entrer l'élément  $\Delta x$

$I$  = valeur du courant juste avant d'entrer l'élément  $\Delta x$

$V + \Delta V$  = tension quittant l'élément  $\Delta x$ .

$I + \Delta I$  = courant quittant l'élément  $\Delta x$ .

$\Delta V$  = baisse de tension à travers l'élément

$z\Delta x$  = impédance série de l'élément  $\Delta x$

$y\Delta x$  = admission de dérivation de l'élément  $\Delta x$

Où,  $Z = z l$  et  $Y = y l$  sont les valeurs de l'impédance totale et l'admission de la ligne de transmission longue.

$$z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad \Omega \text{ Impédance caractéristique de la ligne}$$

$$\delta = \sqrt{y z} \text{ constante de propagation}$$

Finalement on aura les deux équations suivantes:

$$V_s = V_R \cosh \delta l + Z_C I_R \sinh \delta l \quad (3.89)$$

$$I_s = \frac{V_R \cos h \delta l}{Z_C} + I_R \sinh \delta l \quad (3.90)$$

D'où les paramètres ABCD peuvent être exprimés comme suit:

$$A = \cosh \delta l \quad (3.91)$$

$$B = Z_C \sinh \delta l \quad (3.92)$$

$$C = \frac{\sinh \delta l}{Z_C} \quad (3.93)$$

$$D = \cosh \delta l \quad (3.94)$$

### 3.5 Exercices de chapitre 3

#### Exercice 01

La résistance d'un fil de 5 m de longueur est de 600  $\Omega$ . Déterminer :

- la résistance d'une longueur de 8 m du même fil
- la longueur du même fil lorsque la résistance est de 420  $\Omega$

#### Exercice 02 .

Une bobine de fil de cuivre a une résistance de 100 quand sa température est de 0°C. Déterminer sa résistance à 70°C si le coefficient de température de résistance du cuivre à 0°C est de 0,0043 /°C.

#### Exercice 03

Un générateur monophasé de fréquence 60 Hz alimente une charge inductive de puissance 4500KW et un facteur de puissance de 0.8 AR (en retard) avec une ligne de transport à 20km, la résistance et inductance linéiques de la ligne sont respectivement, 0.0195  $\Omega$ /Km et 0.60 mH/Km, la tension réceptionnée par le récepteur est e 10.2 KV.

Calculer :

- la tension fournie par le générateur (Vs)
- la régulation de la tension
- la valeur du capacité placée en parallèle de la charge pour avoir un régulation de 60%
- comparer le rendement de la ligne avant et après compensation

## CHAPITRE IV

### TRANSFORMATEURS ET SYSTEME D'UNITE RELATIVE

#### 4.1 Introduction

Le transformateur permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur efficace de la tension. La tension peut être soit élevée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique. Parmi les applications des transformateurs, on note :

- (a) alimentation à basse tension
- (b) adaptation d'impédance
- (c) transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité
- (d) alimentation à basse tension
- (e) transformateurs d'intensité de courant
- (f) transformateurs de potentiel

Le transformateur joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. C'est l'un des éléments que l'on retrouve aux différents niveaux de tension du réseau électrique. L'élévation de la tension à la sortie des centrales et la diminution au niveau de l'utilisation est assurée par les transformateurs triphasés. Le transformateur permet donc de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue.

#### 4.2 Transformateur monophasé parfait

Un transformateur monophasé est constitué d'un circuit magnétique constitué de tôles de matériaux ferromagnétiques et éventuellement d'un entrefer. Deux bobinages, l'un est appelé primaire, les autres secondaires. Le circuit magnétique d'un transformateur parfait présente une perméabilité magnétique infinie : sa réluctance est nulle, il n'y a pas de fuites de flux, pas de pertes ferromagnétiques (hystérésis et courants de Foucault). La résistance des enroulements est nulle (pas de pertes par effet Joule).



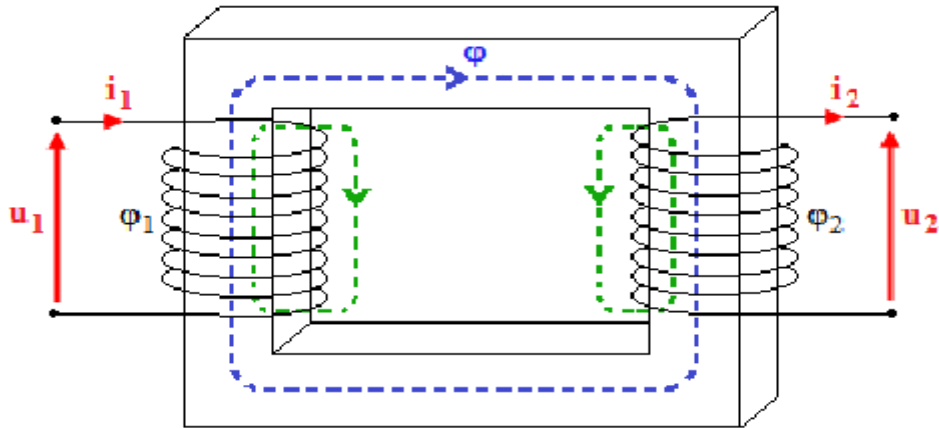


Figure 4.1 Schéma de principe d'un transformateur monophasé

### 4.3 Equation d'un transformateur monophasé

Le flux à travers une section du circuit magnétique est noté par  $\varphi(t)$ .

Le flux total  $\varphi_1(t)$ , pour l'enroulement primaire.

$$\varphi_1(t) = N_1 \varphi(t) \quad (4.1)$$

Le flux total  $\varphi_2(t)$  pour l'enroulement secondaire.

$$\varphi_2(t) = N_2 \varphi(t) \quad (4.2)$$

La tension  $u_1$  en fonction de  $\varphi_1(t)$  (loi de Faraday) :

$$u_1(t) = -d\varphi_1(t)/dt \quad (4.3)$$

La tension  $u_2$  en fonction de  $\varphi_2(t)$  (loi de Faraday) :

$$u_2(t) = -d\varphi_2(t)/dt \quad (4.4)$$

Pour les valeurs efficaces des tensions

$$u_2/u_1 = N_2/N_1 \quad (4.5)$$

Pour les valeurs efficaces des courants

$$I_1/I_2 = N_1/N_2 \quad (4.6)$$

Pour un transformateur parfait

On note  $m$  le rapport du nombre de spires secondaires sur le nombre de spires primaires. Cette grandeur est appelée « rapport de transformation ».

Avec :

Un transformateur est parfait :  $N_1 I_1 + N_2 I_2 = 0$

$$u_2/u_1 = m \quad (4.5)$$

$$I_2/I_1 = 1/m \quad (4.6)$$

Les puissances apparentes au primaire et au secondaire sont égales pour un transformateur parfait.

$$S_1 = S_2 = U_1 * I_1 = U_2 * I_2 \quad (4.6)$$

Le schéma équivalent est :

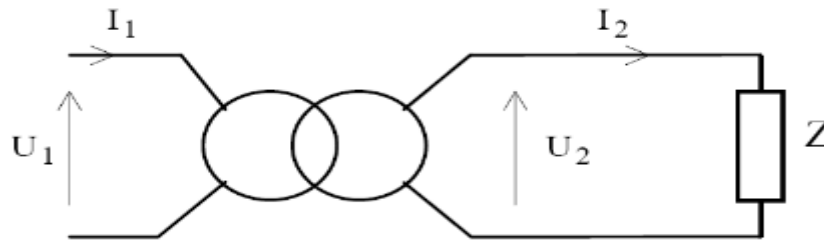


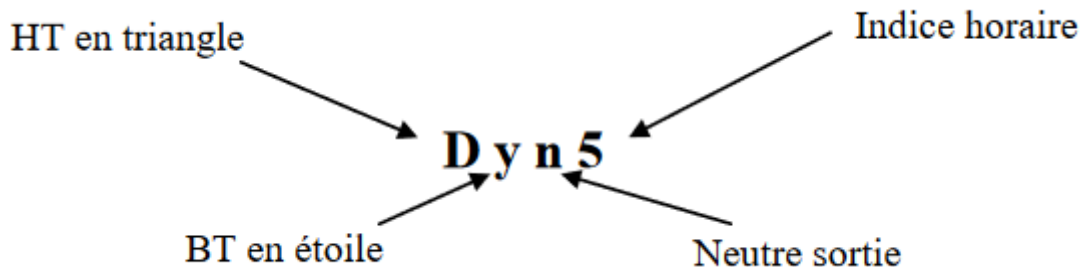
Figure 4.2 Schématique équivalent d'un transformateur monophasé parfait

#### 4.5 Transformateur triphasé

Le transformateur triphasé comporte trois enroulements au primaire et au secondaire. Les bornes du côté HT sont représentés par les lettres majuscules (A, B, C) et les bornes du côté BT par les lettres minuscules (a, b, c) et un chiffre ;

Le mode de branchement des enroulements se fait en étoile (Y ou y) avec ou sans neutre, en triangle (D ou d) ou en zig-zag (z) ;

L'association d'un mode de connexion HT avec un mode de connexion BT caractérise un couplage de transformateur.



Type de couplage d'un transformateur triphasé

##### 4.5.1 Grandeurs nominales et autres caractéristiques:

$U_{1n}, U_{2n}$  (kV) : Tensions nominales entre phases au primaire et au secondaire respectivement;

$I_{1n}, I_{2n}$  (A): Courants nominaux dans un fil de ligne au primaire et au secondaire respectivement;

$S_n$  (kVA) : Puissance apparente nominale  $S_n = 3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}$  ;

$m = U_{20}/U_1$ : Rapport de transformation ( $U_{20}$  est la tension secondaire entre phases à vide) ;

$P_{cc}(\%)$ ,  $P_0(\%)$  : puissances de court-circuit et à vide (au primaire) respectivement;

$U_{cc}(\%)$ : Tension entre phases de court-circuit au primaire ;

$I_m(\%)$ : Courant magnétisant.

#### 4.6 Modélisation du transformateur

Quel que soit le mode de couplage, le transformateur peut être modélisé par le schéma équivalent présenté sur la figure 4.3:

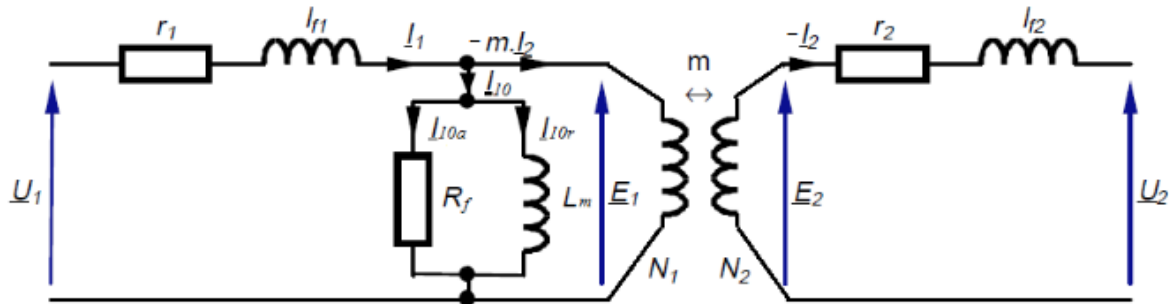


Figure 4.3 : Circuit équivalent du transformateur d'un transformateur monophasé

Tel que:

$z_1 = r_1 + j x_1$  : Impédance de l'enroulement primaire ( $x_1 = \omega l_{11}$ ) ;

$z_2 = r_2 + j x_2$  : Impédance de l'enroulement secondaire ( $x_2 = \omega l_{12}$ ) ;

$y = G_f + j B_m$  : Admittance représentant les pertes de fer et réactance magnétisante ( $G_f = 1/R_f$  et  $B_m = 1/X_m$  avec  $X_m = \omega L_m$ ) ;

$U_1, I_1$ : Tension et courant au primaire du transformateur respectivement;

$U_2, I_2$ : Tension et courant au secondaire du transformateur respectivement;

$E_1, E_2$  : Tensions aux bornes des enroulements du transformateur idéal respectivement;

$I_{10}$  : Courant qui traverse la branche magnétisante ;

$m$ : Rapport de transformation du transformateur idéal.

#### 4.7 Modes de couplage des transformateurs

Le choix entre les différentes connexions résulte de considération de construction et d'exploitation (Nombre de spires et isolement, dimensionnement des conducteurs, nécessité d'avoir un neutre et fonctionnement sur charge déséquilibrée).

- ❖ Au primaire (figure 4.4), les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle(D)

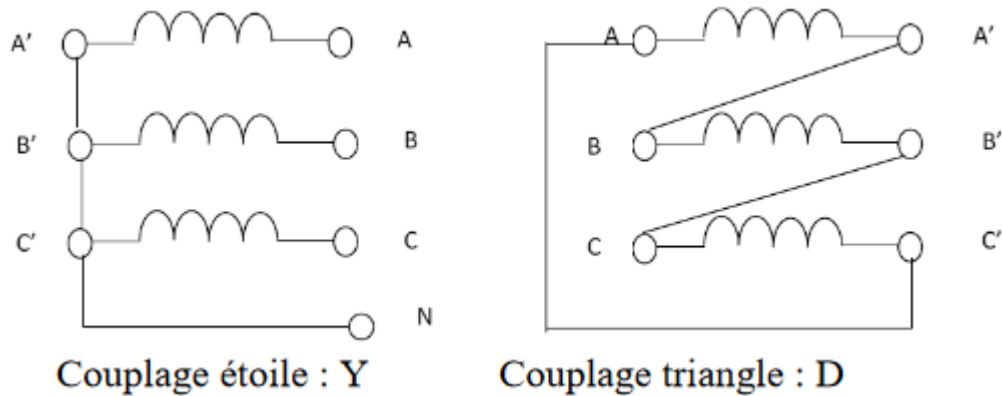


Figure 4.4 : Modes de couplage au primaire d'un transformateur

- ❖ Au secondaire (figure 4.5), les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : Etoile (y), triangle (d) et zig-zag (z)

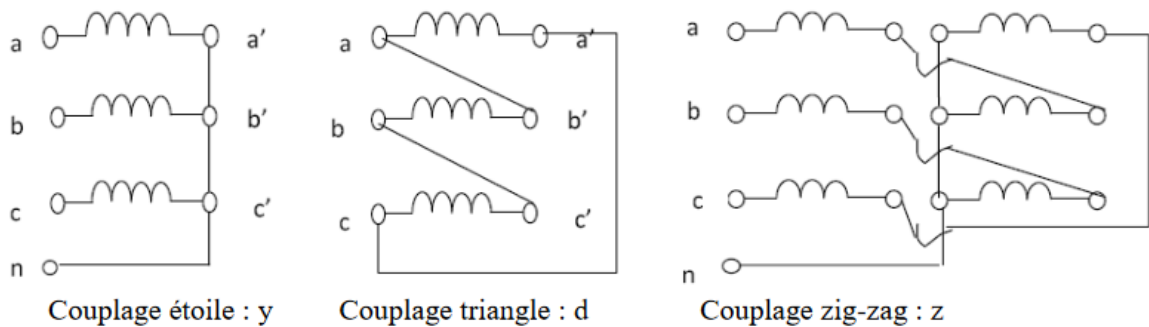


Figure 4.5 Modes de couplage au secondaire d'un transformateur

On obtient ainsi six (6) couplages possibles entre primaire et secondaire :

Y-y : étoile – étoile

Y-d : étoile – triangle

Y-z : étoile – zigzag

D-y : triangle – étoile

D-d : triangle – triangle

D-z : triangle – zigzag

#### 4.8 Couplages usuels des transformateurs triphasés

La figure 4.6 donne le symbole, le déphasage  $\theta$  de  $v_a$  en arrière de  $V_a$ , le rapport de transformation, le montage électrique des phases et le diagramme vectoriel correspondant aux transformateurs usuels. Le symbole comporte trois indications : le couplage des phases primaires, celui des phases secondaires et l'indice horaire.

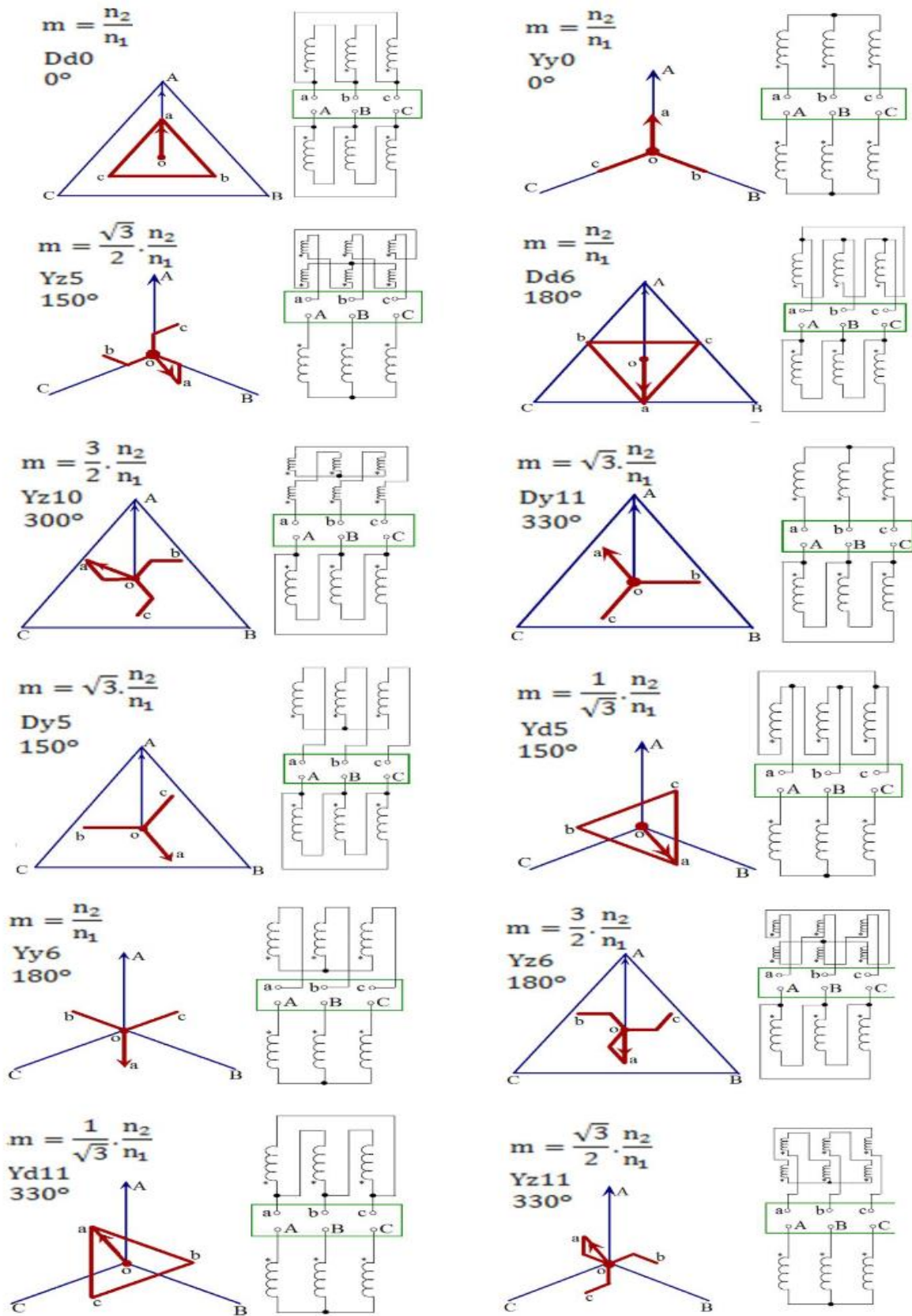


Figure .4.6: Couplage possible des transformateurs triphasé

#### 4.9 Choix du couplage

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La nécessité d'avoir un neutre pour l'alimentation justifie le choix des couplages Y et Z ;
- Coté haute tension, on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser) ;
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle (Pour une même intensité en ligne le triangle entraîne une section de conducteur plus faible) ;
- Le fonctionnement est déséquilibré, la connexion zig-zag introduit un plus faible déséquilibre; Parmi ses défauts, il est relativement complexe à construire.

#### 4.10 Détermination des paramètres du transformateur.

##### Résistance $R_T$

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

$$R_T = (P_{cc} (\%)/100) \cdot (U_1 n^2 / S_n) \quad (4.7)$$

avec  $P_{cc} (\%) = P_{cc} / S_n \cdot 100$

$$P_{cc} = 3 \cdot R_T \cdot I_1 n^2$$

$P_{cc}$  : Pertes dans le cuivre

##### Réactance $X_T$

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

$$X_T = (Z_T^2 - R_T^2)^{1/2} \quad (4.8)$$

$$Z_T = (U_{cc} (\%) / 100) \cdot U_1 n^2 / S_n$$

(4.3)

avec

$$U_{cc} \% = (U_{cc} / U_1 n) \cdot 100$$

$$U_{cc} = \sqrt{3} \cdot Z_T \cdot I_1 n$$

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

##### Conductance $G_f$

$$G_f = (P_f (\%) / 100) / S_n / U_1 n^2 \quad (4.9)$$

avec

$$P_f (\%) = P_f / S_n \cdot 100$$

$$P_f = U_1 n^2 / R_f$$

$$G_f = 1 / R_f$$

$P_f$  : Pertes dans le fer

##### Réactance magnétisante $X_m$

$$B_m = I_m (\%) / 100 \cdot S_n / U_1 n^2 \quad (4.10)$$

avec

$$I_m (\%) = I_m / I_{1n} \cdot 100$$

$$I_m = S_m / \sqrt{3} \cdot U_{1n}$$

$$B_m = 1 / X_m$$

$I_m$  : Courant magnétisant

#### 4.11 Chute de tension dans le transformateur

$$\Delta V_2 = R_S I_2 \cos \delta_2 + X_S I_2 \sin \delta_2 \quad (4.11)$$

Avec,  $R_S$  et  $X_S$  sont la résistance et la réactance du transformateur ramenées au secondaire.

#### 4.11 Rendement du transformateur

$$\eta = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \delta_2 / \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \delta_2 + P_f + P_{Joule} \quad (4.12)$$

#### 4.12 Indice horaire de couplage

Le déphasage des tensions simples correspondantes  $V_{AN}$  et  $v_{an}$ ,  $V_{BN}$  et  $v_{bn}$ ,  $V_{CN}$  et  $v_{cn}$  à vide comme montré sur la figure 4.7

Dépendant des couplages primaire et secondaire, ce déphasage  $\theta$  est un multiple de  $\pi/6$ .

L'indice horaire indique sa valeur

- Comptée dans le sens horaire ;
- En prenant pour origine des phases la tension primaire ;
- Par un nombre égal au quotient de  $\theta$  par  $\pi/6$ .

Ainsi, l'indice 5 signifie que  $v_{an}$  est en retard de  $5\pi/6$  par rapport à  $V_{AN}$ .

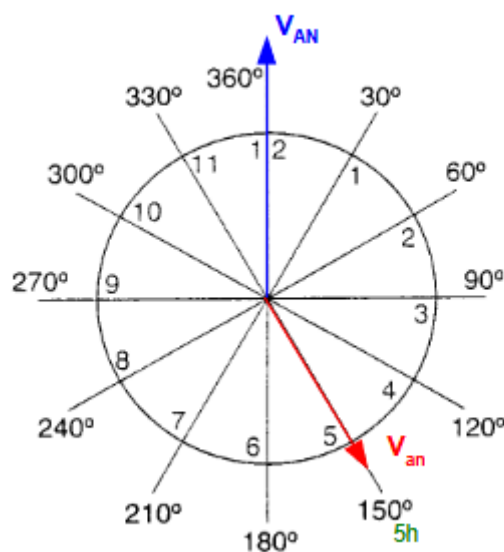


Figure 4.7: Exemple de couplage horaire 5 heures

#### 4.13 Intérêt de l'indice horaire

Pour des raisons de continuité de service, ou des variations journalières voire saisonnières de la consommation (il est nécessaire de pouvoir coupler en parallèle plusieurs transformateurs afin de satisfaire à la demande d'énergie électrique), pour une modification d'installation.

#### Exemple de couplage

Les transformateurs de distribution HTA/BT ont généralement le couplage D-y n 11. La figure 4.8, montre le couplage des enroulements et leurs raccordements sur la plaque à bornes.

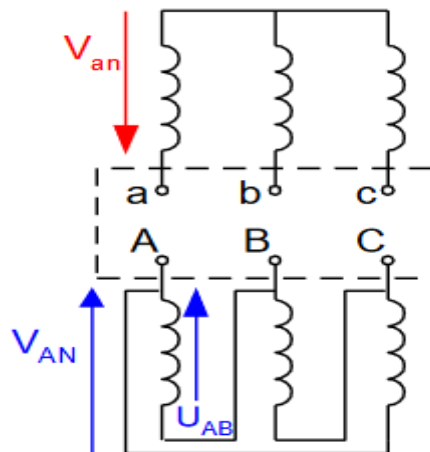


Figure .IV.8 Représentation des vecteurs des tensions au primaire et au secondaire du transformateur

On trace le graphique des tensions pour vérifier l'indice horaire de ce transformateur en considérant que le sens d'enroulement des bobines primaire et secondaire est identique.

Le vecteur tension  $V_{AN}$  est pris comme origine et positionné à 12 heures ; on construit alors les vecteurs  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ .

Il suffit ensuite de construire les tensions secondaires en remarquant que les tensions, aux bornes d'enroulements appartenant au même noyau, sont en concordance de phase ou en opposition de phase.

Dans l'exemple montré sur la figure IV.9, la tension  $V_{an}$ , est en concordance de phase avec la tension  $U_{AB}$ . Le graphique montre que le vecteur tension  $V_{an}$ , est bien positionné à 11 heures (c'est-à-dire  $\theta = 11 \times 30 = 330^\circ$ ).



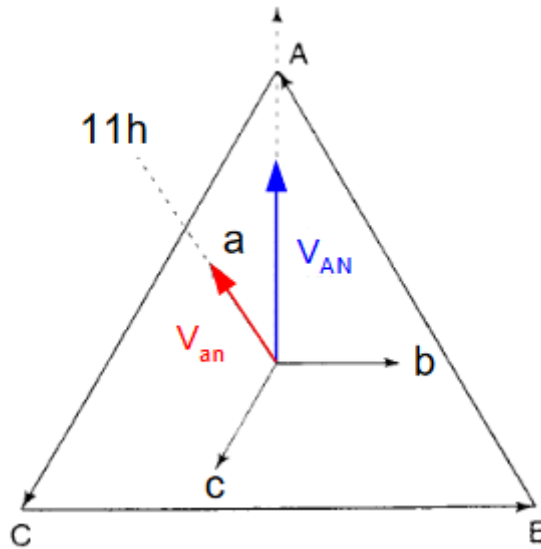


Figure .4.9 : Représentation vectorielle des tensions au primaire et au secondaire du transformateur

#### 4.14 Mise en parallèle des transformateurs triphasés

Pour répondre à une demande croissante en énergie électrique ;

Les intensités primaire et secondaire ayant alors des valeurs excessives provoquent un échauffement anormal des bobines et une chute de tension secondaire exagérée.

Pour remédier à ces inconvénients, il est possible de coupler des transformateurs en parallèle.

La figure 4.10 est un exemple, généralement T1 et T2 sont de même ordre de puissance pour garantir un bon rendement de l'ensemble, la charge est alors répartie sur les deux transformateurs et les récepteurs sont alimentés sous une tension normale

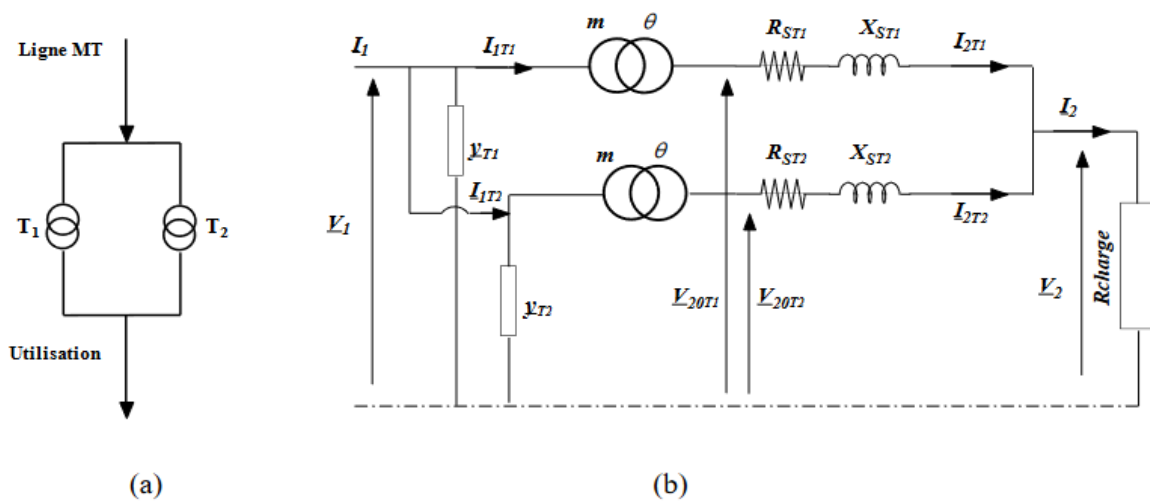


Figure 4.10 : mise en parallèle de deux transformateurs

(a) Schéma bloc ; (b) Principe de fonctionnement

#### 4.14. 1 Conditions à satisfaire pour coupler des transformateurs

Pour répartir la puissance totale entre plusieurs transformateurs alimentés par une même source et débitant sur un même circuit d'utilisation, il faut satisfaire aux conditions ci-après :

Les rapports de transformation des transformateurs doivent être égaux afin d'assurer une égalité des tensions secondaires et ainsi éviter tout courant de circulation entre enroulements ;

Le rapport des puissances nominales des transformateurs doit être compris entre 0,5 et 2, ceci afin que la répartition des charges soit acceptable ;

Leurs tensions de court-circuit doivent être égales, leurs différences entraînent une mauvaise répartition de la puissance apparente totale (il est admis une tolérance de  $\pm 10\%$ ) ;

Leurs couplages doivent être compatibles entre eux, c'est-à-dire :

- soit, que leurs indices horaires soient identiques;
- Soit, si ce n'est pas le cas, qu'ils appartiennent à l'un de quatre groupes de couplage (figures 4.11 et 4.12).

#### Marche en parallèle de transformateurs du même groupe

La marche en parallèle de deux transformateurs faisant partie d'un même groupe de couplage est toujours possible en régime pratiquement équilibrée. Les appareils appartenant à un même groupe, dont les indices diffèrent de 4 ou 8 peuvent fonctionner en parallèle en connectant ensemble d'un côté (haute ou basse tension) les bornes marquées de la même lettre et en reliant de l'autre côté les couples de bornes marqués de lettres différentes qui présentent des tensions en phase.

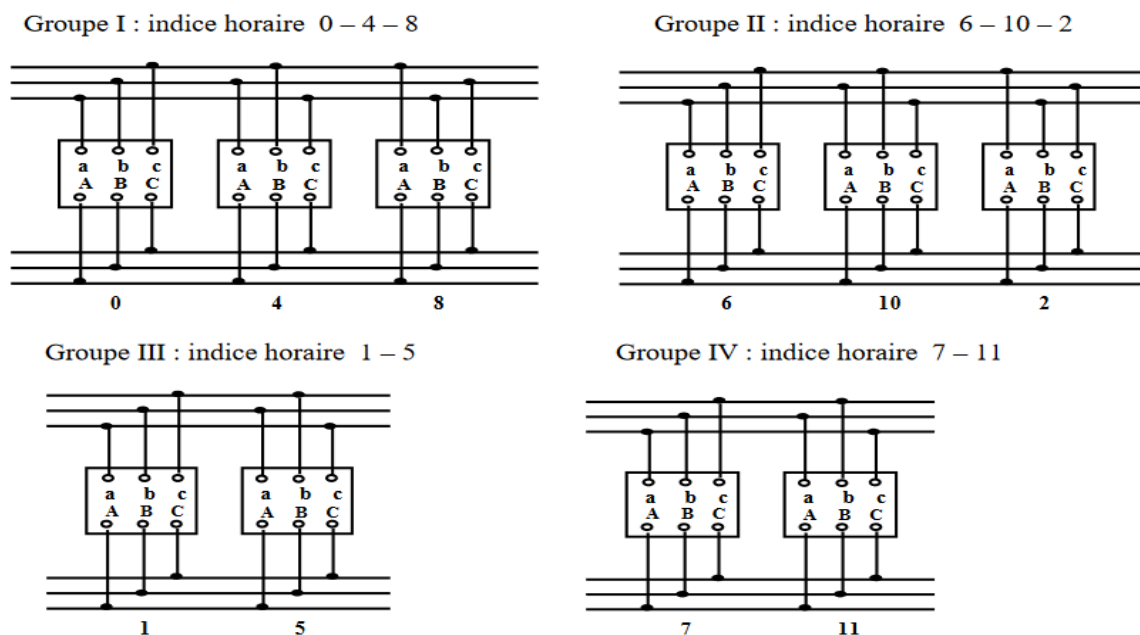


Figure 4.11 : Marche en parallèle des transformateurs du même groupe

### B. Marche en parallèle de transformateurs des groupes III et IV

A l'exception de la combinaison entre les groupes III et IV qui vient d'être décrite, il est impossible de faire fonctionner en parallèle des transformateurs appartenant à des groupes différents.

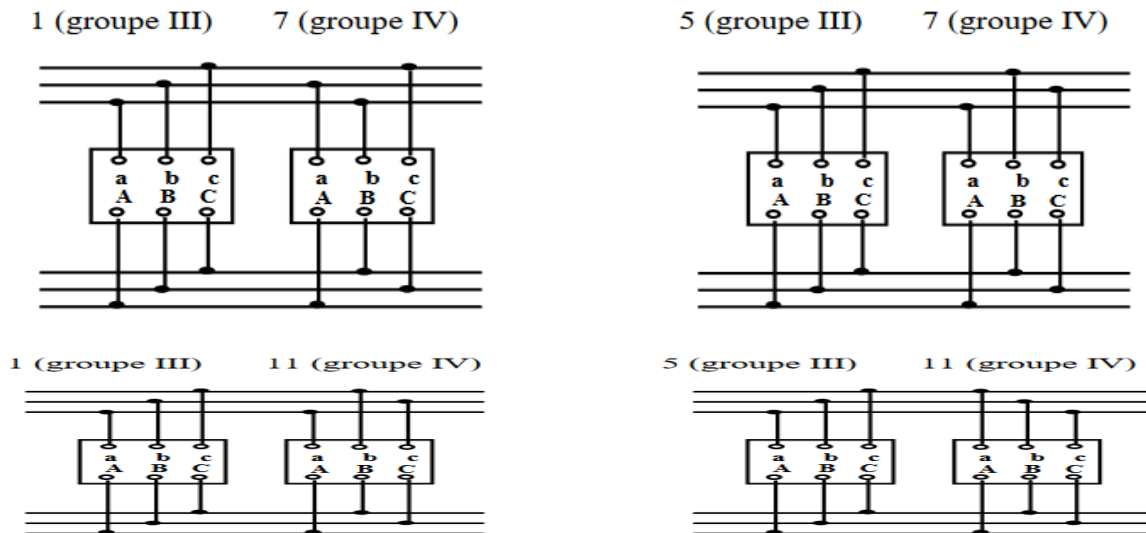


Figure 4.12 : Marche en parallèle des transformateurs des groupes III et IV

### 4.15 Transformateurs spéciaux

#### 4.15.1. Transformateur de mesure de courant

C'est un appareil utilisé pour la mesure de forts courants électriques. Il sert à faire l'adaptation entre le courant élevé circulant dans un circuit électrique (jusqu'à quelques milliers d'ampères) et l'instrument de mesure (Ampèremètre ou Wattmètre par exemple), ou le relais de protection, qui eux sont prévus pour mesurer des courants de l'ordre de l'Ampère (figure IV.13). La caractéristique la plus importante d'un transformateur de courant est donc son rapport de transformation, exprimé par exemple sous la forme 100 A/5 A.

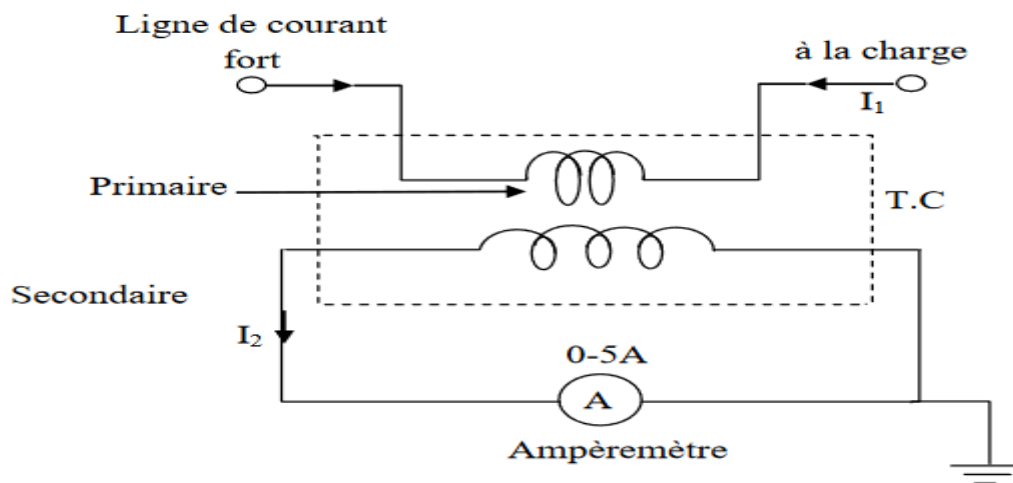


Figure .4.13 : Schéma équivalent d'un transformateur de mesure de courant

Le transformateur d'intensité ou de courant, sert d'ordinaire à obtenir, à partir d'un courant primaire  $I_1$  d'intensité importante, un courant secondaire  $I_2$  proportionnel à  $I_1$  et en phase avec lui mais d'intensité plus réduite.

L'enroulement primaire de  $N_1$  spires est placé en série dans le conducteur de ligne parcouru par le courant  $I_1$  à mesurer. Si on néglige les ampères-tours magnétisant, le courant passant dans le secondaire  $I_2$  passant dans le secondaire de  $N_2$  tours crée une f.m.m. qui compense la f.m.m. primaire :  $U_2/U_1 = I_1/I_2 = N_2/N_1$

Les transformateurs d'intensité permettent de ramener les courants industriels importants à une valeur compatible, d'ordinaire 5 Ampère.

#### 4.15.2. Transformateurs de mesure de tension

Un transformateur de tension (figure 4.14) est un « transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions ».

Il s'agit donc d'un appareil utilisé pour la mesure de fortes tensions électriques. Il sert à faire l'adaptation entre la tension élevée d'un réseau électrique HTA ou HTB (jusqu'à quelques centaines de kiloVolts) et l'appareil de mesure (voltmètre, ou wattmètre par exemple) ou le relais de protection, qui eux sont prévus pour mesurer des tensions de l'ordre de la centaine de Volt.

La caractéristique la plus importante d'un transformateur de tension est donc son rapport de transformation, par exemple 400 000 V/100 V. On utilise aussi le terme transformateur de potentiel. Voici quelques rapports de transformation considérés comme standard :

220/110	550/110	3300/110	6600/110	11000/110	16500/110
---------	---------	----------	----------	-----------	-----------

La tension nominale standardisée est de 110 Volt.

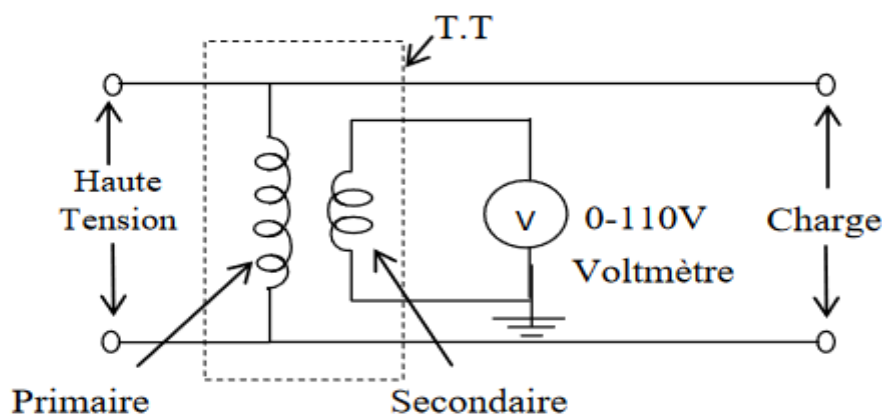


Figure 4.14 : Schéma équivalent d'un transformateur de mesure de tension

### 4.15.3. Transformateurs avec régleur en charge

Les transformateurs HTB/HTA alimentent les départs HTA via des jeux de barres (demi-rames). Ces transformateurs sont équipés d'un régleur en charge qui permet de modifier le rapport de transformation par pas de 1%, en diminuant ou augmentant le nombre de spires de l'enroulement primaire en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension amont, et ce sans coupure de l'alimentation (figure 4.15).

La commande de ce régleur en charge est assurée par un automate local de régulation de tension qui joue sur le rapport de transformation pour réguler la tension au jeu de barres HTA autour d'une tension de consigne donnée, et contribuer ainsi au réglage de tension sur les réseaux HTA et BT.

Le réglage de la tension HTA peut se faire avec ou sans compoundage. Le compoundage est une technique qui prend en compte, par mesure du courant dans le transformateur (et donc de l'état de charge moyen du réseau), les chutes de tension dans le réseau aval. Cela permet de tenir la tension en un point du réseau différent du poste source : centre de gravité, nœud prioritaire ou critique, etc

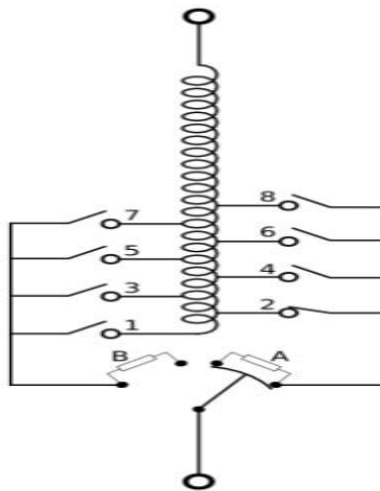
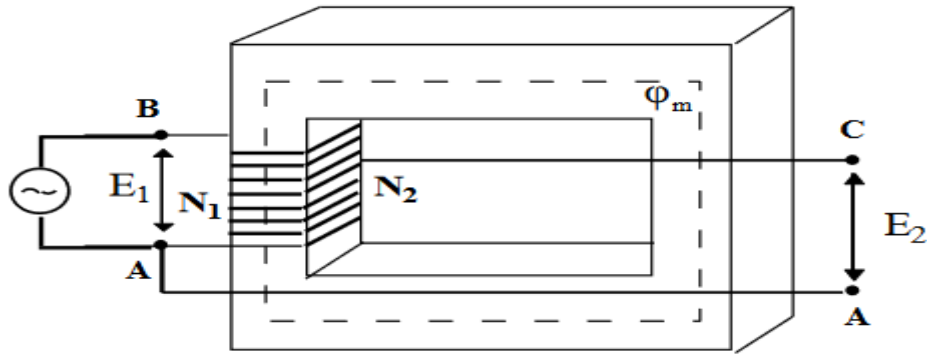


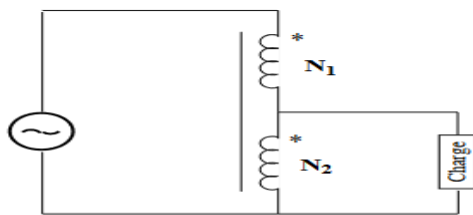
Figure 4.15: Régleur en charge

### 4.15.4 Autotransformateur

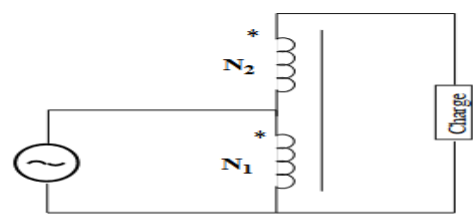
C'est un transformateur statique dans lequel les deux enroulements primaire et secondaire ne sont plus distincts électriquement. Il ne comporte qu'un seul bobinage, le secondaire utilisant une partie des spires du primaire ( $N_1$  spires entre les bornes A et B et  $N_2$  spires entre les bornes A et C). Il y a deux configurations possibles abaisseur et élévateur (figure 4.16) :



(a) Circuits électrique et magnétique



$a = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$   
(b) Abaisseur de tension



$a = \frac{N_1}{N_1 + N_2}$   
(c) Elévateur de tension

Figure 4.16 : Autotransformateur

### Avantages

- Un seul bobinage suffit et le fil de la partie commune peut être plus fin ;
- Les pertes à effet Joule sont réduites d'où meilleur rendement.

### Inconvénient

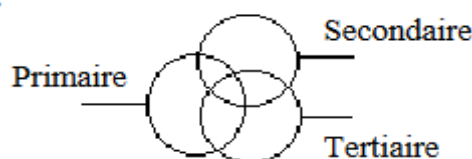
Le primaire et le secondaire ne sont plus isolés électriquement. En cas de défaut, il peut y avoir propagation de la haute-tension à la basse-tension.

### Utilisation

Les dangers auxquels exposeraient les inconvénients de l'autotransformateur font que cet appareil n'est pas utilisé en distribution. Dans certains pays, on l'utilise en MT lorsque les tensions sont voisines (15/20 kV par exemple) et en THT dans les postes d'interconnexion.

### 4.15.5 Transformateur à trois enroulements

Ce transformateur porte sur son circuit magnétique trois enroulements : un enroulement primaire, un enroulement secondaire, et un enroulement tertiaire. Il permet d'alimenter deux réseaux de tensions respectives et à partir d'un réseau de tension à l'aide d'un appareil unique. Son schéma équivalent est celui représenté sur la figure 4.17:



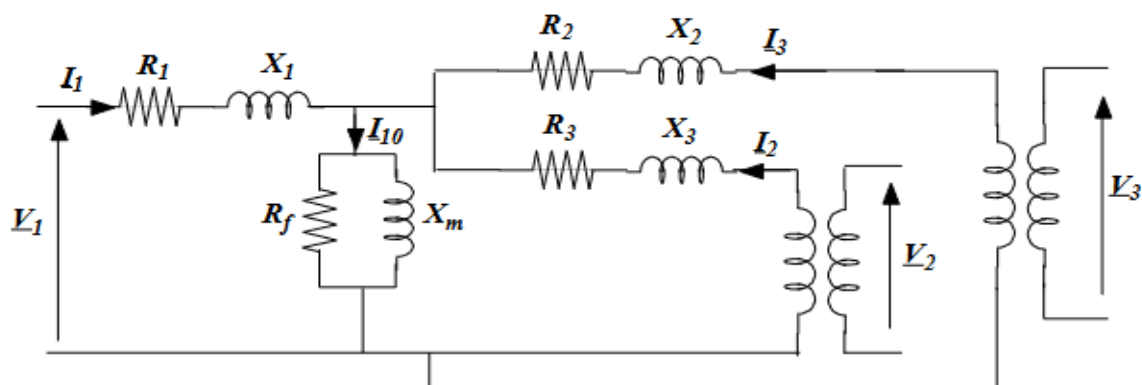


Figure 4.17 : Schéma équivalent d'un transformateur à trois enroulements

#### 4.15.6 Transformateur déphaseur

Un transformateur déphaseur est une forme spéciale de transformateur électrique, ou plus exactement de transformateur de puissance, utilisée pour réguler le transit de puissance active entre plusieurs lignes électriques triphasées. En effet, dans une ligne de transmission à courant alternatif, la puissance active transmise est proportionnelle au sinus de l'angle de transport. Quand deux lignes sont en parallèle, un réglage de cet angle permet de régler la répartition du courant entre les deux lignes et d'optimiser la capacité de transmission tout en évitant les surcharges.

#### 4.16 Système d'unité relative (pu)

Le système d'unité relative « per unit » est un système de grandeurs réduites qui permet à l'ingénieur électricien d'avoir constamment à l'esprit des ordres de grandeurs relatifs de certains paramètres indépendamment des niveaux de tension et de puissance. De plus, l'utilisation de ce système simplifie certaines formules et schémas équivalents. En particulier, un bon choix initial permet de s'affranchir de la présence des transformateurs idéaux et la formulation se ramène à l'étude de circuits monophasés. Ce système associe, à une variable quelconque «  $\alpha$  », une valeur de base «  $\alpha_{base}$  » et la compare à sa valeur 'vraie' «  $\alpha_{vraie}$  » de manière à l'exprimer dans un système adimensionnel « pu » (ou en % de sa valeur de base) dont les ordres de grandeur sont bien connus.

##### 4.16.1 Puissance, tension et courant de base

Dans un système triphasé équilibré, l'amplitude (module) de la tension entre phases et celle la tension entre une phase (quelconque) et le point neutre sont liées entre-elles par la relation :

$$U_{eff} = \sqrt{3} V_{eff} \quad (4.13)$$

La puissance complexe est donnée par

$$S=3VI=\sqrt{3}UI=P+JQ \quad (4.14)$$

La tension (Phase-Neutre) et le courant sont liés entre eux par la loi d'Ohm

$$\vec{V}=\vec{Z}*\vec{I} \quad (4.15)$$

Les grandeurs de base, indicées 'Base', choisies judicieusement, permettent de simplifier considérablement les calculs dans les réseaux d'énergie électrique. Dans le système de base, la puissance se conserve et la loi d'Ohm reste également d'application.

Nous définissons le système de grandeurs réduites «per unit» de la manière suivante::

$$S_{pu}=\vec{S}/S_{base}$$

$$U_{pu}=\vec{U}/U_{base} \quad (4.16)$$

$$I_{pu}=\vec{I}/I_{base}$$

$$Z_{pu}=\vec{Z}/Z_{base}$$

$$U_{base}=\sqrt{3}V_{base}$$

$$S_{base}=\sqrt{3}U_{base}*I_{base}$$

$$V_{base}=Z_{base}*I_{base}$$

Lors de la résolution d'un problème à partir d'un schéma unifilaire équivalent, nous n'avons plus besoin de nous poser la question de savoir s'il s'agit de la tension entre phases ou entre phases et neutre car les valeurs sont identiques. En divisant membre à membre les équations précédentes, nous obtenons :

$$S_{pu}=U_{pu}*I_{pu} \quad (4.17)$$

La Suppression du coefficient «3 » dans l'expression de la puissance complexe.

#### 4.16.1 Impédance et admittance de base

La puissance complexe absorbée par ces charges peut s'exprimer en fonction de la tension entre phases (son module) et l'impédance complexe (son conjugué) :

$$S= 3V.V^*/Z=3V^2/Z^*=U^2/Z \quad (4.18)$$

Dans le système lié aux grandeurs de base (qui sont de préférence réelles), nous avons:

$$S_{base}= U_{base}^2/Z_{base} \quad (4.19)$$

$$Z_{base}= U_{base}^2/S_{base} \quad (4.20)$$

La puissance complexe en pu devient, en fonction de l'impédance 'Zpu' :

$$Z_{pu}= U_{pu}^2/Z^*_{pu} \quad (4.21)$$

Nous définissons, alors de manière similaire à l'impédance, l'admittance de base et l'admittance en pu :

$$Y_{base}=S_{base}/U_{base}^2 \quad (4.22)$$



$$Y_{pu} = \vec{Y}/Y_{base} \quad (4.9)$$

Alors, La puissance complexe en pu devient, en fonction de l'admittance Y en pu :

$$S_{pu} = \vec{Y} * U^2_{pu} \quad (4.23)$$

#### 4.16.1 Changement de base

Généralement, les valeurs d'impédances des générateurs et transformateurs fournies par les constructeurs sont données dans un système per unit dont les grandeurs de base correspondent aux tensions et puissances nominales de l'appareil. Le problème qui se pose alors est celui d'uniformiser les données, soit, de convertir les impédances et admittances - exprimées dans un système quelconque - dans le système lié aux grandeurs de base (SB et VB) choisies pour le tronçon considéré.

Nous pouvons écrire, pour deux systèmes de base différents :

$$\vec{Z} = \vec{Z}_{pu1} * Z_{base1} = \vec{Z}_{pu2} * Z_{base2} \quad (4.24)$$

Alors :

$$\vec{Z}_{pu} = \vec{Z}_{pu1} * Z_{base1} / Z_{base2} = \vec{Z}_{pu1} * (U^2_{base1} * S_{base2}) / (U^2_{base2} * S_{base1}) \quad (4.25)$$

Pour les admittances, nous obtenons une formule analogue :

$$\vec{Y}_{pu} = \vec{Y}_{pu1} * Y_{base1} / Y_{base2} = Y_{pu1} * (U^2_{base2} * S_{base1}) / (U^2_{base1} * S_{base2}) \quad (4.26)$$

### 4.17 Exercices chapitre 4

#### Exercice N°1

Un transformateur monophasé à deux enroulements aux données nominales suivantes :

20KVA, 480/120V, 60Hz,

Une source de tension connectée à l'enroulement de 480V. Alimente une charge connectée à l'enroulement 120V. La charge absorbe 15KVA sous  $\cos\phi = 0.8$  retardant et une tension de 118V. En suppose que le transformateur est idéal.

Calculez :

La tension aux bornes de l'enroulement 480V

L'impédance de la charge

L'impédance de la charge ramenée à l'enroulement 480V

La puissance active et réactive fournies à l'enroulement 480V.

#### Exercice N°2

Un transformateur monophasé est alimenté sous une tension 230V, et de fréquence 50Hz, on réalise trois essais :

Le premier essai en régime nominal avec un facteur de puissance  $\cos\phi = 0.8$ . il permet de relever les valeurs nominales suivantes :

$V_{IN} = 230V$ ,  $I_{IN} = 18A$ ,  $P_{IN} = 3.23KW$ .

Le second essai est réalisé à vide :

$V_{10}=230V$  ;  $V_{20}=420V$  ;  $I_{10}=400mA$  ;  $P_{10}=20W$ .

Le troisième essai en court circuit :

$V_{1cc}=13V$  ;  $I_{1cc}=I_{1N}=18A$  ;  $P_{1cc}=74W$ .

Questions

Calculer les valeurs du facteur de puissance à vide, en court circuit et en régime nominal.

Calculer le rapport de transformation et préciser le rôle du transformateur

Calculer les grandeurs du circuit magnétique équivalent à vide  $R_F$  et  $L_m$ .

Calculer les valeurs de  $R_s$  et  $X_s$  ramenées au secondaire

Calculer la chute de tension sur  $R_s$  et  $X_s$

Calculer la valeur efficace de la tension secondaire  $V_{2n}$

Calculer le rendement.

### Exercice N°3

Un transformateur monophasé à deux enroulements aux données nominales suivantes :

20KVA, 480/120V, 60Hz,

L'impédance du transformateur ramenée au enroulement secondaire est  $Z'_2 = 0.0525 e^{j78.13^\circ} \Omega$ . En prenant comme grandeur de base les données nominales du transformateur

Déterminer en per unit (p.u) la valeur de l'impédance équivalente du transformateur ramenée au secondaire puis au première.

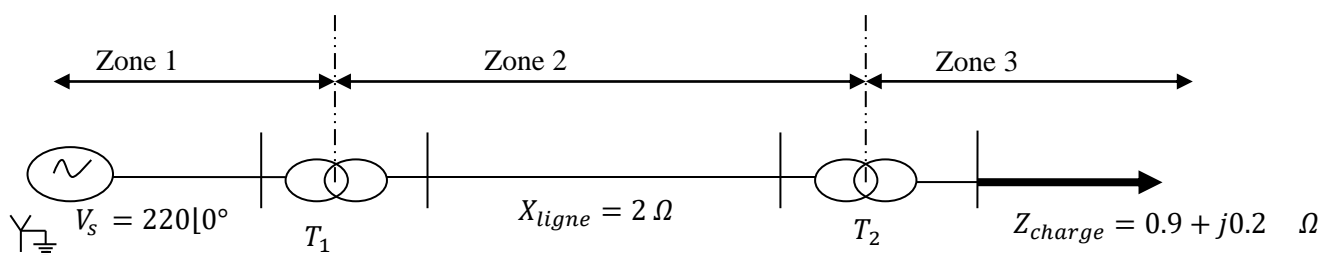
### Exercice N°4

Considérons le système électrique monophasé représenté par la figure suivante, il se divise en trois zones reliées entre elles par

deux transformateurs ( $T_1$  et  $T_2$ ), les données nominales sont indiqués dans la figures, on prend comme une base (Zone1)

$S_{base} = 30KVA$ ,  $V_{base1} = 240V$

- Déterminer l'impédance totale en p.u du système
- calculer le courant de charge en p.u



$T_1$  : 30KVA, 240/480 V,  $X_{T_1} = 0.10 pu$

$T_2$  : 20KVA, 460/115 V,  $X_{T_2} = 0.10 pu$

## CHAPITRE V

### CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

#### 5.1 Introduction

Les lignes de transport sont construites avec des conducteurs nus, ces conducteurs sont installés dans des structures métalliques spéciales “des pylônes“ dans lesquels ces conducteurs sont séparés du pylône lui-même par des composants isolants et séparés entre eux par des espaces suffisants permettant à l’air d’agir comme isolant. Différents types de défauts peuvent se produire (défauts avec terre ou entre phases). Cependant les défauts les plus fréquents sont des surtensions, la plupart se produisent temporairement résultant un court-circuit au niveau de l’isolation due à des facteurs environnementaux tels que les éclairs (foudre). Ils peuvent aussi se produire par un défaut dans l’isolation due à la détérioration du matériel d’isolation en lui-même.

#### 5.2 Les défauts électriques

La plupart des défauts du système d'alimentation conduit à une condition de court-circuit. Quand une telle condition se produit, un fort courant (appelé courant de court-circuit) traverse l'équipement, causant des dommages considérables aux équipements et l'interruption du service des consommateurs. Il n'y a probablement pas d'autre sujet d'une plus grande importance pour un ingénieur électricien que la question de la détermination du court-circuit courants en condition de défaut. Le choix d'appareils et la conception et la disposition pratique de tous les équipements du système d'alimentation dépend des considérations de courant de court-circuit

**Défauts Monophasés :** ce sont des défauts entre une phase et la terre.

**Défauts biphasés avec terre :** ce sont des courts-circuits entre deux phases de la ligne de transport et la terre.

**Défauts biphasés isolés :** ce sont des courts-circuits entre deux phases de la ligne de transport.

**Défaut triphasé :** un défaut triphasé est provoqué par un court-circuit entre les trois phases de la ligne de transport.

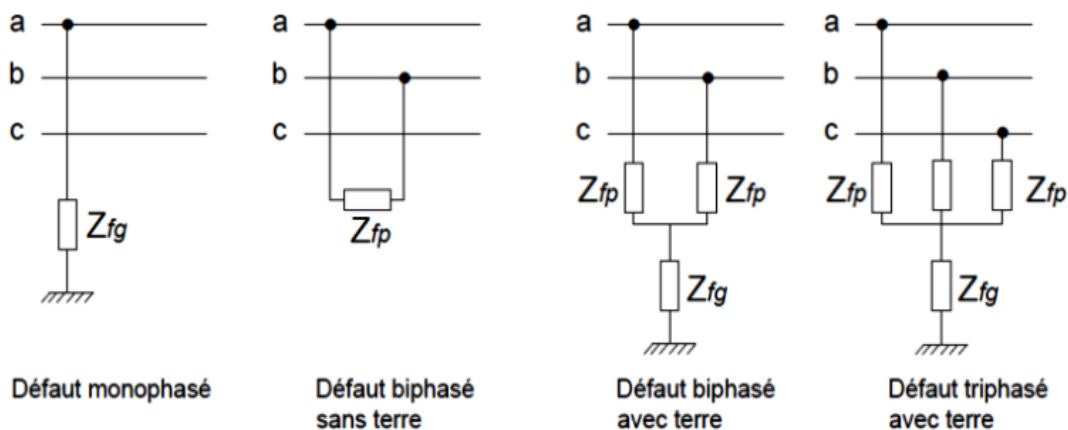


Figure 5.1 : Différents types de défaut.

### 5.3 Caractéristiques des défauts monophasés

**Défaut auto-extincteur** : Un défaut monophasé auto-extincteur est un défaut qui s'élimine seul sans coupure de l'alimentation ou fermeture d'un disjoncteur. Ces défauts existent sur les réseaux à neutre avec impédance (environ 10% des défauts). Mais ils existent surtout sur les réseaux à neutre compensé dans des proportions importantes (jusqu'à 80%).

**Défaut réamorçant** : Un défaut réamorçant est un défaut monophasé auto-extincteur, qui réapparaît périodiquement (dans environ 90% de cas, le défaut monophasé auto-extincteur est constitué d'un seul amorçage). Le temps entre deux réamorçages peut varier de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes. Si le temps entre deux réamorçages successifs est inférieur à 200 ms, on considère cette succession de défauts comme le même défaut (Figure 5.2).

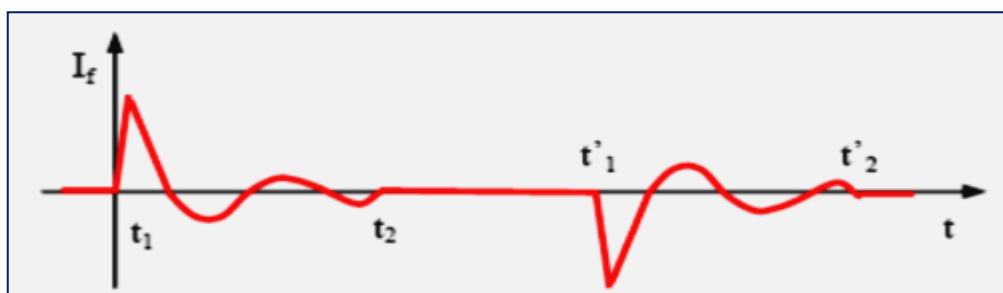


Figure 5.2 allure d'un défaut réamorçant

### 5.4 Les effets des défauts

Les effets des défauts sont surtout à redouter sur les réseaux à haute et très haute tension (H.T et T.H.T). Les défauts ont des effets sur :

- Le bon fonctionnement des réseaux.
- La tenue diélectrique des matériels.
- La qualité de fourniture d'énergie.
- Les circuits de télécommunication.
- La sécurité des personnes.

### 5.4 Calcul des courants de court-circuit avec des composantes symétriques

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. La technique des composantes symétriques est l'outil mathématique proposé par "Fortescue" en 1918 et cet outil est devenu le véhicule requis pour faire l'analyse des réseaux électriques sous conditions dissymétriques, c'est-à-dire, lors de court-circuit.

### 5.4 Composantes symétriques

Un système triphasé non équilibré peut être résolu en trois systèmes équilibrés dans l'état stable sinusoïdal. Cette méthode de résolution d'un système déséquilibré en trois systèmes équilibrés Le système phaseur a été proposé par C. L. Fortescue. Cette

méthode s'appelle la résolution composante symétrique des phaseurs d'origine ou simplement composants symétriques. Dans ce chapitre, nous allons discuter de la transformation des composants symétriques et ensuite présenterons comment composants non équilibrés tels que charges connectées en Y ou  $\Delta$ , transformateurs, générateurs et les lignes de transmission peuvent être résolues en composants symétriques. Nous pouvons alors combiner tous ces composants ensemble pour former ce qu'on appelle des réseaux de séquence.

Un système de trois phaseurs non équilibrés peut être résolu dans les trois suivants composants symétriques:

**Séquence positive:** Un système triphasé équilibré avec la même séquence de phases que la séquence d'origine.

**Séquence négative:** Un système triphasé équilibré avec une séquence de phases opposée comme la séquence d'origine.

**Séquence homopolaire:** Trois phaseurs d'égale magnitude et de phase.

décrit un ensemble de trois phaseurs non équilibrés qui sont résolus dans les trois composants de séquence mentionnés ci-dessus. Dans cet ensemble, l'ensemble initial de trois phaseurs est désigné par  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$ , tandis que leurs composantes positive, négative et à séquence nulle sont désignés par les indices 1, 2 et 0 respectivement. Cela implique que les composantes positive, négative et homopolaire de la phase a sont respectivement notées  $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$  et  $V_{a0}$ . Notez que, tout comme les phaseurs de tension donnés dans la Figure 5.3 nous pouvons également résoudre trois phaseurs de courant non équilibrés en trois composants symétriques.

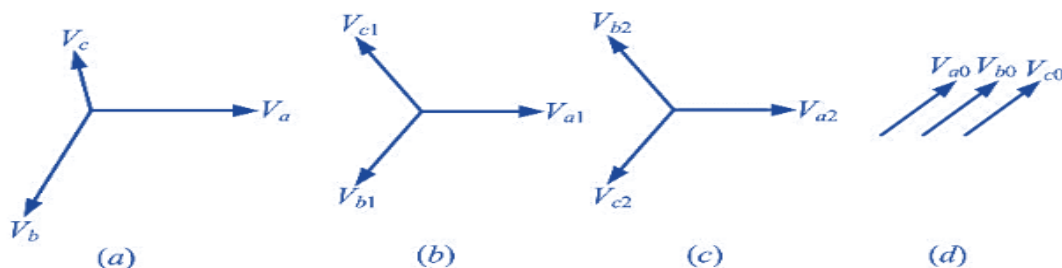


Figure.5.3: Représentation de (a) un réseau déséquilibré, sa séquence (b) positive, sa séquence (c) négative et (d) sa séquence zéro.

#### 5.4 Transformation des composantes symétriques

Avant de discuter de la transformation de composant symétrique, définissons d'abord l'opérateur  $a$ . ci-dessous.

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.1)$$

Notez que pour l'opérateur ci-dessus, les relations suivantes tiennent

$$\begin{aligned}
 a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = a^* \\
 a^3 &= e^{j360^\circ} = 1 \\
 a^4 &= e^{j480^\circ} = e^{j360^\circ} e^{j120^\circ} = a \\
 a^5 &= e^{j600^\circ} = e^{j360^\circ} e^{j240^\circ} = a^2
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Notez également que nous avons

$$1 + a + a^2 = 1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 0
 \tag{5.3}$$

La matrice de transformation des composantes symétriques est alors donnée par

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \tag{5.4}$$

Définir les vecteurs  $V_{a012}$  et  $V_{abc}$  comme

$$V_{a012} = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}, \quad V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \tag{5.5}$$

où C est la matrice de transformation de composant symétrique et est donné par

$$C = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}
 \tag{5.6}$$

En inversant la matrice C donnée en (VI.9) et en combinant avec (VI.10) on obtient

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}
 \tag{5.7}$$

#### 5.4 Valeur du courant 'Icc' selon les différents types de court-circuit

Il existe principalement deux types de courts-circuits : courts-circuits symétriques : Ce type de défaut engendre un courant symétrique, c'est-à-dire des courants de défaut égaux avec un déphasage de 120 °. En raison de la nature équilibrée du défaut, une seule phase doit être considérée dans les calculs puisque la condition dans les deux autres phases sera également similaire.

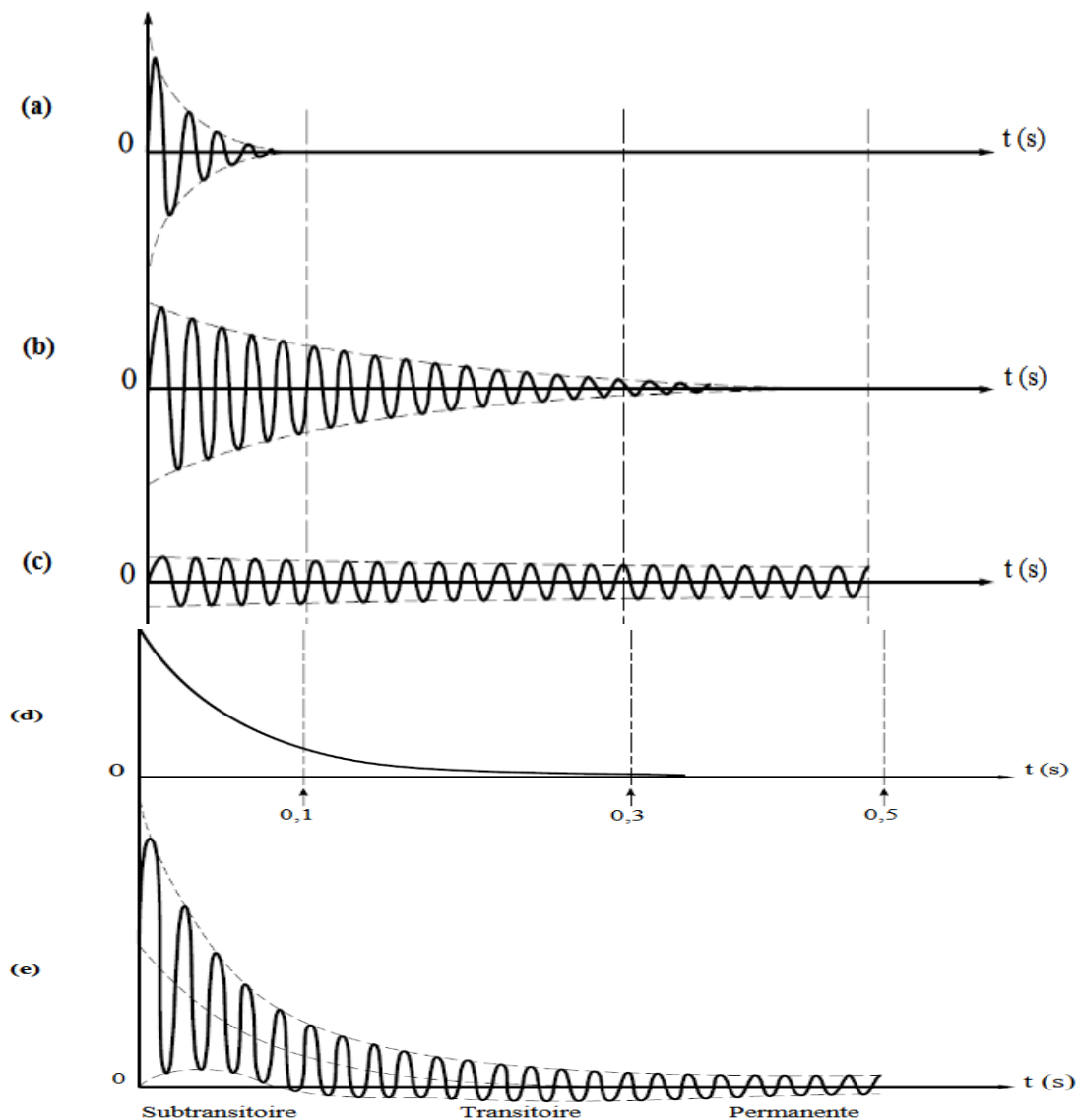


Figure 5.4 : Forme du courant total de court-circuit  $I_{cc}$ , courbe (e), avec la contribution de : (a) la réactance subtransitoire ; (b) la réactance transitoire ; (c) la réactance permanente ; (d) la composante continue

Il s'agit des courts-circuits triphasés isolés ou à la terre, ils engendrent en général les courants de défaut les plus élevés ;

**Courts-circuits asymétriques** : Lorsqu'un tel défaut se produit, il en résulte des courants asymétriques, c'est-à-dire que l'amplitude des courants de défaut dans les trois phases est différente et que le déphasage est différent.

Il s'agit des courts-circuits suivants : court-circuit monophasé (phase-terre) et court circuit biphasé isolé (phase-phase) ou à la terre (phase-phase-terre).

#### **Court-circuit triphasé**

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases (figure 5.5).

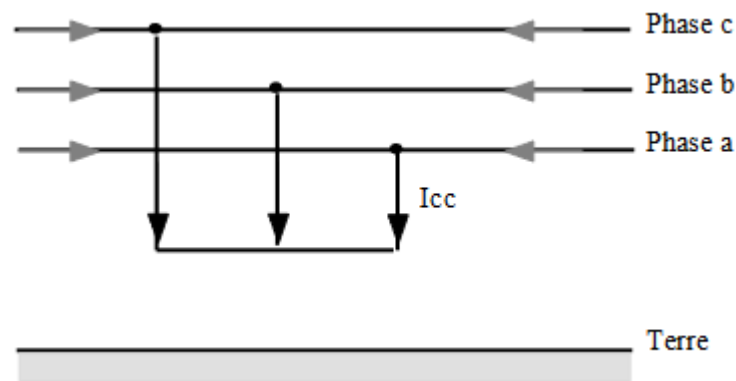


Figure 5.5 : Court-circuit triphasé

L'intensité de court-circuit  $I_{cc3}$  est :

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}} \quad (5.7)$$

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. 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  $I_{cc}$ , du générateur jusqu'au point de défaut de la source et des lignes (figure 5.6).

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (5.9)$$

Avec,  $\sum R$  = somme des résistances en série, et  $\sum X$  = somme des réactances en série.

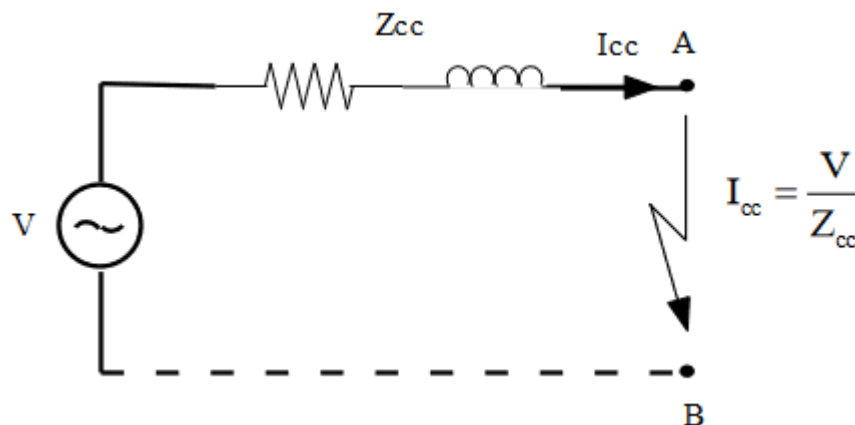


Figure 5.7 : Impédance équivalente pour un court-circuit triphasé

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 de  $I_{cc3}$  est donc indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).



### 5.6. Court-circuit biphasé isolé

Il correspond à un défaut entre deux phases (figures (5.8) et (5.9)), alimenté sous une tension composée U.

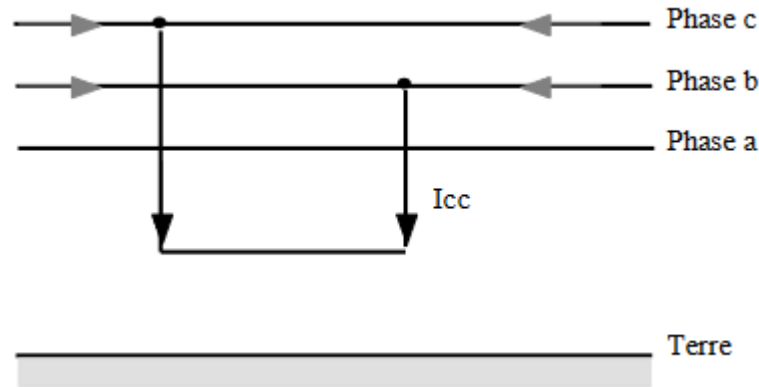


Figure .5.8 : Court-circuit biphasé-isolé

L'intensité  $I_{cc2}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé :

$$I_{cc2} = \frac{U}{2.Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} . I_{cc} \approx 0,86 \quad (5.9)$$

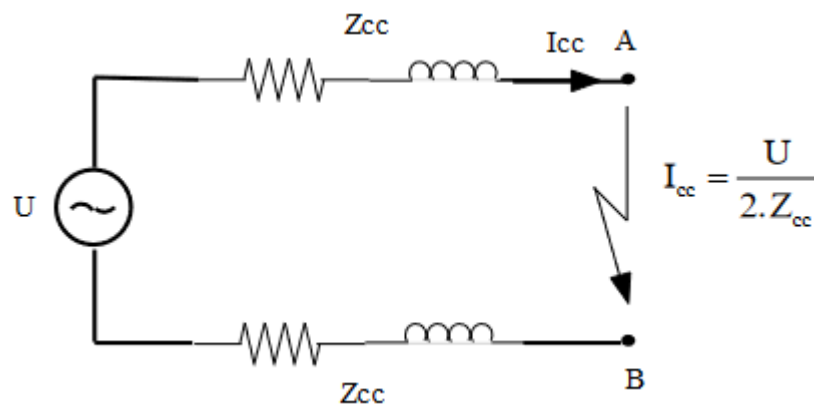


Figure 5.9 : Impédance équivalente pour un court-circuit biphasé-isolé

### 5.7 Court-circuit monophasé

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre (figures 5.10), alimenté sous une tension simple

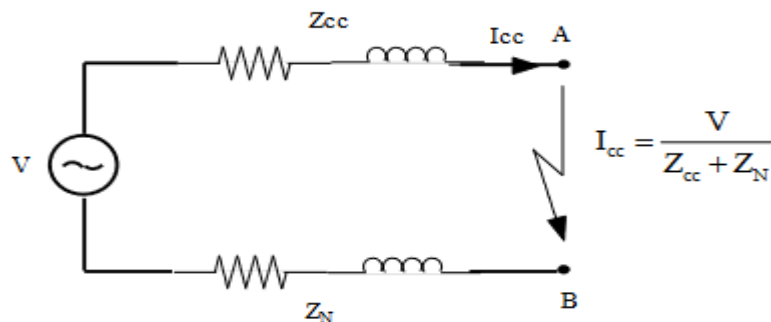


Figure 5.10 : Impédance équivalente pour un court-circuit monophasé

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

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} (Z_{CC} + Z_{LN})} \quad (5.10)$$

Dans certains cas particuliers de défaut monophasé, l'impédance homopolaire de la source est plus faible que  $Z_{CC}$  (par exemple aux bornes d'un transformateur à couplage étoile-zig zag ou d'un alternateur en régime subtransitoire). L'intensité monophasée peut être alors plus élevée que celle du défaut triphasé.

### 5.8 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  $I_{ch}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé (figures (5.11) et (5.12)).

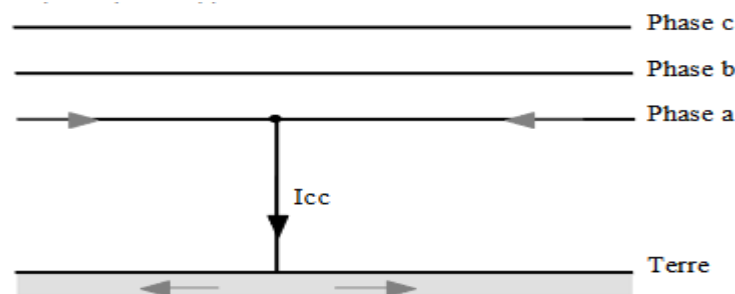


Figure 5.11 : Court-circuit monophasé-terre

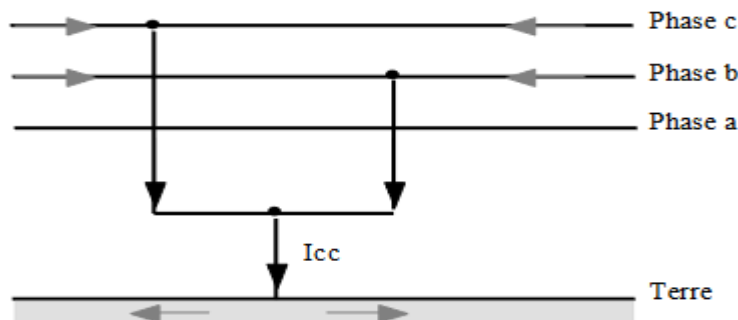


Figure 5.12 : Court-circuit biphasé-terre

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).

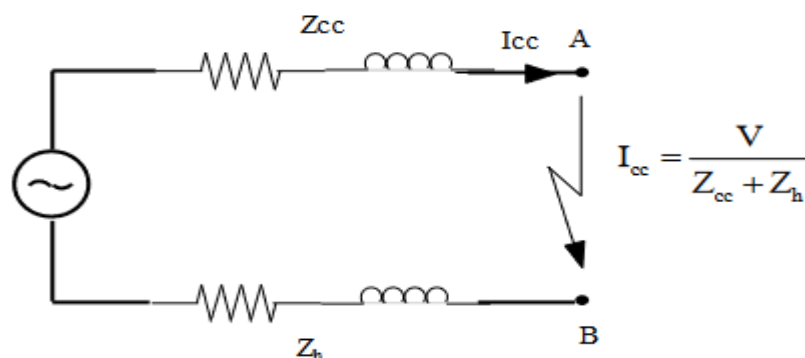


Figure 5.13 Impédance équivalente pour un court-circuit biphasé-terre

### 5.9 Calcul de court-circuit monophasé par des composants symétriques

La phase a est défectueux dans la figure 5.14. Comme le courant de charge est

négligé, les courants des phases b et c sont nuls et la tension au point de défaut,  $V_a = I_a Z_{Df}$ . Les composantes de séquence des courants sont données par.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Aussi,

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_d = \bar{I}_i = \frac{1}{3} \bar{I}_a \quad \text{et} \quad V_0 + V_1 + V_2 = I_a Z_{Df} = 3I_0 Z_{Df} \quad (5.12)$$

Ce qui donne

$$I_0 = \frac{E}{Z_0 + Z_d + Z_i + 3Z_{Df}} \quad (5.13)$$

Cela montre que le circuit de défaut équivalent utilisant des impédances de séquence peut être construit comme montré sur la figure V.15.

Le courant de court-circuit  $I_a$  est

$$\begin{cases} I_a = \frac{3E}{(Z_0 + Z_d + Z_i) + 3Z_{Df}} \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{cases} \quad (5.14)$$

$$\begin{cases} V_d = E \frac{Z_i + Z_0 + 3Z_{Df}}{Z_0 + Z_d + Z_i + 3Z_{Df}} \\ V_i = E \frac{-Z_i}{Z_0 + Z_d + Z_i + 3Z_{Df}} \\ V_0 = E \frac{-Z_0}{Z_0 + Z_d + Z_i + 3Z_{Df}} \end{cases} \quad (5.15)$$

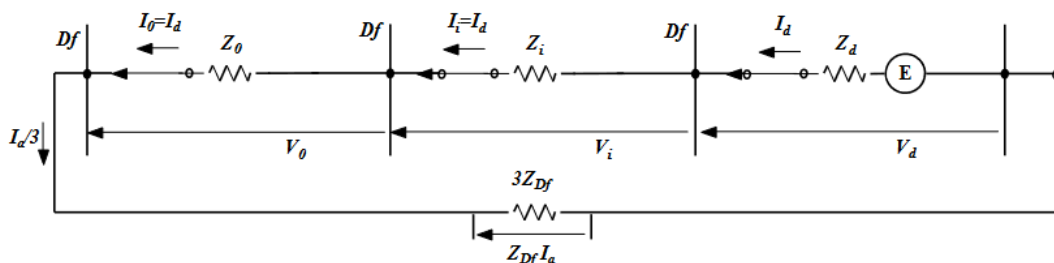


Fig.V.14: Schéma équivalent des séquences pour un court-circuit monophasé

### 5.10 Court-circuit biphase

La figure 5.15 montre un défaut ligne-ligne. Un court-circuit se produit entre les phases b et c, à travers une impédance de défaut  $Z_{Df}$ . Le courant de défaut circule

entre les phases b et c, retournant à la source à travers la phase b et retournant à travers la phase c.

$$\bar{I}_a = 0 \text{ et } \bar{I}_c = -\bar{I}_b \quad (5.16)$$

Les composantes séquentielles des courants sont

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ a - a^2 \\ a^2 - a \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_{Df}} \\ I_i = -\frac{E}{Z_d + Z_i + Z_{Df}} \\ I_0 = 0 \end{cases} \quad (5.18)$$

$$\begin{cases} V_d = \frac{E(Z_i + Z_{Df})}{Z_d + Z_i + Z_{Df}} \\ V_i = \frac{E(Z_i + Z_{Df})}{Z_d + Z_i + Z_{Df}} \\ V_0 = 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

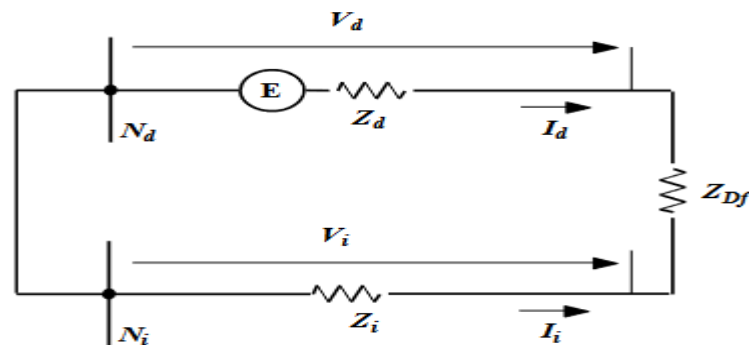


Figure 5.15 : Schéma équivalent des séquences pour un court-circuit biphasé

### 5.11 Court-circuit biphasé terre

Un double défaut ligne-terre est représenté sur la figure V.10. Les phases b et c vont à la masse par une impédance de défaut  $Z_{Df}$ . Le courant dans la phase non mise à la terre est nul, c'est-à-dire :

$I_a = 0$ , par conséquent,  $I_d + I_i + I_0 = 0$ .

$$V_b = V_c = (I_b + I_c)Z_{Df} \quad (5.20)$$

Alors,

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + 2V_b \\ V_a + (a + a^2)V_b \\ V_a + (a + a^2)V_b \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Ce qui donne

$$\bar{V}_d = \bar{V}_i, \text{ et } \bar{V}_0 = \bar{V}_d + 3Z_{Df}I_0 \quad (5.22)$$

Ceci donne le circuit équivalent de la figure V.17. Le courant de défaut est :

$$I_a = \frac{E}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_{Df})}{Z_2 + Z_0 + 3Z_{Df}}} \quad (5.23)$$

Cas particuliers

Défaut franc

Soit  $Z_{Df} = 0$ , le courant de défaut à la terre prend la valeur :

$$I_2 + I_3 = -\frac{3E.Z_i}{Z_d.Z_i + Z_i.Z_0 + Z_d.Z_0} \quad (5.24)$$

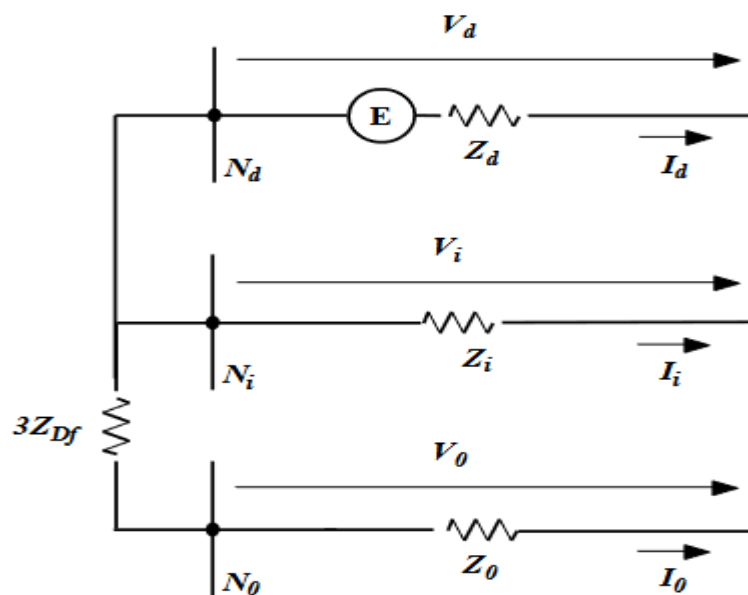


Figure 5.16 : Schéma équivalent des séquences pour un court-circuit biphasé-terre

Défaut biphasé : Soit  $Z_{Df} = \infty$ , le courant de défaut phase vaut alors :

$$I_2 = I_3 = E \frac{(a^2 - a)}{Z_d + Z_i} \quad (5.25)$$

## 5.12 Court-circuit triphasé

Dans ce cas

$$I_d = \frac{E}{Z_d}, I_i = I_o = 0 \text{ et } V_d = V_i = V_o = 0 \quad (5.26)$$

Les valeurs réelles sont données par :

$$I_1 = \frac{E}{Z_d}, I_2 = a^2 \frac{E}{Z_d}, I_3 = a \frac{E}{Z_d} \text{ et } V_1 = V_2 = V_3 = 0 \quad (5.27)$$

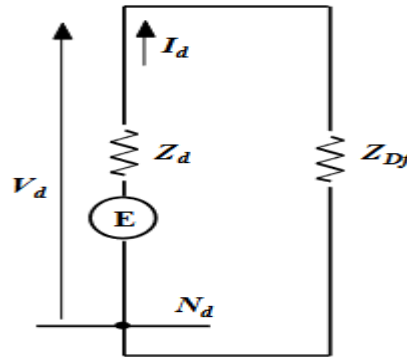


Figure 5.17 : Schéma équivalent des séquences pour un court-circuit triphasé

### 5.13 Exercice du chapitre 5

#### Exercice 1

Considérons un ensemble de tensions équilibrées données par unité de

$$V_a = 1.0, V_b = 1.0 \angle -120^\circ \text{ and } V_c = 1.0 \angle 120^\circ$$

Ceux-ci impliquent

$$V_b = a^2 \text{ and } V_c = a$$

On obtient

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(1 + a^2 + a) = 0$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(1 + a^3 + a^3) = 1.0 \text{ pu}$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(1 + a^4 + a^2) = 0$$

#### Exercice 2

Toutes les quantités données dans cet exemple sont exprimées en unités. Considérons maintenant le jeu suivant des trois tensions non équilibrées

$$V_a = 1.0, V_b = 1.2 \angle -110^\circ \text{ and } V_c = 0.9 \angle 120^\circ$$

Nous aurons alors

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.2 \angle -110^\circ \\ 0.9 \angle 120^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0465 + j0.1161 \\ 1.0273 + j0.0695 \\ -0.0738 + j0.0466 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1250 \angle -68.16^\circ \\ 1.0296 \angle 3.87^\circ \\ 0.0873 \angle 147.72^\circ \end{bmatrix}$$

Nous avons donc

$$\begin{aligned} V_{a0} &= V_{b0} = V_{c0} = 0.125 \angle -68.16^\circ \\ V_{b1} &= 1.0296 \angle -116.13^\circ, \quad V_{c1} = 1.0296 \angle 123.87^\circ \\ V_{b2} &= 0.0873 \angle 267.72^\circ, \quad V_{c2} = 0.0973 \angle 27.72^\circ \end{aligned}$$

Notez en outre que

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 1.0 \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} = 1.2 \angle -110^\circ \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} = 0.9 \angle 120^\circ \end{aligned}$$

### Puissance active et réactive

La puissance triphasée dans le système asymétrique d'origine est donnée par

$$P_{abc} + jQ_{abc} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = V_{abc}^T I_{abc}^*$$

où  $I^*$  est le conjugué complexe du vecteur  $I$ .

$$P_{abc} + jQ_{abc} = V_{a012}^T C^{-T} C^{-1*} I_{a012}^*$$

$$C^{-T} C^{-1*} = 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donc on obtient

$$P_{abc} + jQ_{abc} = 3(V_{a0} I_{a0}^* + V_{a1} I_{a1}^* + V_{a2} I_{a2}^*)$$

Nous trouvons alors que la puissance complexe est trois fois la somme de la puissance complexe des séquences en trois phases.

### Exercice 3

Considérons les tensions données dans l'exercice 2. Supposons en outre que ces tensions sont des tensions ligne à neutre et qu'elles fournissent une charge symétrique connectée à Y, dont l'impédance par phase est  $Z_Y = 0,2 + j0,8$  par unité. Ensuite, les courants par unité dans les trois phases sont :

$$I_a = \frac{V_a}{Z_Y} = 1.2127 \angle -75.96^\circ \text{ pu}$$

$$I_b = \frac{V_b}{Z_Y} = 1.4552 \angle 174.04^\circ \text{ pu}$$

$$I_c = \frac{V_c}{Z_Y} = 1.0914 \angle 44.04^\circ \text{ pu}$$

Ensuite, la puissance réelle et réactive consommée par la charge est donnée par

$$P_{abc} = (1.0 \times 1.2127 + 1.2 \times 1.4552 + 0.9 \times 1.0914) \times \cos(75.96^\circ) \\ = 0.9559 \text{ pu}$$

$$Q_{abc} = (1.0 \times 1.2127 + 1.2 \times 1.4552 + 0.9 \times 1.0914) \times \sin(75.96^\circ) \\ = 3.8235 \text{ pu}$$

En utilisant la transformation (VI.15) nous obtenons

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1229 - j0.0889 \\ 0.3839 - j1.1881 \\ 0.0331 + j0.1005 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1516 \angle -144.12^\circ \\ 1.2486 \angle -72.10^\circ \\ 0.1058 \angle 71.75^\circ \end{bmatrix} \text{ pu}$$

A partir des résultats donnés dans l'exercice.2 et à partir des valeurs ci-dessus, nous pouvons calculer la puissance complexe à séquence zéro comme

$$P_0 + jQ_0 = 3V_{a0}I_{a0}^* = 0.0138 + j0.0552 \text{ pu}$$

La puissance complexe de séquence positive est

$$P_1 + jQ_1 = 3V_{a1}I_{a1}^* = 0.9354 + j3.7415 \text{ pu}$$

Enfin, la puissance complexe de séquence négative est

$$P_2 + jQ_2 = 3V_{a2}I_{a2}^* = 0.0067 + j0.0269 \text{ pu}$$

En additionnant les trois puissances complexes, on obtient la puissance totale complexe consommée par la charge



## **CONCLUSIONN GENERALE**

Le polycopié de cours entre vos mains donne un aperçu sur la gestion et le dimensionnement du réseau d'énergie électrique (transport et distribution). Ce polycopié de cours présente des notion de base sur l'électrotechnique fondamentale sur le transport d'énergie électrique et des méthodes d'analyse de ces circuits pour pouvoir calculer toutes les grandeurs électriques.

Ce cours complet des réseaux électrique est destiné aux étudiants d'Université Tebessa. Il correspond au programme officiel du module « Réseaux électriques » enseigné en Troisième année.

Le document se compose de cinq chapitres. Le chapitre 1 présente des généralités sur sur les réseaux électriques : Organisation du réseau électrique Centrales électriques Postes électriques (transformateurs de puissance, transformateurs de mesure (courant et tension), disjoncteurs, sectionneurs, Autres appareillage d'un poste,...) Autres éléments du réseau (supports, câbles conducteurs, lignes aériennes, lignes souterraines, câbles de garde, jeux de barres, isolateurs) ; Centre de dispatching.

Le chapitre 2 concerne les modes de transport, répartition et distribution de l'énergie électrique, où sont exposées les différentes topologies des réseaux : Description des réseaux électriques (structure des réseaux électriques, Niveau de tension) ; Topologie des réseaux électriques (postes sources HT/MT, réseaux MT, postes HTA/BT, réseaux BT) Le chapitre 3 traite les paramètres des lignes de transmission. Ces paramètres sont calculés pour le système équilibré par phase. Il est consacré aussi au calcul du transit de puissance et au développement des équations permettant le calcul des chutes de tensions en fonction des paramètres du réseau. Le chapitre 4 traite les transformateurs, leur modélisation et leur mode de couplages, un accent est mis sur le système d'unité relative. Le chapitre 5 est réservé à l'étude et l'analyse des courants de court-circuit, Calcul des courants de court-circuit (causes, conséquences, différents types, notion de court circuit symétrique et asymétrique, ...).

## REFERENCES

- [1] Debaprya.DAS, « Electrical power system », Indian institute of technology, New Delhi, 2006.
- [2] John J. Grainger, WUliam D. Stevenson, Jr. « Power system analysis », .North carolina state
- [3] Uniccrsity,1994.
- [4] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, and Thomas J. Overbye, «Power System Analysis and Design, Fifth Edition, SI», failure electrical, llc, USA, 2008
- [5] J. Lewis Blackburn, « Symmetrical Components for Power Systems », Department of Electrical Engineering, Ohio State University Columbus, Ohio, 1993.
- [6] Jean-Pierre Muratet, « éléments économiques et de planification pour les réseaux de transport et distribution d'électricité », ALSTOM, 1998.
- [7] Serge Pichot , « Lignes de transport HT» FCI SAAE Transmission, 1998.
- [8] Daniel . Noel, « Postes MT/BT», ALSTOM, 1998.
- [9] Guide de conception des réseaux électriques industriels T & D, « Architecture des réseaux électriques» ; Schneider electric, 6 883 427/A.
- [10] Guide de conception des réseaux électriques BT, « Transformateur, définitions et paramètres caractéristiques» ; Schneider electric, B92.
- [11] «La GRTE organisation et missions», 10<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la haute Tension CNHT16, mai 2016.
- [12] Avril Charles, « Construction des lignes aériennes à haute tension », Paris : Editions Eyrolles , 1974
- [13] Souad Chebbi, « Défauts dans les réseaux électriques »,support pédagogique, Université Virtuelle de Tunis.
- [14] Electrotechnique deuxième édition, Presses internationales polytechniques, 1999.
- [15] J. C. Gianduzzo : Cours et travaux dirigés d'électrotechnique, photocopiés de cours et de TD de Licence EEA de l'Université de Bordeaux 1.
- [16] L. Lasne : L'électrotechnique pour la distribution d'énergie, Photocopié de cours de l'Université de Bordeaux 1, 2004.
- [17] [16] T. Wildi : Électrotechnique Troisième édition, Les presses de l'université de Laval, 2000.
- [18] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, 'Lignes et Réseaux Electriques 1 : Lignes d'énergie électrique', édition : HERMES - LAVOISIER, 2007 ;
- [19] B. DE METZ-NOBLAT, 'Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques', cahier technique Schneider N°: 18, 2002 ;
- [20] A.A.SALLAM, OM.P.MALIK, "Electric distribution systems", édition: WILEY, 2010;

- [21] A.K. Deb, „Power line ampacity system: Theory, modeling, and applications“, édition: CRC PRESS, 2000;
- [22] B. DE METZ-NOBLAT, „Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques“, cahier technique Schneider N°: 18, 2002 ;
- [23] B. DE METZ-NOBLAT, F. DUMAS et G. THOMASSET, „Calcul des courants de court-circuit“, cahier technique Schneider N°: 158, 2000 ;
- [24] B. S. GURU, H. R. HIZIROGLU, „Electric machinery and transformers“, 3me édition: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2001;
- [25] C. GARY, „Effet couronne sur les réseaux électriques aériens“, Techniques de l'Ingénieur, D 4 440 ;
- [26] C. MAXFIELD and al, „Electrical engineering“, édition: NEWNES, 2008;
- [27] C. PREVE, „Protection des réseaux électriques“, édition : HERMES, 1998 ;
- [28] D. DAS, „Electrical power systems », édition: NEW AGE INTERNATIONAL, 2006;
- [29] D.F.WARNE, „Electrical Power Engineer"s Handbook“, édition: NEWNES, 2004;
- [30] D.R. PATRICK, S.W. FARDO, „Electrical distribution systems, 2nd Edition, The Fairmont Press, 2009;
- [31] E. ACHA et al, „Power electronic control in electrical systems“, édition: NEWNES, 2002;
- [32] G.G. SEIP, „Electrical Installation Handbook“, 3ème édition, JOHN WILEY & SONS, 2000;
- [33] J. C. DAS, „Power system analysis: Short-circuit load flow and harmonics“, edition:MARCEL DEKKER, 2002;
- [34] J.DE KOCK, K. STRAUSS „Practical power distribution for industry“, édition:NEWNES, 2004;
- [35] J. H. HARLOW, „Electric power transformer engineering“, édition: MARCEL DEKKER, 2004 ;
- [36] □ J.L.LILIEN, „Transport et distribution de l'énergie électrique“, cours Faculté des Sciences
- [37] Appliquées, Université de Liège, 1999/2000 ;
- [38] □ J. VERSEILLE, „Circulation d'énergie réactive: Effets sur un réseau“, Techniques de l'Ingénieur, D 4 300 ;
- [39] M.BOUDOUR, A.HELLAL, „Réseaux électriques : fondamentaux et concepts de base“, édition : PAGES BLEUES INTERNATIONALES, 2014 ;
- [40] M. BROWN, B.RAMESH, „Practical power systems protection“, édition: Newnes, 2004;
- [41] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, „Smart grids : les réseaux électriques intelligents“, édition : HERMES - LAVOISIER, 2012 ;
- [42] N. HADJSAID, J.C. SABONNADIÈRE, „Lignes et réseaux électriques 1 : Lignes d'énergie électrique“, édition : HERMES - LAVOISIER, 2007 ;