

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : GUEMMAZ Chihab Eddine

Thème

**Calcul du courant de court circuit dans les  
réseaux électriques en utilisant le logiciel CYME.**

Soutenu publiquement, le 08 /09 / 2020, devant le jury composé de :

M. F. MALIKI	Docteur / MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M. A. CHIALI	Docteur / MCB	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. A. DJEBIEN	Ingénieur /	SONELGAZ Tamanrasset	Co- Directeur de mémoire
M. L. MERAD	Docteur / MCA	Univ. Tlemcen	Examineur 1
M. M.BRAHAMI	Docteur / MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire :2019 /2020

## **Dédicace:**

*Je dédie ce modeste mémoire de mon ingéniorat*

*A ma mère Leila et mon père: Fateh*

*Mes sœurs: Rahma & Hadil*

*A mes frères: Imad, Ala & Mohamed*

*A ma grande-mère: Hadda*

*A toute ma famille: GUEMMAZ*

*A ma meilleure: Amani*

*A tous mes amis : Khalil, Mohcene, Housseem, Nej mou, Oussama, Nasro, Rachid,*

*Samad, Rabie, et Mouloud.*

*A ma meilleure: Amani*

*A tous les membres du groupe Scouts Aures Batna*

*et de l'association Sawaid El-ihcene Batna et Tlemcen*

*pour leur soutien moral.*

*Sont oublier tous les membres du Groupe SONEGGAZ, Filiale S.D.C, Direction de la  
Distribution de Tamanrasset : Ahmed DJEBIEN, Ahmed DAMIRNA, Zaki, Wahab,  
Djawida,*

***Chihab***

## **Remerciements:**

*Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de cette thèse.*

*Egalement, je remercie le directeur de thèse monsieur Anisse CHIALI, Docteur et chef relations extérieurs à l'ESSA-Tlemcen pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail.*

*Ma gratitude s'exprime pareillement pour Dr. MALIKI Foued, également président des jurys.*

*Egalement, je remercie les autres membres du jury Dr, BRAHAMI Mostefa et Dr, MERAD Laaradj pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.*

*Je remercie également tous les enseignants de l'ESSA-Tlemcen qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle Supérieur et tous les enseignants de l'ESSA-Alger (ex: EPSTA) qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle préparatoire*

*Enfin, je ne peux oublier de remercier tous mes collègues Durant toute ma formation supérieur qui ont été ma deuxième famille.*

## Table des matières :

Introduction Générale :.....	4
------------------------------	---

### **I CHAPITRE 01 : DESCRIPTION DES RESEAUX DE DISTRIBUTION**

I.1 Introduction : .....	6
--------------------------	---

I.2 Définition d'un réseau électrique : .....	7
---	---

I.3 Les principales parties des réseaux électriques : .....	8
---	---

I.3.1 La production : .....	8
-----------------------------	---

I.3.1.1 Définition d'une centrale électrique :.....	8
---	---

I.3.1.2 Classification des centrales de production :.....	9
---	---

I.3.1.2.1 Centrales Classiques : .....	9
--	---

I.3.1.2.1.1 Les centrales à combustibles fossiles : .....	9
---	---

I.3.1.2.1.2 Les centrales nucléaires : .....	10
--	----

I.3.1.2.1.3 Les centrales hydro-électriques : .....	11
---	----

I.3.1.2.2 Centrales modernes (à source renouvelable) .....	12
--	----

I.3.1.2.2.1 Centrales géothermiques : .....	12
---	----

I.3.1.2.2.2 Centrales à biomasse : .....	13
--	----

I.3.1.2.2.3 Centrales éoliennes : .....	14
---	----

I.3.1.2.2.4 Centrales solaires : .....	15
--	----

I.3.1.2.2.5 Avantages et inconvénients des Energies renouvelables :.....	17
--	----

I.3.2 Le transport de l'énergie électrique :.....	21
---	----

I.3.2.1 Nécessité de la Haute Tension : .....	21
---	----

I.3.2.2 Nécessité du courant alternatif : .....	21
---	----

I.3.2.3 Le réseau de transport et d'interconnexion : .....	22
--	----

I.3.2.4 Le réseau de répartition régionale ou locale : .....	22
--	----

I.3.2.4.1 Les conducteurs de phases : .....	23
---	----

I.3.2.4.2 Câbles de garde : .....	24
-----------------------------------	----

I.3.2.4.3 Les isolateurs : .....	24
----------------------------------	----

I.3.2.4.4 Les pylônes : .....	25
-------------------------------	----

I.3.3 La distribution de l'énergie électrique :.....	26
--	----

I.3.3.1 Réseau radial (simple dérivation) : .....	26
---	----

I.3.3.2 Réseau boucle ouverte : .....	27
---------------------------------------	----

I.3.3.3 Réseau double dérivation : .....	27
--	----

I.4 Conclusion : .....	28
------------------------	----

### **II CHAPITRE 02 : EQUIPEMENTS DE PROTECTION DES RESEAUX DE DISTRIBUTION MT**

II.1 Introduction : .....	30
---------------------------	----

II.2 Système de protection : .....	30
------------------------------------	----

II.2.1 Définition : .....	30
---------------------------	----

II.2.2 Les fonctions de protection : .....	30
--	----

II.3 Qualités principales d'un système de protection : .....	30
--	----

II.3.1 Rapidité : .....	30
-------------------------	----

II.3.2 Sélectivité : .....	31
----------------------------	----

II.3.2.1 Sélectivité ampèremétrique : .....	31
---	----

II.3.2.2	Sélectivité chronométrique : .....	31
II.3.3	Sensibilité : .....	32
II.3.4	Fiabilité : .....	32
II.4	Chaîne générale d'un système de protection : .....	33
II.4.1	Transformateur de courant : .....	33
II.4.1.1	Définition : .....	33
II.4.1.2	Modélisation : .....	34
II.4.1.2.1	Importance du choix des TC : .....	34
II.4.1.2.2	Principe de fonctionnement : .....	35
II.4.1.3	Caractéristiques : .....	36
II.4.1.3.1	Niveau d'isolement assigné : .....	36
II.4.1.3.2	Le rapport assigné de transformation (Ip/Is) : .....	37
II.4.1.3.3	Précision (FLP) : .....	37
II.4.1.3.4	Puissance de précision : .....	37
II.4.1.3.5	Courant de courte durée admissible : .....	38
II.4.1.4	Transformateur de courant à doubles enroulements : .....	38
II.4.1.4.1	Double enroulements secondaires : .....	38
II.4.1.4.2	Double enroulements primaires : .....	38
II.4.1.5	Précautions importantes : .....	39
II.4.2	Transformateur de tension : .....	39
II.4.2.1	Définition : .....	39
II.4.2.2	Fonction : .....	39
II.4.2.3	Précautions importantes : .....	40
II.4.3	Les relais de protection : .....	40
II.4.3.1	Définition : .....	40
II.4.3.2	Les types : .....	40
II.4.3.2.1	Les relais électromécaniques : .....	40
II.4.3.2.2	Les Relais statique : .....	41
II.4.3.2.3	Les Relais numériques : .....	42
II.4.4	Disjoncteur moyenne tension : .....	42
II.4.4.1	Définition et rôle : .....	42
II.4.4.2	Principe de fonctionnement : .....	43
II.4.4.3	Essais : .....	43
II.4.4.3.1	Essais type : .....	43
Les essais de type obligatoires suivant la norme CEI-56 sont : .....	43	
II.4.4.3.2	Essais routine : .....	44
II.4.4.4	Caractéristiques électrique : suivant la norme CEI 56-87 .....	44
II.4.4.4.1	Tension assignée : .....	44
II.4.4.4.2	Niveau d'isolement assigné : .....	44
II.4.4.4.3	Courant assigné en service continu : .....	45
II.4.4.4.4	Courant de courte durée admissible : .....	45
II.4.4.4.5	Tension assignée d'alimentation de circuits auxiliaires : .....	45
II.4.4.4.6	Pouvoir de coupure en court-circuit : .....	45
II.4.4.5	Différentes techniques de coupure d'arc électrique : .....	45
II.4.4.5.1	Disjoncteur à huile : .....	45
II.4.4.5.1.1	Disjoncteurs à faible volume d'huile : .....	45
II.4.4.5.1.2	Disjoncteurs à grand volume d'huile : .....	45
II.4.4.5.2	Disjoncteur à air comprimé : .....	46
II.4.4.5.3	Disjoncteur à gaz SF6 : .....	46
II.4.4.5.4	Disjoncteur à vide : .....	47
II.4.5	Fusible moyenne tension : .....	48
II.4.5.1	Généralités : .....	48
II.4.5.2	Caractéristiques : .....	48
II.4.5.2.1	Tension assignée (Un) : .....	48

II.4.5.2.2	Courant assigné (In) :	49
II.4.5.2.3	Courant minimal de coupure assigné (I3) :	49
II.4.5.2.4	Courants critiques (I2) :	49
II.4.5.2.5	Courant maximal de coupure assigné (I1) :	49
II.5	Conclusion :	49

### III CHAPITRE 03 : LES COURANTS DE COURTS-CIRCUITS

III.1	Introduction :	51
III.2	Les court-circuit :	51
III.2.1	Définition :	51
III.2.2	Classification :	51
III.2.2.1	Leur origine :	51
III.2.2.2	Leur localisation :	51
III.2.2.3	Leur durée :	51
III.2.3	Types des court-circuit :	52
III.2.3.1	Court-circuit triphasé symétrique :	52
III.2.3.2	Court-circuit dissymétrique entre une phase et la masse :	53
III.2.3.3	Court-circuit dissymétrique entre deux phases et la terre :	53
III.2.4	Les causes des court-circuit :	53
III.2.5	Les effets des court-circuit :	53
III.3	Les autres types de défauts :	53
III.3.1	Sur les moteurs :	53
III.3.2	Sur les alternateurs :	54
III.3.3	Autres types de défauts :	54
III.4	L'intérêt de calcul des courants de court-circuit :	54
III.4.1	La valeur efficace du courant de Court-circuit maximal (court-circuit triphasé symétrique) :	54
III.4.2	La valeur crête du courant de court-circuit maximal (valeur de la première crête de période transitoire) :	55
III.4.3	Le courant de court-circuit minimal :	55
III.5	Simplification des schémas :	55
III.6	Calcul des court-circuit par la méthode des composantes symétriques :	56
Méthode de calcul des régimes déséquilibrés :		56
III.6.1	Principe de superposition :	56
III.6.1.1	Remarques générales concernant les impédances directes :	58
III.6.1.2	Remarques générales concernant les impédances inverses.....	58
III.6.1.3	Remarques générales concernant les impédances homopolaires.....	58
III.6.1.4	Impédance des alternateurs :	58
III.6.1.4.1	Impédance directe :	59
III.6.1.4.2	Impédance inverse :	60
III.6.1.4.3	Impédance homopolaire :	60
III.6.2	Méthode de résolution pratique :	60
III.6.2.1	Défaut phase-terre (dit homopolaire) :	61
III.6.2.2	Défaut biphasé-terre :	63
III.6.2.3	Défaut triphasé-terre :	65
III.6.2.4	Réseau à charge déséquilibré :	66
III.7	Calcul des court-circuit par la méthode des impédances :	68

III.7.1 Court-circuit triphasé :	68
III.7.2 Court-circuit biphasé isolé :	69
III.7.3 Court-circuit monophasé isolé :	69
III.7.4 Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé) :	69
III.7.5 Détermination des diverses impédances de court-circuit.....	70
III.7.5.1 Impédance du réseau :	70
III.7.5.2 Disjoncteur :	75
III.7.5.3 Jeu de barre :	75
III.8 Conclusion :	75

## **IV CHAPITRE 04 : MODELISATION DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION**

IV.1 Introduction :	77
IV.2 Description du logiciel CYME :	77
IV.2.1 Caractéristiques du logiciel :	77
IV.2.2 Application modulaires sur le logiciel CYME :	77
IV.2.3 Analyse des défauts :	78
IV.2.3.1 Caractéristiques :	79
IV.2.3.2 Court-circuit conventionnel :	79
IV.2.3.3 Court-circuit CEI-60909©.....	80
IV.2.3.4 Court-circuit ANSI® .....	80
IV.2.3.5 Défaut série :	80
IV.2.3.6 Défaut simultané :	81
IV.2.3.7 Creux de tension :	81
IV.2.3.8 Localisation des défauts :	81
IV.2.3.9 Vérification des capacités nominales des équipements :	81
IV.2.3.10 Affichage des résultats :	81
IV.2.4 Interface du logiciel CYME :	82
IV.3 La simulation sur le logiciel CYME :	83
IV.3.1 Traçage du schéma unifilaire de l'étude :	83
IV.3.2 Injection de toutes les données de chaque équipement de l'étude :	84
IV.3.3 Analyse de défauts (courts-circuits) :	84
IV.4 Conclusion :	85
Conclusion Générale :	86
Références bibliographiques :	87

# Table des Figures

Fig(I-01) : Schéma unifilaire global d'un réseau électrique. ....	6
Fig(I-02) : Réseau électrique structure parallèle-série. ....	7
Fig(I-03) : Schéma unifilaire d'une centrale de production. ....	8
Fig(I-04) : Centrale de production à combustible. ....	9
Fig(I-05) : Centrale de production nucléaire. ....	10
Fig(I-06) : Centrale de production hydraulique. ....	11
Fig(I-07) : Centrale de production géothermique. ....	12
Fig(I-08) : Centrale Biomasse. ....	13
Fig(I-9) : Centrale de production éolienne. ....	13
Fig(I-10) : Centrale de production solaire thermique (thermodynamique) ....	14
Fig(I-11) : Centrale de production ....	15
Fig(I-12) : Centrale de production photovoltaïque. ....	16
Fig(I-13) : Composants principales d'un pylône électrique. ....	22
Fig(I-14) : Câble de garde. ....	23
Fig(I-15) : Isolateur. ....	24
Fig(I-16) : pylône. ....	24
Fig(I-17) : Schéma d'un réseau de distribution. ....	25
Fig (I-18) : Exemple de réseau simple dérivation.....	25
Fig(I-18) : Exemple de réseau simple dérivation. ....	26
Fig(I-19) : Exemple de réseau double dérivation. ....	27
Fig (II-01) : Fonctionnement d'une sélectivité ampèremétrique.....	30
Fig (II-02) : Principe de la sélectivité chronométrique.....	31
Fig (II-03) : Fiabilité d'une protection.....	32
Fig (II-04) : Association de protection.....	32
Fig (II-05) : Chaîne principale de la protection électrique.....	32
Fig (II-06) : Transformateur de courant.....	33
Fig (II-07) : Schéma équivalent du circuit secondaire d'un TC.....	34
Fig (II-08) : Diagramme de Fresnel représenté le TC.....	34
Fig (II-09) : Courbe de magnétisation (d'excitation) d'un TC.....	35
Fig (II-10) : TC avec double enroulements secondaires (comptage et protection).....	37
Fig (II-11) : Couplage d'un TC avec double enroulements primaires.....	38
Fig (II-12) : Relais électromagnétique à induction par disque simple.....	40
Fig (II-13) : Arc électrique entre les contacts d'un disjoncteur MT.....	42
Fig (II-14) : Chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'huile.....	44
Fig (II-15) : Chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air.....	45
Fig (II-16) - Constitution d'une ampoule de coupure dans le vide.....	46
Fig (III-01) : Décomposition d'un système de 3 tensions d'amplitudes et de phases quelconque en la somme de 3 systèmes de tensions triphasées équilibrées.....	55
Fig (III-02) : Schémas monophasés équivalents direct, inverse et homopolaire du réseau.....	56
Fig (III-03) : Circuit affecté par un défaut phase- terre (homopolaire).....	60
Fig (III-04) : Schéma du réseau selon les composantes symétriques.....	61

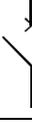
Fig (III-05) : Circuit affecté par un défaut biphasé terre.....	62
Fig (III-06) : Schéma du réseau selon les composantes cas d'un défaut biphasé à la terre .....	63
Fig (III-07) : circuit affecté par un défaut triphasé symétrique .....	64
Fig (III-08) : Schéma du réseau selon les composantes cas d'un défaut triphasé symétrique .....	65
Fig (III-09) : circuit affecté par un défaut biphasé déséquilibré .....	65
Fig (III-10) : Les différents courants de courts circuits pas la méthode des impédance .....	69
Fig (III-11) : tension de court-circuit $U_{cc}$ normalisée pour les transformateurs HTA/BT de distribution publique. ....	70
Fig (III-12) : erreur induite dans le calcul du courant de court-circuit lorsque l'impédance $Z_a$ du réseau amont est négligée. ....	71
Fig (III-13) : valeurs de la résistivité $r$ des conducteurs à prendre en considération selon le courant de court-circuit calculé, maximum ou minimum (cf. UTE C 15-105). ....	72
Fig (III-14) : valeurs de la réactance des câbles selon le mode de pose.....	73
Fig(IV-01) : interface du logiciel CYME. ....	81
Fig(IV-02) : Schéma unifilaire d'un exemple d'étude .....	82
Fig(IV-03) : la vue imbriquée sur le schéma unifilaire. ....	82
Fig(IV-04) : exemple sur les données nécessaires pour les paramètres d'une génératrice Synchrones .....	83
Fig(IV-05) : les valeurs des courants de CC au niveau de la source .....	83
Fig(IV-06) : Les valeurs des courants de CC au niveau du transformateur .....	83
Fig(IV-07) : les valeurs des courants de CC au niveau du jeu de barres.....	84
Fig(IV-08) : les valeurs des courants de CC au niveau du câble .....	84

## Abréviations :

Les abréviations mentionné ci-dessus selon les normes international CEI 27-1 :

Indice	Mot clé	Unité
<b>AC</b>	Courant Alternatif	A
<b>DC</b>	Courant Direct	A
<b>BT</b>	Basse tension	A
<b>HT ou HTB</b>	Haute tension	V
<b>MT ou HTA</b>	Moyenne tension	V
<b>kV</b>	Kilo Volt	kV
<b>TC</b>	Transformateur de mesure de courant	-
<b>TT</b>	Transformateur de mesure de tension	-
<b>JB</b>	Jeu de barre (nœud)	-
<b>l</b>	Longueur de la ligne ou câble	km
<b>R<sub>L</sub></b>	Résistance de la ligne ou câble	Ω/km
<b>L</b>	Inductance de ligne ou câble	H
<b>L<sub>d</sub>, L<sub>i</sub>, L<sub>o</sub></b>	Réactance directe, inverse et homopolaire	H
<b>X<sub>L</sub> = L.ω</b>	Réactance de la ligne ou câble	Ω/km
<b>C</b>	Capacité de la ligne ou câble	F/km
<b>X<sub>d</sub>, X<sub>i</sub>, X<sub>o</sub></b>	Réactance directe , inverse et homopolaire	Ω
<b>R<sub>d</sub>, R<sub>i</sub>, R<sub>o</sub></b>	Résistance directe, inverse et homopolaire	Ω
<b>Z<sub>L</sub> = R<sub>L</sub> + j X<sub>L</sub></b>	Impédance de la ligne	Ω/km
<b>R<sub>t</sub></b>	Résistance de terre	Ω
<b>R<sub>f</sub></b>	Résistance de défaut	Ω
<b>S</b>	Section de la ligne ou câble	mm <sup>2</sup>
<b>I<sub>n</sub></b>	Courant nominal	A
<b>U<sub>n</sub></b>	Tension composé nominale	V
<b>I<sub>max</sub></b>	Courant maximal	A
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit	A
<b>I<sub>cc.min</sub></b>	Courant de court-circuit minimum	A
<b>I<sub>cc.max</sub></b>	Courant de court-circuit maximum	A
<b>P</b>	Puissance active	W
<b>Q</b>	Puissance réactive	Var
<b>S</b>	Puissance apparente	VA
<b>V<sub>d</sub>, V<sub>i</sub>, V<sub>o</sub></b>	Composantes symétriques de tension	V
<b>I<sub>d</sub>, I<sub>i</sub>, I<sub>o</sub></b>	Composantes symétriques de courant	A
<b>U<sub>cc</sub></b>	Tension de court-circuit d'un transformateur	%
<b>f<sub>n</sub></b>	Fréquence nominale	Hz
<b>a</b>	L'opérateur égale 1 <sup>L</sup> 120°	-
<b>I<sub>phase</sub></b>	Courant de réglage phase	A
<b>I<sub>h</sub></b>	Courant de réglage homopolaire	A
<b>t</b>	Temporisation	sec

## *Symboles graphiques :*

<b>Symbole</b>	<b>Mot clé</b>
	Ligne ou câble triphasé
	La terre
	Arrivée HTA
	Départ HTA ou BT
	Court-circuit
	Disjoncteur
	Interrupteur fusible
	Transformateur de puissance
	Fusible
	Transformateur de courant
	Transformateur de tension (potentiel)

# Introduction Générale

Les investissements humains et matériels affectés aux réseaux électriques sont énormes. Pour cela, le réseau électrique doit répondre à trois exigences essentielles : stabilité, économie et surtout continuité du service.

Les lignes et les câbles de distribution d'énergie électrique moyenne tension HTA constituent une partie essentielle d'un réseau électrique qui doit assurer la continuité de l'alimentation en électricité aux consommateurs HTA et BT. Ce qui n'est pas toujours le cas, car ces lignes sont souvent exposées à des incidents ou défauts qui peuvent interrompre ce service et engendrer des pertes financières importantes pour les industriels et des désagréments pour les simples consommateurs.

Pour cela le sujet traité dans ce mémoire s'intéresse à un stage pratique effectuée pendant une durée de trois mois au niveau de Groupe SONELGAZ, *Société de Distribution de l'Electricité et du Gaz du Centre (S.D.C)*, Direction de la Distribution de Tamanrasset (D.D.T), Division Technique Electricité

Notre travail consiste à une étude sur les courants des courts-circuits dans le réseau de distribution moyenne tension 30kV et 10 kV, et aussi la maîtrise du logiciel de simulation des réseaux électriques CYME au réseaux électrique moyenne tension, en injectant les données nécessaires et le schéma unifilaire de l'étude afin de déduire les valeurs des courants et cela veut dire connaître les valeurs des protections nécessaires.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre est une description des réseaux électriques,
- Le deuxième chapitre étudie les équipements de protection des réseaux électriques MT,
- Le troisième chapitre traite le calcul des courants de courts-circuits,
- Dans le quatrième chapitre représente la modélisation des courants de courts-circuits par les logiciel CYME.

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail.

Le stage a été interrompu après 25 jours de son début à cause de la crise sanitaire (COVID-19)



# Chapitre I : Description des réseaux électriques



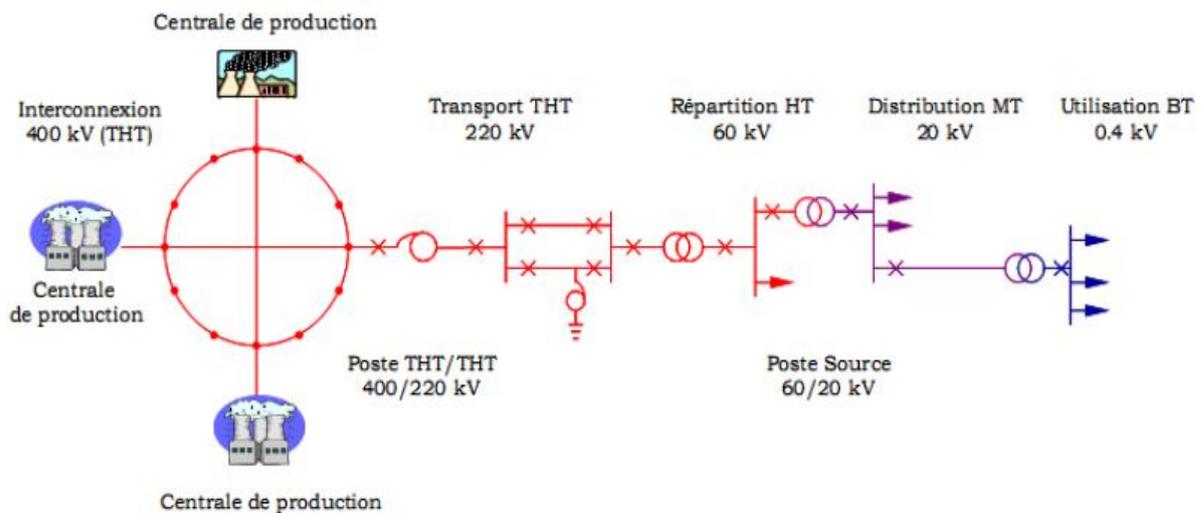
## I Chapitre 01 : Description des réseaux de distribution

### I.1 Introduction :

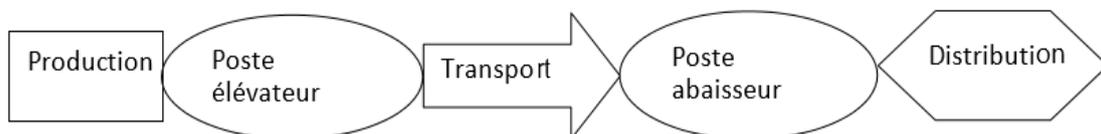
Ce chapitre introductif a pour objet de présenter la chaîne de fourniture d'électricité, plus précisément la production, le transport et la distribution d'énergie électrique. Les systèmes électriques présentent des caractéristiques spécifiques de fonctionnement, qui les différencient des autres types d'industrie. La prise en compte de ces caractéristiques et la coordination entre les différents acteurs du système est essentielle pour garantir un système électrique fiable en permanence.

### I.2 Définition d'un réseau électrique : [1]

Un réseau électrique est l'ensemble des infrastructures et des appareils (centrales, lignes, postes de transformation, conducteurs, isolateurs, pylônes, parafoudres, transformateurs, équipements de protection, ...) destinés à produire, transporter et distribuer l'énergie électrique depuis les centrales de production jusqu'aux consommateurs finals.



Fig(I-01) : Schéma unifilaire global d'un réseau électrique.

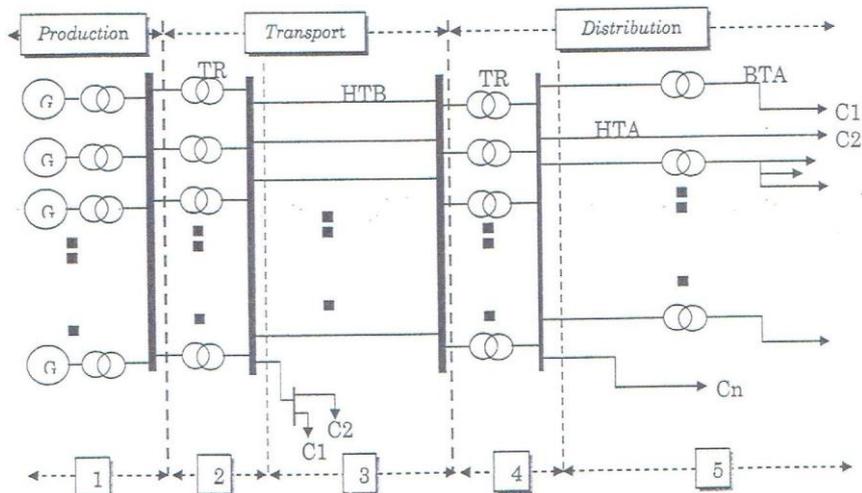


- Le bloc production électrique : regroupant l'ensemble des éléments des unités de production, tels que les alternateurs, les moteurs, les turbines etc...
- Les blocs : postes éleveurs et abaisseurs regroupant l'ensemble des éléments pouvant transformer l'énergie par changement de niveau de tension.
- Les blocs transport et distribution regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie électrique vers les consommateurs.

Pour satisfaire les consommateurs, on suggère qu'il soit nécessaire d'investir dans un système électrique pour minimiser les défaillances ou les interruptions dans le but d'améliorer la fiabilité du système. Dans une perspective à long terme, il est important que les investissements soient choisis afin de minimiser les coûts de l'atteinte de la fiabilité.

Les systèmes électro-énergétiques ont été conçus dans le but de veiller à :

- La fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique : Le système de production tient à relier toutes les unités de production et visent à assurer une fonction de secours en cas de panne et/ou de défaillances.
  - La possibilité d'une disponibilité de l'énergie électrique aux consommateurs avec un prix raisonnable.
  - Permettent d'acheminer l'énergie produite par des sources délocalisées vers les points de consommations.
  - La continuité de service tout en maintenant l'outil de production et le confort d'exploitation.
- ❖ Le premier réseau électrique a vu le jour aux Etats Unis en 1882 et a été conçu par thomas Edison. C'était un réseau local à courant continu et servait à assurer de la région de Manhattan.



**Fig (I-02) : Réseau électrique structure parallèle-série**

**I.3 Les principales parties des réseaux électriques :**

Les réseaux électriques se composent de trois principales parties : la production, transport et distribution et la consommation ;

**I.3.1 La production : [2], [3]**

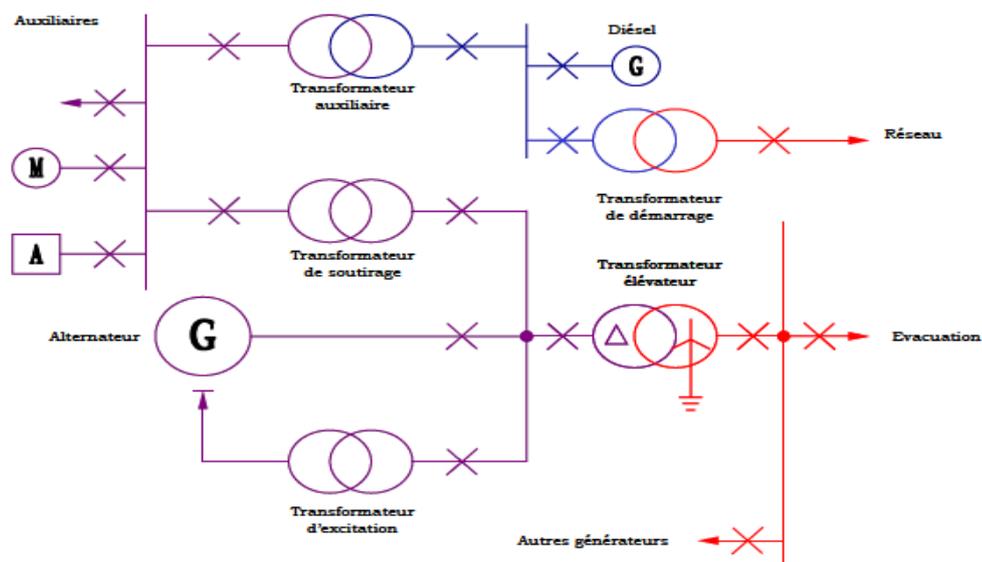
La production de l'électricité constitue entre 35 et 50% du coût total de l'électricité fournie aux consommateurs, elle fait appel à différents types de principes.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des centrales capables de transformer une source d'énergie fournie par la nature pour produire de l'électricité en grande quantité.

### I.3.1.1 Définition d'une centrale électrique :

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité dont le but d'alimenter les consommateurs particuliers ou industriels éloignés de la centrale au moyen du réseau électrique.

La production d'électricité y est assurée par la conversion en énergie électrique d'une énergie primaire qui peut être soit mécanique (force du vent, force de l'eau des rivières, des marées...), soit chimique (réactions d'oxydoréduction avec des combustibles, fossiles ou non, tels que la biomasse), soit nucléaire, soit solaire. Ces énergies primaires peuvent être renouvelables (biomasse, etc.) ou constituer des ressources dont les réserves sont limitées (combustibles fossiles, etc.).



Fig(I-03) : Schéma unifilaire d'une centrale de production.

### I.3.1.2 Classification des centrales de production :

#### I.3.1.2.1 Centrales Classiques : [4]

Dont le principe est de transformer l'énergie cinétique (le mouvement) en énergie électrique. Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

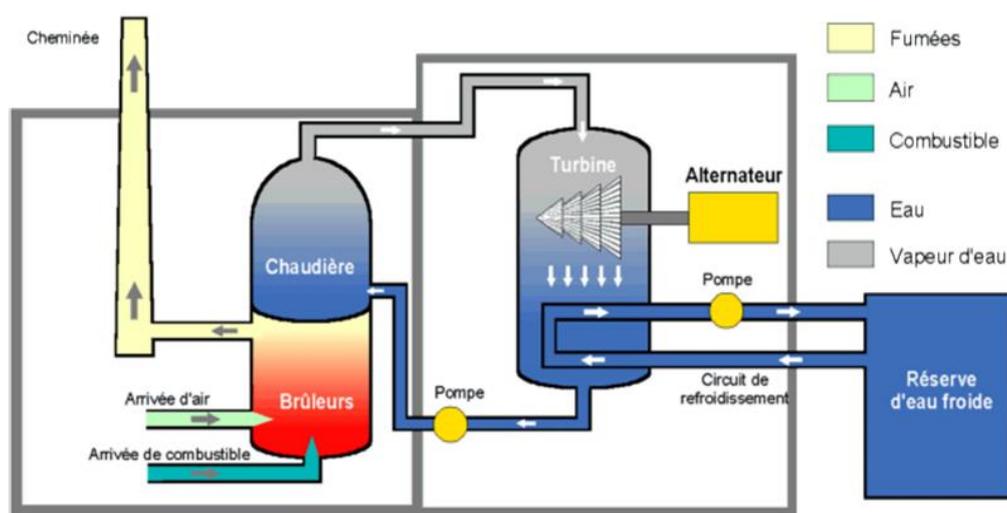
- Une turbine en mouvement
- Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique.

Les différents types de centrales classiques :

### I.3.1.2.1.1 Les centrales à combustibles fossiles :

Dont la source est : (charbon, pétrole et gaz naturel) dites des centrales thermiques classiques : Elles produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. La plupart ont une capacité comprise entre 100 MW et 2000 MW afin de réaliser les économies d'une grosse installation

Si l'on compare les centrales thermiques aux centrales nucléaires, leurs coûts variables sont plus élevés. Par ailleurs, leurs coûts sont largement dépendants du prix du combustible, ce qui rend incertain leur efficacité dans le futur. Cependant, ils ont trois avantages. Le premier en termes de disponibilité comme leurs délais de construction sont assez faibles par rapport aux centrales nucléaires. Le second en termes de coût d'investissement qui est aussi plus faible. Enfin, ils sont plus rapides au démarrage que les centrales nucléaires.



Fig(I-04) : Centrale de production à combustible.

### I.3.1.2.1.2 Les centrales nucléaires :

Sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques. A base d'uranium, l'énergie d'une centrale nucléaire provient de la fission de noyaux de ces atomes lourds. Celle-ci dégage de la chaleur, qui sert dans un premier temps à vaporiser de l'eau, comme dans toute centrale thermique conventionnelle, puis la vapeur d'eau produite entraîne en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

Ces centrales sont caractérisées par un coût variable très faible. Ce coût reflète le coût de combustible utilisé et les autres coûts d'exploitation et de maintenance de la centrale. Cependant, elles ont un temps de démarrage assez long, ce qui les rend moins flexibles à une variation brusque de la demande. La construction d'une telle centrale nécessite des coûts fixes

élevés et un long délai de construction, qui varie entre cinq et sept ans. Pour assurer la rentabilité de la centrale nucléaire, une exploitation continue sur toute l'année est requise soit une durée de fonctionnement annuelle de 5000 à 6000 heures.

On compte dans le monde environ 250 centrales nucléaires qui ont produit 10,3 % de l'électricité mondiale en 2017. Ces centrales comptent en décembre 2019 un total de 449 réacteurs en fonctionnement (y compris 31 réacteurs japonais à l'arrêt), dont la puissance atteint 399 GW (890 MW en moyenne par réacteur) et 54 réacteurs en cours de construction.

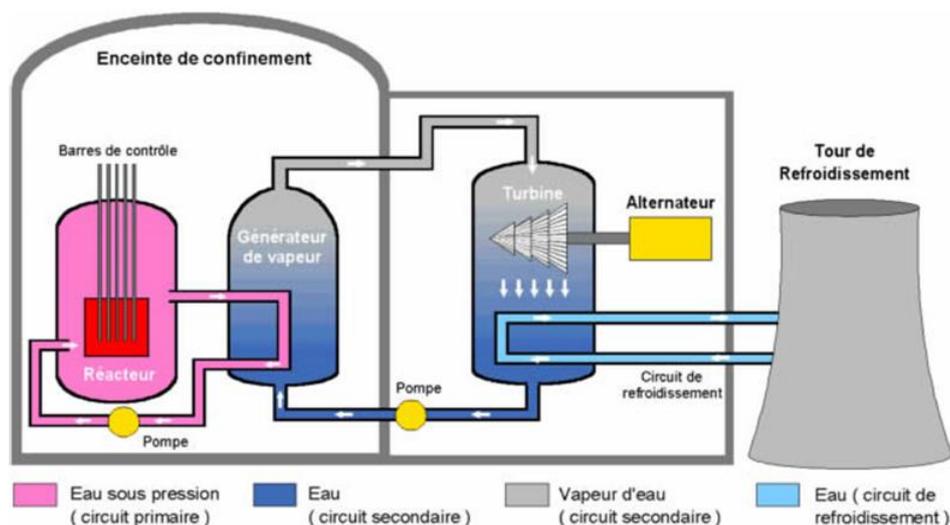


Fig (I-05) : Centrale de production nucléaire.

### I.3.1.2.1.3 Les centrales hydro-électriques : [5]

Chaque année, environ 3 500 TWh d'électricité sont produits dans le monde à partir de l'énergie hydraulique, l'hydroélectricité représente 20% des capacités électriques installées avec un parc global de 1 040 GW (selon Enerdata, 2011).

Une dizaine de pays, dont quatre en Europe, produisent plus de la moitié de leur électricité grâce à l'hydraulique. La Norvège vient en tête avec 98%, suivie par le Brésil avec 86%, la Colombie, l'Islande, le Venezuela, le Canada, l'Autriche, la Nouvelle Zélande et la Suisse. Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. En générale ces centrales utilisent l'énergie potentiel stocké par l'eau pour la transformé en électricité tel que :  $E_p = m \cdot g \cdot h$  (donc cela dépend de la hauteur et le volume stocké dans les barrages)

$E_p$  : c'est l'énergie potentiel de l'eau stocké

$m$  : masse de l'eau

$g$  : la pesanteur

$h$  : la hauteur du barrage par rapport à la turbine

Donc l'énergie électrique produite est :  $E_e = E_p \cdot \eta$  tel que

$\eta$  : est le rendement du turbo-alternateur

- ❖ Le facteur climat joue un rôle prépondérant dans la productivité de ces centrales, car elles dépendent des précipitations. Leur coût variable est généralement faible par rapport aux centrales thermiques. Cependant, l'investissement dans le développement de cette technologie est limité pour le futur en l'absence de sites encore disponible pour l'implantation de nouvelles centrales. Enfin, elles sont appelées pour produire spécialement en périodes de tensions.

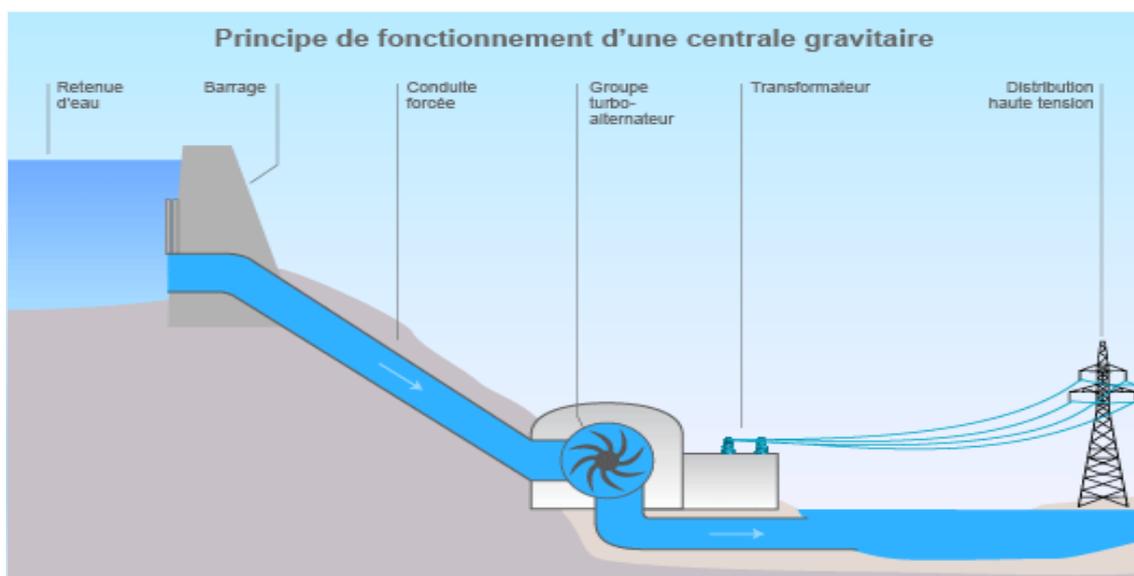


Fig (I-06) : Centrale de production hydraulique.

### I.3.1.2.2 Centrales modernes (à source renouvelable)

#### I.3.1.2.2.1 Centrales géothermiques : [6]

Il existe dans la croûte terrestre un gradient de température qui est en moyenne de 3 °C par 100 mètres. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m.

La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur.

L'exploitation de cette ressource consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité à l'aide de turbines dans les centrales géothermiques, grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la Terre.

Cette ressource a l'avantage de préserver l'environnement et d'être indépendante des

conditions météorologiques (disponible continuellement), elle est donc fiable et stable dans le temps. Malheureusement cette ressource nécessite des forages dont les résultats sont parfois aléatoires et dont le temps de réalisation et de mises en service sont importantes.

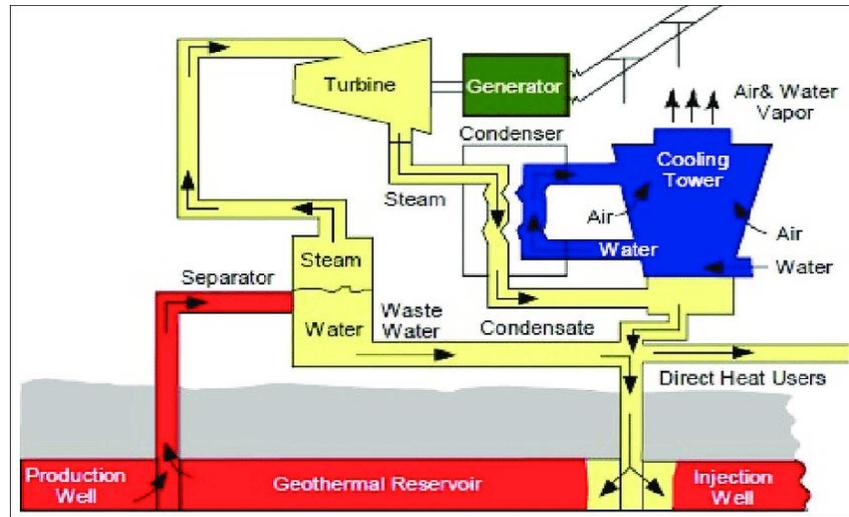


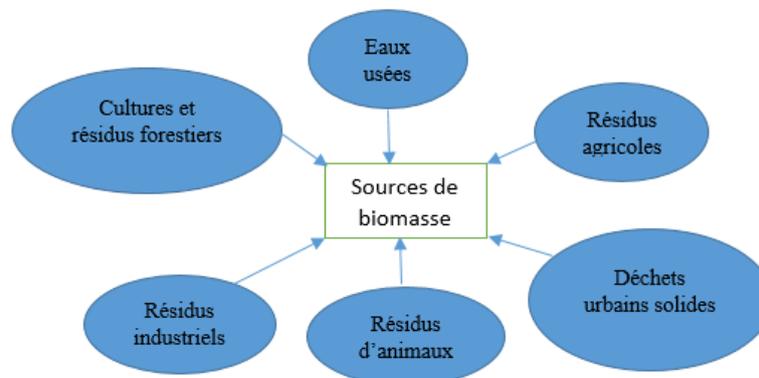
Fig (I-7) : Centrale de production géothermique.

**I.3.1.2.2 Centrales à biomasse : [7]**

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Autrement : La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées : les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ; les liquides (ex : huiles végétales, bio alcools) ; les gazeux (ex : biogaz).



Il s'agit d'une énergie stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est ensuite exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. A cet effet, la biomasse n'est pas inépuisable.

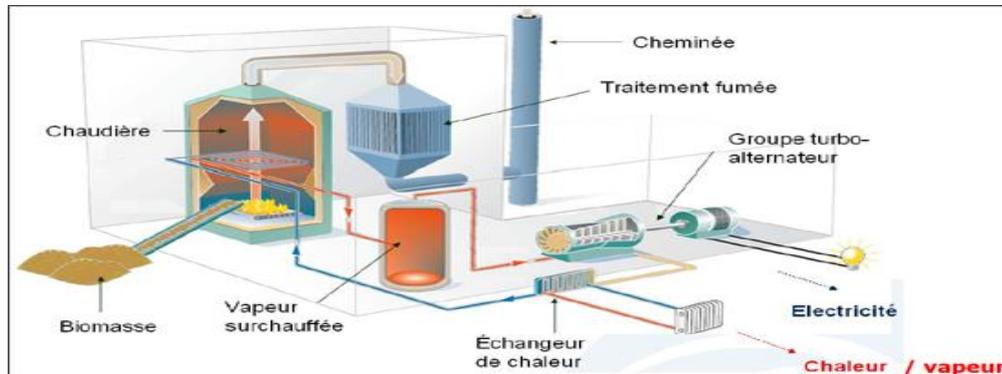


Fig (I-8) : Centrale Biomasse.

Quand on l'exploite de manière naturelle elle est peu menacée mais lorsqu'il s'agit d'une biomasse cultivée (pour les biocarburants par exemple) ou en cas de surexploitation massive de la ressource (comme la déforestation), la production d'une telle énergie peut rapidement avoir de lourds impacts environnementaux.

**I.3.1.2.2.3 Centrales éoliennes :**

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. Cette dernière est produite par la force que le vent exerce sur les pales d'une éolienne par l'intermédiaire d'un rotor. Parmi les avantages de cette source est qu'elle est non polluante (une fois installée sur le site). Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts environnementaux et sonores

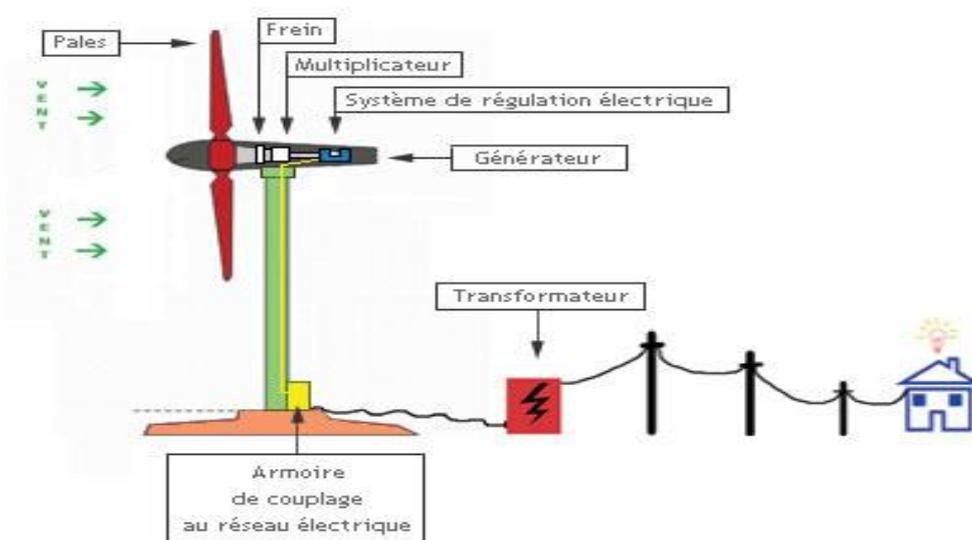


Fig (I-9) : Centrale de production éolienne.

La quantité d'énergie produite par l'éolienne dépend de :

- La vitesse du vent.
- La surface balayée par les pales.
- La densité de l'air.

### I.3.1.2.2.4 Centrales solaires :

#### I.3.1.2.2.4.1 Centrales solaires thermiques (thermodynamiques) :

Les centrales solaires thermiques sont d'une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés comparable à celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est donc nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

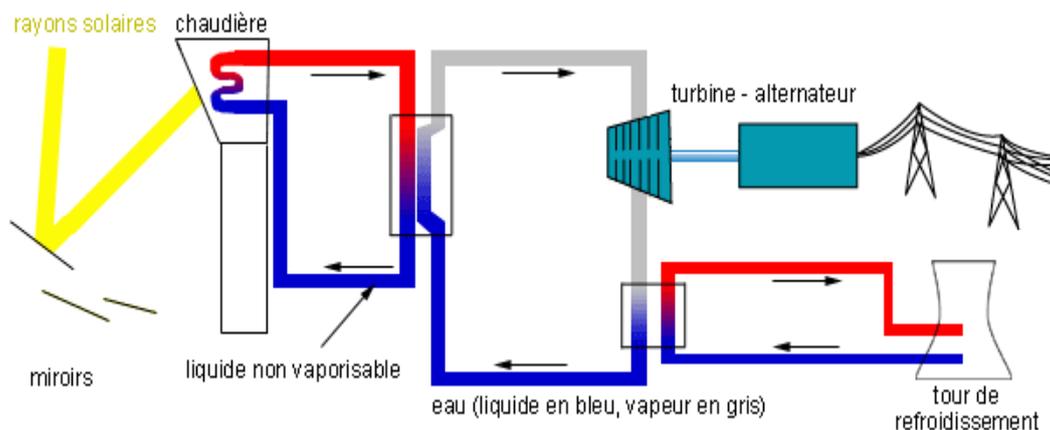


Fig (I-10) : Centrale de production solaire thermique (thermodynamique)

Ce type de centrales transforme l'énergie lumineuse en chaleur, laquelle sert ensuite à produire de l'électricité. Les rayons solaires sont alors concentrés par des réflecteurs sur un liquide vecteur de chaleur, qui va s'évaporer puis se diriger sous forme de vapeur vers une turbine reliée à un alternateur. Il existe de multiples configurations possibles.

La figure suivante montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels.

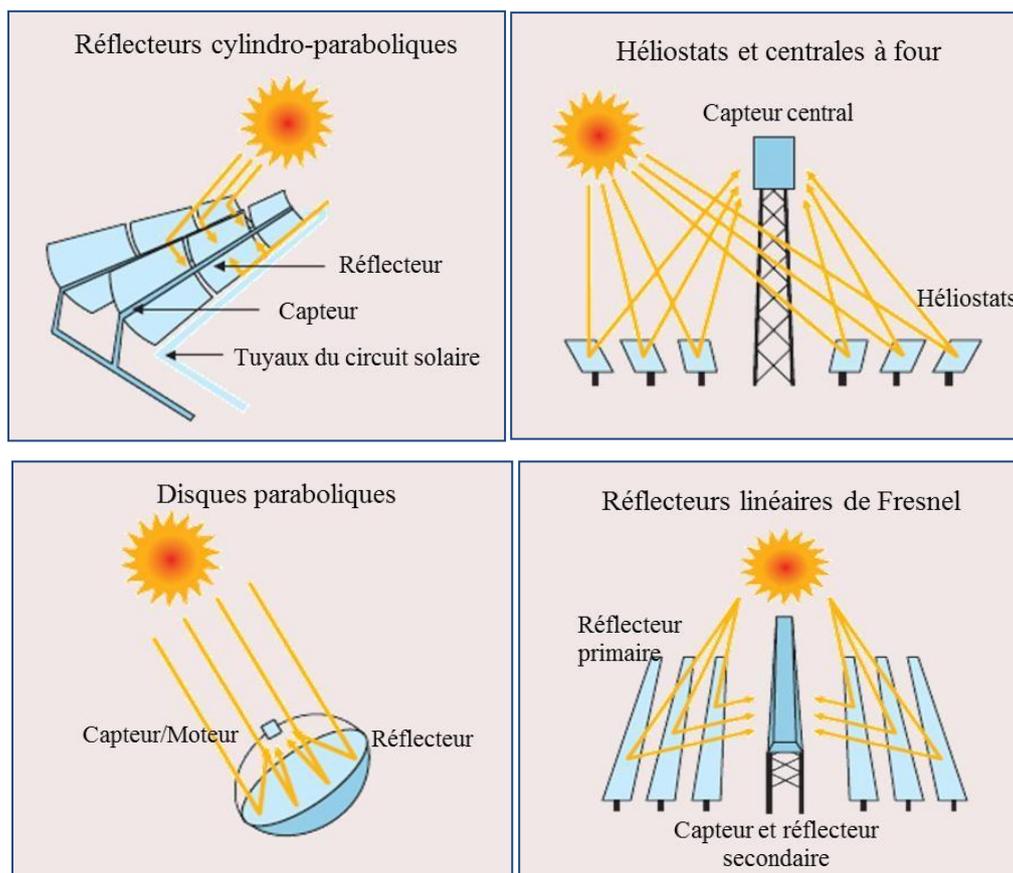


Fig (I-11) : Différents technologies de production à base du solaire thermodynamique

#### I.3.1.2.2.4.2 Centrales solaires photovoltaïques :

Une centrale photovoltaïque est pour sa part composée de panneaux solaires photovoltaïques comportant un grand nombre de cellules photoélectriques convertissant directement l'énergie lumineuse en électricité.

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique créant un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique émis par le soleil. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire. C'est également une énergie « propre » puisque la production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de GES. Cette ressource a toutefois deux inconvénients majeurs, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie sachant que le rendement des panneaux PV est relativement faible (typiquement entre 6 et 20 %)

Les technologies cristallines mettent en œuvre le silicium comme matériau semi-conducteur. Elles se présentent en trois sous-groupes principaux :

- Le silicium poly cristallin : avec un rendement de 12 à 15%, il constitue environ 57% du marché mondial. Il présente le meilleur rapport prix/rendement.
- Le silicium monocristallin : avec un rendement de 13 à 20%, il constitue environ 30% du marché mondial. Il présente un prix plus élevé que le poly cristallin.
- Le silicium amorphe : intégré à la famille suivante dite des « couches minces », il présente un rendement de 6% environ. Cette technologie est principalement appliquée sur les petites puissance (montres, calculatrice), et constitue environ 3% du marché mondial.
- Les technologies « Couches minces » sont très diverses et utilisent de nombreux matériaux semi-conducteurs, tels que le Galium, le Sélénium, l'indium, le Cadmium.... Elles représentent environ 10% du marché mondial, et des rendements de 6 à 11%. Elles présentent souvent des prix plus abordables que les technologies plus conventionnelles, et ont la capacité de pouvoir être appliquées de façon très innovante (panneaux solaires flexibles, tissu photovoltaïque, peinture photovoltaïque...). La technologie couche mince la plus courante est le composé Cd/Te (Tellure de Cadmium).

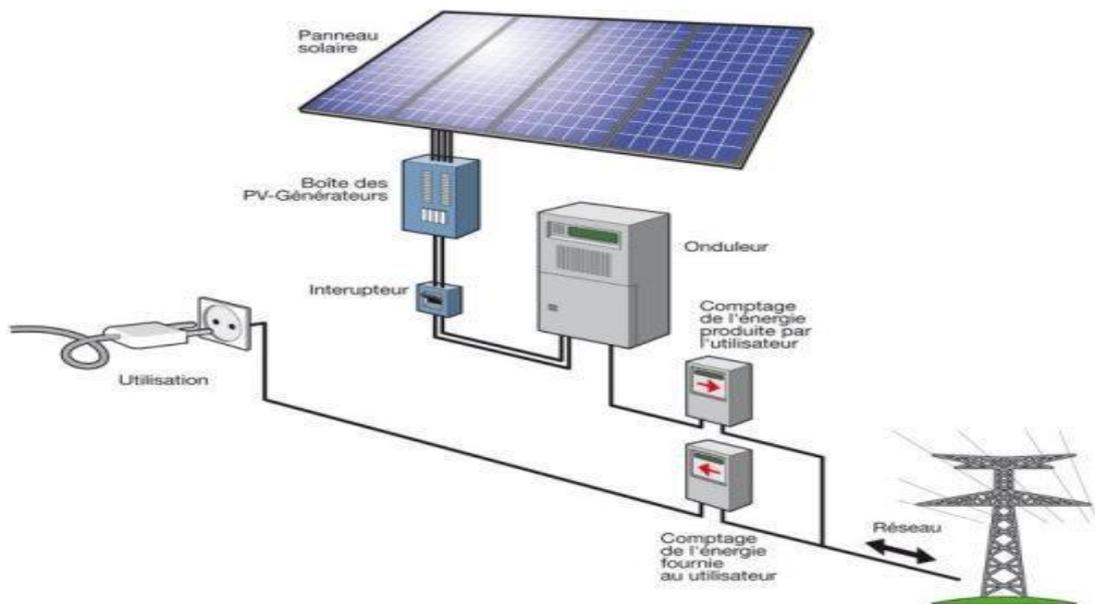


Fig (I-12) : Centrale de production photovoltaïque.

**I.3.1.2.5 Avantages et inconvénients des Energies renouvelables :**

Type d'énergie	Avantages	Inconvénients
Solaire	- Energie renouvelable, et gratuite. - Energie dont l'utilisation ne pollue	- La nuit, la source d'énergie n'existe plus, il faut donc prévoir des systèmes de stockage. - La production d'électricité solaire est pour l'instant encore assez coûteuse car les

	<p>pas, elle ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour le chauffage, les coûts</li> <li>- installation ne sont pas très élevés.</li> </ul>	<p>cellules photovoltaïques sont chères à fabriquer.</p>
Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Durée de vie d'environ 30 ans selon les techniques utilisées.</li> <li>- Pose facile.</li> <li>- Peu d'entretien.</li> <li>- Subventionné par l'état.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Souvent utilisée comme énergie d'appoint car la surface en capteurs est souvent trop petite.</li> <li>- Coût d'achat élevé.</li> </ul>
Thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de couvrir quasiment l'intégralité des besoins en eau chaude et du chauffage en fonction de la surface utilisée.</li> <li>- Des aides financières sont proposées par l'état et les régions.</li> <li>- Les frais de maintenance sont réduits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Assez chère à l'achat, l'amortissement d'investissement est d'environ 5 ans,</li> <li>- La surface installée est souvent inférieure au besoin.</li> <li>- Elle est variable dans le temps (variable en fonction des saisons).</li> </ul>
Eolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- C'est une énergie renouvelable où le vent est 100 % gratuit. - C'est une énergie dont l'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-L'énergie change suivant la météo.</li> <li>-Les éoliennes génèrent un bruit acoustique en continue pas vraiment supportable.</li> <li>- Dans le cas d'installations autonomes, il est</li> </ul>

	<p>ne pollue pas (pas de gaz à effet de serre, ni de production de déchets). - Les coûts d'installation ne sont pas très élevés. - Les principales techniques sont simples, même si leur mise en application technologique est relativement complexe. - Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents.</p>	<p>nécessaire de recourir au stockage ou à l'association d'une installation de groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût.</p>
<p>Géothermie</p>	<p>- C'est une source d'énergie gratuite et renouvelable.                  - Son exploitation ne génère pas de flamme, d'odeurs et ne coûte pas cher.                  - Les installations qui utilisent la géothermie ne polluent pas. - La production d'électricité en même temps que la chaleur peut encore augmenter l'intérêt porté à la géothermie.                  - On peut l'utiliser à n'importe quel moment, jour et nuit.                  - Elle ne dépend pas des conditions atmosphériques</p>	<p>- C'est une énergie qui se transporte difficilement, elle doit donc être utilisée sur place.                  - Les investissements pour pomper l'eau chaude peuvent parfois être importants.                  Risques de tremblements de terre avec certains types de géothermie</p>

	telles que la pluie, le soleil ou le vent.	
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie renouvelable.</li> <li>- Réduire la quantité de déchets envoyés à la décharge.</li> <li>- Absorbe du gaz carbonique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complexité de transformation.</li> <li>- Beaucoup de dégagement de chaleur par combustion</li> </ul>
Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'hydroélectricité fait partie des énergies renouvelables gratuites.</li> <li>- Elle est non polluante et joue un rôle majeur en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.</li> <li>- Elle ne produit pas de déchets toxiques.</li> <li>- Les risques d'accident (rupture de barrage) sont très faibles, grâce à un contrôle continu des ouvrages.</li> <li>- Exploite l'eau mais ne la consomme pas.</li> <li>- Haut rendement de production par comparaison aux autres sources d'énergies.</li> <li>- L'entretien de l'installation est simple et les frais de fonctionnement sont réduits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Les problèmes d'environnement et de perturbation de l'équilibre écologique, avant et après la construction du barrage, qui nécessitent des études sérieuses.</li> <li>-L'investissement consenti à la construction des barrages est très cher.</li> <li>- L'installation des centrales hydroélectriques nécessite des sites appropriés</li> </ul>

	- Longue durée de vie des centrales hydrauliques.	
--	---	--

Tableau 01

### I.3.2 Le transport de l'énergie électrique :

L'électricité est conduite de son lieu de production jusqu'au consommateur final grâce à un large réseau de lignes aériennes ou souterraines. Le câble reste l'unique moyen de transport de l'électricité

Le réseau de transport assure plusieurs fonctions :

- Il rassemble toutes les énergies électriques produites sur le territoire.
- Il répartit ces énergies en fonction des besoins des régions.
- Il assure la sécurité de l'ensemble.
- Il assure l'interconnexion avec les pays voisins.

#### I.3.2.1 Nécessité de la Haute Tension :

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique de minimiser l'énergie perdue par effet Joule le long de la ligne de transport. La solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension et de l'abaisser à l'utilisation. Les deux opérations de changement de niveau de tension sont effectuées par des transformateurs. Ces sous-systèmes sont formés d'un ensemble de transformateurs (élévateurs ou abaisseurs) placés en série dont la capacité ou bien la performance totale est la somme des différentes versions et type de transformateur.

Pour minimiser les pertes par effet de Joule résultants par la résistance des conducteurs cela est proportionnelle à la diminution du courant parcouru :  $P_{\text{joule}} = R * I^2$

Si :  $I \searrow \implies P \searrow$

On réduit donc l'intensité pour limiter les pertes tout en augmentant la tension car la puissance véhiculée doit rester la même  $P = U * I$

#### I.3.2.2 Nécessité du courant alternatif : [8]

Le courant alternatif présente des avantages très importants pour transporter l'électricité :

La chose la plus importante c'est que le courant alternatif passe par la valeur zéro (0 A)

- Il s'agit du régime de production des alternateurs des centrales et de celui utilisé par de nombreux appareils de consommation comme les moteurs.

- Il permet très facilement d'élever les tensions, de réduire les intensités donc de limiter les pertes par effet Joule sur les réseaux.
- Le maillage des réseaux est facile : le passage d'un niveau de tension à un autre s'effectue grâce aux transformateurs dont les rendements sont très bons.  
Pourtant le courant continu s'impose parfois pour des raisons économiques et/ou techniques :
- Le transport de courant alternatif sur longue distance développe, par effet capacitif entre la ligne et le sol, des effets déstabilisants. Au plan technique, le choix du continu s'impose au-delà de 1 500 km ;
- Le continu ne nécessite que deux conducteurs au lieu de trois. Dès que la ligne est longue, cette économie compense la nécessité d'avoir des stations de conversion aux deux extrémités pour se raccorder aux réseaux alternatifs. Au plan économique, le continu peut ainsi devenir plus intéressant dès 600 km ;
  - En cas de lignes souterraines ou sous-marines de plus de 50 km. L'alternatif développe, par effet capacitif, une puissance réactive qui s'oppose à la circulation du courant. L'intérêt du continu, qui en est exempt, croît avec la distance du transport ;
  - Le passage par du continu est le moyen le plus économique et efficace de raccorder des réseaux alternatifs asynchrones (dotés de fréquences ou de réglages de phase différents).

### **I.3.2.3 Le réseau de transport et d'interconnexion :**

Il est destiné à transporter des quantités importantes d'énergie sur de longues distances (vu la dispersion géographique entre les lieux de production et centres de consommation). Il constitue l'ossature principale pour l'interconnexion des grands centres de production.

Ce réseau peut être assimilé au réseau d'autoroutes. Ces lignes atteignent parfois des milliers de kilomètres.

### **I.3.2.4 Le réseau de répartition régionale ou locale : [9]**

Ils sont destinés à répartir l'énergie sur des distances plus courtes. Le transport est assuré en très haute tension (225000 volts) et en haute tension (90000 et 63000 volts). Ce type de réseau est l'équivalent des routes nationales dans le réseau routier. La fonction principale de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommations. Ces derniers sont : soit du domaine public avec l'accès au réseau de distributions HTA, soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT. Fait à base d'une configuration arborescente de même niveau de tension, alors ces lignes sont placées en parallèle et servent à transiter

l'énergie électrique d'un point A vers le point B. Ces lignes se caractérisent par leurs capacités de transport, de fiabilité, ainsi que de leurs coûts. De plus les puissances transportées sont telles, que l'utilisation d'une tension basse entrainerait des sections de câble tout à fait inadmissibles. L'usage des tensions élevées se trouve donc imposé malgré les contraintes d'isolement qui se traduisent par des coûts de matériel plus importantes, la solution la plus facile étant l'utilisation des lignes aériennes.

Dans tous les cas, le choix d'une tension de transport est avant tout un compromis technico- économique entre les puissances à transporter et les distances à parcourir. La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité des sites urbains). Dans ce domaine, les politiques de respect de l'environnement et de protection des sites.

- Types de lignes : Les lignes électriques peuvent être classées suivant trois critères
  - Situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles)
  - Classe de tension : lignes à basse tension et ligne à haute tension.
  - Nature de la tension : continue, alternative monophasée ou triphasée.

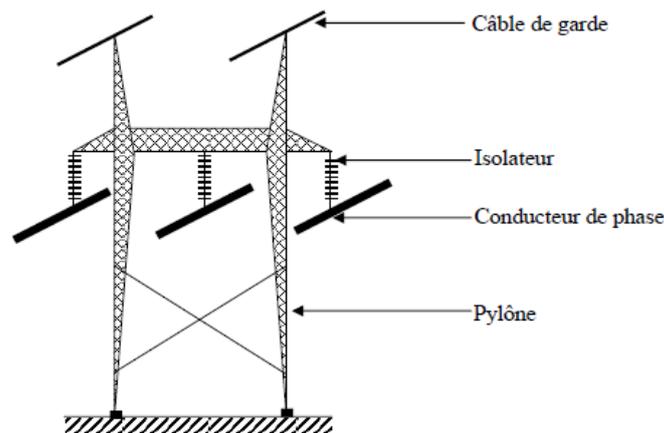


Fig (I-13) : Composants principales d'un pylône électrique.

Les lignes aériennes : se sont constitués par des conducteurs de phases fixés par des isolateurs sur des pylônes métalliques, des poteaux en béton ou en bois. Elles sont utilisées pour :

- Les longues distances
- Les HT et THT surtout
- Dans les zones rurales (BT)

#### I.3.2.4.1 Les conducteurs de phases :

Ils ne sont pas isolés pour faciliter le dégagement de chaleur. Les brins donnent beaucoup de souplesse. Les conducteurs sont constitués en aluminium, des brins toronnés et renforcés en acier.

Le choix des conducteurs se fait selon un certain nombre de critères :

- Critère 1 : Les pertes ohmiques doivent être inférieures à 2% de la puissance maximale transportée par la ligne.
- Critère 2 : Les pertes par effet de couronne doivent être inférieures ou égales à 1,5 kW/km de ligne.
- Critère 3 : le niveau de perturbation radiophonique.

#### **I.3.2.4.2 Câbles de garde :**

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almélec-acier.

Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant ; on parle alors de OPGW, Câble de garde à fibre optiques/ Optical Ground Wire, ou fibre optique composite. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

- Le rôle du câble de garde :
  - Protection des conducteurs de phase contre les coups de foudre direct.
  - Transport des courants homopolaires et harmoniques.

Si la résistance de la terre est importante :

- La différence de potentiel entre le pied et le sommet du pylône devient importante,
- Amorçage en retour entre le pylône et le câble de garde par contournement de l'isolateur
  - ⇒ Choc en retour
  - ⇒ Surtension sur les lignes de phases.

Donc la résistance de la terre doit être la plus faible possible.



Fig (I-14) : Câble de garde.

#### **I.3.2.4.3 Les isolateurs :**

Le diélectrique principal utilisé sur des lignes aériennes à haute tension est l'air. L'air entourant les conducteurs, est un bon isolant, à condition que le stress électrique soit tenu au-dessous du seuil d'ionisation. Il est, cependant, nécessaire d'attacher les conducteurs à certains points sur les bras mutuels des pylônes.

Les isolateurs à haute tension se sont développés rapidement très tôt ce siècle, commençant par des isolateurs en porcelaine types. Aujourd'hui, des isolants modernes en polymères sont employés, ainsi que divers matériels.

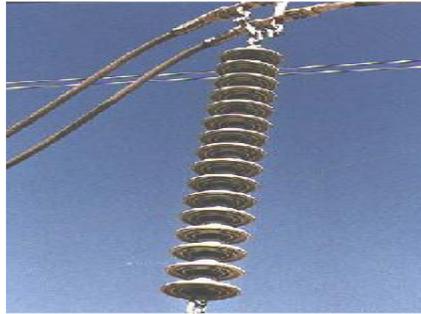


Fig (I-15) : Isolateur.

#### **I.3.2.4.4 Les pylônes :**

Un pylône est un support vertical portant les conducteurs d'une ligne à haute tension. Le plus souvent métallique, il est conçu pour supporter un ou plusieurs câbles aériens et résister aux aléas météorologiques et sismiques (foudre y compris), aux vibrations des câbles ou du pylône et ses fondations.

Leur forme, leur hauteur et leur robustesse, ou résistance mécanique, dépendent des contraintes auxquelles ils sont soumis. L'électricité ne passe pas dans les pylônes, à moins que la foudre ne frappe le câble de garde, placé au sommet du support ; ce câble vise à protéger les conducteurs en permettant à la décharge de la foudre de se rendre jusqu'au sol en passant par le pylône.

On prend comme exemple : (**Pylône Mae West**) qu'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport. Il sert aux paliers de tension allant de 110 000 à 735 000 volts. Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement.

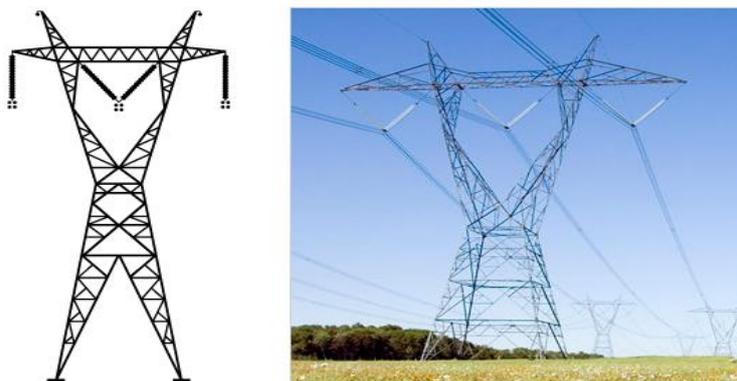


Fig (I-16) : pylône.

### I.3.3 La distribution de l'énergie électrique : [10] [11] [12]

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'énergie électrique du réseau de répartition aux points de consommation. Les réseaux de distribution sont destinés à acheminer l'électricité à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance. La distribution est assurée en moyenne tension (HTA) et en basse tension (BT). C'est l'équivalent des routes départementales et des voies communales dans le réseau routier.

La majeure partie des consommateurs d'énergie électrique sont alimentés par le réseau basse tension (230 et 400 volts) : pavillons, immeubles d'habitation, écoles, artisans, commerçants, professions libérales, exploitations agricoles, d'autres sont alimentés en moyenne tension : grande hôtels, hôpitaux et cliniques, petites et moyennes entreprises. Les gros industriels sont par contre alimentés directement par le réseau de transport, avec un niveau de tension adapté à la puissance électrique dont ils ont besoin.

Le choix d'une topologie fixe les principaux éléments de conception d'une distribution. Plusieurs topologies peuvent être rencontrées.

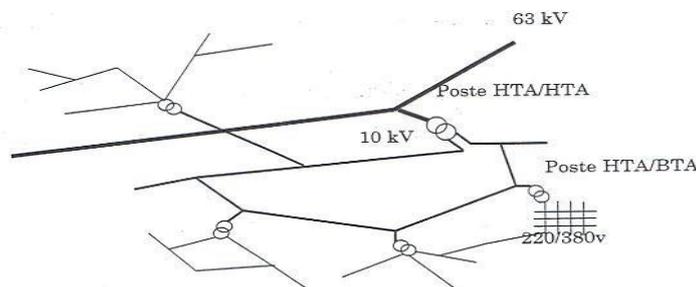


Fig (I-17) : Schéma d'un réseau de distribution

#### I.3.3.1 Réseau radial (simple dérivation) :

Ce schéma est aussi appelé en antenne, son principe de fonctionnement est à une seule voie d'alimentation. Ce schéma est particulièrement utilisé pour la distribution de la HTA en milieu rural.

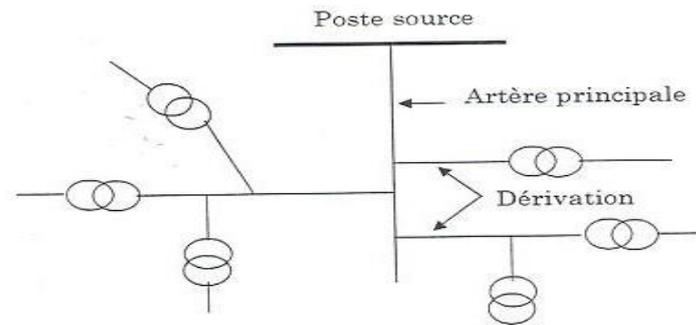


Fig (I-18) : Exemple de réseau simple dérivation

En effet, il permet facilement et à moindre coût d'accéder à des points de consommation de faible densité de charge. Il est très souvent un schéma radial lié à une distribution de type aérienne ; de plus la réparation d'un incident exige la mise hors tension d'une partie du réseau sans possibilité de réalimentation de secours.

- Avantage : Coût minimal
- Inconvénient : Disponibilité réduite

### I.3.3.2 Réseau boucle ouverte :

Il est aussi appelé coupure d'artères où le fonctionnement est à deux voies d'alimentation. En temps normal, les boucles sont ouvertes ce qui rend la protection et l'exploitation plus difficiles. Ce réseau est un peu plus compliqué que le précédent, un peu plus coûteux et un peu plus difficile à exploiter, mais il assure une meilleure continuité du service. Très souvent ce schéma est associé à une distribution de type souterraine.

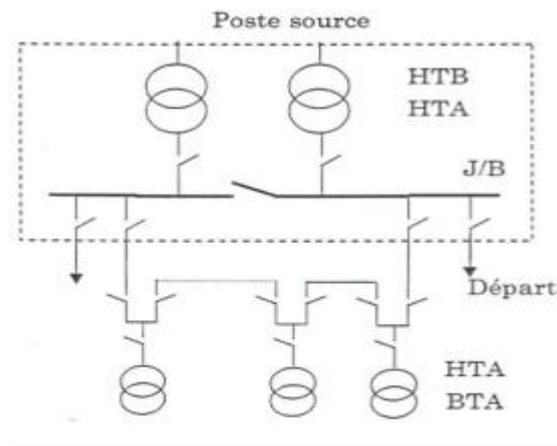


Fig (I-19) : Représentation d'un réseau HTA en boucle

- Avantages :
  - Bonne disponibilité, dans la mesure où chaque source peut alimenter la totalité du réseau.
  - Maintenance possible du jeu de barres avec un relayage vers le deuxième jeu de barres.
- Inconvénients :

- Solution plus couteuse que l'alimentation simple antenne.
- Ne permet qu'un fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance.

### I.3.3.3 Réseau double dérivation :

Chaque poste est alimenté par deux câbles avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des arrivées

#### ▪ Avantages :

- Bonne disponibilité d'alimentation.
- Très grande souplesse d'utilisation pour l'affectation des sources et des charges 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 un sectionneur adjacent est fermé).

#### ▪ Inconvénients :

- Surcout important par rapport à la solution simple jeu de barres.
- Les trois types peuvent être utilisés aussi bien pour la HTA que pour la BTA, le choix ne peut se faire qu'après une étude tenant compte du prix de revient du réseau et de la qualité du service qui doit être assuré.

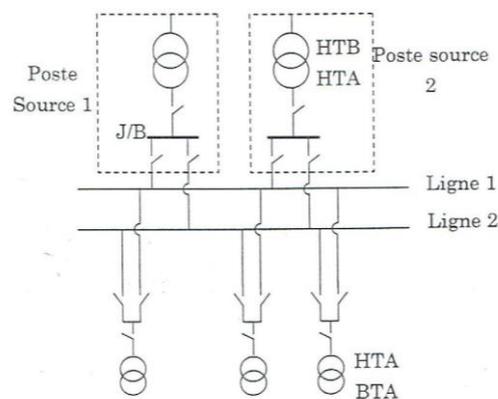


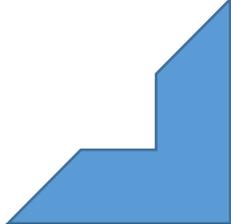
Fig (I-20) : Exemple de réseau double dérivation

## I.4 Conclusion :

Nous avons exposé dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de ses différents composants nécessaires à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique. Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité : **production=consommation + pertes.**



# **Chapitre II : Equipements de protection des réseaux de distribution MT**



## **II     *Chapitre 02 : Equipements de protection des réseaux de distribution*** ***MT***

### **II.1   Introduction :**

Les dispositifs de protection surveillent en permanence l'état électrique des éléments d'un réseau et provoquent leur mise hors tension (par exemple l'ouverture d'un disjoncteur), lorsque ces éléments sont le siège d'une perturbation indésirable : court-circuit, défaut d'isolement, surtension, ...etc. Le choix d'un dispositif de protection n'est pas le fruit d'une réflexion isolée, mais une des étapes les plus importantes de la conception d'un réseau électrique.

A partir de l'analyse du comportement des matériels électriques (moteurs, transformateurs, câbles, ...etc.) sur défauts et des phénomènes qui en découlent, on choisit les dispositifs de protection les mieux adaptés. C'est ce que l'on va présenter dans ce chapitre.

### **II.2   Système de protection :**

#### **II.2.1 Définition :**

La Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I) définit la protection comme l'ensemble des dispositions destinées à la détection des défauts et des situations anormales des réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire d'élaborer d'autres ordres de signalisations.

#### **II.2.2 Les fonctions de protection : [13]**

Les fonctions de protection sont réalisées par des relais ou des appareils multifonctions. A l'origine, les relais de protection étaient de type analogique et effectuaient généralement une seule fonction. Actuellement, la technologie numérique est la plus employée. Elle permet de concevoir des fonctions de plus en plus évoluées et un même appareil réalise généralement plusieurs fonctions. C'est pourquoi, on parle plutôt d'appareils **multifonctions**.

### **II.3   Qualités principales d'un système de protection : [13] [14] [15] [16]**

#### **II.3.1 Rapidité :**

Les courts-circuits sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement et des performances prioritaires.

Le temps d'élimination des courts-circuits comprend deux composantes principales :

- Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes).
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide),

ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes.

### II.3.2 Sélectivité :

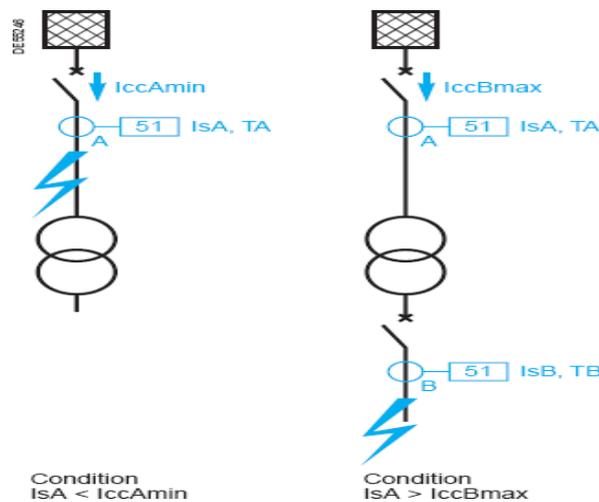
La sélectivité est une capacité d'un ensemble de protections à faire la distinction entre les conditions pour lesquelles une protection doit fonctionner de celles où elle ne doit pas fonctionner.

Les différents moyens qui peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants :

- Sélectivité ampèremétrique par les courants,
- Sélectivité chronométrique par le temps,
- Sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique.

#### II.3.2.1 Sélectivité ampèremétrique :

Une protection ampèremétrique (Fig. II.1) est disposée au départ de chaque tronçon son seuil est réglé à une valeur inférieure à la valeur de défaut minimal provoqué par un court-circuit sur la section surveillée, et supérieure à la valeur maximale du courant provoqué par un court-circuit situé en aval (au-delà de la zone surveillée).



Fig(II-1) : Fonctionnement d'une sélectivité ampèremétrique

Ainsi réglée, chaque protection ne fonctionne que pour les courts-circuits situés immédiatement en aval de sa position, à l'intérieur de la zone surveillée, elle est insensible aux courts-circuits apparaissant au-delà.

#### II.3.2.2 Sélectivité chronométrique :

Sélectivité dans laquelle les protections sollicitées sont organisées pour fonctionner de manière décalée dans *le temps*. La protection la plus proche de la source a la temporisation la plus longue.

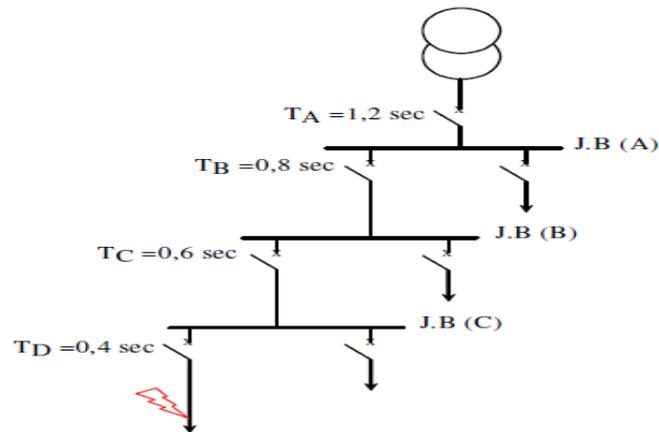


Fig (II-2) : Principe de la sélectivité chronométrique.

Ainsi, sur le schéma (Fig. II.2), le court-circuit représenté est vu par toutes les protections (en A, B, C, et D). La protection temporisée D ferme ses contacts plus rapidement que celle installée en C, elle-même plus rapide que celle installée en B. Après l'ouverture du disjoncteur D et la disparition du courant de court-circuit, les protections A, B, C qui ne sont plus sollicitées, revient à leur position de veille. La différence des temps de fonctionnement  $\Delta T$  entre deux protections successives est l'intervalle de sélectivité.

### II.3.3 Sensibilité :

La protection doit fonctionner dans un domaine très étendu de courants de courts-circuits Entre :

- Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est donc parfaitement connu,
- Un courant minimal dont la valeur est très difficile à apprécier et qui correspond à un court-circuit se produisant dans des conditions souvent exceptionnelles.

La notion de *sensibilité d'une protection* est fréquemment utilisée en référence au courant de court-circuit le plus faible pour lequel la protection est capable de fonctionner.

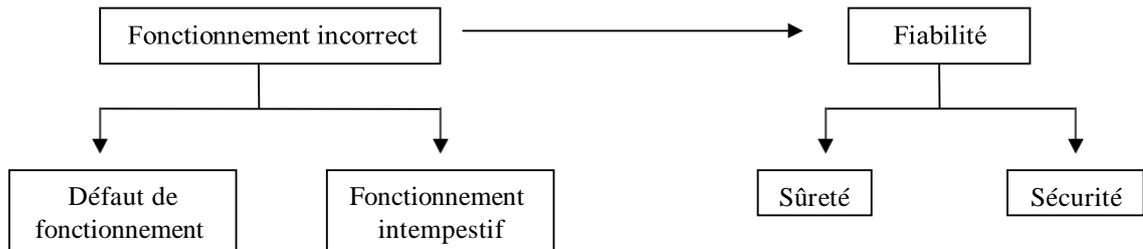
### II.3.4 Fiabilité :

Les définitions et les termes proposés ici, sont dans la pratique, largement utilisés au plan international.

- Une protection a un *fonctionnement correct* lorsqu'elle émet une réponse à un court-circuit sur le réseau en tout point conforme à ce qui est attendu.
- A l'inverse, pour un *fonctionnement incorrect*, elle comporte deux aspects :
  - Le défaut de fonctionnement ou non-fonctionnement lorsqu'une protection, qui aurait dû fonctionner, n'a pas fonctionné.
  - Le fonctionnement intempestif, qui est un fonctionnement non justifié, soit en

l'absence de défaut, soit en présence d'un défaut pour laquelle la protection n'aurait pas dû fonctionner.

- La fiabilité d'une protection, qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement incorrect (éviter les déclenchements intempestifs), est la combinaison de :
  - La sûreté : qui est la probabilité de ne pas avoir de défaut de fonctionnement.
  - La sécurité : qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement intempestif.



Fig(II-3) : Fiabilité d'une protection.

On peut améliorer la fiabilité en associant plusieurs protections, mais, comme on peut le voir sur la figure II.4, sûreté et sécurité sont deux exigences contradictoires (Fig. II.4).



a) Association en série :

Sécurité augmente, Sûreté moindre.

b) Association en parallèle :

Sécurité moindre, Sûreté augmente.

Fig (II-4) : Association de protection.

**II.4 Chaîne générale d'un système de protection :**

C'est le choix des éléments de protection et de la structure globale de l'ensemble, de façon cohérente et adaptée au réseau (Fig. II.5). Le système de protection se compose d'une chaîne constituée des éléments suivants quel que soit les éléments principaux de protection des réseaux électriques.

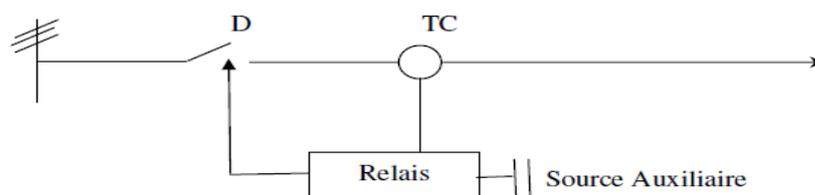


Fig (II-5) : Chaîne principale de la protection électrique.

**II.4.1 Transformateur de courant :**

**II.4.1.1 Définition :**

Selon la définition de la commission électrotechnique internationale (C.E.I), "un transformateur de courant est un transformateur de mesure dans lequel le courant secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle approximativement nul pour un sens approprié des connexions".

La notion de **transformateur de courant** est un abus de langage, mais elle a été popularisée dans l'industrie. L'expression « transformateur d'intensité » est sans doute plus exacte. On utilise fréquemment les abréviations TC ou TI.

- Les transformateurs de courant ont deux fonctions essentielles :

- Adapter la valeur du courant MT du primaire aux caractéristiques des appareils de mesure ou de protection en fournissant un courant secondaire d'intensité proportionnelle réduite,
- Isoler les circuits de puissance du circuit de mesure et/ou de protection.

La fonction d'un transformateur de courant phase est de fournir à son secondaire ( $I_s$ ) un courant proportionnel au courant primaire ( $I_p$ ) mesuré. L'utilisation concerne autant la mesure (comptage) que la protection.

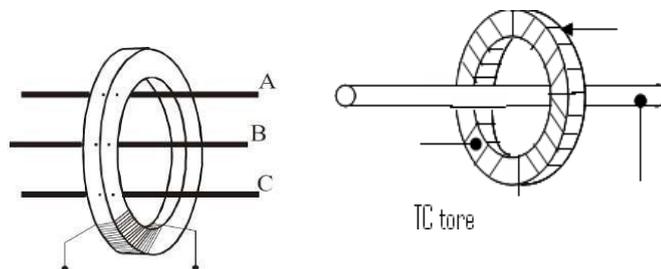


Fig (II.6) : Transformateur de courant.

#### II.4.1.2 Modélisation :

Un transformateur de courant est constitué d'un circuit primaire et d'un circuit secondaire couplés par un circuit magnétique et d'un enrobage isolant, en époxy silice dans le cas des transformateurs Merlin Gerin et Siemens par exemple (Fig II.7). L'appareil est de type :

- Bobiné : lorsque le primaire et le secondaire comportent un bobinage enroulé sur le circuit magnétique,
- Traversant : primaire constitué par un conducteur non isolé de l'installation,
- Tore : primaire constitué par un câble isolé.

##### II.4.1.2.1 Importance du choix des TC :

La précision de fonctionnement des appareils de mesure ou de protection dépend directement de la précision du TC.

**II.4.1.2.2 Principe de fonctionnement :**

Un TC débite souvent sur une charge plutôt résistive ( $R_c$  + sa filerie), et peut être représenté par le schéma équivalent ci-dessous.

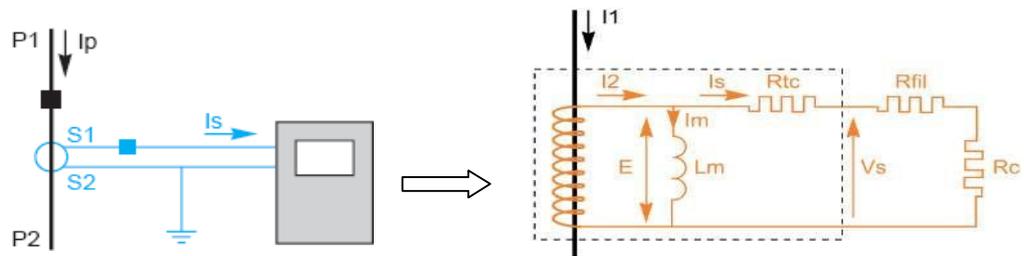


Fig (II.7) : Schéma équivalent du circuit secondaire d'un TC.

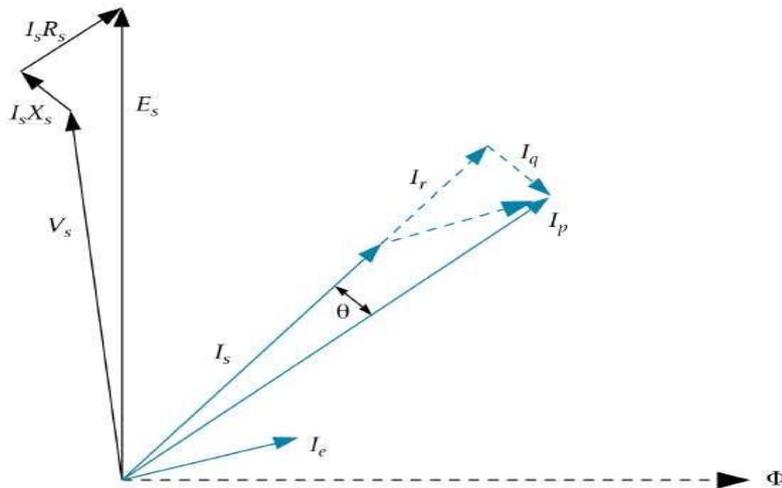


Fig (II.8) : Diagramme de Fresnel représenté le TC.

Avec :

$I_p$  : courant primaire,

$I_s$  : courant secondaire pour un TC parfait,

$I_s$  : courant secondaire circulant effectivement,  $I_m$  : courant magnétisant,

$E$  : force électromotrice induite,  $V_s$  : tension de sortie,

$L_m$  : self de magnétisation (saturable) équivalente du TC,

$\Phi$  : Flux magnétique,

$R_{tc}$  : résistance secondaire du TC,

$R_{fil}$  : résistance de la filerie de connexion,

$R_c$  : résistance de charge.

Suite la figure II.8, le courant secondaire est l'image parfaite du courant primaire

dans le rapport de transformation. Mais le courant de sortie est entaché d'une erreur due au courant de magnétisation.

Un TC a une courbe de magnétisation unique (à une température et une fréquence données). Elle caractérise, avec le rapport de transformation, son fonctionnement.

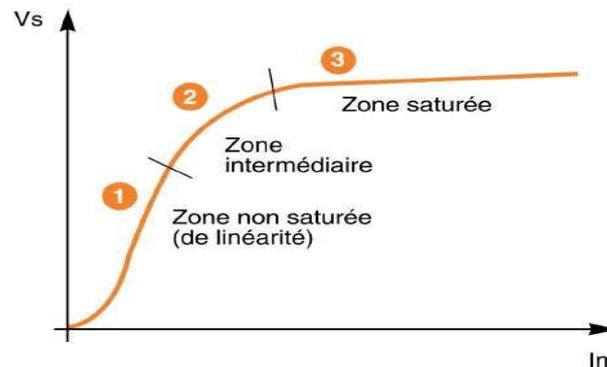


Fig (II.9) : Courbe de magnétisation (d'excitation) d'un TC.

Cette courbe de magnétisation Fig. II.9 (tension  $V_s$ , fonction du courant magnétisant  $I_m$ ) peut être divisée en trois zones :

- 1 - Zone non saturée :  $I_m$  est faible et la tension  $V_s$  (donc  $I_s$ ) augmente de façon quasi proportionnelle au courant primaire.
- 2 - Zone intermédiaire : Il n'y a pas de réelle cassure de la courbe et il est difficile de situer un point précis correspondant à la tension de saturation.
- 3 - Zone saturée : la courbe devient quasiment horizontale ; l'erreur de rapport de transformation est importante, le courant secondaire est déformé par la saturation.

#### II.4.1.3 Caractéristiques :

Le transformateur de courant est constitué de deux circuits, primaire et secondaire, couplés par un circuit magnétique. Avec plusieurs spires au primaire, l'appareil est de type bobiné. Avec un primaire réduit à un simple conducteur traversant le capteur, l'appareil est à barre passante (primaire intégré constitué par une barre de cuivre), ou traversant (primaire constitué par un conducteur non isolé de l'installation), ou tore (primaire constitué par un câble isolé).

- Les TC est caractérisés par les grandeurs suivantes (d'après les normes CEI 60044).

##### II.4.1.3.1 Niveau d'isolement assigné :

- C'est la tension la plus élevée à laquelle le primaire du TC est soumis.
- Rappelons que le primaire est au potentiel de la HT et le secondaire a très généralement une de ses bornes à la terre.
- Comme pour tout matériel, on définit également :

- Une tension maximum de tenue 1min à fréquence industrielle,
- Une tension maximum de tenue à l'onde de choc.

Exemple : en 24 kV de tension nominale, le TC doit supporter une tension de 50 kV pendant 1min à 50 Hz et une tension de 125 kV à l'onde de choc.

#### **II.4.1.3.2 Le rapport assigné de transformation ( $I_p/I_s$ ) :**

- Il est donné sous la forme du rapport des courants primaires et secondaires  $I_p/I_s$ .
- Valeurs normales des courant secondaire assigné est généralement 5 A ou 1 A.
- Valeurs normales des courants primaires assignés (en A) : 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 et leurs multiples ou sous-multiples décimaux.

#### **II.4.1.3.3 Précision (FLP) :**

- Elle est définie par l'erreur composée pour le courant limite de précision.
- Le facteur limite de précision (FLP) est le rapport entre le courant limite de précision et le courant assigné.

Pour la classe P :

- 5P10 signifie 5 % d'erreur pour  $10xI_n$  et 10P15 signifie 10 % d'erreur pour  $15xI_n$ ,
- 5P et 10P sont les classes de précision normalisées pour les TC de protection,
- $5.I_n$ ,  $10. I_n$ ,  $15. I_n$  et  $20. I_n$  sont les courants limites de précision normalisés.

La classe PR :

Elle est définie par le facteur de rémanence, rapport du flux rémanent au flux de saturation, qui doit être inférieur à 10 %. 5PR et 10PR sont les classes de précision normalisées pour les TC de protection.

La classe PX :

Correspond à une autre façon de spécifier les caractéristiques d'un TC à partir de sa "tension de coude", la résistance secondaire et le courant magnétisant (réponse d'un TC en régime saturé).

#### **II.4.1.3.4 Puissance de précision :**

- Puissance apparente en VA, que le TC peut fournir au secondaire pour le courant secondaire assigné pour lequel la précision est garantie.
- La puissance est consommée par tous les appareils connectés ainsi que les fils de liaison.
- Si un TC est chargé à une puissance inférieure à sa puissance de précision, sa précision réelle est supérieure à la précision assignée, réciproquement un TC trop chargé perd en précision.

### II.4.1.3.5 Courant de courte durée admissible :

Exprimé en kA efficace, le courant ( $I_{th}$ ) maximum admissible pendant 1 seconde (le secondaire étant en court-circuit) représente la tenue thermique du TC aux surintensités. Le TC doit supporter le courant de court-circuit pendant le temps nécessaire à son élimination. Si le temps d'élimination  $t$  est différent de 1 seconde. La tenue électrodynamique exprimée en kA crête est au moins égale à  $2,5 \times I_{th}$ .

#### Remarques :

- Il ne faut jamais laisser le secondaire d'un transformateur de courant ouvert,
- On ne peut pas utiliser un transformateur de courant en courant continu,
- Dans chaque phase de réseaux électrique on trouve un transformateur de courant

### II.4.1.4 Transformateur de courant à doubles enroulements :

#### II.4.1.4.1 Double enroulements secondaires :

Ils sont montés sur deux circuits magnétiques indépendants (Fig. II.10). L'un des deux est utilisé pour l'alimentation du comptage et mesure et a toujours une puissance d'au moins 10 VA en classe sa précision égale 0,5. Son circuit magnétique doit se saturer à  $2 \cdot I_n$  pour la protection des appareils de comptage et mesure. L'autre est utilisé pour l'alimentation des circuits de protection et a une puissance de 10 VA en classe sa précision égale 1. Son circuit magnétique ne doit pas y avoir de saturation avant au moins 15 fois le courant nominal

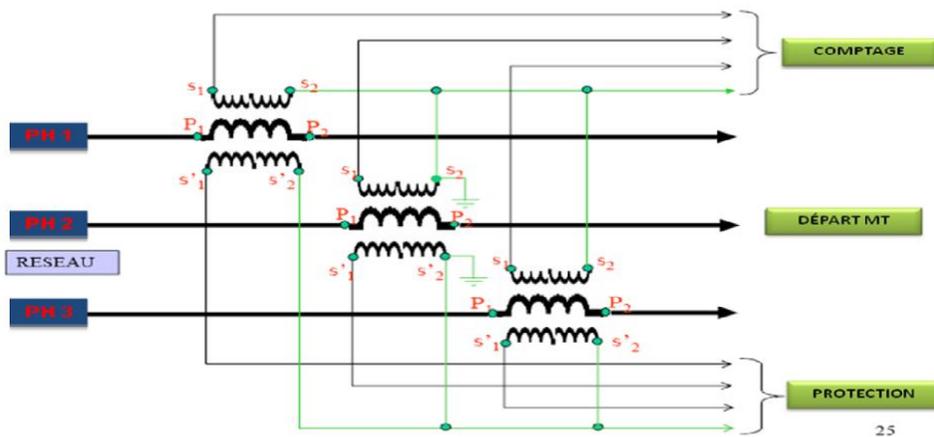


Fig (II.10) : TC avec double enroulements secondaires (comptage et protection).

#### II.4.1.4.2 Double enroulements primaires :

Il est obtenu par couplage série ou parallèle des enroulements primaires (Fig. II.11).

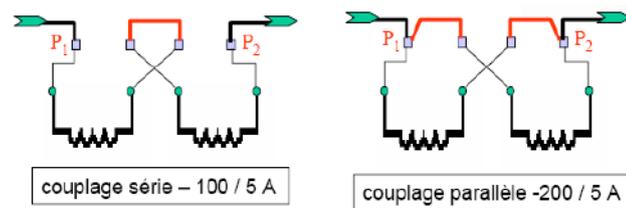


Fig (II.11) : Couplage d'un TC avec double enroulements primaires.

#### II.4.1.5 Précautions importantes :

Ne jamais laisser ouvert le secondaire d'un transformateur de courant lorsque le primaire est alimenté. Des tensions élevées peuvent apparaître aux bornes du circuit secondaire ; elles peuvent être dangereuses pour l'homme et entraîner la destruction du transformateur de courant.

### II.4.2 Transformateur de tension :

#### II.4.2.1 Définition :

Selon la définition donnée par la commission électrotechnique internationale (C.E.I), un transformateur de tension ou potentiel 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 ». On utilise aussi le terme transformateur de potentiel (TP).

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 volts.

La caractéristique la plus importante d'un transformateur de tension est donc son rapport de transformation, par exemple 400 000 V/100 V.

#### II.4.2.2 Fonction :

La fonction d'un transformateur de tension est de fournir à son secondaire une tension image de celle qui lui est appliquée au primaire. L'utilisation concerne autant la mesure que la protection. Les transformateurs de tension (TT ou TP) sont constitués de deux enroulements, primaire et secondaire, couplés par un circuit magnétique, les raccordements peuvent se faire entre phases ou entre phase et terre (Fig. II.12).

Avec :  $m = V_2/V_1$

m : Rapport de transformation de TT

**II.4.2.3 Précautions importantes :**

Ne jamais court-circuiter les circuits secondaires d'un transformateur de tension alimenté au primaire, car celui-ci serait détruit en quelques secondes.

**II.4.3 - Les relais de protection :****II.4.3.1 Définition :**

Les relais de protection sont des appareils qui reçoivent un ou plusieurs informations (signaux) à caractère analogique ( courant, tension, puissance, fréquence, température, ...etc.) et le transmettent à un ordre binaire (fermeture ou ouverture d'un circuit de commande) lorsque ces informations reçues atteignent les valeurs supérieures ou inférieures à certaines limites qui sont fixées à l'avance, Donc le rôle des relais de protection est de détecter tout phénomène anormal pouvant se produire sur un réseau électrique tel que le court-circuit, variation de tension. ...etc. Un relais de protection détecte l'existence de conditions anormales par la surveillance continue, détermine quels disjoncteurs ouvrir et alimente les circuits de déclenchement.

**II.4.3.2 Les types :**

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

**II.4.3.2.1 Les relais électromécaniques :**

Ce relais est basé sur le principe d'un disque d'induction actionné par des bobines alimentées par des variables électriques du réseau via des transformateurs de courant et de tension. Un ressort de rappel réglable détermine la limite de l'action du disque sur un déclencheur (points de réglage).

Les équipements électromécaniques sont des assemblages de fonctions : détection de seuils et temporisation. Ils avaient l'avantage d'être robustes, de fonctionner sans source d'énergie auxiliaire et d'être peu sensibles aux perturbations électromagnétiques. Ces relais se démarquent par leur solidité et leur grande fiabilité, pour cette raison, leur entretien est minime. Ils sont réputés pour leur fiabilité dans les environnements de travail les plus délicats. Il est néanmoins souhaitable de les contrôler régulièrement, et la périodicité d'inspection dépend des conditions d'exploitation (Fig. II.12).

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

- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de maintenance,
- Le manque de précision, le dispositif étant sensible à son environnement et aux phénomènes d'usure,

- Il est aussi difficile d'obtenir des réglages adaptés aux faibles courants de court-circuit,
- Son coût de fabrication est élevé,
- Des performances insuffisantes et n'autorisent l'emploi que de fonctions élémentaires simples, en nombre limité et sans redondance,

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

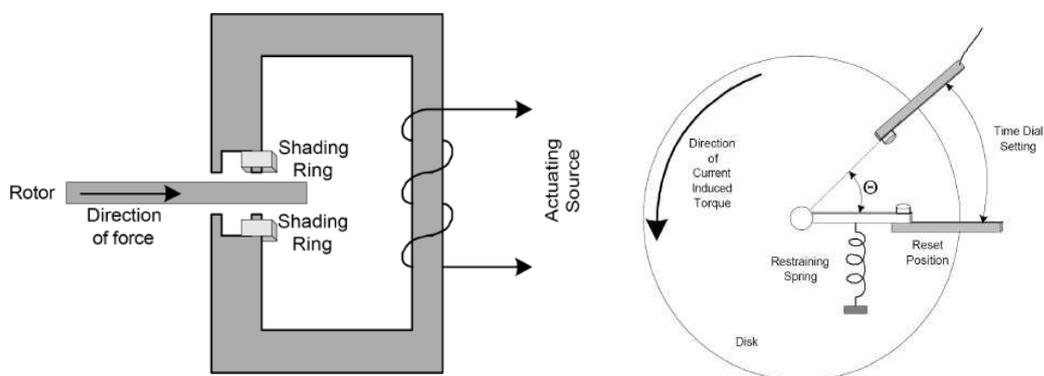


Fig (II.12) : Relais électromagnétique à induction par disque simple.

#### II.4.3.2.2 Les Relais statique :

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

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

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

Les inconvénients de ces dispositifs demeurent :

- Le risque d'être hors d'état de fonctionner entre deux périodes de tests,
- La grande puissance consommée en veille,
- La faible sécurité de fonctionnement (pas de fonction d'autocontrôle).

#### **II.4.3.2.3 Les Relais numériques :**

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

Les protections numériques, sont basées sur le principe de la transformation de variables électriques du réseau, fournies par des transformateurs de mesure, en signaux numériques de faible voltage. L'utilisation de techniques numériques de traitement du signal permet de décomposer le signal en vecteurs, ce qui autorise un traitement de données via des algorithmes de protection en fonction de la protection désirée. En outre, ils sont équipés d'un écran d'affichage à cristaux liquides sur la face avant pour le fonctionnement local. Ces dispositifs nécessitant une source auxiliaire, offrent un excellent niveau de précision et un haut niveau de sensibilité. Ils procurent de nouvelles possibilités, comme :

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

Ces modèles intègrent des possibilités d'autotest et d'autocontrôle qui augmentent leur continuité de fonctionnement tout en réduisant la durée et la fréquence des opérations de maintenance. En plus des fonctions de protection, ces équipements disposent également de fonctions complémentaires facilitant leur fonctionnement. Les liaisons séries permettent de les paramétrer depuis un micro-ordinateur et de les connecter à un système de contrôle commande au niveau local et central. Ils permettent aussi de bénéficier des récentes découvertes dans le domaine de l'intelligence artificielle, comme les réseaux neuronaux et la logique floue.

#### **II.4.4 Disjoncteur moyenne tension :**

##### **II.4.4.1 Définition et rôle :**

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale (C.E.I), un

disjoncteur à HTA est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois :

- Dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique,
- Dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit, et les conséquences de la foudre.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel des réseaux électrique HTA, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc éviter que le matériel soit endommagé par ce court-circuit.

#### II.4.4.2 Principe de fonctionnement :

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur à MT est obtenue en séparant des courant dans un gaz (air, SF6, etc.) ou dans un milieu isolant (par exemple à vide). Après la séparation des contacts, le courant continue de circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts du disjoncteur (Fig. II.13).

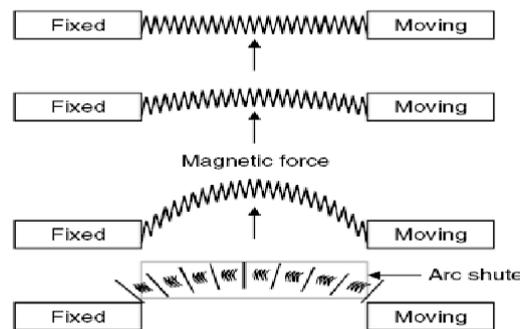


Fig (II-13) : Arc électrique entre les contacts d'un disjoncteur MT.

Pour les disjoncteurs à MT, le principe de coupure retenu est la coupure du courant lorsqu'il passe par zéro (ceci se produit toutes les dix millisecondes dans le cas d'un courant alternatif à 50 Hz). En effet, c'est à cet instant que la puissance qui est fournie à l'arc électrique par le réseau est minimal (cette puissance fournie est même nulle à l'instant où la valeur instantanée du **courant est nulle**)

#### II.4.4.3 Essais : [17]

Les essais de type ont pour but de vérifier les caractéristiques du disjoncteur HTA, de ses dispositifs de commande et des équipements auxiliaires. En principe, chaque essai de type doit être effectué sur un disjoncteur à l'état neuf et propre et les divers essais de type peuvent être effectués à des époques différentes et en des lieux différents.

##### II.4.4.3.1 Essais type :

Les essais de type obligatoires suivant la norme CEI-56 sont :

- Les essais diélectriques :
  - Essai de choc de foudre,
  - Essai de tenue à la fréquence industrielle du circuit principal, des auxiliaires.
- Les essais d'échauffement et de mesure de la résistance du circuit principal,
- Les essais de courant admissible de courte durée,
- Les essais de courant de crête admissible,
- Les essais mécaniques et climatiques :
  - Essais de fonctionnement mécaniques à la température de l'air ambiant,
  - Essais à haute et basse température.
- Les essais d'établissement et de coupure de courants de court-circuit,
- Les essais d'établissement et de coupure de courants capacitifs,
- Les essais d'établissement et de coupure de faibles courants inductifs.

#### **II.4.4.3.2 Essais routine :**

Les essais de routine ont pour but de vérifier les caractéristiques du disjoncteur HTA, ses dispositifs de commande et ses équipements auxiliaires. Ils sont réalisés par le constructeur, en usine, pour chaque appareil. Les essais de routine sont :

- Le fonctionnement mécanique,
- La mesure des durées de manœuvre des auxiliaires,
- La chute de tension maximale du circuit principal,
- Le contrôle d'étanchéité,
- Le temps de fermeture en cycle rapide,
- Les essais diélectriques à la fréquence industrielle,
- La vérification de la chaîne de déclenchement pour les disjoncteurs à protection intégrée.

#### **II.4.4.4 Caractéristiques électrique : suivant la norme CEI 56-87**

##### **II.4.4.4.1 Tension assignée :**

La tension assignée est la valeur efficace maximale de la tension que le matériel peut supporter en service normal. Elle est toujours supérieure à la tension de service.

##### **II.4.4.4.2 Niveau d'isolement assigné :**

Le niveau d'isolement fixe la tenue diélectrique des matériels de manœuvre et l'onde de choc de foudre. Il est caractérisé par deux valeurs :

- La tenue à l'onde de choc (1,2/50  $\mu$ s),
- La tenue à la fréquence industrielle pendant une minute.

**II.4.4.4.3 Courant assigné en service continu :**

Un disjoncteur étant toujours fermé, le courant de charge doit circuler sans emballement thermique.

**II.4.4.4.4 Courant de courte durée admissible :**

C'est la valeur efficace du courant de court-circuit en kA sur un réseau pendant 1s ou 3s

**II.4.4.4.5 Tension assignée d'alimentation de circuits auxiliaires :**

Valeurs de tension d'alimentation des bobines d'ouverture et fermeture

**II.4.4.4.6 Pouvoir de coupure en court-circuit :**

Le pouvoir de coupure assigné en court-circuit est la valeur la plus élevée du courant que le disjoncteur peut couper sous sa tension assignée dans un circuit dont la tension transitoire de rétablissement (TTR) répond à une spécification précise.

**II.4.4.5 - Différentes techniques de coupure d'arc électrique :**

Les disjoncteurs moyenne tension peuvent être :

**II.4.4.5.1 Disjoncteur à huile :**

L'huile qui servait déjà comme isolant a été utilisée dès le début du siècle comme milieu de coupure car cette technique permet la conception d'appareils relativement simples et économiques. Les disjoncteurs à huile ont été utilisés principalement pour les tensions de 5 à 30 kV (Fig. II.14).

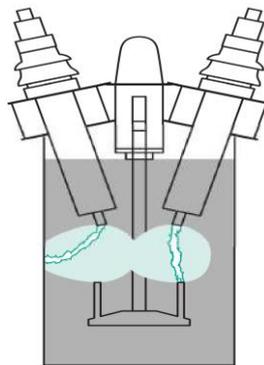


Fig (II-14) : Chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'huile.

**II.4.4.5.1.1 Disjoncteurs à faible volume d'huile :**

L'arc et la bulle sont confinés dans un pot de coupure isolant. La pression du gaz augmente lors du passage de l'arc dans une succession de chambres puis, quand le courant passe par zéro, se détend à travers une buse sur la zone d'arc.

**II.4.4.5.1.2 Disjoncteurs à grand volume d'huile :**

Dans les premiers appareils utilisant l'huile, l'arc se développait librement entre les contacts créant des bulles de gaz non confinées. Afin d'éviter des amorçages entre phases

ou entre bornes et masse, ces bulles ne doivent en aucun cas atteindre la cuve ou se rejoindre. Les appareils dimensionnés en conséquence, atteignent des dimensions extrêmement grandes.

En MT d'autres techniques ont été préférées car la coupure dans l'air présente plusieurs inconvénients :

- Encombrement de l'appareillage (dimensions plus grandes à cause de l'allongement de l'arc),
- Pouvoir de coupure influencé par la présence des cloisons métalliques de la cellule contenant l'appareil et par l'humidité de l'air,
- Coût et bruit.

Cette technique de coupure a été très employée dans tous les domaines, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Progressivement, elle est supplantée par les techniques de coupure dans le vide et dans le SF<sub>6</sub>, techniques qui ne présentent pas les inconvénients présentés dans les paragraphes précédents.

#### II.4.4.5.2 Disjoncteur à air comprimé :

L'air comprimé est utilisé (Fig. II.15) pour assurer les fonctions suivantes :

- Refroidissement et allongement de l'arc, entraînement des particules ionisées,
- Après passage à zéro du courant, refroidissement de la colonne ionisée résiduelle et entraînement des particules ionisées restant dans l'espace entre contacts,
- Après l'extinction de l'arc, apparition d'une rigidité diélectrique élevée, d'autant plus élevée que la pression d'air est importante.

Les inconvénients de ce type sont :

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

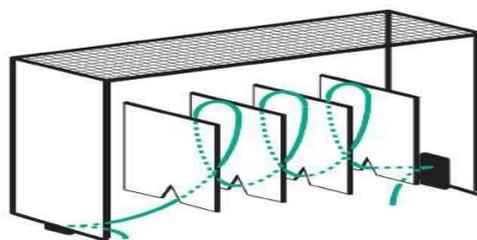


Fig (II-15) : Chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air (Disjoncteur de type Solénarc, Marque : Merlin Gerin).

#### II.4.4.5.3 Disjoncteur à gaz SF<sub>6</sub> :

La mise au point de nouvelles générations de disjoncteur SF<sub>6</sub> (hexafluorure de

soufre) très performantes a entraîné dans les années 1970 la suprématie des appareils SF<sub>6</sub> dans la gamme 7,2 kV à 245 kV. Sur le plan technique, plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF<sub>6</sub> peuvent expliquer leur succès :

- La simplicité de la chambre de coupure qui ne nécessite pas de chambre auxiliaire pour la coupure,
- L'autonomie des appareils apportée par la technique auto-pneumatique (sans compresseur de gaz),
- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63 kA,
- Le nombre de chambres de coupure est réduit (01 chambre en 245 kV, 02 chambres en 420 kV, 03 chambres pour la ligne de 550 kV et 04 en 800 kV),
- Une durée d'élimination de court-circuit court, de 2 à 2,5 cycles en réseau THT,
- La durée de vie d'au moins de 25 ans,
- Faible niveau de bruit,
- Zéro maintenance (régénération du gaz SF<sub>6</sub> après coupure),
- Eteint l'arc dix fois mieux que l'air.

- L'un des inconvénients de ce type d'appareil est son prix élevé.

**II.4.4.5.4 Disjoncteur à vide :**

En principe le vide est un milieu diélectrique idéal : il n'y a pas de matière donc pas de conduction électrique. Cependant, le vide n'est jamais parfait et de toute façon a une limite de tenue diélectrique. Malgré tout, le « vide » réel a des performances spectaculaires : à la pression de 10<sup>-6</sup> bar, la rigidité diélectrique en champ homogène peut atteindre une tension crête de 200 kV pour une distance inter électrodes de 12 mm (Fig. II.16).

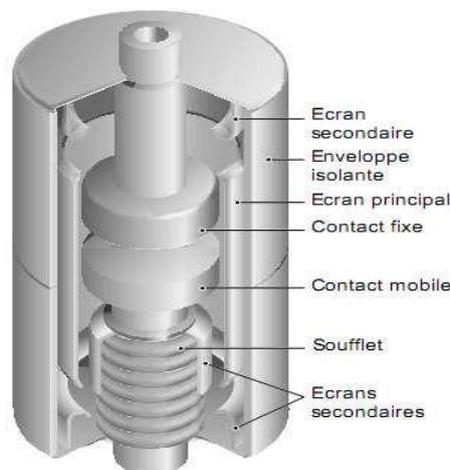


Fig (II-16) : Constitution d'une ampoule de coupure dans le vide.

Tous les constructeurs ont été confrontés aux mêmes exigences :

- Réduire le phénomène d'arrachement de courant pour limiter les surtensions,
- Éviter l'érosion précoce des contacts pour obtenir une endurance élevée,
- Retarder l'apparition du régime d'arc concentré pour augmenter le pouvoir de coupure,
- Limiter la production de vapeurs métalliques pour éviter les ré-claquages,
- Conserver le vide, indispensable pour garder les performances de coupure, pendant la durée de vie de l'appareil.

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

## **II.4.5 - Fusible moyenne tension :**

### **II.4.5.1 Généralités :**

Les fusibles moyenne tension offrent une protection des dispositifs de distribution moyenne tension (de 3 à 36 kV) contre des effets dynamiques et thermiques causés par les court-circuits plus élevés que le courant minimal de coupure du fusible. Etant donné leur faible coût d'acquisition et ne nécessitant aucune maintenance, les fusibles moyenne tension sont une excellente solution pour la protection de différents types de dispositifs de distribution :

- Des récepteurs moyenne tension (transformateurs, moteurs, condensateurs... etc.),
- Des réseaux de distribution électrique publique et industrielle.

Ils offrent une protection sûre contre des défauts importants qui peuvent survenir d'une part sur les circuits moyenne tension, d'autre part sur les circuits basse tension. Cette protection peut être accrue en combinant les fusibles avec des systèmes de protection basse tension ou un relais de surintensité.

Les caractéristiques les plus importantes qui définissent notre gamme de fusibles sont les suivantes :

- Haut pouvoir de coupure,
- Basses valeurs de  $I^2t$ ,
- Interruption sûre des courants critiques,
- Baisse puissance dissipée,
- Utilisables pour l'intérieur et l'extérieur,
- Avec percuteur thermique,
- Basses valeurs d'intensité minimale de coupure.

### **II.4.5.2 Caractéristiques :**

**II.4.5.2.1 Tension assignée ( $U_n$ ) :**

C'est la tension entre phases (exprimée en kV) la plus élevée du réseau sur laquelle pourra être installé le fusible. Dans la gamme moyenne tension, des tensions assignées préférentielles ont été fixées : 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 et 36 kV.

**II.4.5.2.2 Courant assigné ( $I_n$ ) :**

C'est la valeur du courant que le fusible peut supporter en permanence sans échauffement anormal.

**II.4.5.2.3 Courant minimal de coupure assigné ( $I_3$ ) :**

C'est la valeur minimale du courant qui provoque la fusion et la coupure du fusible. Ces valeurs sont comprises entre 3 et 5 fois la valeur de  $I_n$ .

**Remarque** : il ne suffit pas pour un fusible de fondre pour interrompre le passage du courant. Pour des valeurs de courant inférieures à  $I_3$ , le fusible fond, mais peut ne pas couper le courant. L'arc reste maintenu jusqu'à ce qu'une intervention extérieure interrompe le courant. Il est donc impératif d'éviter la sollicitation d'un fusible dans la zone comprise entre  $I_n$  et  $I_3$ .

**II.4.5.2.4 Courants critiques ( $I_2$ ) :**

(Courants donnant des conditions voisines de l'énergie d'arc maximale). Cette intensité soumet le fusible à une plus grande sollicitation thermique et mécanique. La valeur de  $I_2$  varie entre 20 et 100 fois la valeur de  $I_n$ , selon la conception de l'élément fusible. Si le fusible peut couper ce courant, il peut aussi garantir la coupure de courant pour toutes les valeurs comprises entre  $I_3$  et  $I_1$ .

**II.4.5.2.5 Courant maximal de coupure assigné ( $I_1$ ) :**

C'est le courant présumé de défaut que le fusible peut interrompre. Cette valeur est très élevée (allant de 20 à 63 kA).

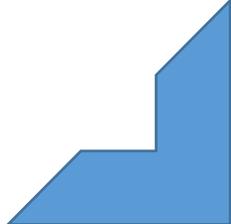
**Remarque** : il est nécessaire de s'assurer que le courant de court-circuit du réseau est au plus égal au courant  $I_1$  du fusible utilisé.

**II.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, il nous a paru nécessaire de donner assez d'informations sur les différents éléments qui composent un système de protection moyenne tension. Ces éléments sont très importants, très sensibles et doivent être bien choisis et bien réglés afin d'assurer une protection efficace contre les différents types d'anomalies qui peuvent survenir sur le réseau électrique.



# Chapitre III : Les courants de court-circuit



### **III    *Chapitre 03 : Les courants de court-circuit***

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

Le dimensionnement d'une installation électrique et des matériels à mettre en œuvre, la détermination des protections des personnes et des biens, nécessite le calcul des courants de court-circuit en tout point du réseau.

L'objectif poursuivi est de bien faire connaître les méthodes de calcul pour déterminer en toute connaissance de cause les courants de court-circuit, même en cas d'utilisation de moyens informatiques.

#### **III.2 Les court-circuit : [18] [19] [20]**

##### **III.2.1 Définition :**

Un court-circuit est un phénomène électrique qui se produit notamment lorsqu'un conducteur sous tension se trouve mis en contact accidentellement avec un conducteur de tension différente ou avec une pièce conductrice reliée à la terre (bâti de machine, support de ligne...), ou avec la terre elle-même. Il se traduit par une augmentation brusque de l'intensité du courant qui peut aller jusqu'à provoquer un incendie.

##### **III.2.2 Classification :**

Les court-circuit sont classifiés selon :

###### **III.2.2.1 Leur origine :**

Elle peut être :

- Mécanique : Comme la rupture de conducteur, la liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger tel que outils ou animaux.
- Electrique : Suite à la dégradation de l'isolement entre phases, ou entre phase et masse ou terre, ou suite à des surtensions d'origine interne.
- Erreur d'exploitation : Mise à la terre d'une phase, couplage entre deux sources de tensions différentes ou des phases différentes, fermeture par erreur d'un appareil de coupure.

###### **III.2.2.2 Leur localisation :**

Elle peut être :

- Interne à un matériel : (Câbles, moteurs, transformateurs, tableaux ...) Il entraîne généralement des détériorations.
- Externe à un matériel : (Câbles, moteurs, transformateurs, tableaux ...) donc y'aura des conséquences limitées à des perturbations pouvant entraîner à plus ou moins longues échéances

**III.2.2.3 Leur durée :**

Elle peut être :

On effectue généralement le classement des défauts en fonction de leur durée. Cette dernière a un impact sur le comportement des protections. On distingue les défauts

- Auto-extincteurs : Ils disparaissent naturellement avant le fonctionnement des protections, en une durée inférieure à environ 100 ms
- Fugitifs : Ils nécessitent le fonctionnement des protections et sont éliminés par les automatismes de reprise de service après une ouverture d'environ 0,3 s ou par le disjoncteur shunt. (Le défaut est brûlé après le ré-enclenchement).
- Semi-permanents : Ils nécessitent le fonctionnement des protections et sont éliminés par les automatismes de reprise de service à l'issue du 1er ou du 2ème ré-enclenchement lent.
- Permanents : Ils mettent le réseau hors tension et nécessitent l'intervention du personnel d'exploitation d'abord pour isoler l'équipement en défaillance, rétablir l'équipement en défaut.
  - Ces défauts ne se produisent pas à la même fréquence, car les statistiques donnent la répartition suivante :

Auto-extincteurs : 5 %.

Fugitifs : 70 % à 80 %.

Semi-permanents : 05 % à 15%.

Permanents : 05% à 15 %.

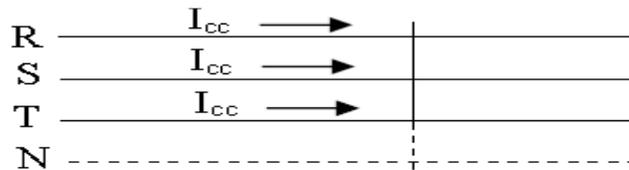
Ces chiffres justifient l'utilisation d'appareils automatiques qui coupent les départs affectés le temps nécessaire à l'élimination des défauts non permanents

**III.2.3 Types des court-circuit :**

Dans un réseau triphasé de constitution symétrique on peut classer les court-circuit de la manière suivante :

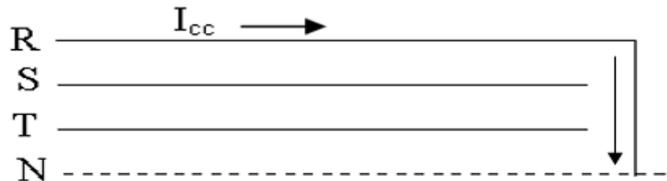
**III.2.3.1 Court-circuit triphasé symétrique :**

Intéressant toutes les phases avec ou sans mise à la terre (la mise à la terre ne modifie pas la valeur des courants, puisqu'en raison de la symétrie du système, le conducteur neutre, ou la terre, n'est parcouru par aucun courant. Ces courts-circuits représentent environ 5% de tous les cas.



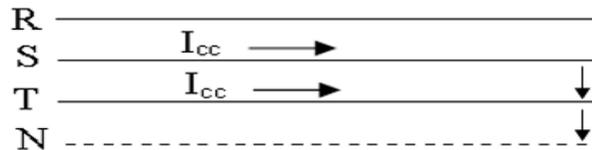
### III.2.3.2 Court-circuit dissymétrique entre une phase et la masse :

Cela se traduit par la mise en contact par le sol ou par une pièce conductrice avec la terre). Ces court-circuit représentent 65% des cas.



### III.2.3.3 Court-circuit dissymétrique entre deux phases et la terre :

Ces court-circuit représentent environ 20% des cas.



### III.2.4 Les causes des court-circuit :

- La dégradation des isolations due à :
  - La dégradation de la qualité de surface (isolation).
  - La température excessive.
  - La décharge partielle dans les vacuoles (micro poches) à l'intérieur des isolants.
- La diminution accidentelle des distances d'isolement (présence d'animaux, branches d'arbres, outils laissés par mégarde sur un jeu de barres...)
- La destruction par cause extérieure (coup de pelle, ...)
- Les surtensions entraînant le claquage de l'isolation des matériels (surtension de manœuvre ou coup de foudre).

### III.2.5 Les effets des court-circuit :

- Échauffement des conducteurs.
- Ramollissement ou carbonisation des matières isolantes.
- Allongement et déformation des conducteurs.
- Érosion des conducteurs et isolateurs.
- Perturbation électromagnétique gênante.
- Courant et tension dangereux au sol,

**III.3 Les autres types de défauts :****III.3.1 Sur les moteurs :**

- Une fréquence de démarrage trop élevée entraînant un échauffement exagéré et des chocs mécaniques sur les accouplements.
- Les démarrages trop longs ou le blocage du rotor entraînant les mêmes conséquences.

**III.3.2 Sur les alternateurs :**

- La perte d'excitation due à un défaut dans le circuit du rotor (coupure, court-circuit, ...), elle entraîne un échauffement du rotor et du stator et, une perte de synchronisme avec le réseau.
- Les variations de fréquences dues à une surcharge ou au mauvais fonctionnement d'un régulateur de fréquence (pour un alternateur fonctionnant iloté du réseau de distribution).
- Le couplage en opposition de phases, d'un alternateur avec le réseau ou de 2 parties d'un réseau issues de sources différentes.

**III.3.3 Autres types de défauts :**

- Les surtensions dues à un coup de foudre.
- Les surtensions de manœuvre (d'un interrupteur ou d'un disjoncteur)
- Les surcharges sur les câbles, les transformateurs, les moteurs ou les alternateurs
- L'inversion du sens de l'écoulement de l'énergie en l'absence de défaut électrique. En cas de coupure de l'alimentation du distributeur ou de baisse de tension de celui-ci, une centrale de production autonome peut être amenée à fournir de l'énergie au distributeur.
- Les variations de tension dues à un mauvais fonctionnement des régleurs en charge d'un transformateur ou, une sous-charge ou surcharge du réseau.
- La présence d'une composante inverse due à une source de tension non symétrique, à un gros consommateur monophasé, à une erreur de connexion ou à la coupure d'une phase. Elle provoque un échauffement des moteurs et des alternateurs, et une perte de synchronisme des alternateurs.

**III.4 L'intérêt de calcul des courants de court-circuit :**

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

L'intensité du courant de court-circuit doit être calculée à chaque étage de l'installation pour les différentes configurations possibles du réseau ; ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou qui doit couper ce courant de défaut.

Pour choisir convenablement les appareils de coupure (disjoncteurs ou fusibles) et régler les fonctions de protection, trois valeurs du courant de court-circuit doivent être connues :

#### **III.4.1 La valeur efficace du courant de Court-circuit maximal (court-circuit triphasé symétrique) :**

Elle détermine :

- Le pouvoir de coupure des disjoncteurs et fusibles.
- La contrainte thermique que doivent supporter les matériels.
- Il correspond à un court-circuit à proximité immédiate des bornes aval de l'appareil de coupure Il doit être calculé avec une bonne marge de sécurité (valeur maximale).

#### **III.4.2 La valeur crête du courant de court-circuit maximal (valeur de la première crête de période transitoire) :**

Elle détermine :

- Le pouvoir de fermeture des disjoncteurs et des interrupteurs la tenue électro dynamique des canalisations et de l'appareillage

#### **III.4.3 Le courant de court-circuit minimal :**

Il est Indispensable au choix de la courbe de déclenchement des disjoncteurs et des fusibles ou au réglage des seuils des protections à maximum de courant, en particulier quand :

- La longueur des câbles est importante ou lorsque la source a une impédance interne relativement élevée (générateurs ou onduleurs).
- La protection des personnes repose sur le fonctionnement des dispositifs de protection à maximum de courant phase, c'est essentiellement le cas en basse tension pour les schémas de liaison à la terre du neutre TN ou IT

#### **III.5 Simplification des schémas :**

Lors des court-circuit l'intensité du courant peut atteindre des valeurs très élevées. La valeur du courant de court-circuit, pouvant exister en un endroit du réseau est souvent fixée en tout premier lieu par la puissance des centrales qui alimentent celui-ci. Dans le cas pratique où les court-circuit se produisent dans un réseau comportant de nombreuses lignes et plusieurs transformateurs élévateurs ou abaisseurs de tension, on peut conclure :

- Que l'intensité des courants de court-circuit diffère d'un point à l'autre d'un réseau : relativement intenses à proximité des centrales, ils sont moins à distance plus grande, vu qu'ils sont alors limités par les impédances des lignes et des transformateurs entre les sources et le défaut.

- Qu'en un point donné du réseau, le courant de court-circuit peut augmenter très sensiblement si l'on accroît la puissance de la centrale, ou si l'on procède à l'interconnexion de centrales précédemment isolées.

Dans les réseaux industriels à 60 Hz, la réactance des différents éléments constitutifs est généralement prépondérante par rapport à la résistance ; aussi peut-on négliger cette dernière pour le calcul des courants de court-circuit. On assimile alors les impédances à des réactances pures.

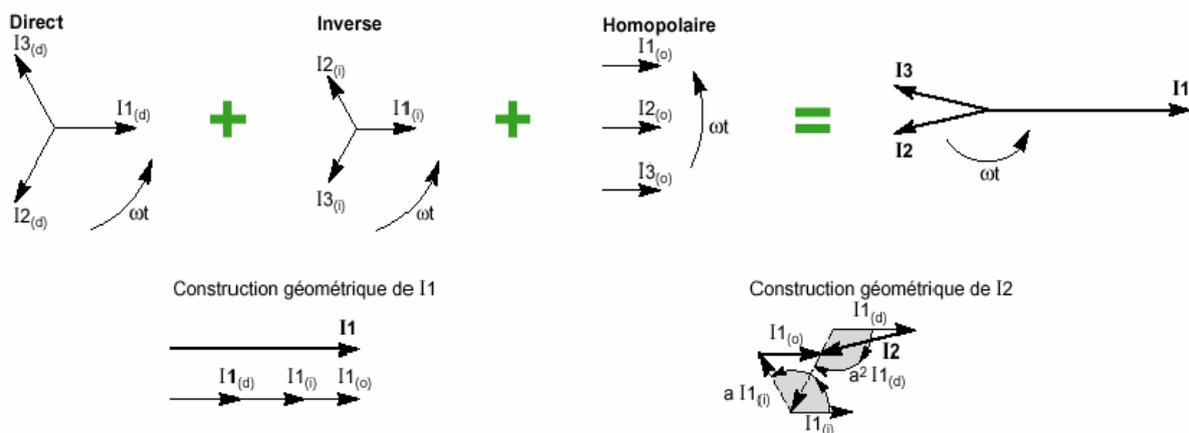
- Dans les transformateurs on néglige les résistances et courants magnétisant,
- Dans les machines synchrones, on néglige les résistances,
- Au niveau des lignes de transmission, on néglige les condensateurs, conductances et résistances.

Ces approximations entraînent une erreur  $\leq 5\%$ .

### III.6 Calcul des court-circuit par la méthode des composantes symétriques : [18] [19] [20] [21]

Elle consiste à décomposer un système de trois tensions d'amplitudes et de phases quelconques en la somme de trois systèmes de tensions triphasées équilibrées dits direct, inverse et homopolaire. On peut démontrer mathématiquement que cette décomposition existe quelles que soient les valeurs des courants et des tensions.

- Le système direct est le système de tensions de l'alimentation, 3 tensions égales déphasées de  $120^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre :  $V_{1d}$ ,  $V_{2d}$  et  $V_{3d}$ .
- Le système inverse est le système de 3 tensions égales déphasées de  $120^\circ$  dans le sens inverse des aiguilles d'une montre :  $V_{1i}$ ,  $V_{2i}$  et  $V_{3i}$ .
- Le système homopolaire est le système de 3 tensions phase terre égales non déphasées :  $V_{10}$ ,  $V_{20}$  et  $V_{30}$ .



Fig(III-01) : Décomposition d'un système de 3 tensions d'amplitudes et de phases quelconque

en la somme de 3 systèmes de tensions triphasées équilibrées

**Méthode de calcul des régimes déséquilibrés :**

**III.6.1 Principe de superposition :**

Examinons le comportement d'un réseau triphasé linéaire et symétrique, c'est-à-dire composé d'impédances constantes et identiques pour les 3 phases (c'est le cas en pratique) ne comportant que des forces électromotrices équilibrées mais dont les courants et tensions peuvent se trouver déséquilibrés du fait de la connexion à une zone dissymétrique D.

Les forces électromotrices (f.é.m.) constituent par nature des systèmes directs, les f.é.m. des systèmes inverses et homopolaires étant nulles. Le fonctionnement du réseau est interprété en considérant la superposition de trois régimes correspondant chacun à l'un des systèmes direct, inverse et homopolaire.

En effet dans ce réseau linéaire et symétrique, les courants de chaque système sont liés uniquement aux tensions du même système, et réciproquement, par l'intermédiaire des impédances du système considéré. Notons que ces impédances  $Z_d$ ,  $Z_i$ ,  $Z_o$  sont fonction des impédances réelles, notamment des inductances mutuelles.

- Pour un réseau comportant une seule f.é.m, les composantes symétriques de tension et de courant étant respectivement, à l'endroit D de la dissymétrie :

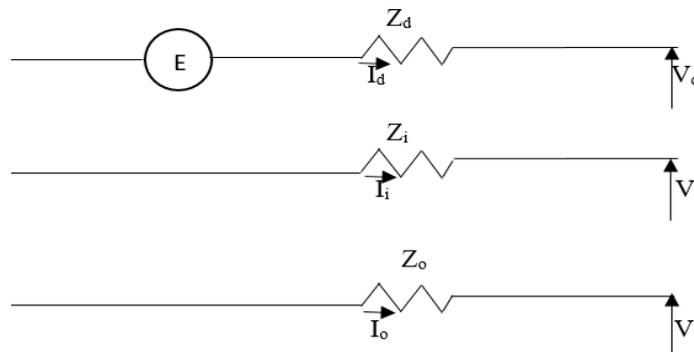
$V_d$ ,  $V_i$ ,  $V_o$ ,  $I_d$ ,  $I_i$ ,  $I_o$ , les relations définissant les trois régimes sont :

$$E = V_d + Z_d \times I_d$$

$$0 = V_i + Z_i \times I_i$$

$$0 = V_o + Z_o \times I_o$$

Schématisées par la Figure :



Fig(III-02) : Schémas monophasés équivalents direct, inverse et homopolaire du réseau

La source d'alimentation étant un système triphasé direct, elle apparaît comme de tension du schéma monophasé direct. Les schémas monophasés inverses et homopolaires sont a priori dépourvus de source de tension.

Les valeurs des impédances  $Z_d$ ,  $Z_i$  et  $Z_0$  sont données par les constructeurs (câbles, lignes, transformateurs, alternateurs...) et le distributeur ou peuvent être déterminées à partir des règles. Malgré le caractère un peu abstrait de la méthode de calcul, ces impédances sont mesurables facilement et ont un caractère physique concret.

Pour mesurer l'impédance direct d'un élément du réseau (câble, transformateur, machines tournantes...), on lui applique un système direct de tensions triphasées aux bornes des 3 phases et on mesure le courant.

Pour mesurer l'impédance homopolaire d'un élément du réseau (câble, transformateur, machines tournantes...), on lui applique une tension phase-terre aux bornes des 3 phases et on mesure la valeur du courant.

Pour les réseaux comportant plusieurs sources, ces équations restent valables à condition de considérer  $E$  et  $Z_d$ ,  $Z_i$ ,  $Z_0$ , respectivement comme la f.é.m. et comme les impédances internes du générateur équivalent de Thévenin.

- Valeurs des impédances des éléments du réseau

#### **III.6.1.1 Remarques générales concernant les impédances directes :**

$Z_d$  est l'impédance directe d'un élément, elle correspond à l'impédance mesurée lorsqu'on lui applique un système de tensions triphasées aux bornes de trois phases. Elle est identique à l'impédance  $Z_{cc}$  utilisée pour le calcul des courants de court-circuit triphasé symétrique. En effet, lors d'un court-circuit triphasé symétrique, le système direct de tensions de l'alimentation est appliqué aux éléments du réseau parcourus par le courant de court-circuit.

On a donc la relation  $Z_d = Z_{cc}$  pour tous les éléments du réseau.

#### **III.6.1.2 Remarques générales concernant les impédances inverses**

Le caractère symétrique des câbles, des lignes et des transformateurs entraîne que l'impédance directe est égale à l'impédance inverse pour ces éléments. On a donc la relation  $Z_i = Z_d = Z_{cc}$  pour tous les éléments du réseau autres que les machines tournantes.

#### **III.6.1.3 Remarques générales concernant les impédances homopolaires**

Elle est directement liée au régime du neutre du distributeur :

- si le neutre est mis à la terre par une bobine de Petersen, l'impédance homopolaire est considérée comme infinie, car le courant de défaut à la terre est nul.
- Si le neutre est mis directement à la terre, l'impédance homopolaire est à peu près égale à l'impédance directe ;
- Si le neutre est mis à la terre par résistance, l'impédance homopolaire est à peu près égale à 3 fois cette résistance, car les impédances du transformateur et des liaisons sont négligeables

devant la résistance de limitation.  $Z_o = 3Z_n$  avec  $Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_l}$

$I_l$  : courant de limitation

### III.6.1.4 Impédance des alternateurs :

Pour les alternateurs, au lieu de donner les valeurs des impédances caractéristiques ( $X_d$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $X_i$ ,  $X_o$ ) en ohms, les constructeurs donnent celles-ci en %.

On a, par définition, la relation suivante :

$$X(\Omega) = \frac{V_n}{I_n} * \frac{X(\%)}{100}$$

Les constructeurs donnent la puissance nominale apparente  $S_n$  en KVA :  $S_n = 3V_n * I_n$

On aura donc :  $X(\Omega) = \frac{3V_n^2}{S_n} * \frac{X(\%)}{100}$

Ou :  $X(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_n} * \frac{X(\%)}{100}$

La résistance est négligeable devant la réactance pour les différentes impédances directes, inverses et homopolaires des alternateurs

#### III.6.1.4.1 Impédance directe :

Le courant de court-circuit triphasé évolue suivant les 3 stades suivants :

- Subtransitoire ( $X''_d$ ) : intervenant pendant 10 à 20 ms après le début de court-circuit,
- Transitoire ( $X'_d$ ) : se prolongeant jusqu'à 100 à 400 ms,
- Synchrones ( $X_d$ ) : réactance permanente ou synchrones à considérer après la période transitoire.

L'impédance à prendre en compte dépend donc de l'objectif de calcul :

- Pour la vérification des contraintes électrodynamique, le courant de court-circuit maximal est calculé d'après la réactance subtransitoire :

$$I_{cc3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * X''_d}$$

Pour la vérification des contraintes thermiques, le courant de court-circuit maximal est calculé d'après la réactance transitoire :

$$I_{cc3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * X'_d}$$

Pour le réglage des seuils des protections à maximum de courant phase, notamment lorsque l'alternateur peut fonctionner îloté du réseau de distribution publique, le courant de court-circuit minimal est calculé d'après la réactance transitoire et la réactance inverse :

$$I_{cc3} = \frac{U_n}{X_i + X'_d}$$

Il n'est généralement pas tenu compte du régime permanent en supposant que les

dispositifs de protection coupent le courant pendant le régime transitoire. Dans le cas contraire, on utilise une protection à maximum de courant phase à retenue de tension.

Pour la détermination du pouvoir de coupure des disjoncteurs basse tension, le courant de court-circuit maximal est calculé d'après la réactance subtransitoire :

$$I_{cc3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * X'_d}$$

Pour la détermination du pouvoir de coupure des disjoncteurs haute tension, il faut déterminer la valeur de la composante périodique et la valeur de la composante apériodique à l'instant d'ouverture minimal des contacts, auquel on ajoute une demi-période de la fréquence assignée.

#### III.6.1.4.2 Impédance inverse :

Le champ produit par un système triphasé inverse de courants tourne dans le sens opposé au sens de rotation de la machine, il n'y a donc de réaction d'induit. L'impédance inverse est alors la réactance propre du circuit inducteur :

$$X_i = X''_d$$

#### III.6.1.4.3 Impédance homopolaire :

Lorsque l'on applique un système de 3 tensions homopolaires sur le stator, le flux induit sur le rotor est nul (car il n'y a pas de champ tournant), il n'y a donc pas de réaction d'induit. Ainsi, cette impédance ne dépend que de l'enroulement statorique, sa valeur est donc faible.

Notons que pour calculer le courant de court-circuit phase-terre, le mode de mise à la terre du neutre de la machine est très important pour déterminer l'impédance homopolaire de l'ensemble alternateur et impédance de mise à la terre du neutre :

- lorsque le neutre est mis directement à la terre :  $Z_{ens} = jX_0$

- lorsque le neutre est mis à la terre par une impédance  $Z_N$ ,  $Z_{ens} = 3 Z_N + j X_0 = 3 Z_N$ . car en général  $X_0 \ll Z_N$ .

#### III.6.2 Méthode de résolution pratique :

La méthode résumée ci-dessous sera développée en détail sur l'exemple du paragraphe suivant (défaut monophasé terre).

- Le réseau est divisé en deux zones :
  - Une zone dissymétrique D (réseau déséquilibré),
  - Une zone symétrique S (réseau équilibré).
- On écrit les équations liant courants et tensions :
  - Dans la zone D (composantes réelles),

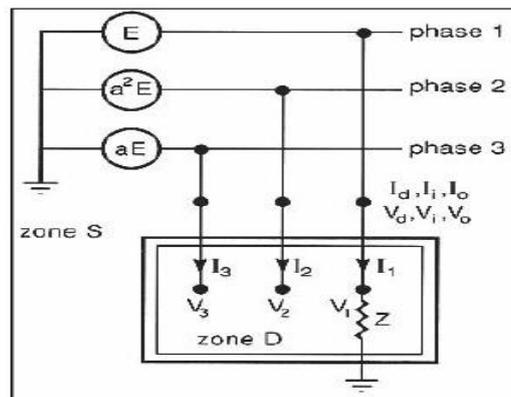
- Dans la zone S (composantes symétriques),
- Continuité à la frontière D-S,
- Fonctionnement dans la zone S.
- La résolution mathématique des équations permet de calculer les valeurs des composantes symétriques et des composantes réelles des courants et tensions des zones D et S
- Il est à noter que les schémas représentatifs des systèmes symétriques offrent la possibilité de calculer directement les valeurs des composantes symétriques.

**III.6.2.1 Défaut phase-terre (dit homopolaire) :**

Le circuit est supposé non chargé.

- Écriture des équations :

Isolement de la zone dissymétrique (Fig.III-3) :



Fig(III-03) : Circuit affecté par un défaut phase-terre dit homopolaire

- Équations des composantes réelles dans (D)

$$I_2 = I_3 = 0$$

$$V_1 = Z \times I_1$$

Ces équations décrivent le cas examiné. Ce sont les seules qui soient propres à ce cas de figure.

- Équations des composantes symétriques dans (S)

$$\begin{aligned} I_1 &= I_d + I_i + I_o \\ I_2 &= a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 &= a I_d + a^2 I_i + I_o \end{aligned}$$

Ces

équations lient

$$\begin{aligned} V_1 &= V_d + V_i + V_o \\ V_2 &= a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 &= a V_d + a^2 V_i + V_o \end{aligned}$$

respectivement les courants réels et les tensions réelles à leurs composantes symétriques. On les retrouvera à l'identique dans tous les calculs des régimes déséquilibrés.

- Continuité à la frontière D-S

En combinant entre elles les équations des composantes réelles dans (D) et les équations des composantes symétriques dans (S) on obtient :

$$a^2 I_d + a I_i + I_o = 0$$

$$a I_d + a^{2I_i} + I_o = 0$$

$$I_d = I_i = I_o = \frac{I_1}{3}$$

$$V_d + V_i + V_o = Z * I_1$$

$$V_d + V_i + V_o = 3Z * I_o$$

- Équations de fonctionnement de S :

$$E = V_d + Z_d * I_d$$

$$0 = V_i + Z_i * I_i$$

$$0 = V_o + Z_o * I_o$$

Ces trois équations se retrouveront systématiquement dans tous les calculs de régimes déséquilibrés ne comportant qu'une seule source de tension.

- Valeurs des composantes symétriques des courants et des tensions

$$E + 0 + 0 = V_d + V_i + V_o + Z_d \times I_d + Z_i \times I_i + Z_o \times I_o \quad \text{Donc : } E = 3Z \times I_o + (Z_d + Z_i + Z_o) I_o$$

$$\text{Soit : } I_o = I_d = I_i = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_i = -Z_i \times I_i = -Z_i \times \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_o = -Z_o \times I_o = -Z_o \times \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_d = E - Z_d * I_d = (E - Z_d) \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

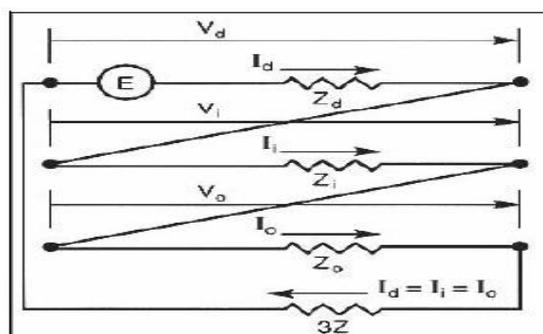
$$V_d = E * \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

- Valeurs des tensions et des courants réels :

$$I_1 = I_d + I_i + I_o$$

$$I_1 = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$I_2 = I_3 = 0$$



Fig(III-04) : Schéma du réseau selon les composantes symétriques

$$V_1 = Z \times I_1$$

$$V_1 = 3Z \times \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o$$

$$= a^2 E \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} - a E \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} - E \frac{Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$= E \frac{Z_i(a^2 - a) + Z_o(a^2 - 1) + 3a^2 Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_2 = a^2 E \left( 1 - \frac{Z_d + a^2 Z_i + a Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \right)$$

$$V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_o$$

$$= a E \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} - a^2 E \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} - E \frac{Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$= E \frac{Z_i(a - a^2) + Z_o(a - 1) + 3a Z}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$V_3 = a E \left( 1 - \frac{Z_d + a Z_i + a^2 Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \right)$$

❖ Nota :

Le terme :  $\left( 1 - \frac{Z_d + a Z_i + a^2 Z_o}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z} \right)$  Est appelé facteur de « défaut à la terre », Sa valeur varie entre

**1 et 1,8.**

❖ Cas particuliers

- Défaut franc

Soit  $Z = 0$ , le courant de défaut phase-terre prend la valeur :  $I_1 = 3 E / (Z_d + Z_i + Z_o)$ .

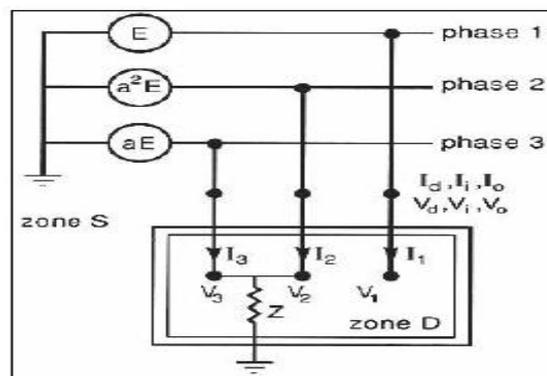
- Défaut de terre impédant

Soit :  $3Z \gg Z_d + Z_i + Z_o$ , le courant de défaut phase-terre est défini par l'impédance de défaut

$$I_1 = E/Z.$$

### III.6.2.2 Défaut biphasé-terre :

Ecriture des équations :



Fig(III-05) : circuit affecté par un défaut biphasé terre

- Équations des composantes réelles dans (D)

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = I_3 = Z^*(I_2 + I_3)$$

- Équations des composantes symétriques dans (S)

$$\begin{aligned} I_1 &= I_d + I_i + I_o \\ I_2 &= a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 &= a I_d + a^2 I_i + I_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_d + V_i + V_o \\ V_2 &= a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 &= a V_d + a^2 V_i + V_o \end{aligned}$$

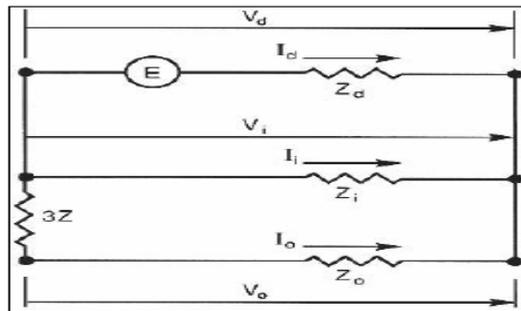
- Continuité à la frontière D-S :

$$I_d + I_i + I_o = 0$$

$$V_d = V_i$$

$$V_o = V_d + 3Z * I_o$$

- Résolution des équations :



Fig(III-06) : Schéma du réseau selon les composantes cas d'un défaut biphasé à la terre

Pour :  $I_d = \frac{E}{Z_d + \frac{Z_i(Z_o + 3Z)}{Z_i + Z_o + 3Z}}$

$$I_d = E \frac{Z_i + Z_o + 3Z}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)}$$

$$I_i = \frac{-E}{Z_d + \frac{Z_i(Z_o + 3Z)}{Z_i + Z_o + 3Z}} * \frac{Z_o + 3Z}{Z_i + Z_o + 3Z}$$

$$I_i = \frac{-E(Z_o + 3Z)}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)} \quad \text{On aura :}$$

$$V_i = V_d = \frac{E}{Z_d + \frac{Z_i(Z_o + 3Z)}{Z_i + Z_o + 3Z}} * \frac{Z_i(Z_o + 3Z)}{Z_o + Z_i + Z_d}$$

Et pour :  $I_o = \frac{-E}{Z_d + \frac{Z_i(Z_o + 3Z)}{Z_i + Z_o + 3Z}} * \frac{Z_i}{Z_i + Z_o + 3Z}$

$$V_o = \frac{E}{Z_d + \frac{Z_i(Z_o + 3Z)}{Z_i + Z_o + 3Z}} * \frac{Z_o * Z_i}{Z_o + Z_i + Z_d}$$

$$I_o = \frac{-E * Z_i}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)} \quad \text{On aura :}$$

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = -j\sqrt{3} E \frac{(Z_o + 3Z - aZ_i)}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)}$$

$$I_3 = j\sqrt{3} E \frac{(Z_o + 3Z - a^2 Z_i)}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)}$$

$$V_1 = E \frac{3Z_i(Z_o + 2Z)}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)}$$

$$V_2 = V_3 = E \frac{3Z_i(Z_o + 2Z)}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)}$$

❖ Cas particuliers :

- Défaut franc

Soit  $Z = 0$ , le courant de défaut phase-terre prend la valeur :

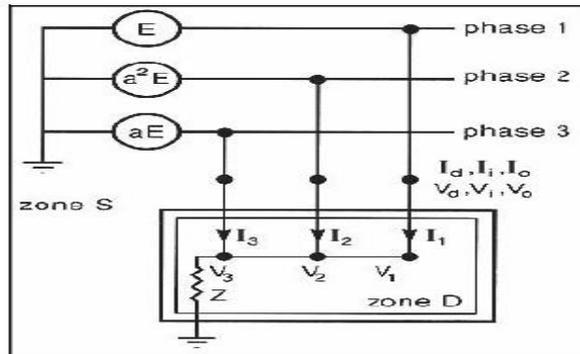
$$I_2 + I_3 = -3E \frac{Z_i}{Z_i * Z_d + (Z_i + Z_d)(Z_o + 3Z)}$$

- Défaut biphasé

Soit  $Z = \infty$ , le courant de défaut phase vaut alors :

$$I_2 = -I_3 = E \frac{(a^2 - a)}{Z_i + Z_d} = -jE \frac{\sqrt{3}}{Z_i + Z_d}$$

### III.6.2.3 Défaut triphasé-terre :



Fig(III-07) : circuit affecté par un défaut triphasé symétrique

Écriture des équations :

- Dans la zone (D) :

$$V_1 = V_2 = V_3 = Z * (I_1 + I_2 + I_3)$$

- Dans la zone(S) :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_d + I_i + I_o \\ I_2 &= a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 &= a I_d + a^2 I_i + I_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_d + V_i + V_o \\ V_2 &= a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 &= a V_d + a^2 V_i + V_o \end{aligned}$$

- Continuité à la frontière D-S :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 3I_o = V_o/Z$$

$$V_d = V_i = 0$$

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_o$$

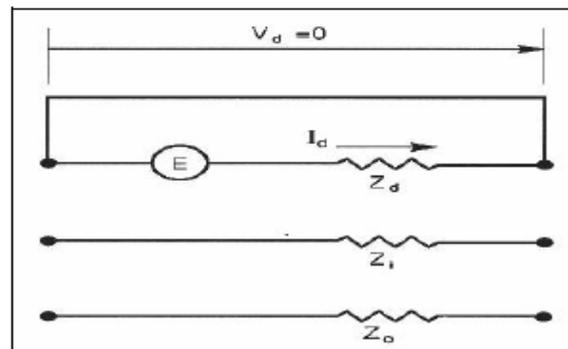
- Fonctionnement de S :

$$E = V_d + Z_d * I_d$$

$$0 = V_i + Z_i * I_i$$

$$0 = V_d + Z_d * I_d$$

- Résolution des équations



Fig(III-08) : Schéma du réseau selon les composantes cas d'un défaut triphasé symétrique

$$I_d = E/Z_d \quad \text{et} \quad I_i = I_o = 0$$

$$V_d = V_i = V_o = 0 \quad \text{et} \quad V_1 = V_2 = V_3 = 0$$

$$I_1 = \frac{E}{Z_d}$$

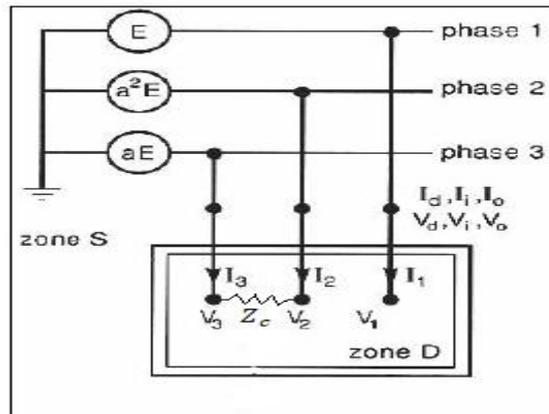
$$I_2 = a^2 \frac{E}{Z_d}$$

$$I_3 = a \frac{E}{Z_d}$$

Les résultats sont indépendants des valeurs  $Z_d$ ,  $Z_i$  et  $Z_o$ .

### III.6.2.4 Réseau à charge déséquilibré :

Ecriture des équations  $Z_c$



Fig(III-09) : circuit affecté par un défaut biphasé déséquilibré

- Fonctionnement de S :

$$E = V_d + Z_d * I_d$$

$$0 = V_i + Z_i * I_i$$

$$0 = V_d + Z_d * I_d$$

- Dans la zone (D) :

$$I_1 = 0$$

$$V_1 = V_3 - V_2 = I_3 * Z_c = -I_2 * Z_c$$

- Dans la zone(S) :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_d + I_i + I_o \\ I_2 &= a^2 I_d + a I_i + I_o \\ I_3 &= a I_d + a^2 I_i + I_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_d + V_i + V_o \\ V_2 &= a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 &= a V_d + a^2 V_i + V_o \end{aligned}$$

- Continuité à la frontière D-S :

$$I_o = 0$$

$$I_d = -I_i$$

$$V_d - V_i = Z_c * I_d$$

Résolution des équations

Cas particuliers

- Charge de puissance faible

Soit :  $Z_c \rightarrow \infty$  d'où  $I_1$  et  $I_3 \rightarrow 0$  et  $V_1, V_2, V_3$  tendent vers les valeurs du réseau symétrique, c'est-à-dire vers  $E, a^2 E, aE$ .

- Court-circuit biphasé isolé

Soit  $Z_c = 0$ , Le courant de défaut égale alors :  $I_3 = -I_2 = j \frac{E\sqrt{3}}{Z_i + Z_d}$

❖ Formules récapitulatives

- tension efficace composée du réseau triphasé = U
- tension efficace simple du réseau triphasé  $V = U/\sqrt{3}$
- courant de court-circuit en module =  $I_{cc}$ .
- courant de défaut terre en module =  $I_{terre}$
- impédances symétriques =  $Z_d, Z_i, Z_o,$
- impédance de court-circuit =  $Z_c,$
- impédance de terre =  $Z.$

Le tableau ci-dessous récapitule les courants en module dans différentes dissymétries.

Type de dissymétrie	Dissymétrie impédante	Dissymétrie franche ( $Z = 0$ et/ou $Z_c = 0$ )
Court-circuit monophasé	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o + 3Z }$	$I_{cc} = \frac{U\sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o }$
Court-circuit biphasé terre ( $Z_c = 0$ )	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3} Z_i }{ Z_d \times Z_i (Z_d + Z_i)(Z_o + 3Z) }$	$I_{terre} = \frac{U\sqrt{3} Z_i }{ Z_d \times Z_i + Z_i \times Z_o + Z_d \times Z_o }$
Court-circuit biphasé isolé ( $Z = m$ )	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_i + Z_c }$	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_i }$
Court-circuit triphasé ( $Z$ quelconque)	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d + Z_c  \sqrt{3}}$	$I_{cc} = \frac{U}{ Z_d  \sqrt{3}}$

**III.7 Calcul des court-circuit par la méthode des impédances :**

La méthode des impédances permet de calculer les courants de défaut en tout point d'une installation BT avec une bonne précision. Elle consiste à totaliser séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source, jusqu'au point considéré ; puis à calculer l'impédance correspondante. Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est enfin obtenu par l'application de la loi d'Ohm :  $I_{cc}$  selon les différents types de court-circuit.

**III.7.1 Court-circuit triphasé :**

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

$$I_{cc3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

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

Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de l'impédance  $Z_{cc}$ ,

impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par l' $I_{cc}$  du générateur jusqu'au point de défaut

- de la source et des lignes - (**fig 01**). C'est en fait l'impédance « directe » par phase :

$$Z_{cc} = \sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X)^2}$$

Avec :  $\Sigma R$  = somme des résistances en série,

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

Le défaut triphasé est généralement considéré comme celui provoquant les courants de défaut les plus élevés. En effet, le courant de défaut dans le schéma équivalent d'un système polyphasé, n'est limité que par l'impédance d'une phase sous la tension simple du réseau.

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

### III.7.2 Court-circuit biphasé isolé :

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée  $U$ .

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

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3} = 0,86 I_{cc3}$$

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

### III.7.3 Court-circuit monophasé isolé :

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

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

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

$$I_{cc1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

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.

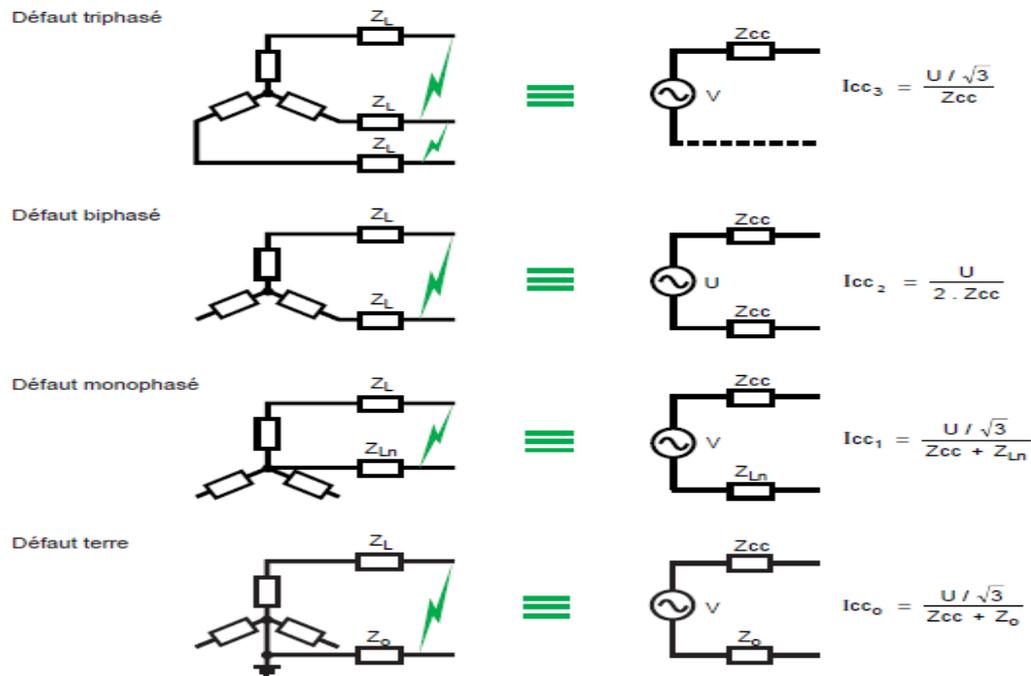
### III.7.4 Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé) :

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire  $Z_0$ . Sauf en présence de machines tournantes où l'impédance homopolaire se trouve réduite, l'intensité  $I_{cc0}$  débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé.

Son calcul peut être nécessaire, selon le régime du neutre (schéma de liaison à la terre),

pour le choix des seuils de réglage des dispositifs de protection homopolaire (HT) ou différentielle (BT).

**Tableau récapitulatif des différents courants de court-circuit (Fig 10).**



Fig(III-10) : les différents courants de court-circuit par la méthode des impédances

### III.7.5 Détermination des diverses impédances de court-circuit : [20] [21]

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

#### III.7.5.1 Impédance du réseau :

- Impédance du réseau amont

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

- L'impédance équivalente du réseau amont est :

$$Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

$U$  : est la tension composée du réseau non chargé.

La résistance et la réactance amont se déduisent à partir de  $R_a / Z_a$  en HT par :

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

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

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

Or,  $X_a = Z_{a2} - R_{a2}$ , d'où

$$X_a = \sqrt{(Z_a)^2 - (R_a)^2}$$

D'où :  $\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{Z_a}\right)^2}$

- Pour 20 kV, on a donc

$$\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - 0,2^2} = 0,98$$

Donc :  $X_a = 0,98 Z_a$

D'où l'approximation  $X_a \approx Z_a$ .

- Impédance interne du transformateur

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

$$Z_T = \frac{U_{cc}}{100} * \frac{U^2}{S_n}$$

$U$  : tension composée à vide du transformateur,

$S_n$  : puissance apparente du transformateur.

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

Pour les transformateurs HTA / BT de distribution publique des valeurs de  $U_{cc}$  sont fixées par EDF (HN52 S20) et publiées au niveau européen (HD 428.1S1) (**Fig. 11**)

A ce sujet il faut noter que la précision de ces valeurs influe immédiatement sur le calcul de l' $I_{cc}$  puisqu'une erreur de  $x$  % sur  $U_{cc}$  induit une erreur du même ordre ( $x$  %) sur  $Z_T$ .

Puissance du transformateur HTA/BT(en kVA)	≤ 630	800	1000	1250	1600	2000
Tension de court-circuit $u_{cc}$ (en %)	4	4,5	5	5,5	6	7

Fig(III-11) : Tension de court-circuit  $U_{cc}$  normalisée pour les transformateurs HTA / BT de distribution publique.

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

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

$$W = 3 R_T I_n^2$$

$$\text{Donc : } R_T = \frac{W}{I_n^2}$$

❖ Notes :

- Lorsque n transformateurs sont en parallèle et de puissances identiques, leurs valeurs d'impédance interne ainsi que de résistance ou de réactance sont à diviser par n.
- Il convient de porter une attention particulière aux transformateurs spéciaux : par exemple les transformateurs de groupes redresseurs ont des valeurs de  $U_{cc}$  qui atteignent 10 à 12 % pour limiter le courant de court-circuit.

Avec la prise en compte de l'impédance amont au transformateur et de l'impédance interne du transformateur, le courant de court-circuit s'exprime par :

$$I_{cc} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_a + Z_T}$$

En première approximation,  $Z_a$  et  $Z_T$  sont assimilées à leurs réactances respectives.

L'impédance de court-circuit  $Z_{cc}$  est alors égale à leur somme algébrique.

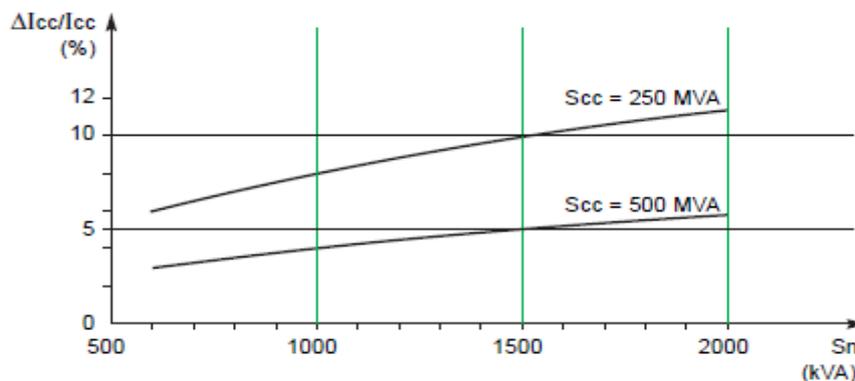
L'impédance du réseau amont peut être négligée, dans ce cas, la nouvelle valeur du courant est

$$I'_{cc} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_T}$$

L'erreur relative est :

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{I'_{cc} - I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{Z_a}{Z_T} = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{U_{cc}^2}{100 * S_n}$$

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{100}{U_{cc}} * \frac{S_n}{S_{cc}}$$



Fig(III-12) : erreur induite dans le calcul du courant de court-circuit lorsque l'impédance  $Z_a$  du réseau amont est négligée.

La **figure 12** indique le niveau d'erreur par excès dans le calcul de  $I'_{cc}$ , qu'apporte le fait de

négliger l'impédance amont. Cette figure montre bien qu'il est possible de négliger cette impédance du réseau amont pour les réseaux dont la puissance de court-circuit  $S_{cc}$  est importante par rapport à la puissance  $S_n$  du transformateur : ainsi, avec  $S_{cc} / S_n = 300$ , l'erreur est d'environ 5 %.

- Impédance des liaisons

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

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

$$R_L = \frac{\rho}{S} \quad \text{Avec :}$$

$S$  : section du conducteur ;

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

Le tableau de la **figure 13** donne ces valeurs pour chacun des cas.

Dans la réalité, en BT et pour les conducteurs de section inférieure à 150 mm<sup>2</sup>, seule la résistance est prise en compte ( $R_L < 0,15 \text{ m}\Omega / \text{m}$  avec  $S > 150 \text{ mm}^2$ ).

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

$$X_L = L * \omega = [15,7 + 144,44 \text{ Log}(\frac{d}{r})]$$

Règle	Résistivité (*)	Valeur de la résistivité ( $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ )		Conducteurs concernés
		Cuivre	Aluminium	
Courant de court-circuit maximal	$\rho_0$	0,01851	0,02941	PH-N
Courant de court-circuit minimal				
■ avec fusible	$\rho_2 = 1,5 \rho_0$	0,028	0,044	PH-N
■ avec disjoncteur	$\rho_1 = 1,25 \rho_0$	0,023	0,037	PH-N (**)
Courant de défaut dans les schémas TN et IT	$\rho_1 = 1,25 \rho_0$	0,023	0,037	PH-N PE-PEN
Chute de tension	$\rho_1 = 1,25 \rho_0$	0,023	0,037	PH-N
Courant de surintensité pour la vérification des contraintes thermiques des conducteurs de protection	$\rho_1 = 1,25 \rho_0$	0,023	0,037	PH, PE et PEN

(\*)  $\rho_0$  = résistivité des conducteurs à 20 °C : 0,01851  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre et 0,02941  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  pour l'aluminium.

(\*\*) N la section du conducteur neutre est inférieure à celle des conducteurs de phase.

Fig(III-13) : valeurs de la résistivité  $r$  des conducteurs à prendre en considération selon le courant de court-circuit calculé, maximum ou minimum (cf. UTE C 15-105).

$X_L$  : Exprimée en  $\text{m}\Omega / \text{km}$  pour un système de câbles monophasé ou triphasé en triangle, avec en mm :

$r$  = rayon des âmes conductrices.

$d$  = distance moyenne entre les conducteurs.

NB : ici, Log = logarithme décimal.

Pour les lignes aériennes, la réactance croît légèrement avec l'espacement des conducteurs selon  $\text{Log}\left(\frac{d}{r}\right)$ , donc avec la tension d'utilisation.

- Les valeurs moyennes suivantes sont à retenir :

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

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

Pour les câbles, selon leur mode de pose, le tableau de la **figure 16** récapitule différentes valeurs de réactance en BT (valeurs pratiques extraites des normes françaises, aussi utilisées dans d'autres pays européens).

Mode de pose	Jeux de barres	Câble triphasé	Câbles unipolaires espacés	Câbles unipolaires serrés en triangle	3 câbles en nappe serrée	3 câbles en nappe espacée de «d» d = 2r	d = 4r
Schéma							
Réactance linéique valeurs recommandées dans UTE C 15-105 (en mΩ/m)		0,08	0,13	0,08	0,09	0,13	0,13
Réactance linéique valeurs moyenne (en mΩ/m)	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19
Réactance linéique valeurs extrêmes (en mΩ/m)	0,12-0,18	0,06-0,1	0,1-0,2	0,08-0,09	0,09-0,1	0,14-0,15	0,18-0,20

Fig(III-14) : valeurs de la réactance des câbles selon le mode de pose.

Les valeurs moyennes à retenir sont :

- 0,08 mΩ / m pour un câble triphasé, cette moyenne un peu plus élevée en HT est comprise entre 0,1 et 0,15 mΩ / m.
- 0,09 mΩ / m pour les câbles unipolaires serrés (en nappe ou en triangle).
- 0,15 mΩ / m par défaut pour les jeux de barres et les câbles unipolaires espacés ; pour les JdB à phases « sandwichées » (genre Canalis -Télémechanique) cette réactance est notablement plus faible.

❖ Notes :

- L'impédance des liaisons courtes entre le point de distribution et le transformateur HT/BT peut être négligée en admettant une erreur par excès sur le courant de court-circuit ; erreur d'autant plus forte que la puissance du transformateur est élevée ;
- La capacité des câbles par rapport à la terre (mode commun), 10 à 20 fois plus élevée que celle des lignes, doit être prise en considération pour les défauts à la terre. A titre indicatif,

la capacité d'un câble triphasé HT de 120 mm<sup>2</sup> de section est de l'ordre de 1 µF / km ; mais le courant capacitif reste faible de l'ordre de 5 A / km sous 20 kV ;

- La résistance ou la réactance des liaisons peuvent être négligées.

Si l'une des grandeurs RL ou XL est faible devant l'autre elle peut être négligée, l'erreur sur l'impédance ZL étant alors très faible ; exemple, avec un rapport 3 entre RL et XL, l'erreur sur ZL est de 5,1 %.

### III.7.5.2 Disjoncteur :

L'impédance du disjoncteur est négligeable.

### III.7.5.3 Jeu de barre :

La résistance du jeu de barre est calculée par :

$$R_B = \rho \cdot \frac{L}{S} \text{ [m}\Omega\text{]}$$

La réactance est calculée par :

$$X_B = 0,15 * L \text{ [m}\Omega\text{]}.$$

La chute de tension dans un jeu de barre "B" est calculée par :

$$\Delta U_B \% = \sqrt{3} * I_B * ( R_B \cos(\varphi) + X_B \sin(\varphi) ) * \frac{100}{U_n} * 10^{-3}$$

Avec :

$I_B$  : courant nominal du jeu de barre en [A].

La réactance varie de 0,12 ÷ 0,18 Ω/km selon l'espacement, on prend en général 0.15 Ω/km

La résistance est négligeable sauf en BT en dessous de 200 mm<sup>2</sup>.

## III.8 Conclusion :

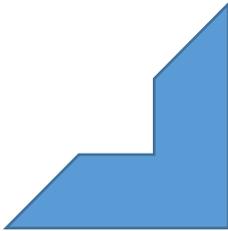
Pour le calcul du courant de court-circuit, différentes méthodes ont été développées et ont trouvé place dans les normes...

Plusieurs de ces méthodes normalisées ont été conçues de telle sorte que le courant de court-circuit puisse être calculé à la main ou à l'aide d'une calculatrice. La révision de ces normes a souvent conduit à faire évoluer ces méthodes pour les rendre plus précises et représentatives de la réalité mais a eu pour conséquence de les rendre moins pratiques, comme le montrent les évolutions récentes de la CEI 60909, réservant un calcul manuel aux cas les plus simples.

Avec le développement d'outils informatiques sans cesse plus performants, les concepteurs d'installations électriques ont conçu des logiciels pour leurs propres besoins.



**Chapitre IV : Modélisation  
des courants de court-  
circuit dans les réseaux de  
distribution**



## IV *Chapitre 04 : Modélisation des courants de court-circuit dans les réseaux de distribution*

### IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va parler sur la modélisation des courants de courts-circuits dans la distribution sur le logiciel CYME à travers l'injection des données des composants de notre exemple de réseau électrique.

### IV.2 Description du logiciel CYME : [22]

Le logiciel de classe internationale CYME pour l'analyse des réseaux électriques est une suite robuste et complète d'outils avancés de simulation de grande utilité aux ingénieurs en réseaux de transport, de distribution et industriels. Le logiciel a été conçu afin d'aider les ingénieurs à relever les défis nouveaux et complexes de la planification et de l'exploitation des réseaux électriques.

#### IV.2.1 Caractéristiques du logiciel :

Les fonctionnalités analytiques du logiciel CYME s'appliquent à n'importe quel type de simulation sur des réseaux électriques. L'élaboration de scénarios de planification et d'études de cas permet d'évaluer et de vérifier de façon précise et efficace l'impact des modifications et des reconfigurations apportées à n'importe quel réseau électrique, résultant en une gestion améliorée des actifs. Le logiciel CYME, alliant à la fois maturité et modernité, a fait ses preuves quant à sa fiabilité et à sa précision et fait l'objet d'améliorations continues d'un soutien à la clientèle sans faille.

Le logiciel CYME présente de puissantes fonctionnalités qui permettent la modélisation détaillée de tout type de réseau électrique de distribution, de transport ou industriel de toutes échelles ou de niveau de complexité. La création de réseaux équilibrés et déséquilibrés, des réseaux secondaires, postes, réseaux imbriqués, avec une configuration radiale ou maillée, triphasée, biphasée ou monophasée est entièrement prise en charge et peut être représentée de façon schématique ou géographique. Afin de rendre encore plus réaliste la représentation du réseau, les fonctionnalités de modélisation sont supportées par des bibliothèques étendues d'équipements standards de l'industrie et de contrôles pouvant être améliorées par l'utilisateur.

#### IV.2.2 Application modulaires sur le logiciel CYME :

- Modules de base pour les réseaux de transport d'énergie et industriels :
- Analyse de répartition de puissance des réseaux électriques triphasés.
- Simulation des conditions de défaut dans des réseaux électriques triphasés.

- Module de base pour les réseaux de distribution :
  - Chute de tension par phase et analyse de répartition de puissance
  - Calcul des courants de court-circuit (écoulement de courant de défaut et tension de défaut)
  - Analyse des dispositifs de protection
  - Emplacement et dimensionnement optimal des batteries de condensateurs
  - Équilibrage, allocation et estimation des charges
  - Analyses sur des réseaux équilibrés ou déséquilibrés ; monophasés, biphasés ou triphasés ; de topologie radiale, bouclée ou maillée.
- Modules supplémentaires d'analyse pour l'ingénierie des réseaux électriques de transport, de distribution et industriels sont disponibles dans la suite d'applications CYME. Ceux-ci fonctionnent de manière homogène avec les modules de base :
  - Analyse harmonique
  - Analyse de la stabilité transitoire
  - Évaluation du risque d'éclair d'arc électrique
  - Contingences en répartition de puissance (N-p)
  - Démarrage de moteurs en régime dynamique
  - Gestionnaire avancé de projets
  - Superposition cartographique

Les modules suivants ajoutent des fonctionnalités additionnelles au module de base d'analyse des réseaux de distribution :

- Évaluation de la fiabilité
- Analyse prévisionnelle automatisée de réseaux
- Analyse en régime permanent avec profils de charge
- Analyse des dispositifs de protection
- Analyse dynamique à long terme
- Optimisation Volt/VAR
- Modélisation et analyse de réseaux de distribution basse tension
- Optimisation de la configuration des réseaux électriques
- Évaluation des contingences simples avec rétablissement
- Modélisation des postes et sous-réseaux ainsi que des réseaux maillés souterrains

#### **IV.2.3 Analyse des défauts :**

L'analyse de défauts est un outil essentiel pour déterminer les courants de court-circuit résultant de différents défauts, estimer leur emplacement, identifier les équipements du réseau

ayant une valeur nominale trop faible et dimensionner ses diverses composantes. Le logiciel CYME comporte un module d'analyse complète des défauts qui aide l'ingénieur à évaluer l'effet des courts-circuits de sévérité variable sur la fiabilité globale du système.

#### **IV.2.3.1 Caractéristiques :**

Connaître l'intensité du courant de court-circuit pouvant être présent à tout point du réseau électrique est crucial pour assurer sa fiabilité. Le niveau anormal de courant produit par les défauts exerce un stress important sur les équipements électriques. S'ils sont mal dimensionnés, ils peuvent être endommagés ou provoquer des blessures chez le personnel ou des pannes de système.

Le module d'Analyse de défauts du logiciel CYME est très complet et offre plusieurs analyses et fonctionnalités pouvant aider les ingénieurs à évaluer de façon détaillée les problèmes liés aux courts-circuits. Le module comporte :

- Des calculs de court-circuit conventionnels
- Des calculs de court-circuit selon la CEI
- Des calculs de court-circuit selon l'ANSI®
- L'analyse des défauts série
- L'analyse des défauts simultanés
- L'analyse des creux de tension
- Le localisateur de défauts
- La vérification des capacités nominales des équipements

#### **IV.2.3.2 Court-circuit conventionnel :**

Le calcul de court-circuit conventionnel est un algorithme de calcul très robuste qui ne suit aucune norme particulière. Il offre :

- Le calcul par séquence et par domaine de phase
- Le calcul du courant de court-circuit dans tous les nœuds ou le calcul de l'effet d'un défaut appliqué à un point déterminé
- Tous les types de défauts (LLL, LLL-T, LL, LL-T, L-T)
- L'option de défaut mobile
- Des réglages de la tolérance de l'impédance
- Des contributions du court-circuit aux machines

#### **IV.2.3.3 Court-circuit CEI-60909©**

Le calcul de court-circuit CEI-60909© suit les lignes directrices de la norme CEI-60909© et supporte les calculs de courant de défaut de réseaux triphasés radiaux ou maillés en c.a.

- Quatre types de calcul de courant de défaut : courant de court-circuit initial, crête de courant de court-circuit asymétrique, courant de court-circuit coupé et courant de court-circuit en régime permanent
- Facteurs de tension conformes à la norme ou définis par l'utilisateur
- Facteurs de correction d'impédance pour le transformateur, la génératrice, les artères du réseau et les unités de centrale électrique (PSU)
- Rapport des ratios X/R des génératrices, moteurs et artères du réseau

#### **IV.2.3.4 Court-circuit ANSI®**

Le calcul de court-circuit ANSI® est conforme aux normes nord-américaines ANSI® C37.5, ANSI® C37.010, ANSI® C37.13 s'appliquant aux études de court-circuit de certains types de fonction spécifiques.

- Les types de fonctions étudiées sont : interruption de contact, fermeture / verrouillage, temporisation.
- Évaluation de la valeur nominale du disjoncteur basse tension
- Sélection automatisée des multiplicateurs appliqués à la réactance subtransitoire du moteur, tel que dicté par la norme

#### **IV.2.3.5 Défaut série :**

L'analyse des défauts série évalue l'effet des circuits ouverts ou des conditions d'impédance dans les lignes asymétriques dans le réseau qui provoquent habituellement une augmentation significative du courant neutre.

- Types de défauts série évalués :

- Une phase ouverte
- Deux phases ouvertes
- Impédances asymétriques

#### **IV.2.3.6 Défaut simultané :**

L'analyse des défauts simultanés étudie l'impact de la présence simultanée de défauts à

différents emplacements.

- Étudiez la combinaison des défauts shunt et série
- Évaluez l'impact des défauts survenant simultanément à deux ou plusieurs emplacements du réseau

#### **IV.2.3.7 Creux de tension :**

L'analyse de creux de tension évalue l'impact de la réduction soudaine de l'amplitude de la tension causée par les défauts du réseau ou par d'autres perturbations telles que le démarrage des moteurs ou les surcharges.

- Confirmez la validité de la durée d'élimination d'un défaut des différents dispositifs de protection par la détermination de la fréquence/durée du creux de tension.
- Déterminez le creux de tension provoqué par une perturbation

#### **IV.2.3.8 Localisation des défauts :**

L'analyse de localisation de défauts prend la valeur de court-circuit enregistrée par un instrument de mesure du courant pour déterminer des emplacements possibles des défauts dans le réseau.

#### **IV.2.3.9 Vérification des capacités nominales des équipements :**

Cette analyse évalue les équipements afin de déterminer s'ils ont été correctement dimensionnés pour exécuter leurs fonctions prévues à mesure que le stress augmente et que la demande d'énergie croît.

- Déterminez, au moyen de l'analyse de court-circuit, si les équipements du réseau pourraient supporter les courants de défaut, conformément aux exigences de l'ANSI ou de la CEI
- Identifiez par l'analyse de répartition de puissance si les appareils du réseau sont surchargés ou si les tensions sont hors-limites durant des conditions de régime permanent
- Rapport détaillé et visualisation des résultats dans le schéma unifilaire

#### **IV.2.3.10 Affichage des résultats :**

Divers outils de production de rapports sont disponibles pour faciliter la visualisation des résultats :

- Rapports

## Chapitre 04 : Modélisation des courants de courts-circuits dans les réseaux de distribution

- Les rapports détaillés sous format tabulaire peuvent être exportés à des formats Microsoft Excel®, XML ou base de données
- Le contenu des rapports peut être personnalisé à l'aide de mots-clés
- Affichage du schéma unifilaire
- Codage par couleur permettant d'illustrer les anomalies en fonction des critères définis par l'utilisateur
- Étiquettes et infobulles personnalisables à des emplacements définis par l'utilisateur dans le schéma unifilaire

### IV.2.4 Interface du logiciel CYME :

Commençant par l'interface principale du logiciel qui contient des barres de commandes, des barres d'outils, barre de notifications en bas et l'espace de travail (fiche d'étude) bien sûr.

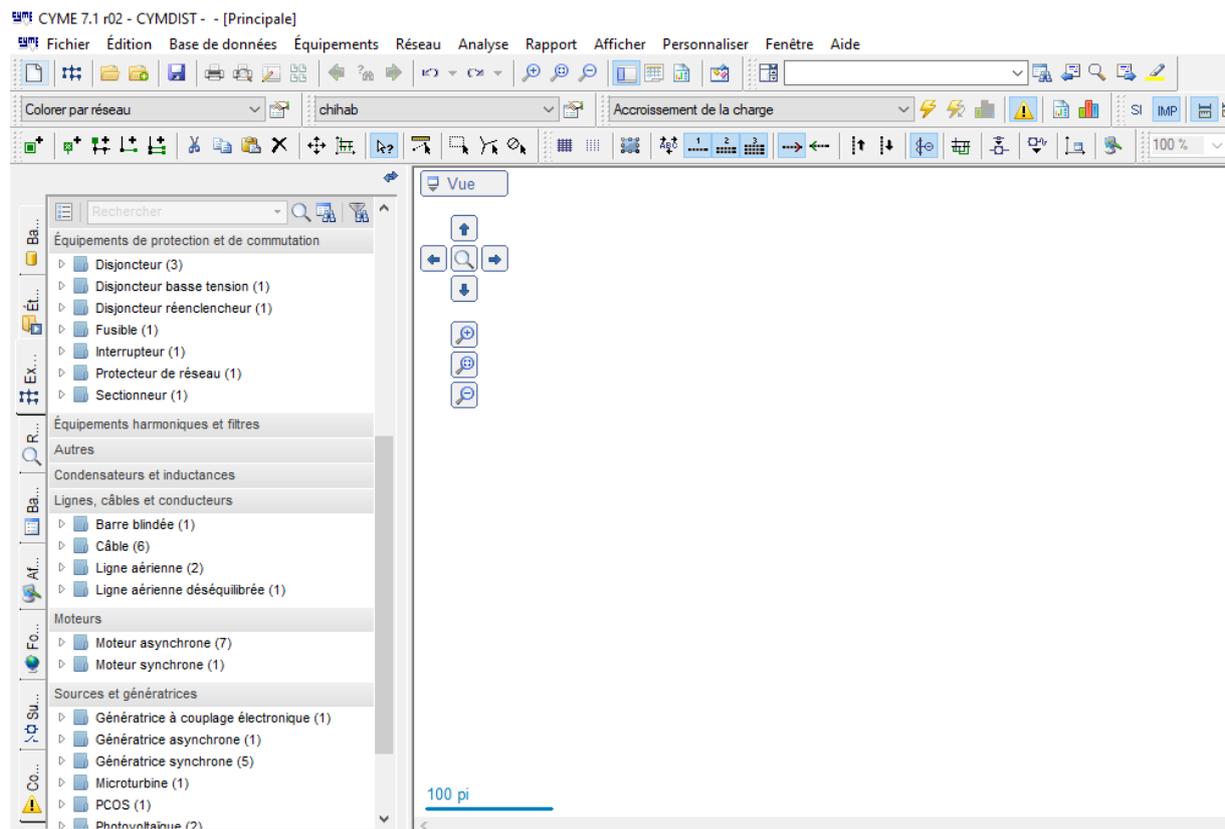


Fig (IV-1) : interface du logiciel CYME

- La barre d'outils : contient tous les équipements nécessaires pour le traçage du schéma unifilaire qu'on veut simuler.

- La barre de commande : contient plusieurs commandes sur le logiciel tel que : l'ouverture et l'enregistrement des fichiers, la création et la modification des paramètres des équipements, ... etc.
- La barre de notification : elle affiche en rouge en cas d'erreur son emplacement et son type

### IV.3 La simulation sur le logiciel CYME :

Pour faire une étude sur le logiciel CYME on a besoin de :

#### IV.3.1 Traçage du schéma unifilaire de l'étude :

Notre exemple d'étude contient deux sources d'énergie électrique la première est définie par leur tension produite et la deuxième c'est une génératrice synchrone à une production différente de la première. On a aussi deux transformateurs de tension dont la configuration est D/Y parce qu'on a deux niveaux de tensions différents et cela est exigé par les consommateurs (trois types de moteurs asynchrones : chaque type avec ses caractéristiques propres) et en fin on a une vue imbriquée (3 moteurs asynchrones : 2 marchent et 1 arrêté. Il y a aussi deux départs). La liaison entre tous ces équipements est faite pas des câbles et des jeux de barres.

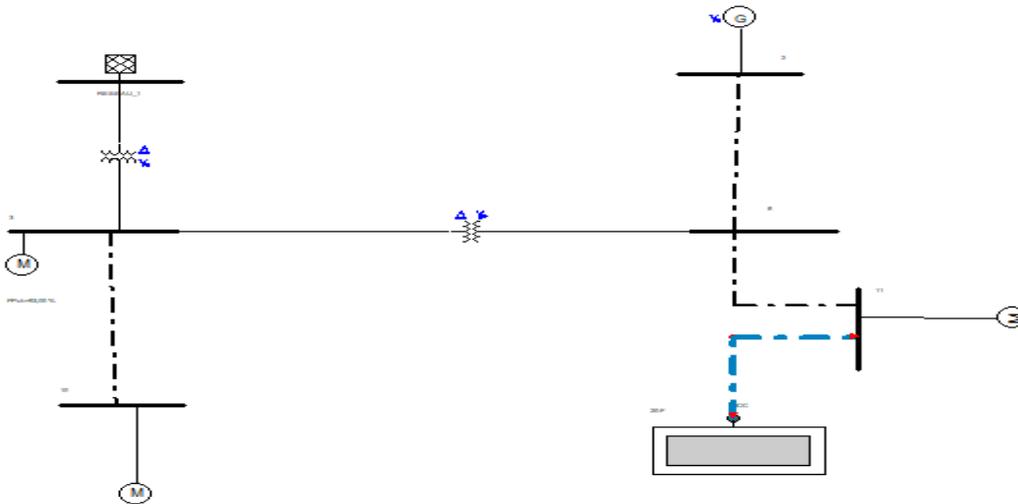


Fig (IV-2) : Schéma unifilaire d'un exemple d'étude

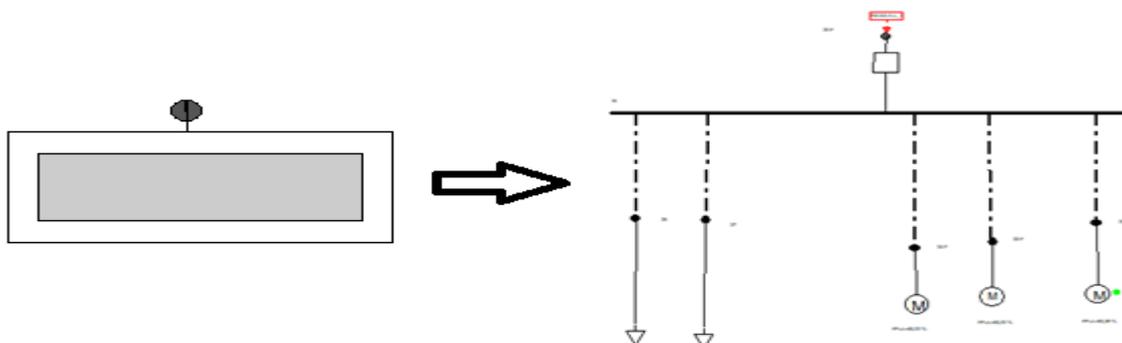


Fig (IV-3) : la vue imbriquée sur le schéma unifilaire

La vue imbriquée aide à simplifier les schémas unifilaires cette vue elle peut présenter par exemple l'acheminement de l'énergie électrique d'une ville à plusieurs départs

**IV.3.2 Injection de toutes les données de chaque équipement de l'étude :**

On prend l'exemple d'une génératrice Synchrones, donc on voit qu'on a besoins de plusieurs données tel que :  $P_n$ ,  $U_n$ ,  $P_a$ ,  $\cos(\varphi)$ ,  $N_p$  et les impédances de la génératrice

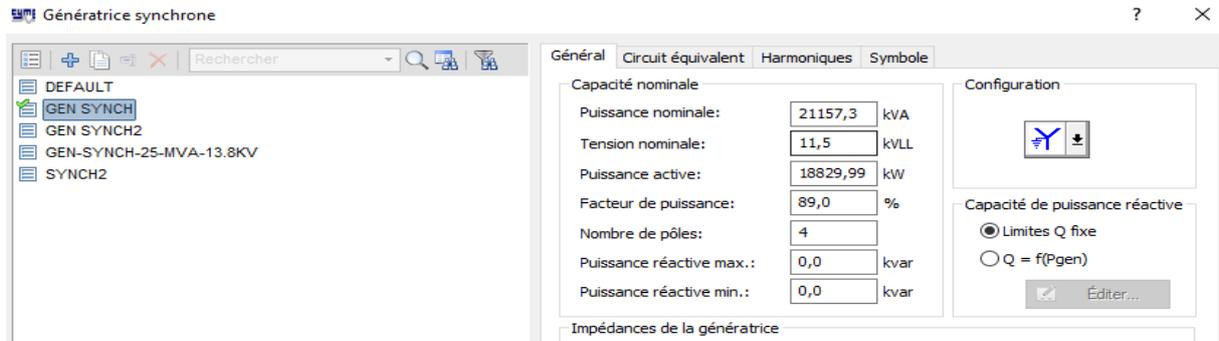


Fig (IV-4) : exemple sur les données nécessaires pour les paramètres d'une génératrice Synchrones

**IV.3.3 Analyse de défauts (courts-circuits) :**

Quand on termine le traçage du schéma unifilaire et l'injection de toutes les données du système on passe à cette étape qui est l'analyse de notre étude. Cette dernière se fait par la commande « analyse » sur la barre de commande, après on chois quelle type d'analyse et le point ou la zone d'analyse (dans notre exemple on a étudié les courts-circuits dans tous les point du réseau). En fin, on aura l'exécution de l'analyse dans tous les nœuds et les barres. Après l'exécution on doit modifier l'étiquette de chaque élément pour afficher les valeurs des courants en tout point du réseau et aussi pour les différents types de court-circuit.

Voici les résultats obtenus par simulation :

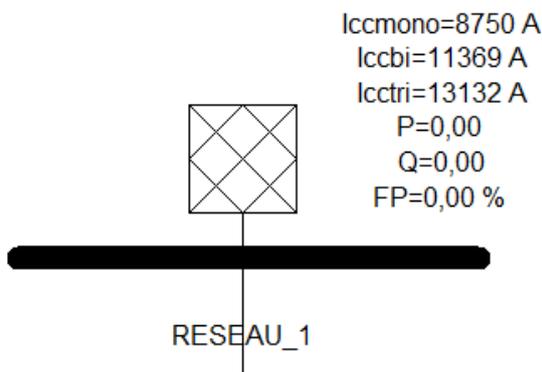


Fig (IV-5) : les valeurs des courants de CC de niveau de la source

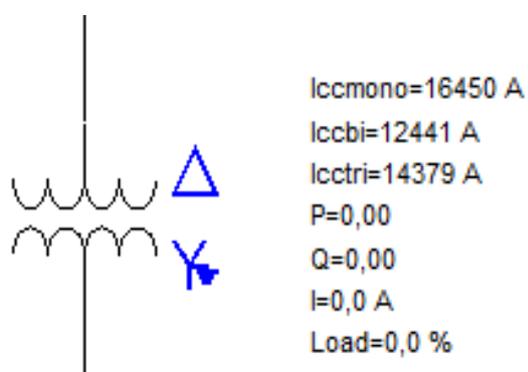


Fig (IV-6) : Les valeurs des courants CC au niveau du transformateur

lccmono=16450 A  
lccbi=12441 A  
lcctri=14379 A  
3  
dU%=0,00 %  
U=11,5 kVLL



Fig (IV-7) : les valeurs des courants de CC  
Niveau du jeu de barre

lccmono=17657 A  
lccbi=19470 A  
lcctri=22732 A  
I=0,0 A  
P= 0,00  
Q= 0,00  
ch=0,0 %

Fig (IV-8) : Les valeurs des courants de  
CC au niveau du câble

Donc ces résultats obtenus vont nous aider à connaître les paramètres des appareils de protection de notre réseau de distribution.

#### **IV.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus par les essais de la simulation par le logiciel CYME pour un exemple de réseau de distribution MT : maximum de courant de Court-circuit et d'autres paramètres comme mesures de protections

## Conclusion Générale

On a vu à travers le premier chapitre les principales parties des réseaux électriques, les différents types de centrales de production et le système de fonctionnement de chaque centrale. La suite c'est le transport et la nécessité du courant alternatif et aussi la très haute tension dans cette partie du réseau. La distribution et la consommation est l'étape finale du réseau pour satisfaire les besoins des clients.

Les avantages et les inconvénients de chaque type de centrales de production nous aide à choisir une source de production performante en augmentant les avantages et diminuer les inconvénients.

Pour assurer la continuité du service et satisfaire les besoins des clients, il est nécessaire de protéger les réseaux électriques que ce soit du côté client ou du côté réseau. Et pour cela il nous a paru nécessaire de donner assez d'informations sur les différents éléments qui composent un système de protection moyenne tension. Ces éléments sont très importants, très sensibles et doivent être bien choisis et bien réglés afin d'assurer une protection efficace contre les différents types d'anomalies qui peuvent survenir sur le réseau électrique.

Pour avoir la précision des paramètres des appareils de protection, on a essayé de donner quelques méthodes de calcul des courants de courts-circuits tel que la méthode des composants symétrique et la méthode des impédances sont les plus utilisés.

Le dernier chapitre pour but de maîtriser les techniques d'utilisation du logiciel CYME pour les calculs des courants de courts-circuits, car pour les réseaux complexe on peut pas calculer manuellement donc la nécessité de l'outil informatique pour simplifier les schémas et les calculs et gagne du temps et de l'effort.

## Références Bibliographiques :

### ▪ Chapitre 01 :

- [1] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_%C3%A9lectrique)
- [2] : <https://www.cours-gratuit.com/cours-energie-electrique/cours-sur-la-production-de-l-energie-electrique>
- [3] : [https://www.hydro.mb.ca/fr/corporate/teachers/producing\\_electricity/](https://www.hydro.mb.ca/fr/corporate/teachers/producing_electricity/)
- [4] : <http://www.hydroquebec.com/comprendre/autres-sources/fossile.html>
- [5] : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>
- [6] : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-geothermie>
- [7] : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- [8] : <https://www.connaissancedesenergies.org/est-il-preferable-de-transporter-l-electricite-en-courant-alternatif-ou-continu-130830>
- [9] : <http://www.hydroquebec.com/comprendre/transport/types-pylones.html>
- [10] : [https://www.memoireonline.com/05/08/1081/m\\_optimisation-production-structure-energie-electrique-colonies-fourmis3.html](https://www.memoireonline.com/05/08/1081/m_optimisation-production-structure-energie-electrique-colonies-fourmis3.html)
- [11] : Schneider Electric, « **Architecteur de Réseau de Distribution** », 2007.
- [12] : Ph. CARRIVE, « **Réseaux de Distribution - Structure et Planification** », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique D 4210, 2006.

### ▪ Chapitre 02 :

- [13] : M. LAMI, « **Protection et Surveillance des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique** », Volume 2, Electricité de France (EDF), février 2003.
- [14] : C. PRÉVÉ, « **Protection des Réseaux Electriques** », Edition HERMES, Paris 1998.
- [12] : C. RUSSELL MASON, « **The Art and Science of Protective Relaying** », 1956 - New York.
- [15] : C. CLAUDE & D. PIERRE, « **Protection des Réseaux de Transport et de Répartition** »
  - *Direction de la Production et du Transport d'Electricité (EDF), octobre 2005.*
- [16] : S. THEOLEYRE, « **Les Techniques de Coupure en MT** », Cahier technique N°193, Schneider Electric.
- [17] : H. BENCHIKH EL HOCINE, « **Protection Etage MT** », Institut de Formation en Electricité et Gaz (IFEG), Centre Ain M'lila, Groupe SONELGAZ, Décembre 2009.

### ▪ Chapitre 03 :

- [18] : Patrick Lagonotte, Les installations électriques, Hermes Science Publications, Paris, 2000
- [19] : M. Aguet et J-J Morf, Énergie Électrique, Traité d'électricité de l'EPFL, volume XII, Lausanne, 1990
- [20] : **Cahiers Techniques Schneider Electric :**

## Références Bibliographiques

---

- Analyse des réseaux triphasés en
- Régime perturbé à l'aide des composantes symétriques, Cahier Technique n° 18 - B. DE METZ-NOBLAT.
- Mise à la terre du neutre dans des réseaux industriels haute tension, Cahier Technique n° 62 - F. SAUTRIAU.
- Techniques de coupure des disjoncteurs Basse Tension, Cahier Technique n° 154 - R. MOREL.
- Les calculs sur les réseaux électriques BT et HT. Cahier Technique n° 213 - B. DE METZ-NOBLAT.
- **Publications diverses :**
- Guide de l'installation électrique (en français, selon NF C 15-100 : édition 2004 ; en anglais selon CEI 60364 : édition 2005), Réalisation Schneider Electric, (Institut Schneider Formation).
- Les réseaux d'énergie électrique (2<sup>e</sup> partie),
- **[21] : Normes :**
- CEI 60909 : Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif.
- Partie 0 : Calcul des courants.
- Partie 1 : Facteurs pour le calcul des courants de court-circuit.
- Partie 2 : Matériel électrique - Données pour le calcul des courants de court-circuit.
- Partie 3 : Courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre.
- Partie 4 : Exemples pour le calcul des courants de court-circuit.
- NF C 15-100 : Installations électriques à basse tension.
- UTE C 15-105 : Guide pratique. Détermination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection.

### ▪ Chapitre 04 :

- [22] : <http://www.cyme.com/software/support/>