

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**

**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**



**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**  
**OPTION : RESEAUX ÉLECTRIQUES**



**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master**

**Intitulé :**

**Protection contre les surtensions de foudre des  
transformateurs Moyenne et Basse tension**

**Présenté par :**

**-Saadaoui Walid**

**-Bouchareb Monsif**

**Encadré par :**

**- CHOUCHOU Abdelmadjid**

**Année universitaire : 2023/2024**

## **REMERCIEMENTS :**

*Remerciement Le présent travail n'est pas seulement le fruit de mes propres efforts, mais aussi les efforts de bien de personnes à qui j'exprime mes vifs remerciements.*

*Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon rapporteur Monsieur, Chouchou-Abdelmadjid qui a été à l'origine de ce travail, pour sa disponibilité, pour sa confiance qu'il m'a témoignée, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien la réalisation de ces travaux*

*Je remercie les membres de jury, chacun par son nom, qui m'a honoré en acceptant d'examiner ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*A tous mes enseignant(e)s du département électrotechnique*

*Dédicaces :*

*-A nos chers parents pour leur soutien a notre égard  
en toute circonstance au cours de toutes mes années  
notre existence, c'est*

*-A tous les membres de notre famille sans aucune  
exception*

*-Tous nos amis St surtout les étudiants des notre  
promotion*

*-tous nos enseignants en particulier notre rapporteur  
A. Chouchou*

*A toutes les personnes que J'ai connues et que je n'ai  
pas citées*

# SOMMAIRE

## Chapitre I : Généralités sur la surtension

I-Introduction .....	11
I-1) Définition des surtensions .....	11
I-2 Classification des surtensions .....	11
I-3 Origine des surtensions .....	12
I-3-1-1) Surtensions de manœuvre .....	12
I-3-1-1-1) Surtension due à la coupure de courants capacitifs ou .....	13
I-3-1-1-1-a) Surtension due à la coupure d'un courant inductif .....	13
I-3-1-1-1-b) Surtension due à la coupure d'un courant capacitif .....	14
I-3-1-2) Surtensions par ferro-résonance .....	14
I-3-1-3 Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti) .....	15
I-3-1-4 Surtensions de résonance .....	16
I-3-1-5 Surtension provoquée par un défaut d'isolement .....	16
I-3-2 Origine Externe .....	17
I-3-2-1 Surtensions externes Atmosphériques – La foudre .....	17
I-3-2-2) Paramètres électriques de la foudre .....	17
I-3-2-2-a) Forme du courant d'arc .....	17
I-3-2-2-b) Forme réelle du courant de foudre .....	18
I-3-2-2-c) Amplitude des coups de foudre .....	18
I-3-2-3) Mécanisme de formation de l'orage .....	19
I-3-2-4) Schéma électrique équivalent .....	20
I-3-2-5) Surtensions dues à la foudre .....	21
I-3-2-5-A) Coups de foudre directs (sur conducteurs de phase) .....	21
I-3-2-5-B) Coups de foudre (sur conducteurs de garde ou sur un pylône) .....	21
I-3-2-5) Effets de la foudre .....	22
I-3-2-5-a) Les effets mécaniques .....	22
I-3-2-5-b) les effets électriques .....	22
I-3-2-5-c) Effets thermiques .....	22
I-3-2-5-d) Effets électrodynamique .....	22
I-3-2-6-e) L'effet électromagnétique .....	23
I-4 Le mécanisme de foudre .....	23
I-5 Classification des coups de foudre .....	24
I-6-1 Caractéristiques des coups de foudre .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

# SOMMAIRE

I-7 Conclusion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Chapitre II : Etat de l'art des transformateurs de puissance	
II-1 Introduction .....	29
II-2 Définition de transformateur .....	29
II-3 Schéma équivalent du transformateur .....	29
II-4 Principe de fonctionnement.....	30
II-4-1 Principes de l'électromagnétisme et Tension créée par induction magnétique .....	31
II-5 Le rôle des transformateurs de puissances .....	32
II-5-1 Types de transformateurs classiques .....	32
II-5-1-1 transformateur monophasé.....	32
II-5-1-2 transformateur triphasé.....	32
II-5-1-3 L'autotransformateur.....	33
II-5-4 Transformateur de distribution et de puissance .....	34
II-6 Constitution générale .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II-6-1 La partie constitutive .....	36
a) Le conservateur d'huile.....	36
b) Le couvercle .....	36
c) La cuve.....	37
d) Les traversées .....	38
e) -Le liquide diélectrique .....	38
II-6-2 La partie active .....	39
A)Le circuit magnétique.....	39
A-1) La technologie en colonnes .....	39
A-1-1) Colonne en galette .....	40
A-1-2) Colonne en couches .....	40
A-2) La technologie en cuirassé .....	41
B) Le circuit électrique.....	41
B-1) Enroulements alternés (à galettes) .....	42
B-2) Enroulements concentrique double.....	42
B-3) Enroulements concentriques simple.....	42
B-4) Enroulements mixtes.....	42
II-7 Couplage des Transformateurs triphasés .....	42
a)Repérage côté HT .....	43
b)Repérage côté BT .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II-7-1 Couplage étoile-étoile.....	43

# SOMMAIRE

I-7-2 Couplage triangle-étoile.....	44
II-7-3 Couplage triangle-triangle .....	45
II-7-4 Couplage étoile-triangle.....	45
II-7-5 Couplage étoile zig-zag .....	46
II-8 Choix du mode de couplage .....	46
II-9 Rapport de transformation .....	46
II-10 Le système de réglage de tension .....	47
II-10-1 Régleur à vide .....	48
II-10-2 Régleur en charge.....	48
II-11 Conclusion.....	49

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

III-1 Introduction.....	51
III-2 Protections internes .....	51
III-2-1 Relais Buchholz .....	51
III-2-1-1 Fonctionnement .....	52
a) Fonction alarme .....	52
b) Fonction déclenchement .....	52
III-2-2 Soupape de surpression .....	53
III-2-3 DGPT.....	54
III-2-4 Indicateur de Niveau d'Huile.....	54
III-2-5 Relais Image Thermique (Indicateur) .....	55
III-3 Protections externes.....	55
III-3-1 La protection primaire .....	55
III-3-1-2 Paratonnerres .....	55
III-3-1-2-1 Le paratonnerre à tige simple (tige de Franklin) .....	56
III 3-1-2-2 Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA).....	57
III 3-1-2-3 Le paratonnerre à cage maillée : (cage de Faraday).....	57
III 3-1-2-4 Le paratonnerre à fils tendus (câbles de garde) .....	58
III 3-1-2-5 Paratonnerre radioactif .....	58
III 3-1-2-6 Paratonnerre à haute tension impulsionnelle (pulsar) .....	59
III 3-1-2-7 Remarque.....	59
III 3-2 Protection secondaire.....	59
III 3-2-1 Les éclateurs .....	59

# SOMMAIRE

III 3-2-1-1 Eclateur à tige .....	60
III 3-2-1-2 Avantage et inconvénients.....	60
III 3-2-2 Les parafoudres .....	60
III 3-2-2-1 Parafoudre au carbure de silicium SiC à éclateurs.....	61
III 3-2-2-1-1 Principe de fonctionnement.....	61
III 3-2-2-2 parafoudres à oxyde de zinc (ZnO).....	62
III 3-2-2-2-1 Principe de fonctionnement.....	63
a) Avantages .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
b) Inconvénients .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
III-4 Conclusion .....	64
Chapitre IV : Etude du système de protection du transformateur contre la foudre	
IV-1 Introduction.....	65
IV-2 Etude du système de protection .....	65
IV-2-1 Model électromagnétique .....	66
IV-2-2 Méthode de la sphère fictive.....	67
IV-2-3 Distance de protection du parafoudre .....	68
IV-3 Protection contre les coups de foudres directes .....	73
IV-3-1 Amélioration de la méthode de protection proposée .....	74
IV-4 Conclusion .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
V-Partie simulation.....	76
V-1 Introduction.....	76
V-2 Principe de fonctionnement de la Protection différentielle .....	76
V-3 Les composants de système .....	77
V-4 Protection différentielle .....	81
V-5 LA SIMULATION.....	81
V-5-1 Fonctionnement normal.....	81
V-5-1-1 Commentaire .....	83
V-5-2 Fonctionnement après le Défaut .....	84
V-5-2-1 Le défaut.....	84
V-6 Conclusion .....	86

## Conclusion générale

# Introduction générale

## **Introduction générale :**

Les transformateurs occupent une place essentielle dans n'importe quel système de gestion de l'énergie la production, le transport, la distribution et l'utilisation du courant électrique sont les étapes qu'ils composent les transformateurs sont présents à chaque étape d'un tel système, de la fabrication à l'exploitation.

Un transformateur de puissance est un dispositif statique composé d'au moins deux enroulements, qui utilise le principe de l'induction électromagnétique pour convertir une tension et un courant alternatif d'un système donné en une tension et un courant généralement différent dans un autre système, tout en conservant la même fréquence. Son rôle principal est de faciliter la transmission efficace de l'énergie électrique.

En raison de son importance efficace dans le domaine de l'électricité, il reste exposé à de nombreux risques, en particulier à une surtension et à une foudre, en électrocinétique, la surtension se réfère à une tension plus élevée aux bornes d'un élément spécifique d'un dipôle électrique par rapport à celle du dipôle complet. Ces surtensions peuvent causer des dommages. Par ailleurs, un coup de foudre est une décharge électrique qui se produit sur une grande distance, entre un nuage orageux chargé et la terre.

Notre étude se concentre sur les méthodes de protection adéquates contre tous les types de défauts. Les systèmes de protection sont essentiels pour prévenir les conséquences des incidents potentiellement dangereux pour les personnes et le matériel.

Une approche consiste à renforcer l'isolation des installations en augmentant les distances d'isolement. Ensuite, il est crucial de limiter les surtensions à l'aide de dispositifs de protection tels que des paratonnerres, des parafoudres ou des éclateurs. et Toutes les protections utilisées contre les surtensions internes et externes consistent à dévier le courant vers la terre

Et nous avons également approfondi le fonctionnement de la protection différentielle, car elle revêt une importance capitale pour la protection des transformateurs. Les principaux défauts affectant les transformateurs. La protection implique l'utilisation de dispositifs qui détectent et isolent tout défaut à l'intérieur du transformateur en cas de surtension ou de courant soudain.

# Chapitre I :

# Généralités sur la surtension

# Chapitre I : généralité sur la surtension

---

## I-Introduction :

Les perturbations électriques majeures telles que les surtensions peuvent avoir un impact sur les transformateurs MT/BT, mettant ainsi en danger la sécurité et la fiabilité de l'alimentation électrique. Il existe différents éléments qui peuvent entraîner ces perturbations, comme les surintensités, les surcharges, les courts-circuits et les éclairs de foudre. Les surintensités désignent des surtensions de courte durée, habituellement inférieures à quelques dizaines de secondes, qui peuvent résulter de problèmes de synchronisation ou de perturbations dans le réseau électrique. En ce qui concerne les surcharges, elles sont des surtensions plus persistantes et peuvent être provoquées par des besoins de puissance supplémentaires ou des perturbations dans la charge du réseau.

### I-1) Définition des surtensions :

En électrocinétique, la surtension se produit lorsqu'un élément spécifique d'un dipôle électrique présente une tension aux bornes plus élevée que celle mesurée aux bornes du dipôle complet.

Les perturbations peuvent conduire à :

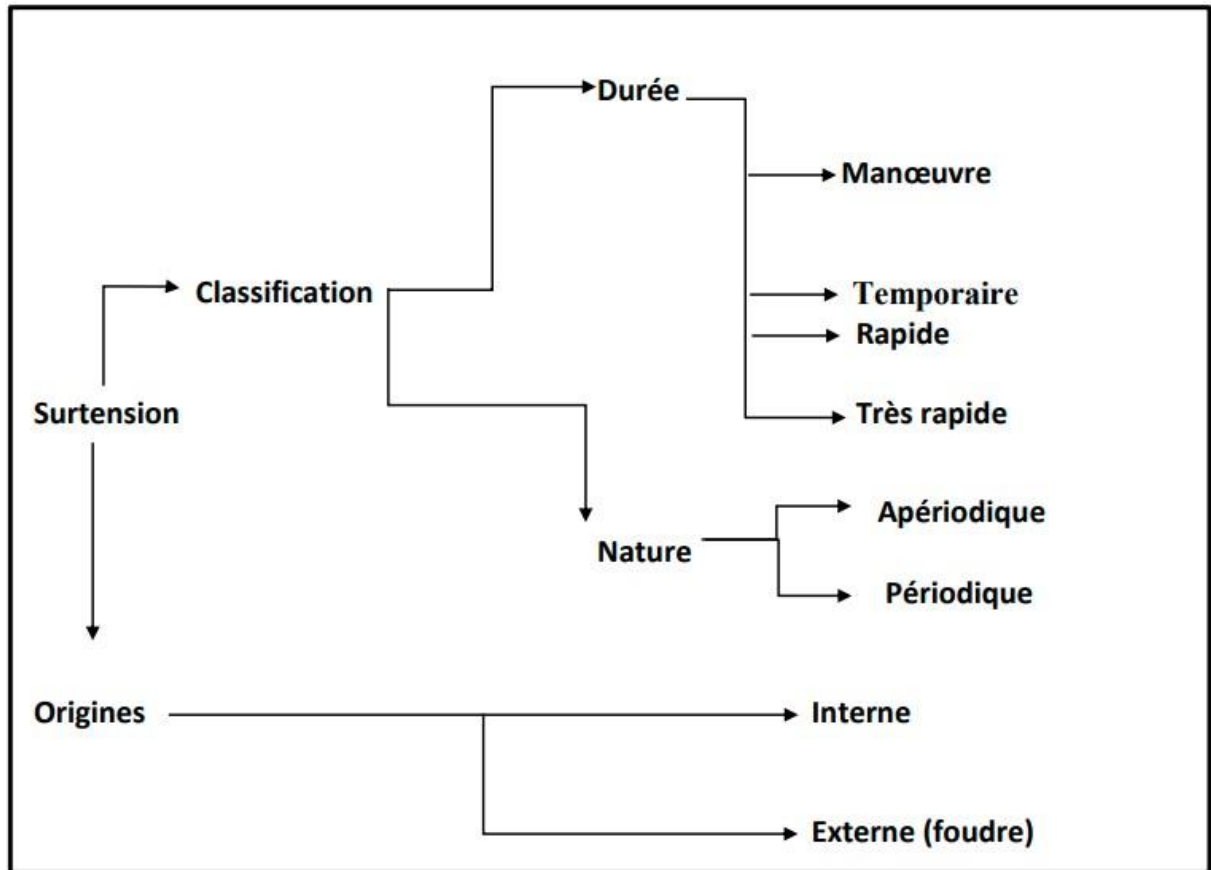
- Interruptions prolongées nécessitant des interventions telles que le remplacement des isolants endommagés voire du matériel complet. La compréhension des divers types de surtensions est cruciale à cet égard, sujet traité dans ce chapitre.
- Interruptions brèves entraînant des ré-enclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT via des lignes aériennes [1]

### I-2 Classification des surtensions :

- **Surtensions temporaires** : la montée à la tension composée des phases saines en cas de défaut phase-terre.
- **Surtensions transitoires** : Les surtensions en question sont de courte durée (quelques millisecondes ou moins), pouvant osciller ou non, et typiquement atténuées significativement. Elles peuvent se superposer ou non à des surtensions temporaires.

Elles se répartissent elles-mêmes en trois types :

- **Les surtensions à front lent** : Par exemple, les surtensions de manœuvre ont un temps de crête variant de 20 à 5 000  $\mu\text{s}$  et une durée totale jusqu'à la mi-amplitude inférieure à 20 ms
- **Les surtensions à front rapide** : Par exemple, les surtensions de foudre ont un temps de front avec une durée comprise entre 0,1 et 20  $\mu\text{s}$ , et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 300  $\mu\text{s}$  ;
- **Les surtensions à front très rapide** : Ayant un temps de front inférieur à 0,1  $\mu\text{s}$  et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 3 ms,



**Figure I-1** Classification et origines des surtensions

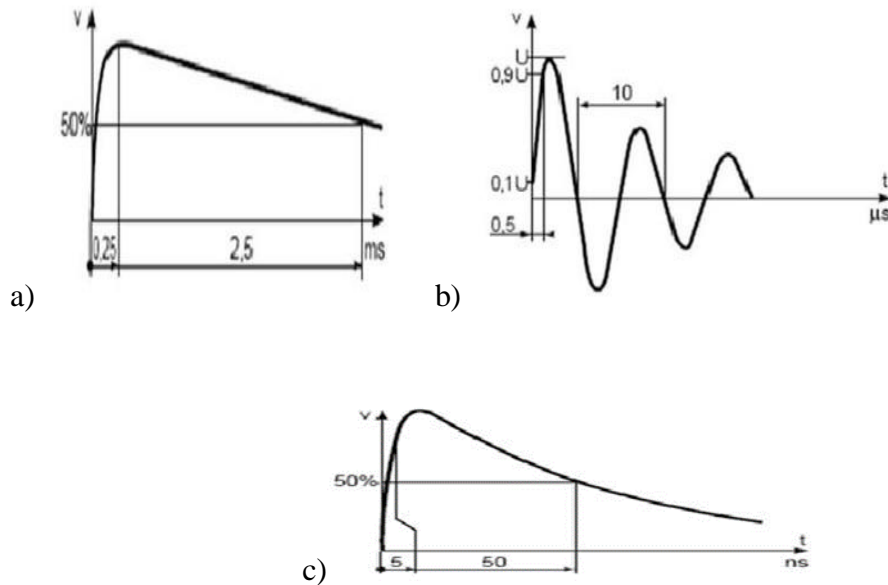
### I-3 Origine des surtensions :

Les surtensions internes peuvent résulter de phénomènes transitoires dans le réseau. Les surtensions de mode commun ou de mode différentiel observées sur les réseaux industriels peuvent avoir deux origines : interne et externe.

#### I-3-1 Origine interne :

##### I-3-1-1) Surtensions de manœuvre :[2]

Lorsque vous allumez ou éteignez le récepteur, Une surtension transitoire se produit sur le réseau. Ces poussées sont encore plus C'est dangereux si l'interruption de courant est inductive ou capacitive l'amplitude, la fréquence et la durée de cet état transitoire dépendent des caractéristiques du réseau ainsi que des propriétés mécaniques et diélectriques des appareils de commutation. L'étude statique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des formes d'ondes représentées dans la figure.(I-2)



**Figure I-2:** Les formes d'ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre."

- a) Les ondes longues amorties ont une période de 250 à 2500  $\mu\text{s}$ .
- b) Les ondes impulsionnelles récurrentes se caractérisent par une période de 5 à 50 ns.
- c) Les ondes sinusoïdales amorties ont une période de 0,5  $\mu\text{s}$  à 100 kHz.

### I-3-1-1-1) Surtension due à la coupure de courants capacitifs ou inductifs :

En général, la coupure de courants capacitifs ou inductifs peut entraîner des surtensions qui nécessitent une attention particulière. Cela peut se produire lors de la coupure de courant au démarrage de moteurs, lors de la coupure du courant magnétisant de transformateurs ou de bobines, ou encore lors de la coupure de câbles à vide. Dans de telles situations, les disjoncteurs peuvent se retrouver dans des conditions de tension transitoire de rétablissement (TTR) insuffisamment couvertes par les normes, ce qui pourrait provoquer le réamorçage entre les contacts et générer ainsi des surtensions potentiellement dommageables pour les équipements. [3]

#### I-3-1-1-1-a) Surtension due à la coupure d'un courant inductif :

Lorsque l'on ouvre un circuit comportant des éléments inductifs. Une surtension significative se manifeste aux bornes de l'interrupteur, pouvant entraîner une décharge électrique entre ses contacts, connue sous le nom d'"étincelle de rupture". Ce phénomène présente un risque d'endommagement des circuits électroniques lorsqu'ils incluent des interrupteurs commandés en série avec des inductances telles que des bobines ou des moteurs. [4]

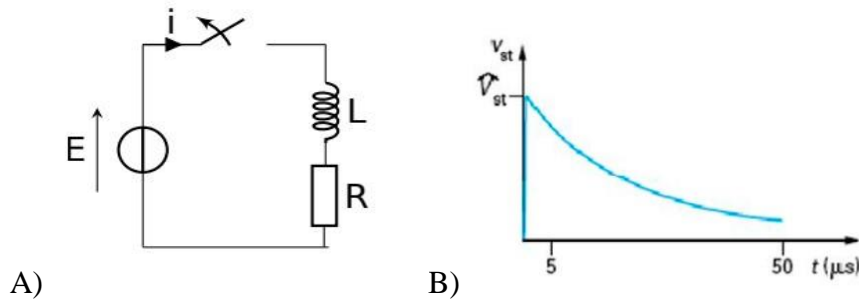


Figure I-3 : Forme de décharge inductive due à la coupure d'un circuit avec inductance L

**I-3-1-1-b) Surtension due à la coupure d'un courant capacitif :**

Il existe trois origines principales de courant capacitif, Les câbles sans charge, les lignes aériennes étendues et les batteries de condensateurs. Panne électrique en principe, il n'y a aucune difficulté avec les batteries de condensateurs. En effet, lorsque l'appareil est interrompu une surtension importante en courant et à haute fréquence due au redémarrage peut se produire et remet en question la coupure et l'intégrité de l'installation. Aussi, La mise hors tension d'un équipement sur un circuit capacitif produit ou génère des phénomènes particuliers

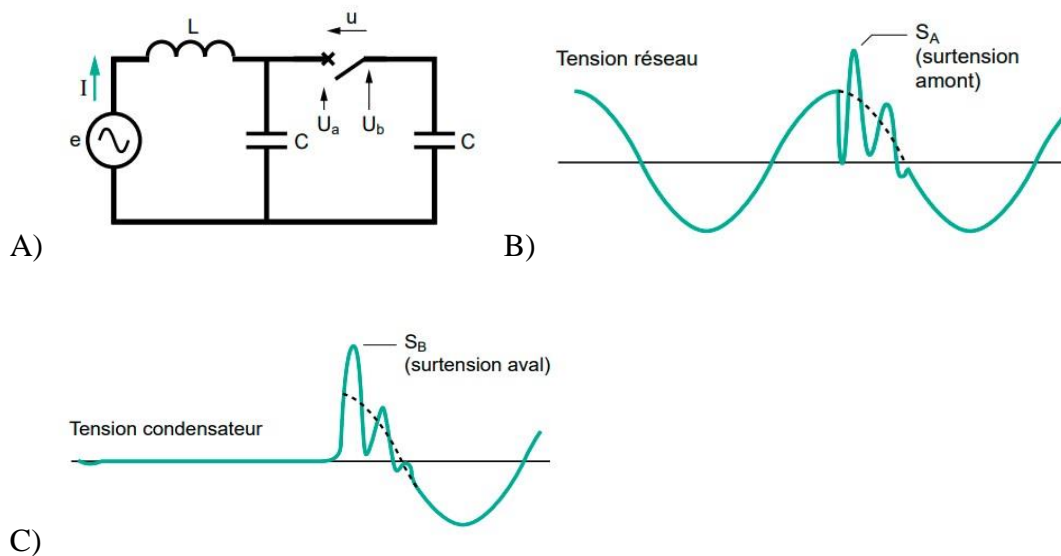


Figure I-4 :formes de la surtension lors du couplage au réseau d'une batterie unique de condensateurs. [5]

**I-3-1-2) Surtensions par ferro-résonance :**

La Ferro résonance est un phénomène de résonance non linéaire qui impacte les réseaux de transmission et de distribution d'énergie électrique. Phénomène d'oscillation Des

harmoniques, mais aussi des pseudo-périodes dans les circuits où plusieurs inductances non linéaires sont associées à un condensateur alimenté par une source de tension généralement sinusoïdale, des perturbations électrotechniques peuvent survenir, en plus des surtensions transitoires. Ces perturbations peuvent être extrêmement dommageables et compromettre l'intégrité des équipements.

La Ferro résonance se produit dans le réseau lorsque la capacité (C) est présente, En série avec inductance équivalente (L) (Ferro résonance série) ou en parallèle possède des propriétés saturées (transformateurs, etc.)

Ce phénomène peut être évité soit :

- En ajustant la longueur du câble.
- En utilisant des parafoudres.
- En effectuant une mise à la terre du neutre (solution la plus efficace)[6]

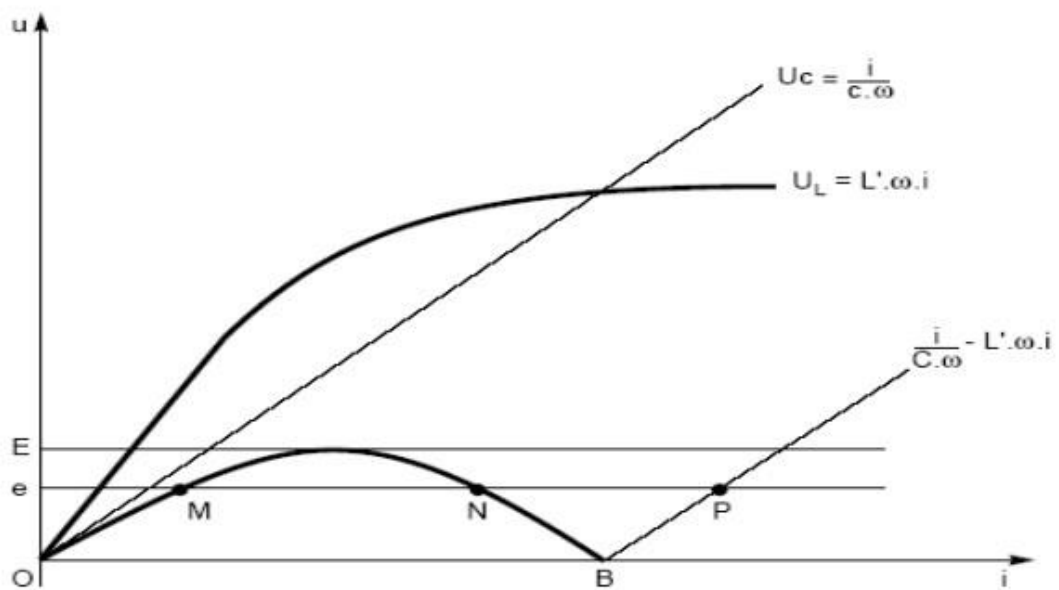


Figure I-5 : Principe de la Ferro résonance

### I-3-1-3 Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti) :

Lorsqu'une ligne longue est alimentée à une extrémité mais non chargée à l'autre, une surtension peut survenir. Ce phénomène résulte d'une onde de tension croissante le long de la ligne, due à un processus de résonance.

En effet, le facteur de surtension est égal à : Pour des valeurs données de L (inductance) et C (capacité totale) de la ligne, ainsi que pour  $U_s$  (tension à l'extrémité ouverte) et  $U_e$  (tension à l'entrée de la ligne), le facteur de surtension est calculé comme suit :

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{L.C.W^2}{2}}$$

Pour une ligne de 300 km, le facteur de surtension est d'environ 1,05, tandis que pour une ligne de 500 km, il est d'environ 1,16. [7]

**I-3-1-4 Surtensions de résonance :**

Quel que soit le niveau de tension des réseaux électriques, le phénomène de résonance se produit. Ce phénomène peut survenir lorsqu'un régime de neutre compensé, tel qu'une bobine de Petersen utilisée en moyenne tension pour réduire les courants de défaut, est impliqué. Il peut entraîner des dommages comme des dégradations diélectriques ou thermiques, ainsi qu'un vieillissement prématuré des équipements électriques en raison de surtensions et de surintensités (résonance harmonique).

En résonance série et en régime sinusoïdal ( $U = E \cos(\omega nt)$ ), la relation entre les tensions peut être exprimée en vectoriel :  $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$

En situation de résonance, les tensions aux bornes du condensateur et de l'inductance se compensent, ce qui place le circuit dans un état de résonance.

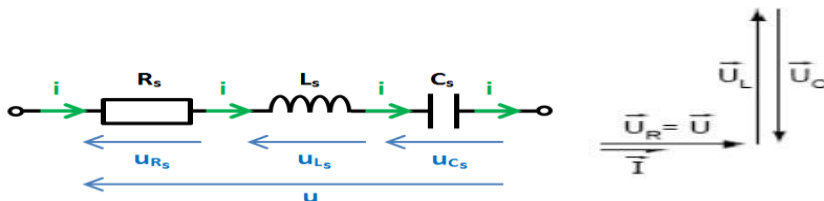
$$L.C.W_n^2 = 1$$

Ce courant peut atteindre des niveaux très élevés.

L'amplitude de la tension aux bornes du condensateur (et de l'inductance) est égale à k.E.

Le facteur de qualité k est exprimé par :

$$K = \frac{L.W_n}{R} = \frac{1}{R.C.W_n}$$



A: circuit résonant RLC simple Tension

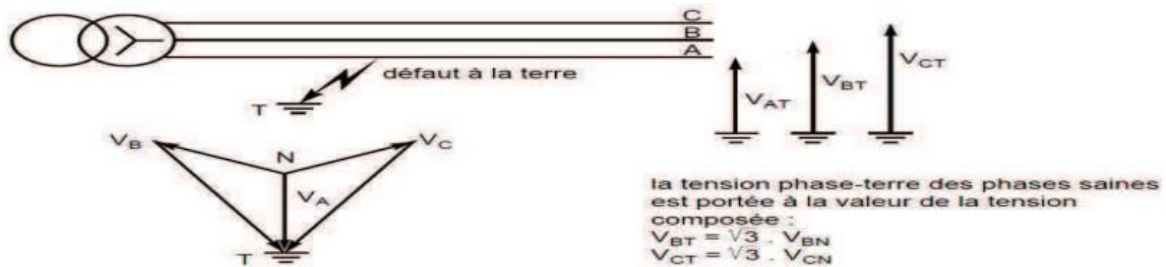
B : représentation vectorielle

**I-3-1-5 Surtension provoquée par un défaut d'isolement:**

Lorsque le neutre est isolé ou présente une impédance élevée dans un réseau triphasé, une surtension peut survenir en cas de défaut d'isolement. Ce défaut peut se produire lorsqu'il y a

un court-circuit entre une phase et la terre ou la masse (par exemple, un câble souterrain endommagé, un contact avec des branchages sur un conducteur aérien, ou un dysfonctionnement dans un équipement).

Dans cette situation, la phase affectée est exposée au potentiel de la terre, tandis que les deux autres phases sont soumises à une tension composée par rapport à la terre. Cette tension composée est équivalente à la tension simple multipliée par la racine de 3 :  $U = V \cdot \sqrt{3}$



**Figure I-6 :** surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en défaut d'isolement.[8]

**I-3-2 Origine Externe :**

**I-3-2-1 Surtensions externes Atmosphériques – La foudre :[6]**

La foudre est une décharge électrique qui se produit sur une grande distance entre un nuage orageux chargé et la terre. La science de la foudre reste relativement mal comprise en raison de sa nature brève et imprévisible, ce qui rend son étude en laboratoire difficile. Pour étudier ce phénomène, les grands laboratoires provoquent la foudre en lançant des fusées reliées à la terre par un fil conducteur.

L'impact d'un coup de foudre sur une installation est comparable à celui d'un générateur de courant très puissant (10 à 100 kA ou plus), provoquant ainsi une surtension significative.

Les surtensions peuvent avoir un impact critique sur les systèmes électriques, notamment celles survenant dans l'atmosphère. Ces surtensions sont particulièrement dangereuses car elles peuvent causer d'importants dommages aux équipements composant le système d'alimentation électrique.

La foudre est un phénomène électrique à haute fréquence qui génère des surtensions sur tous les éléments conducteurs, notamment sur les câblages et les équipements électriques. Les éclairs délivrent une énergie électrique impulsionnelle extrêmement considérable.

- De courte durée (de la microseconde à la milliseconde)
- Souvent de plusieurs milliers de volts (et plusieurs milliers d'ampères).
- À haute fréquence, typiquement de l'ordre du mégahertz.

**I-3-2-2) Paramètres électriques de la foudre :**

En général, on peut définir l'activité orageuse dans une région comme suit :

**I-3-2-2-a) Forme du courant d'arc :**

La forme de ce courant est impulsionnelle, caractérisée par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (temps de montée) et un temps de décroissance.

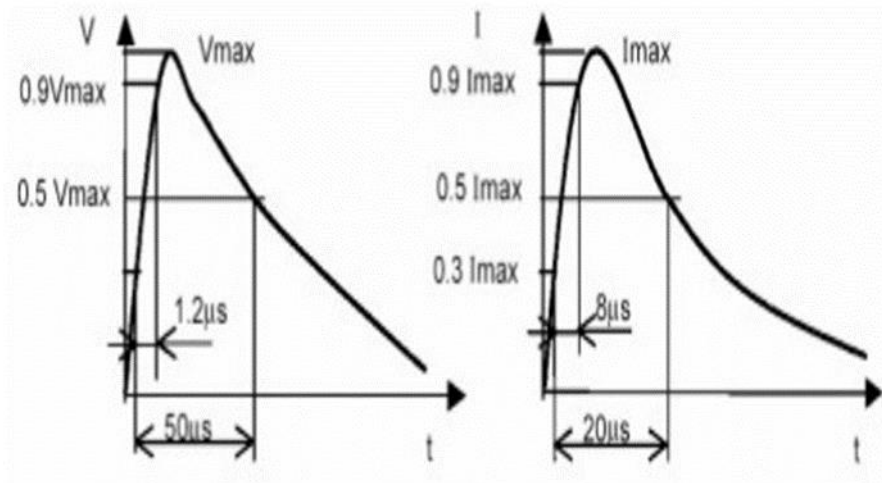


Figure I-7 : Ondes typiques dans le canal de la foudre

**I-3-2-2-b) Forme réelle du courant de foudre :**

La foudre est un phénomène physique caractérisé par une série de décharges électriques sur une courte période. Ce phénomène est souvent modélisé comme une source de courant impulsionnel. La forme d'onde réelle varie considérablement, avec un front de montée atteignant son amplitude maximale (de quelques microsecondes à 20 microsecondes), suivi d'une phase de décroissance durant quelques dizaines de microsecondes.

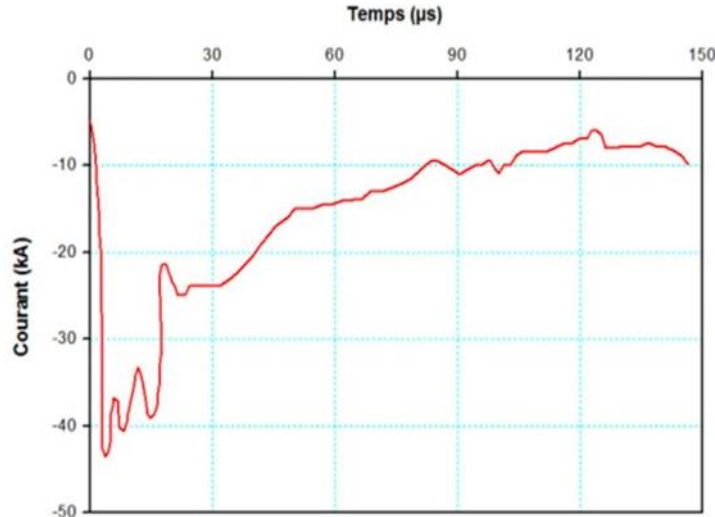
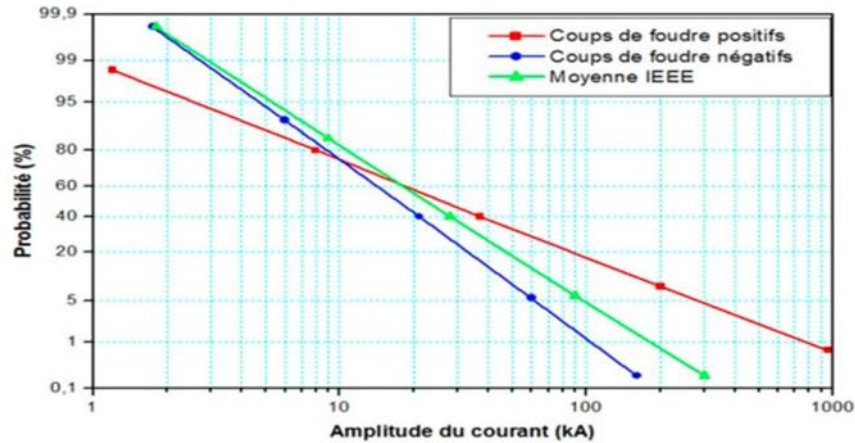


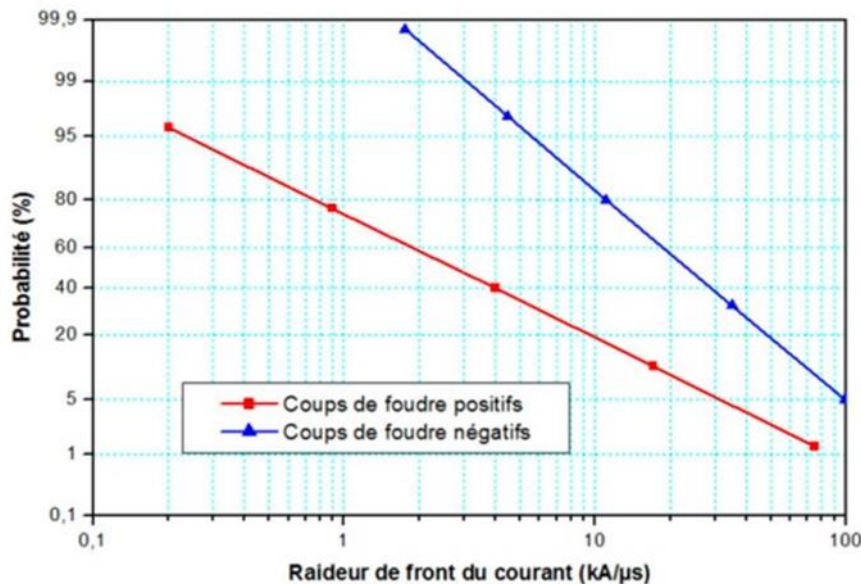
Figure I-8 : Oscillogramme d'un courant de foudre

**I-3-2-2-c) Amplitude des coups de foudre :[9]**

Il existe plusieurs stratégies pour gérer les amplitudes des courants des premiers retours d'arc lors des coups de foudre négatifs. Selon l'IEEE, la distribution statistique expérimentale des amplitudes des coups de foudre suit une loi normale, représentée dans la figure I-9. La figure I-10 illustre la rapidité du front d'onde.



**Figure I-9 :** Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE[9]



**Figure I-10 :** Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE[9]

### I-3-2-3) Mécanisme de formation de l'orage :

Le cumulonimbus, ou nuage d'orage, est la principale source de foudre, formé lorsque des nuages de beau temps se transforment en nuages orageux. Les fronts froids sont souvent à l'origine de ces orages. Lorsqu'un cumulonimbus se forme, une masse d'air froid s'infiltré sous l'air chaud, le soulevant et créant des turbulences qui projettent l'air chaud en altitude. Il existe plusieurs théories complexes pour expliquer l'électrification des nuages, bien que cela ne soit pas l'objet de cette discussion.

Typiquement, la partie supérieure d'un nuage d'orage est chargée positivement, tandis que la partie inférieure est chargée négativement. Cette masse de charges négatives contient souvent des îlots de charges positives.

Lorsqu'un nuage orageux s'approche, le champ électrique atmosphérique au sol, qui est normalement d'environ cent volts par mètre, commence à s'inverser et augmente

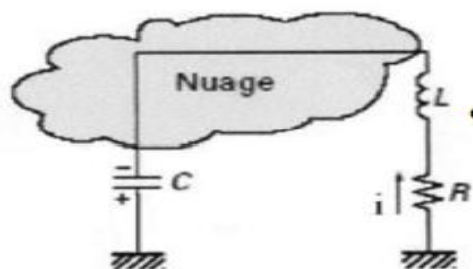
considérablement. Une décharge au sol peut être déclenchée à des niveaux d'environ 20 kV/m. [10]



**Figure I-11 :** Indication illustrative de la distribution de la charge électrique à l'intérieur et autour d'un nuage orageux[11]

#### I-3-2-4) Schéma électrique équivalent :

Le schéma des décharges similaires est illustré dans la Figure. La résistance  $R$  et l'inductance  $L$  varient en fonction du chemin parcouru par le courant de décharge  $i$ . Par conséquent, la différence de potentiel correspondante  $u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$  n'est pas une caractéristique inhérente à la foudre, qui est définie uniquement par son courant, c'est-à-dire par sa surintensité.



**Figure I-12 :** Schéma électrique équivalent de la foudre

**I-3-2-5) Surtensions dues à la foudre :[12]**

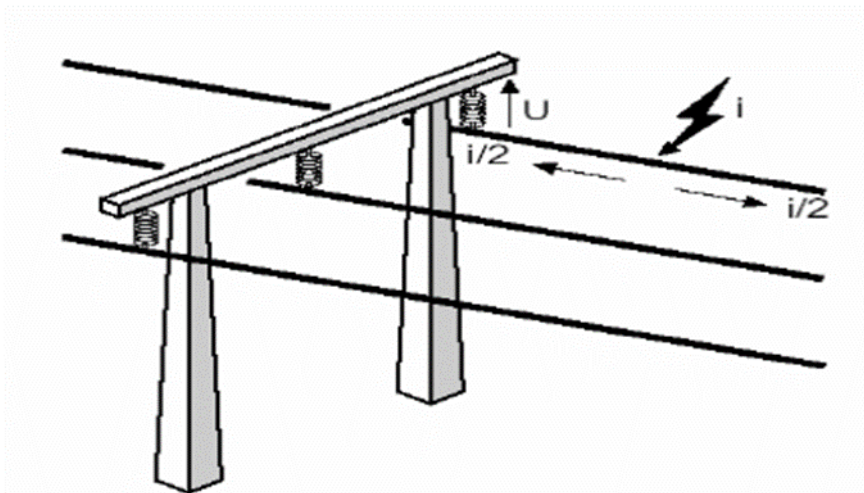
Les dommages causés par la foudre entraînent des coûts de réparation très élevés. Mesurer précisément les impacts est cependant complexe, notamment :

- Les perturbations sur les ordinateurs et les réseaux de télécommunication,
- Les dysfonctionnements des automates et des systèmes de régulation.

De plus, les pertes d'exploitation peuvent entraîner des dépenses bien supérieures à celles de la réparation du matériel endommagé.

**I-3-2-5-A) Coups de foudre directs (sur conducteurs de phase) :**

Lorsqu'un coup de foudre frappe un conducteur de phase d'une ligne, le courant  $i(t)$  est réparti également de part et d'autre du point d'impact, se propageant le long des conducteurs dont l'impédance d'onde  $Z$  est comprise entre 300 et 500  $\Omega$ .



**Figure I-13:** Coup de foudre sur conducteur de phase et propagation bidirectionnelle

La tension augmente au niveau des pylônes et se propage sous forme d'onde jusqu'à atteindre sa valeur maximale.

$$U_{max} = Z \frac{I_{max}}{2} \text{ si } Z \frac{I_{max}}{2} < Ua$$

avec  $Ua$  désignant la tension de claquage lors du choc d'onde sur la chaîne d'isolateurs ou sur d'éventuels parafoudres de protection.

**I-3-2-5-B) Coups de foudre (sur conducteurs de garde ou sur un pylône) :**

Dans cette situation, le courant de foudre circulant vers la terre élève le potentiel des structures métalliques. La tête du pylône peut atteindre un potentiel déterminé par son inductance propre  $L$  et la résistance de mise à la terre  $R$  au moment de l'impact.

$$U_{(t)} = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

La tension sur la chaîne d'isolateurs lors de l'onde de choc peut atteindre le seuil de claquage, souvent appelé "flashover de retour". Une partie du courant est alors transmise aux utilisateurs

pendant les phases de claquage, généralement avec des intensités plus élevées que lors d'un coup de foudre direct. L'installation de câbles de garde est recommandée, car cela réduit le risque de flashover en retour en cas de très haute tension (au niveau de claquage des isolateurs). Cependant, même avec des résistances de terre faibles ( $< 15 \Omega$ ), le flashover en retour peut se produire en dessous de 90 kV, ce qui limite leur efficacité et peut entraîner des interruptions de service fréquentes.

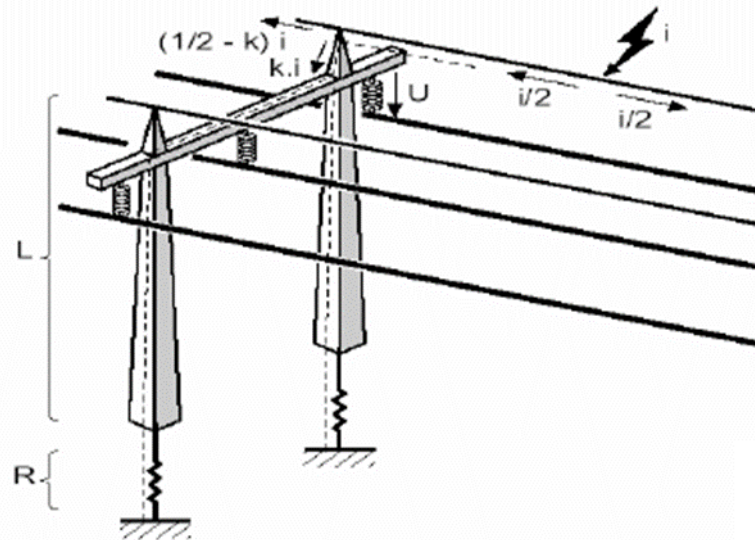


Figure I-14 : Coup de foudre sur conducteur garde et propagation bidirectionnelle

### I-3-2-5) Effets de la foudre :

Il existe deux types de risques : mécaniques et électriques.

#### I-3-2-5-a) Les effets mécaniques :

D'une part, la détente soudaine de l'air provoque une onde de choc atteignant 30 000 K dans le canal ionisé. D'autre part, le champ électromagnétique génère une force électromotrice que le courant de foudre parcourt à travers le canal ionisé.

#### I-3-2-5-b) les effets électriques :

Les variations de potentiel importantes sont causées par le courant de foudre, qui est le principal responsable, ainsi que par l'induction électromagnétique due au champ électrique. Les effets de la foudre sur les personnes et les équipements sont également significatifs. Il est crucial de prendre en compte les câbles enterrés et les conducteurs aériens, car ils captent souvent la foudre et transmettent une partie de son courant aux équipements électriques et industriels. Il est à noter que la décharge agit comme un émetteur de fréquences.

#### I-3-2-5-c) Effets thermiques :

#### I-3-2-5-d) Effets électrodynamique :

- Fusion des éléments au point d'impact (environ 30 000 °C).
- Risque d'incendie associé à la circulation d'un courant élevé.

Lorsque les courants de foudre circulent à travers des conducteurs parallèles, la force magnétique qui en résulte (attraction et répulsion) peut entraîner des déformations mécaniques et même des ruptures.

**I-3-2-6-e) L'effet électromagnétique :**

Lorsqu'un éclair frappe et génère un canal de foudre, ainsi que les éléments conducteurs qui acheminent le courant vers la terre, un champ électromagnétique est créé. Les conducteurs à proximité peuvent donc subir des courants et des tensions induits. Par exemple, un éclair peut induire une tension de 80 V dans une boucle d'un mètre carré formée par un conducteur situé à 100 mètres du point d'impact.

Les variations de potentiel qui en résultent peuvent provoquer des vibrations dans les éléments électriques ou électroniques connectés à ces conducteurs. Ces vibrations peuvent être intenses, augmentant ainsi le risque d'inflammation ou de destruction, similaire à celui provoqué par un coup de foudre direct.

De plus, il est possible que certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétiques soient perturbés ou endommagés par le champ électromagnétique généré par un éclair à proximité.

**I-4 Le mécanisme de foudre:**

Lorsqu'un coup de foudre négatif se produit, il se décompose en plusieurs impulsions distinctes. La première impulsion est initiée par une série de pré-décharges, créant un chemin préférentiel (ou précurseur) sous forme d'un canal ionisé entre le nuage et le sol pour un éclair descendant. Une fois que ce chemin conducteur est établi de manière continue entre le nuage et le sol, la décharge principale se produit du sol vers le nuage (éclair en retour).

Habituellement, cette première impulsion est la plus longue et libère plus d'énergie vers le sol que les impulsions suivantes.[13]

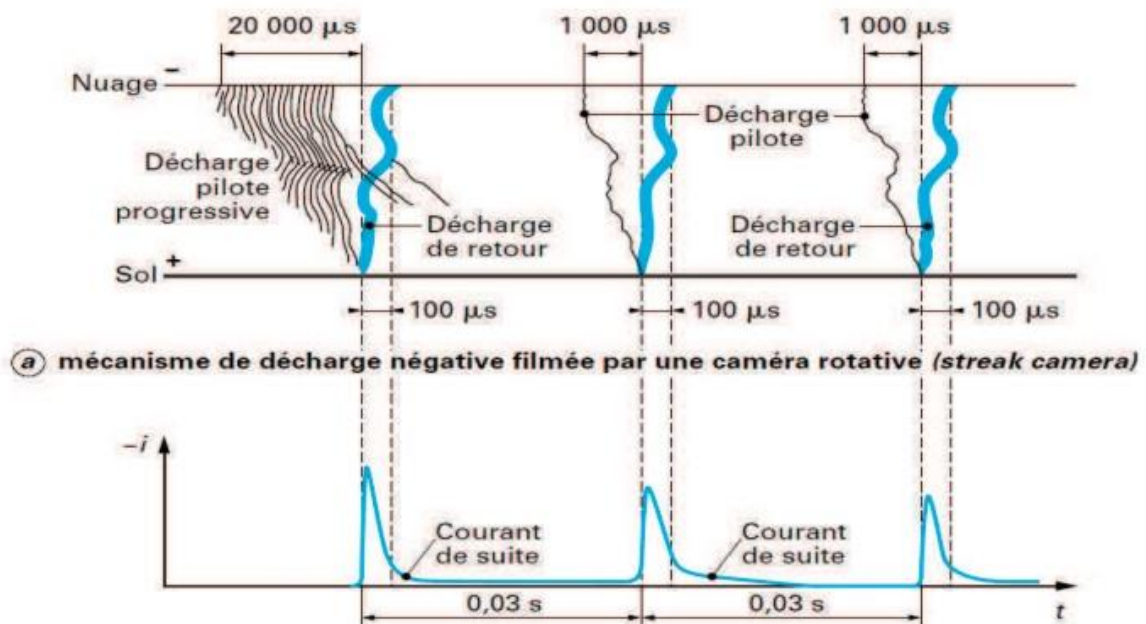


Figure I-15 : le mécanisme de la foudre

La Figure I-15 présente le schéma équivalent des décharges, où les valeurs de la résistance R et de l'inductance L varient en fonction du chemin emprunté par le courant de décharge i. Les variations de potentiel qui en résultent:[14]

$$u = Ri + L \frac{di}{dt}$$

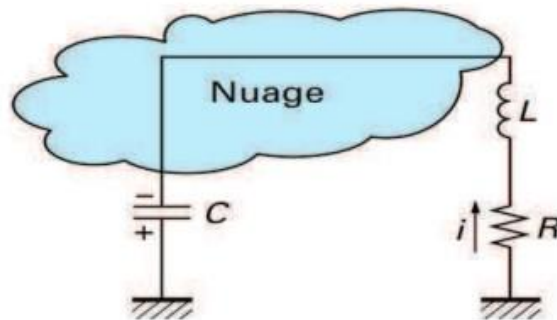


Figure I-16 : Décharges - schéma électrique

### I-5 Classification des coups de foudre :

Le traceur est une décharge préliminaire faiblement lumineuse qui se produit entre la terre et le nuage, préparant le chemin pour le canal de la foudre. Les coups de foudre sont classés en fonction du signe de la charge qui se décharge et du sens de progression du traceur.

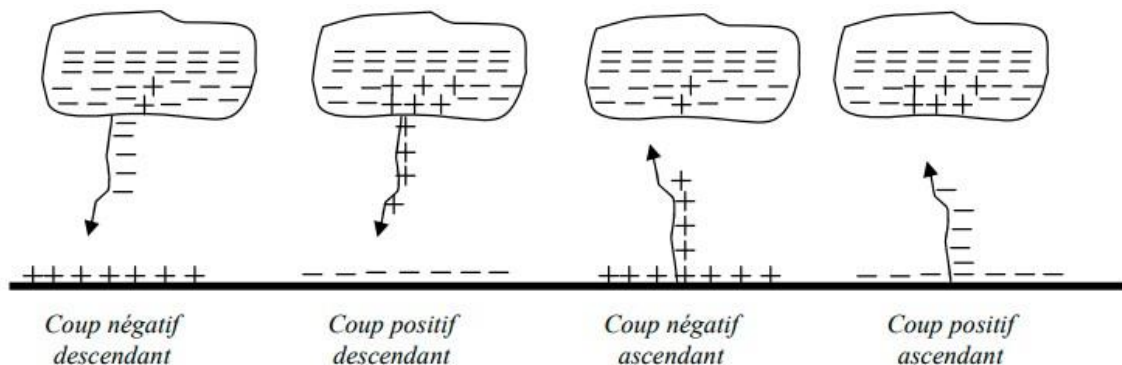


Figure I-17 : Classification des coups de foudre

**Remarque :** Dans les régions à climat tempéré, la majorité des coups de foudre (80 à 90 %) sont de type négatif descendant, bien que les plus énergétiques soient les positifs. En montagne ou en présence d'une proéminence, des coups de foudre négatifs ascendants peuvent se développer. Dans les régions plates, les coups de foudre descendants négatifs sont les plus fréquents. Pour qu'un coup de foudre ascendant se produise, il faut la présence d'une proéminence significative, comme une tour élevée.[15]

#### a- Le coup positif :[16]

Le bas du nuage est chargé positivement. Ces types de décharges se manifestent généralement en une seule impulsion, d'une durée de 0,1 à 0,2 seconde. La durée d'attaque varie entre 20  $\mu$ s et 50  $\mu$ s, et l'amplitude du courant des "coups positifs" est généralement supérieure à celle des "coups négatifs".

**b- Le coup négatif :**

Le fond du nuage est chargé négativement. Les types de décharges sont variés et multiples : après une première décharge partielle avec une durée de front de 10 à 15  $\mu\text{s}$ , on observe des décharges d'attaque plus intenses suivies de décharges de descente plus douces.

**c- Le coup descendant :**

Le type de coup de foudre le plus fréquent est celui qui présente une arborescence ouverte vers le bas. Initialement, une pré-décharge se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (traceur). À la fin de ce traceur, le champ électrique devient très élevé, provoquant une augmentation locale du champ au sol.

Après que le point du traceur approche le sol, des pré-décharges ascendantes se forment à partir de celui-ci. Lorsque ces deux canaux se rencontrent, ils forment un pont conducteur entre le nuage et le sol, facilitant ainsi le passage d'un courant de grande intensité.

**d- Le coup ascendant :**

Ce type de coup de foudre se distingue par une arborescence qui s'ouvre vers le haut. Lorsqu'il touche des pylônes de grande hauteur ou des tours, l'effet couronne peut générer une décharge ascendante qui s'étend du sol jusqu'au nuage. Une fois qu'un canal conducteur est établi, les charges accumulées dans le nuage peuvent se dissiper vers le sol. Les coups de foudre ascendants sont fréquemment observés dans les régions montagneuses.

**I-6 Courant de la foudre :**

Le coup de foudre peut être assimilé à un générateur d'électricité. En réalité, le courant est formé par les charges du sol qui remontent le canal ionisé du traceur, produisant une intense luminosité se déplaçant du sol vers le nuage à une vitesse d'environ 108 m/s. Ce phénomène est connu sous le nom d'"arc en retour" ou de "return stroke".

Généralement, un coup de foudre se compose de plusieurs décharges partielles qui suivent le même canal ionisé. Après la fin de la décharge principale, environ 100 ms plus tard, des décharges secondaires ou multiples peuvent apparaître.

Quelques données sur les courants de foudre :

- Les courants des coups de foudre négatifs ont généralement une amplitude moindre. Dans 10% des cas, ils atteignent environ 50 kA. Dans 50% des cas, l'intensité des coups de foudre négatifs est d'environ 18 kA.
- Les courants des coups de foudre positifs peuvent être considérables, dépassant 150 kA dans 10% des cas. Dans 50% des cas, l'intensité du courant est d'environ 25 kA.

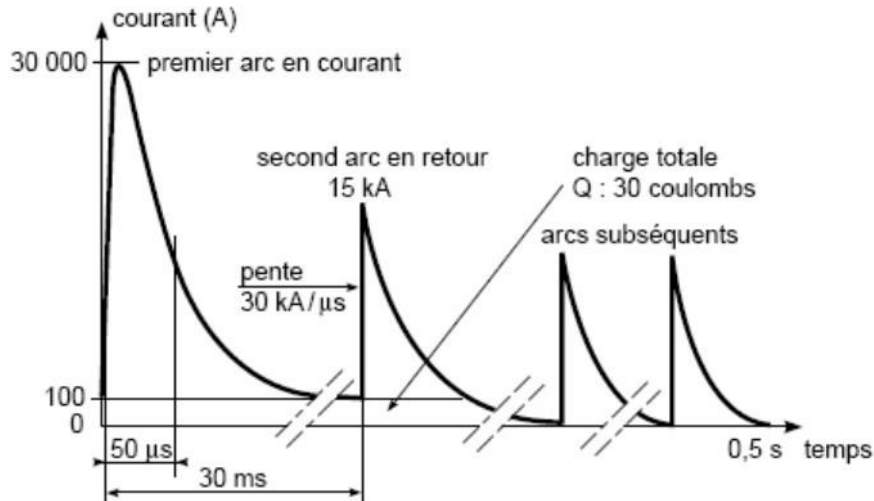


Figure I-18 : forme du courant de la foudre

**Onde conventionnelle :** L'onde de choc conventionnelle est une onde standardisée utilisée par tous les fabricants d'équipements électriques haute tension pour effectuer les tests de contrôle.

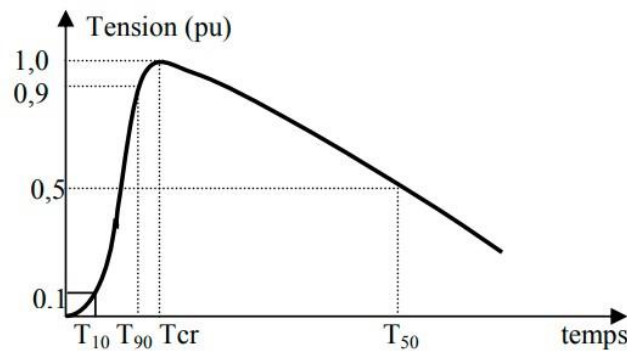


Figure I-19 : Onde de choc conventionnelle

- **Coup de Foudre positif :**  
 Durée du front de montée (90%) : 10 à 100  $\mu$ s  
 Durée du front de montée (50%) : 500 à 1000  $\mu$ s
- **Coup de Foudre négatif :**  
 Durée du front de montée (90%) : 1 à 10  $\mu$ s  
 Durée du front de montée (50%) : 40 à 200  $\mu$ s

**I-6-1 Caractéristiques des coups de foudre :**

PROBABILITE DE DEPASSEMENT (%)	VALEUR CRETE DU COURANT (kA)	CHARGE (C)	PENTE (kA/ $\mu$ s)	DUREE TOTALE (s)	NOMBRE DE DECHARGES
50	26	14	48	0.09	2
10	73	70	74	0.56	5
1	180	330	97	2.7	12

**Tableau I-1 : Caractéristiques des coups de foudre [15]****I-7 Conclusion :**

Les réseaux électriques, particulièrement les postes de transformation, font face régulièrement à des défis majeurs dus aux perturbations électriques. Ces perturbations peuvent être de deux types : internes, comme les courts-circuits, ou externes. Elles perturbent le fonctionnement normal du réseau, entraînant parfois des interruptions soudaines du service et une coupure de l'alimentation des clients.

Les surtensions atmosphériques, provoquées par la foudre, sont parmi les plus intenses et les plus imprévisibles. Elles présentent un risque de destruction des postes de transformation et exigent une protection électrique robuste pour maintenir la qualité de l'électricité, assurer la continuité du service, protéger la sécurité des individus et des équipements, tout en minimisant les coûts associés.

Chapitre II :

État de l'art des  
transformateurs  
De puissance

**II-1 Introduction :**

Les transformateurs de puissance jouent un rôle crucial dans tout système de gestion de l'énergie. Ils interviennent à chaque étape de la production, de la distribution, du transport et de l'utilisation du courant électrique. Les transformateurs sont présents à chaque étape d'un tel système, de la fabrication à l'exploitation.

Les convertisseurs de puissance jouent un rôle crucial dans la réduction efficace des pertes en ligne lors du transport de l'énergie sur de longues distances à des tensions élevées comme 200 kV, 400 kV et plus entre les phases. En abaissant ensuite progressivement cette tension, ils garantissent une alimentation continue et sûre des consommateurs de manière économique.

**II-2 Définition de transformateur :**

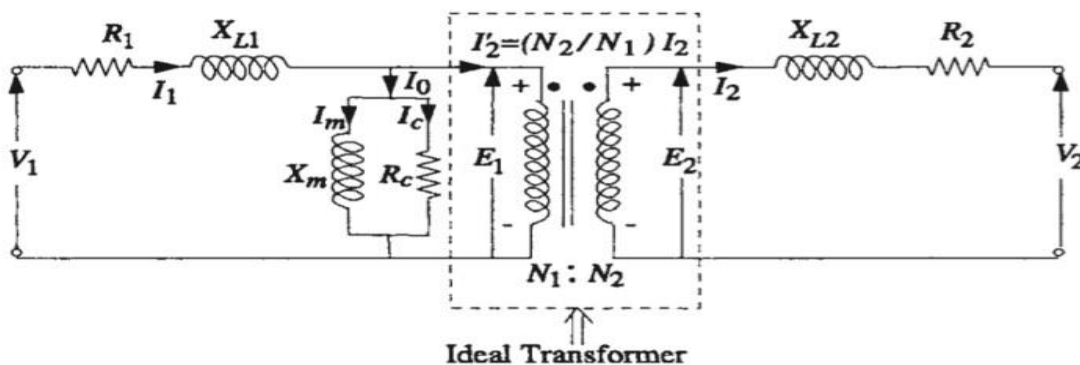
Le transformateur de puissance est un dispositif statique composé de deux enroulements ou plus. Grâce à l'induction électromagnétique, il transforme un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant, généralement à des valeurs différentes mais à la même fréquence. Son rôle est essentiel pour faciliter le transport efficace de l'énergie électrique à travers les réseaux de distribution.



**Figure II-1 :** Transformateur monophasé **Figure II-2:** Transformateur triphasé.

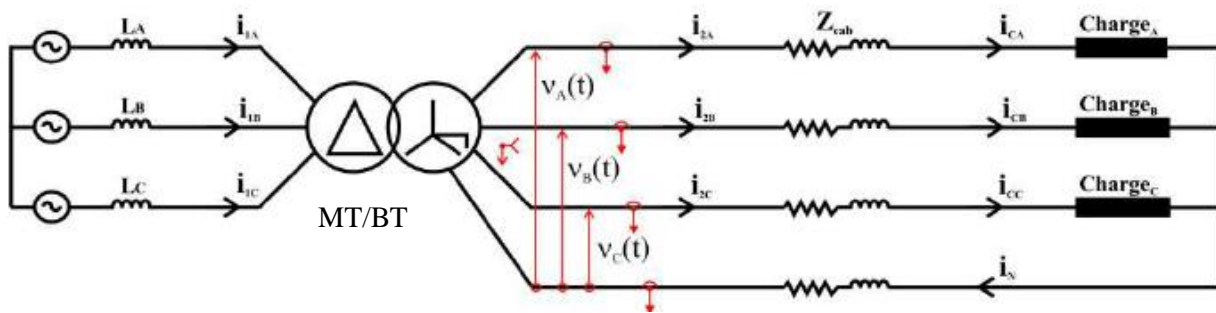
**II-3 Schéma équivalent du transformateur :**

- a) Schéma équivalent d'un transformateur réel, monophasé [17]



**Figure II-3 :** Schéma équivalent d'un transformateur réel, monophasé

- b) Schéma équivalent d'un transformateur triphasé :



**Figure II-4** : Schéma équivalent d'un transformateur triphasé simplifié d'un réseau à neutre isolé

#### II-4 Principe de fonctionnement :

Il semble que vous faisiez référence à une figure pour expliquer le fonctionnement d'un transformateur. Comme je ne peux pas afficher de figures, voici une reformulation du paragraphe :

Un transformateur opère selon le principe de l'induction électromagnétique, où un conducteur transportant du courant génère un champ magnétique autour de lui, et inversement. Il se compose de deux ensembles d'enroulements de fils, souvent appelés enroulement primaire et enroulement secondaire.

- Enroulement primaire (A) : Collecte l'énergie électrique initiale.
- Enroulement secondaire (B) : Fournit l'énergie électrique transformée à une tension ou courant différent.

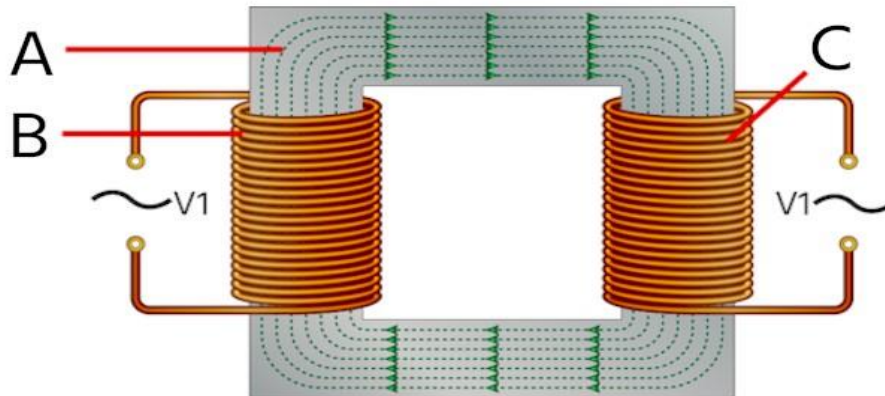
Les enroulements primaire et secondaire sont enroulés autour d'un noyau magnétique en fer, comme illustré dans la figure 5. Bien que ces bobines ne soient pas en contact direct, le matériau magnétique doux du noyau est constitué de tôles (étiquetées C dans la figure 5) qui sont connectées entre elles pour réduire les pertes. La détérioration du noyau se produit lorsque l'énergie dans le noyau diminue en raison du flux magnétique alternatif. Un champ magnétique instable peut perturber le bon fonctionnement du noyau avec le temps.

Lorsqu'on alimente l'enroulement primaire (étiqueté A dans la figure 5) avec une source électrique, un courant circule à travers la bobine, créant ainsi un champ magnétique. Ce champ magnétique induit à travers l'induction mutuelle une tension et un courant dans les enroulements secondaires (étiquetés B dans la figure 5). La tension générée du côté secondaire est proportionnelle au rapport des nombres de tours entre l'enroulement secondaire et l'enroulement primaire. Cette transformation de la tension et du courant est rendue possible grâce à:[18]

$$V1 / V2 = N1 / N2 = I2 / I1$$

Pour :

- $V_1$  : Tension appliquée à l'enroulement primaire du transformateur.
- $V_2$  : Tension produite au niveau de l'enroulement secondaire (de charge) du transformateur.
- $N_1$  : Nombre de tours dans l'enroulement primaire.
- $N_2$  : Nombre de tours dans l'enroulement secondaire.
- $I_1$  : Courant dans l'enroulement primaire.
- $I_2$  : Courant à travers l'enroulement secondaire.

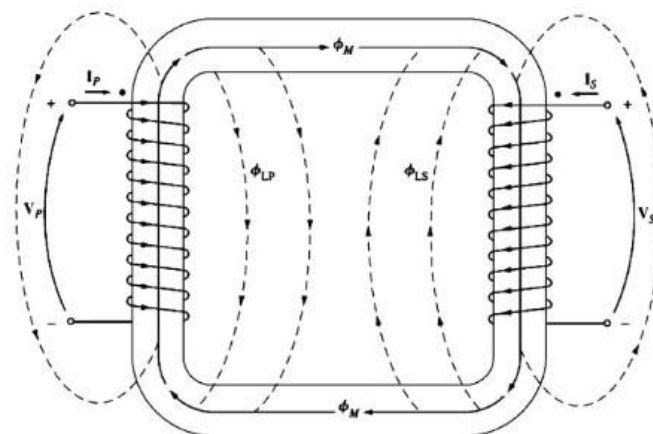


**Figure II-5 :** Enroulements primaires (A) et secondaires (B) d'un transformateur enroulé sur un noyau magnétique (C)

#### II-4-1 Principes de l'électromagnétisme et Tension créée par induction magnétique :

Le flux magnétique,  $\Phi$  (flux magnétique) est défini comme le nombre de lignes de champ magnétique qui pénètrent dans une bobine, et toutes les lignes de champ magnétique ne pénètrent pas dans les bobines primaires et secondaires, où le flux magnétique total peut être divisé en trois sections comme suit :

- **Le flux mutuel :** –  $\Phi_m$  qui est le champ magnétique qui pénètre dans les bobines primaires et secondaire
- **Le flux de fuite primaire :** –  $\Phi_{LP}$  dans la bobine primaire, qui correspond aux lignes de champ magnétique qui pénètrent dans la bobine primaire sans pénétrer dans la bobine secondaire
- **Flux de fuite secondaire :** –  $\Phi_{LS}$ . [19]



**Figure II-6 :** Les différents flux résultant lors du passage d'un courant électrique

### II-5 Le rôle des transformateurs de puissances :

Les transformateurs de puissance sont des dispositifs statiques essentiels dotés de deux enroulements ou plus. Ils utilisent l'induction électromagnétique pour convertir efficacement un système de tension et de courant alternatif en un autre système de valeurs souvent différentes mais à la même fréquence, dans le but de transporter l'énergie électrique. Ces transformateurs peuvent être construits selon une configuration triphasée, mais pour des raisons de taille, de transport et de maintenance simplifiée, ils existent également en unités monophasées facilement interchangeables.

En plus de leur rôle principal de transmission d'énergie, les transformateurs jouent plusieurs autres rôles cruciaux dans les réseaux électriques. Ils contribuent à réduire les courants de défaut en cas de courts-circuits, qu'ils soient équilibrés (triphases) ou déséquilibrés (monophasés ou biphasés). De plus, les transformateurs permettent de séparer différentes parties d'un réseau, par exemple pour modifier le régime de neutre entre l'amont et l'aval du transformateur.

Enfin, les transformateurs peuvent également aider à atténuer ou éliminer certaines perturbations harmoniques dans les réseaux électriques. Ainsi, ils facilitent le transport efficace de l'énergie en courant alternatif depuis les centrales de production jusqu'aux consommateurs finaux, en adaptant les niveaux de tension selon les besoins du réseau.

#### II-5-1 Types de transformateurs classiques :

##### II-5-1-1 transformateur monophasé :

magnétique. Il est largement utilisé dans le domaine de la traction électrique pour l'alimentation des caténaires et des convertisseurs à bord des locomotives. De plus, il est privilégié lorsque des contraintes de gabarit et de poids doivent être respectées lors du transport. Les transformateurs monophasés peuvent être couplés pour fournir de l'énergie à un système triphasé.

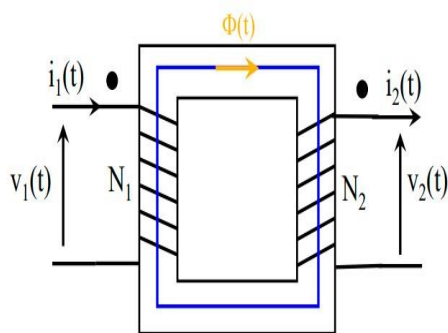
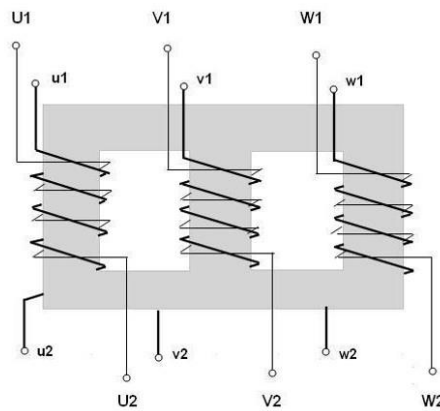


Figure II-7 : transformateur monophasé

##### II-5-1-2 Transformateur triphasé :

Le transformateur triphasé est le type le plus couramment utilisé. Habituellement, il est équipé d'un enroulement secondaire par phase, mais dans certaines applications spécifiques, comme pour l'alimentation d'un pont redresseur polyphasé, il peut comporter plusieurs enroulements secondaires par phase.

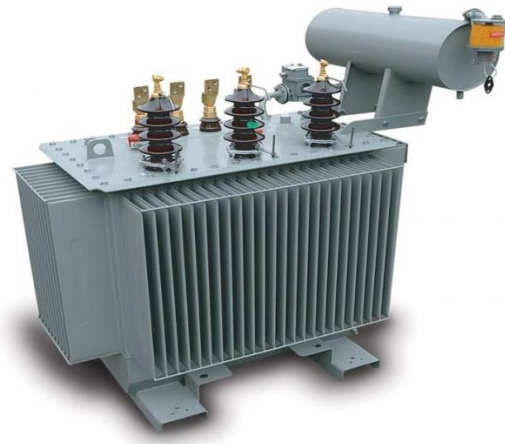
La fonction d'un transformateur triphasé est de fournir aux consommateurs une électricité stable et sûre grâce à un système électrique triphasé AC (courant alternatif). La taille, la conception, la puissance en voltampères et les capacités de charge du transformateur triphasé varient en fonction de l'industrie ou de l'application.



a) Schéma équivalent de transformateur triphasé



b) transformateur à sec



c) Transformateur immergé de l'huile

Figure II-8 : transformateur triphasé

**II-5-1-3 L'autotransformateur :**

Un autotransformateur, est un transformateur électrique ordinaire comportant un seul enroulement. La bobine possède au moins trois points de connexion électrique. La source électrique et la charge sont connectées à leur propre point de connexion. Cependant, le principe de ce type de transformateur reste le même : il va lui aussi convertir le courant. Seulement, cette conversion se fait par le biais d'une seule bobine. En fait, l'un des côtés de la bobine va remplir la fonction de l'enroulement primaire tandis que le côté opposé remplira la fonction d'enroulement secondaire.

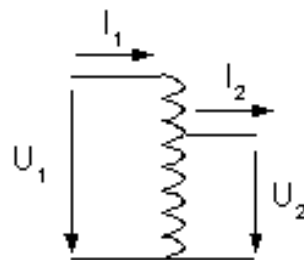


Figure II-9 : Autotransformateur

**II-5-4 Transformateur de distribution et de puissance :**

Les transformateurs de distribution sont largement utilisés pour abaisser la tension du réseau, souvent depuis 20 kV, afin de la rendre adaptée aux utilisateurs finaux, typiquement à une tension triphasée de 400 V en France. Ces transformateurs ont une puissance de quelques kVA environ.

En revanche, les transformateurs de puissance constituent la majorité des autres transformateurs électriques présents sur le réseau haute tension. Ils sont capables de gérer des puissances et des tensions allant jusqu'à plusieurs centaines de MVA et plusieurs centaines de kV.



**Figure II-10 :** Transformateur de puissance

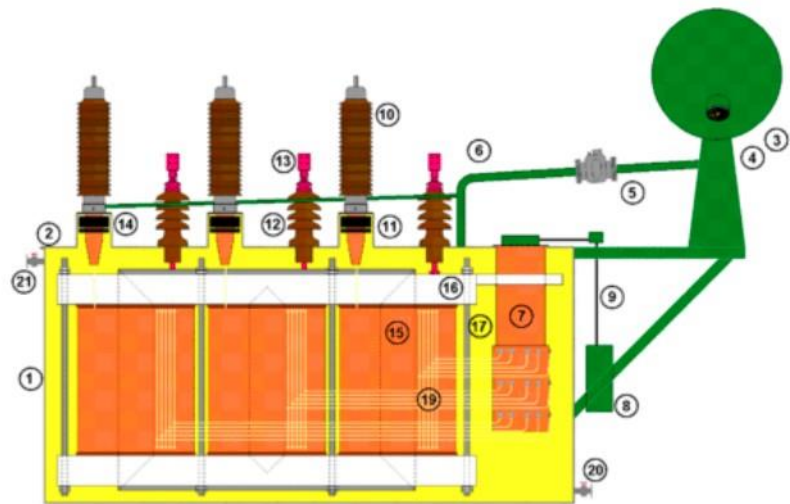


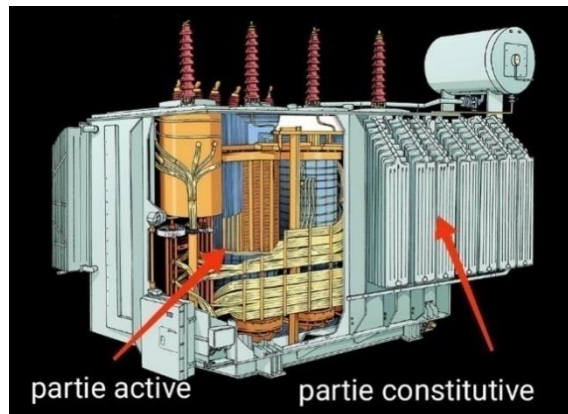
Figure II-11 : Vue intérieure d'un transformateur, type colonne

1	Cuve
2	Couvercle
3	Conservateur
4	Indicateur de niveau d'huile
5	Relais piège à gaz ou Buchholz
6	Tuyau d'huile
7	Changeur de prises
8	Moteur électrique du changeur de prises.
9	Transmission mécanique du changeur de prises
10	Traversée du primaire
11	Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur.
12	Traversée du secondaire
13	Connexion du secondaire avec l'extérieur
14	Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur.
15	Enroulements.
16	Noyau magnétique
17	Élément mécanique maintenant le noyau magnétique et les enroulements.
18	Connexion du changeur de prises aux enroulements.
19	Robinet d'huile
20	Robinet d'air.

TableauII-1 :les éléments de ce transformateur[20]

-Le transformateur est composé de deux éléments fondamentaux :

- La partie constitutive assure la protection et la fixation de la première partie
- La partie active est dédiée à la conversion de l'énergie.



**Figure II-12:** Constitutions d'un transformateur triphasé.

### II-6-1 La partie constitutive :

Les éléments mécaniques présents dans cette section sont utilisés pour protéger, fixer et refroidir la partie active du transformateur. Ces éléments comprennent : [21]

#### a) Le conservateur d'huile :

La structure du conservateur d'huile comprend un corps principal cylindrique soudé avec des plaques d'acier, représentant environ 10 % du volume total du réservoir d'huile. Il est positionné horizontalement au sommet du réservoir d'huile du transformateur. À l'intérieur, l'huile est connectée au réservoir principal via un tuyau relié au relais de gaz, permettant ainsi une libre expansion et contraction du niveau d'huile en réponse aux variations de température. Une jauge de niveau d'huile en verre, montée sur le côté du conservateur, permet de surveiller en temps réel les fluctuations du niveau d'huile.



**Figure II-13 :** Le conservateur d'huile

#### b) Le couvercle :

s'agit d'un élément crucial de la cuve car il constitue la partie supérieure du transformateur, où plusieurs composants sont agencés :

- Borne  $B_T$
- Borne HTA .
- Pattes de suspension.
- Prise de terre.
- Trous pour l'emplacement
- La manette de réglage de la tension et les dispositifs de fixation des éclateurs sont des éléments essentiels intégrés dans la partie supérieure de la cuve du transformateur.



**Figure II-14 :**Le couvercle de transformateur

### c) La cuve :

Les transformateurs sont dotés de cuves en tôle d'acier spécialement conçues pour supporter les contraintes pendant leur déplacement. Le couvercle de ces cuves est fixé à l'aide de boulons ou par soudure, avec un angle d'inclinaison d'au moins  $1^\circ$  pour favoriser le drainage des eaux de pluie. Des joints en caoutchouc artificiel sont utilisés pour assurer une parfaite étanchéité. Les cuves font l'objet de tests sous vide afin de vérifier cette étanchéité. De plus, elles sont revêtues d'un matériau anti-corrosion pour résister efficacement aux conditions environnementales extérieures.[22]



**Figure II-15 :** La cuve de transformateur

#### **d) Les traversées :**

Les traversées pour transformateur TRAVESCA sont constituées d'un corps isolant sec en RIP (Resin Imprégnâtes Paper). Ce matériau isolant est obtenu par l'enroulement de papier crêpé autour d'un conducteur ou tube central, intégrant des couches conductrices stratégiquement positionnées pour une répartition uniforme du champ électrique. Le tout est imprégné sous vide avec de la résine époxyde. Cette méthode assure un fonctionnement sécurisé sur une longue durée, en garantissant une bonne répartition du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle.



**Figure II-16 :** Les traversées de transformateur

#### **e) -Le liquide diélectrique :**

Les huiles diélectriques sont essentielles pour les transformateurs. Elles servent principalement à refroidir le circuit magnétique et les enroulements en dissipant la chaleur générée. Par conséquent, il est crucial de les renouveler régulièrement.

L'huile de transformateur joue un rôle vital dans la préservation et le bon fonctionnement de l'appareil. Elle isole les parties conductrices des courants électriques et dissipe la chaleur grâce à ses propriétés de refroidissement. Cela se traduit par une prolongation de la durée de

vie du transformateur, une amélioration de son efficacité et une réduction des coûts de maintenance.

### II-6-2 La partie active :

Elle englobe à la fois le circuit magnétique et les enroulements.

#### A) Le circuit magnétique :

Pendant de nombreuses années, les circuits magnétiques ont été construits à partir de tôles magnétiques en fer laminées à froid, connues sous le nom de "cristaux orientés", conçues pour optimiser le flux magnétique dans leur direction. Ces tôles sont recouvertes en surface de carlite, un revêtement minéral isolant. Le choix des tôles et la conception globale du circuit magnétique dépendent de l'induction magnétique recherchée, de l'épaisseur des tôles et de leurs pertes spécifiques. Habituellement, cette induction atteint environ 1,7 tesla et reste en dessous de la zone de saturation de la courbe B(H) du matériau, où B (induction magnétique) est proportionnelle à H (champ magnétique). Ces méthodes visent toutes à minimiser les pertes par hystérésis, aussi appelées pertes fer.[23]

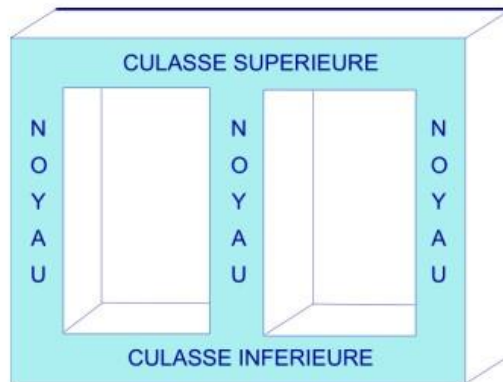


Figure II-17-A : Circuit magnétique triphasé à 3 colonnes

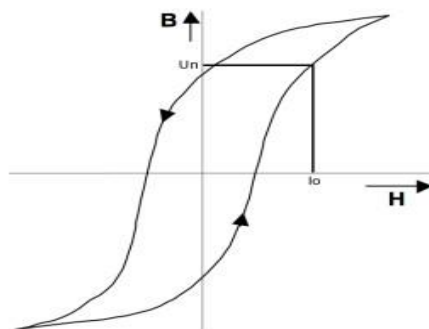


Figure II-17-B : Hystérésis du circuit magnétique

#### A-1) La technologie en colonnes :

Dans la technologie des transformateurs à colonnes, les chemins de retour du flux magnétique traversent des jambes du circuit magnétique, autour desquelles sont enroulés de manière concentrique les principaux enroulements. Chaque phase électrique d'un transformateur triphasé possède une jambe de circuit magnétique distincte. Ce type de transformateur est

largement utilisé dans le monde entier pour diverses applications. Il existe deux techniques de bobinage dans la technologie à colonne : le bobinage en couches et le bobinage en galettes

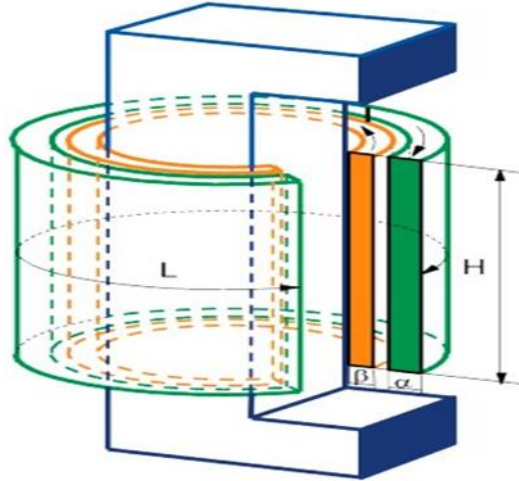
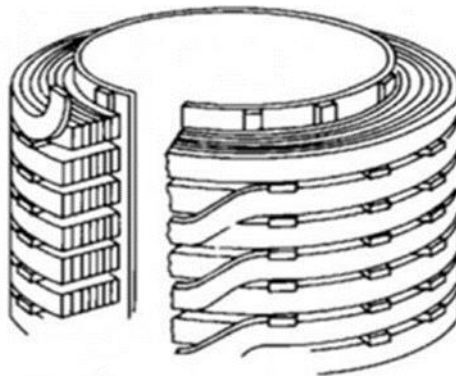


Figure e II-18 : La technologie en colonne

#### A-1-1) Colonne en galette : [24]

L'utilisation des enroulements en galettes permet de répartir uniformément la tension sur toute la hauteur de la bobine, contrairement aux enroulements en couches où la tension est concentrée dans l'épaisseur du bobinage. Cette méthode réduit les exigences d'isolation par rapport aux enroulements longue couche. En général, les enroulements en galettes sont essentiels pour maximiser l'utilisation de l'espace.

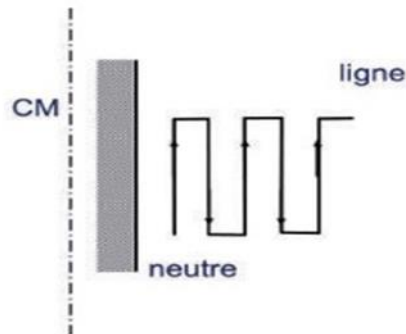
Traditionnellement, un seul conducteur est utilisé pour tout l'enroulement, ce qui simplifie sa réalisation. Pour optimiser la distribution des contraintes électriques, plusieurs méthodes de bobinage et de connexion des conducteurs sont utilisées, telles que les galettes simples, les galettes à spires entrelacées et les galettes inter-écrans.



FigureII-19 : Colonne en galettes

**A-1-2) Colonne en couches :**

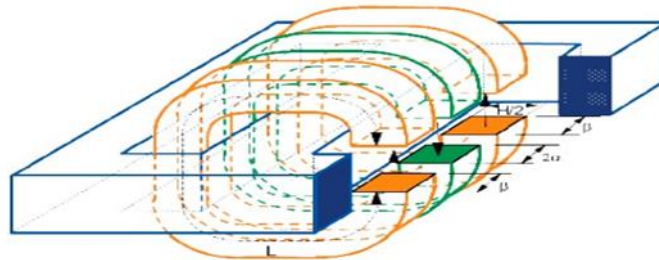
Cette construction présente une capacité particulière à répartir efficacement les chocs de foudre le long des spires, nécessitant une isolation électrique adéquate entre les couches des enroulements. En général, les enroulements en couches sont utilisés pour les applications à haute tension, permettant ainsi d'obtenir la tension totale de l'enroulement en fonction de l'épaisseur de la bobine.



**FigureII-20** : Colonne en couches

**A-2) La technologie en cuirassé :**

La technologie cuirassée utilise le circuit magnétique pour envelopper spécifiquement les bobinages hauts et basse tension d'une phase donnée. Les chemins de retour du flux magnétique passent à travers le circuit magnétique, qui les entoure de l'extérieur. Cette approche est connue pour sa compacité. La construction des bobinages et l'assemblage des tonnes de circuit magnétique nécessitent une expérience et une main-d'œuvre considérables.



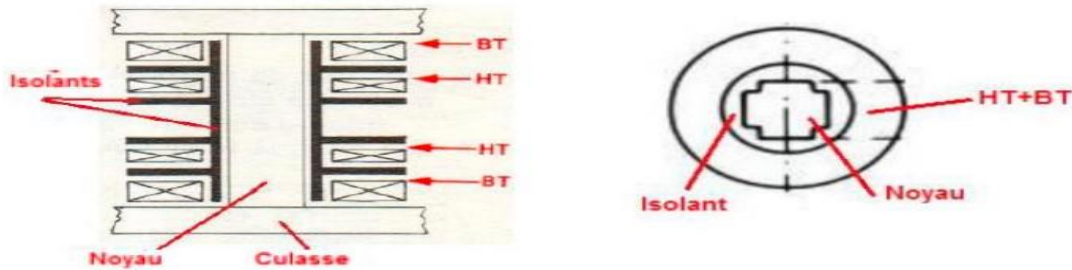
**FigureII-21** : La technologie en cuirassé

**B) Le circuit électrique :**

Les enroulements sont généralement réalisés en cuivre, sous forme circulaire ou rectangulaire. Le choix du profil des conducteurs dépend de la densité du courant qu'ils doivent supporter : des conducteurs de section circulaire (jusqu'à 5 mm<sup>2</sup>), des méplats regroupant plusieurs fils joints reliés aux extrémités, ou des barreaux de cuivre plein. Les spires sont enroulées sur toute la hauteur de la colonne, en longues couches concentriques qui s'étendent d'une extrémité à l'autre. Les bobines ont une forme cylindrique, isolées les unes des autres avec du vernis synthétique. Le nombre de spires dépend à la fois de la tension appliquée et du courant traversant. [25]

**B-1) Enroulements alternés (à galettes) :**

Les bobinages HT et BT sont réalisés sous forme de galettes et disposés alternativement. Dans cette disposition, les bobines(BT) sont disposées contre le fer de la culasse.

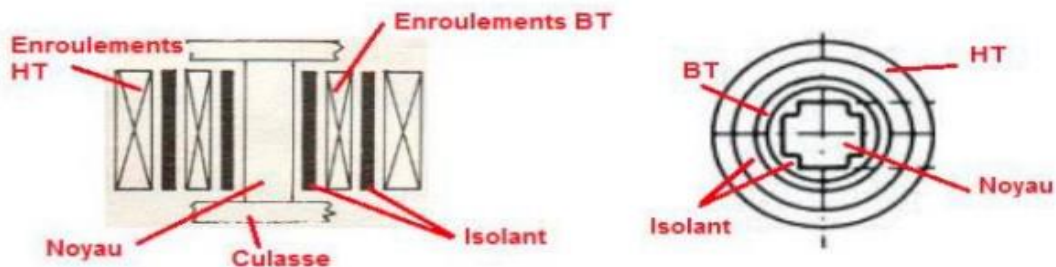


**B-2) Enroulements concentrique double :[26]**

Le noyau est enroulé avec la première moitié du bobinage basse tension, qui est ensuite isolé. Ensuite, le bobinage haute tension est enroulé autour du noyau et isolé à son tour. Enfin, on termine par l'enroulement de la deuxième moitié du bobinage basse tension. Ainsi, le bobinage haute tension est positionné entre les deux moitiés du bobinage basse tension, formant ainsi une structure en sandwich.

**B-3) Enroulements concentriques simple :[20]**

Cette disposition implique que l'enroulement BT soit enroulé autour de la partie du noyau, puis que l'enroulement HT soit enroulé sur l'enroulement BT. L'avantage majeur de l'enroulement concentrique est qu'il résiste énormément aux effets des courants de court-circuit.



**B-4) Enroulements mixtes :**

Il s'agit d'une combinaison des deux premières techniques d'enroulement (en galettes et concentrique), où l'enroulement est réalisé de manière concentrique mais avec l'enroulement haute tension en forme de galettes.

**II-7 Couplage des Transformateurs triphasés:**

a) Repérage côté HT : Utilisation de lettres majuscules : **Y** pour étoile, **D** pour triangle, **Z** pour zig-zag.

b) Repérage côté BT : Utilisation de lettres minuscules : **y** pour étoile, **d** pour triangle, **z** pour zig-zag.

a) Repérage côté HT :

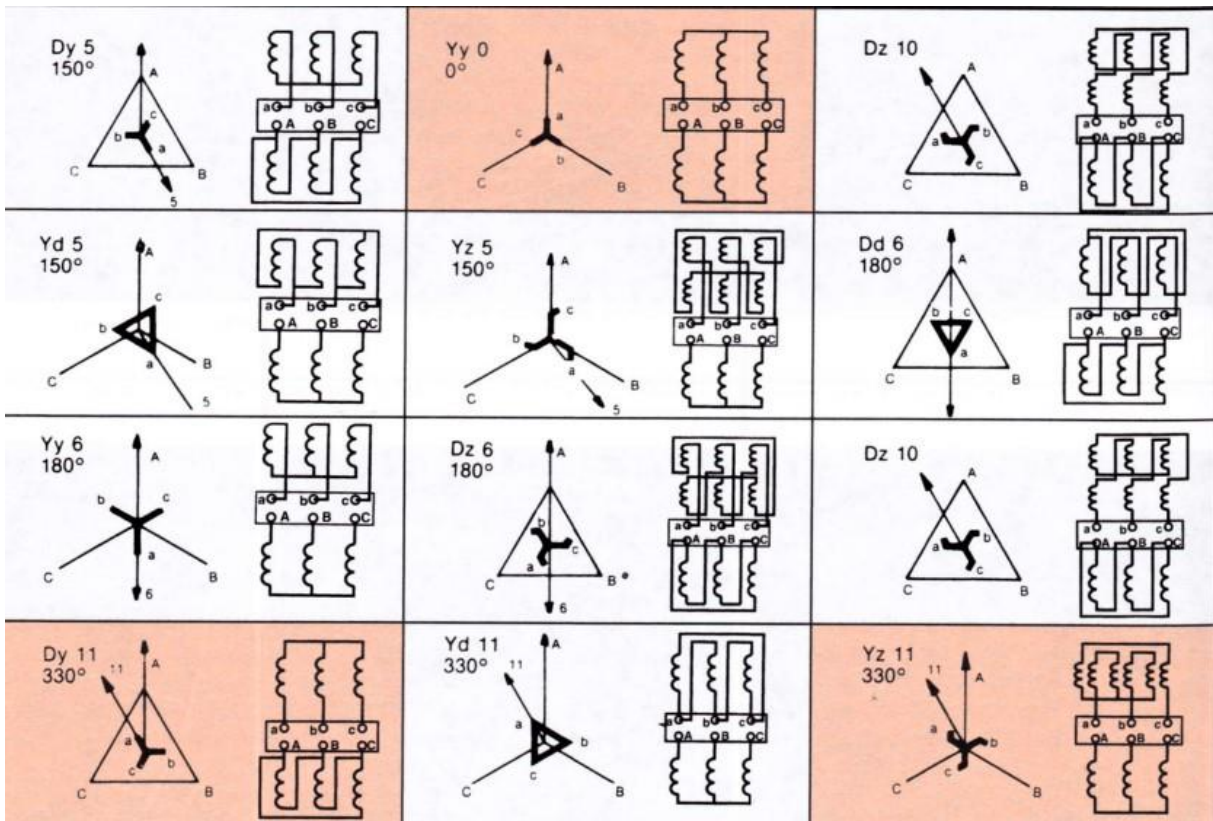


Figure II-22 : Couplage des Transformateurs triphasés[23]

II-7-1 Couplage étoile-étoile :[27]

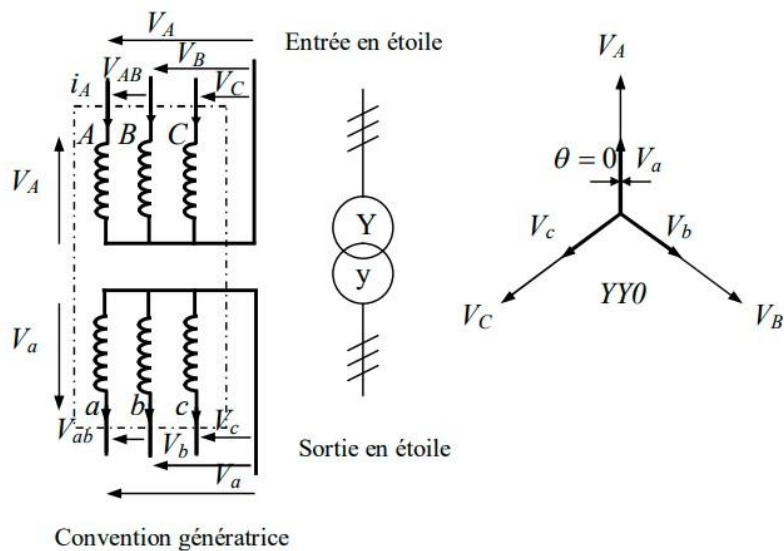
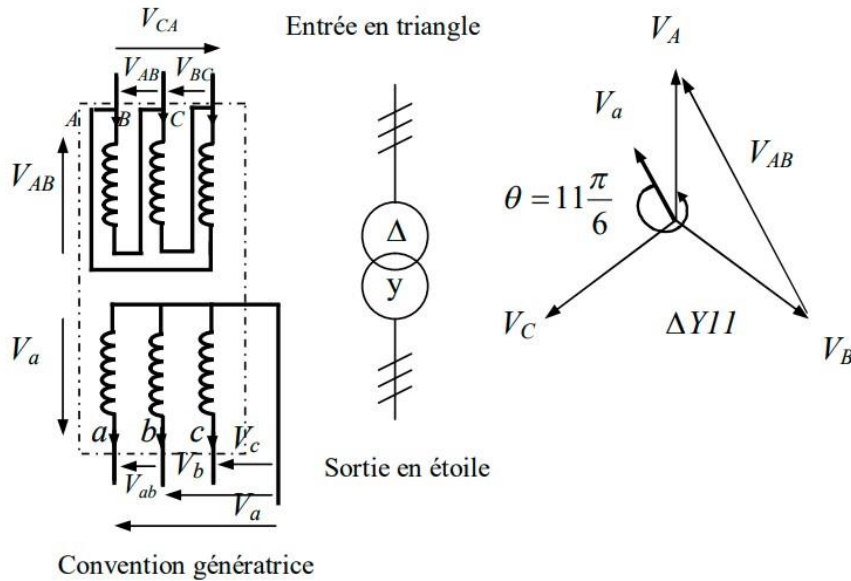


Figure II-23-1 : Couplage étoile-étoile d'un transformateur triphasé

Avec /

- $V_a = \frac{V_{2max}}{m} \sin(\omega t)$
- $V_b = \frac{V_{2max}}{m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$
- $V_c = \frac{V_{2max}}{m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$

**I-7-2 Couplage triangle-étoile :**



**Figure II-23-2 :** Couplage triangle-étoile d'un transformateur triphasé

Avec :

- $V_a = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - 11 \frac{\pi}{6})$
- $V_b = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - 11 \frac{\pi}{6})$
- $V_c = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - 11 \frac{\pi}{6})$

II-7-3 Couplage triangle-triangle :

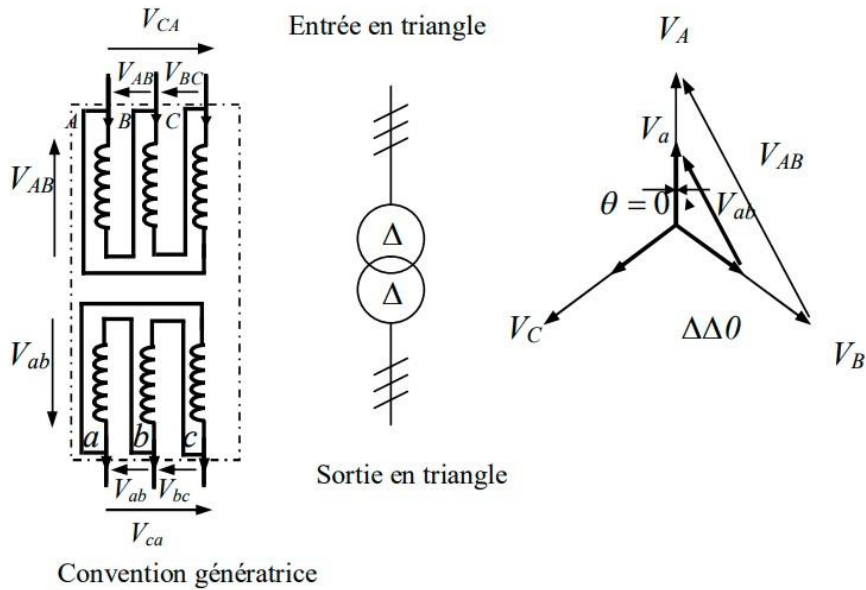


Figure II-23-3 : Couplage triangle-triangle d'un transformateur triphasé

Avec :

- $V_a = \frac{V_{2max}}{m} \sin(\omega t)$
- $V_b = \frac{V_{2max}}{m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$
- $V_c = \frac{V_{2max}}{m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$

II-7-4 Couplage étoile-triangle : [27]

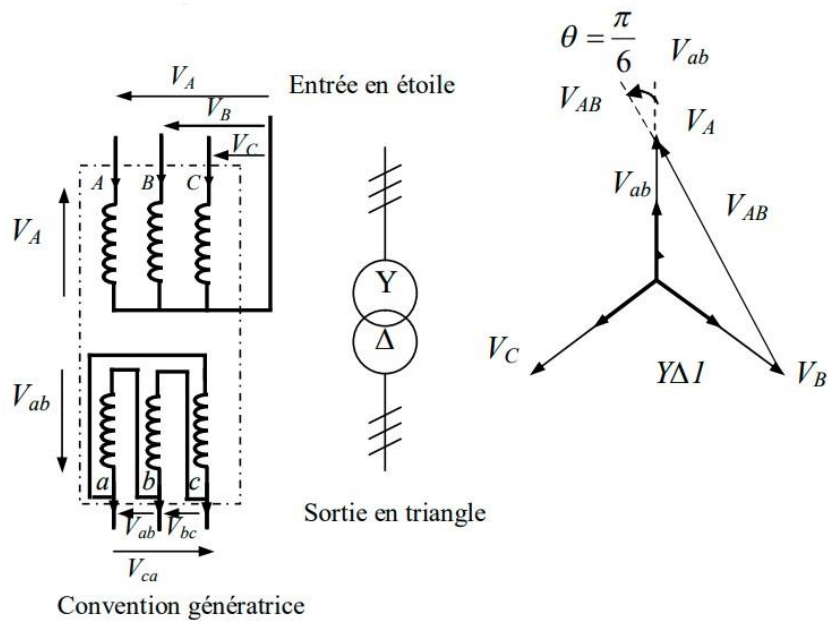
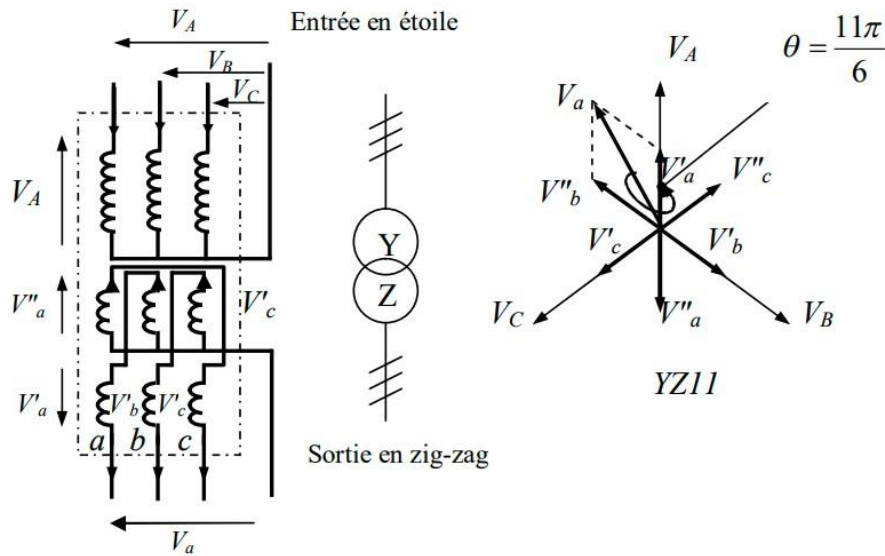


Figure II-23-4 : Couplage étoile-triangle d'un transformateur triphasé

Avec

- $V_a = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - 11 \frac{\pi}{6})$
- $V_b = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - 11 \frac{\pi}{6})$
- $V_c = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - 11 \frac{\pi}{6})$

**II-7-5 Couplage étoile zig-zag :**



**Figure II-23-5 :** Couplage étoile zig-zag d'un transformateur triphasé

Avec :

- $V_a = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - 11 \frac{\pi}{6})$
- $V_b = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - 11 \frac{\pi}{6})$
- $V_c = \frac{V_{max}}{m} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - 11 \frac{\pi}{6})$

**II-8 Choix du mode de couplage :**

- **le couplage étoile :** pour les très hautes tensions, où chaque enroulement supporte une tension individuelle.

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} r^2$$

- **le couplage triangle :** pour les forts courants, où l'intensité est répartie par enroulement.

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Pour obtenir deux tensions différentes, une basse pour l'éclairage et une élevée pour le chauffage d'un moteur, on utilise un couplage étoile au secondaire, similaire à celui utilisé pour les transformateurs de distribution.

- **Le couplage étoile-étoile (Yy) :** est utilisé dans les transformateurs abaisseurs de tension pour relier le réseau haute tension à la moyenne tension.

- **Le couplage triangle-étoile (Dy) :** est employé dans les transformateurs de distribution comme transformateur élévateur de tension à la sortie des centrales de production d'électricité.
- **Le couplage étoile-zig-zag (Yz) :** est utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser les déséquilibres.

**II-9 Rapport de transformation :**

La relation de transformation entre les grandeurs équivalentes du primaire et du secondaire ne se base pas uniquement sur le nombre de spires, mais aussi sur la manière dont les enroulements sont interconnectés. Ainsi, lorsqu'on parle d'un transformateur triphasé, il est essentiel de préciser les différents types de couplage utilisés.

**1 :Rapport de transformation par colonne  $m_c$  :**

Il est défini comme le rapport du nombre de spires du secondaire par rapport au primaire.  $m_c = \frac{N_2}{N_1}$

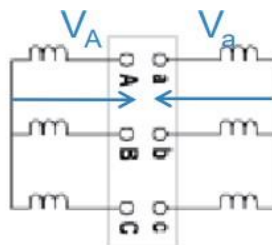
**2 :Rapport de transformation par phase  $m_{ph}$  :**

C'est le rapport entre la tension composée à vide du secondaire et la tension composée du primaire.

$$m_{ph} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}}$$

Exemple :

**Couplage Yy :**



$$m_{ph} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_a}{V_A} = \frac{N_2}{N_1} = m_c$$

**II-10 Le système de réglage de tension :[28]**

La tension et la fréquence jouent des rôles cruciaux dans la qualité de l'énergie électrique, impliquant divers acteurs du réseau tels que les clients, les distributeurs et les producteurs, tous connectés au même point nodal.

Il est essentiel d'ajuster la tension pour optimiser l'utilisation du réseau, assurant ainsi la sécurité en maintenant la tension d'alimentation des clients dans les limites contractuelles, respectant les exigences opérationnelles des équipements, réduisant les pertes et optimisant l'utilisation des infrastructures de transport.

Chaque contrat de fourniture spécifie la tension nominale d'alimentation ainsi que la plage de variation acceptable pour les clients et les distributeurs. Le respect de ces paramètres est crucial car ils déterminent la capacité des équipements des clients à tout moment :

- Des tensions trop basses peuvent entraîner des surcharges dans les lignes, perturber le bon fonctionnement des protections et compromettre la stabilité des auxiliaires des installations de production.
- Des tensions trop élevées peuvent causer le vieillissement prématuré voire la destruction des équipements connectés.

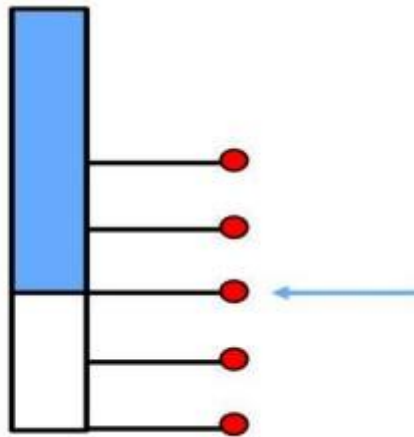
Sur les réseaux électriques, le réglage de la tension est assuré par des régulateurs automatiques installés sur les transformateurs HTB/HTA et HTA/MT. Dans les transformateurs couplés en étoile, le réglage est généralement positionné du côté du neutre où les contraintes sont moindres.

Lorsque le réglage est effectué dans une plage de  $\pm 10\%$  à  $\pm 12\%$ , des prises sont placées sur un enroulement auxiliaire, souvent désigné comme l'enroulement de réglage en série avec l'enroulement HT.

Le transformateur équipé d'un régulateur en charge permet de convertir la tension HTA en basse tension tout en ajustant automatiquement cette tension dans une plage adaptée en fonction de la charge à alimenter. Les tensions au point de connexion primaire et les variations de charge au secondaire influencent son mode de fonctionnement. Deux principes sont essentiels à cet égard :

#### II-10-1 Régleur à vide :

Il s'agit d'utiliser des prises de réglage fixes, spécifiquement adaptées aux réseaux présentant une charge stable (à vide). Lors de l'installation, on ajuste le rapport de transformation en ajoutant ou en retirant des spires sur les enroulements haute tension, puis en positionnant le sélecteur fixe sur les bornes appropriées. Cela permet de maintenir la tension secondaire dans la plage autorisée tout au long du cycle de fonctionnement. [20]



**Figure II-24 :** Un régulateur hors tension

#### II-10-2 Régleur en charge :

De nombreux transformateurs de puissance sont équipés d'enroulements à haute tension comportant des spires supplémentaires en série. Ces spires permettent de régler mécaniquement et électriquement la tension sur une plage spécifique. Un interrupteur de sélection est installé dans un réservoir d'huile distinct, connecté au conservateur.

Ce type d'interrupteur, actionné par ressort, assure une réponse rapide et présente des impédances de transition résistives. Le régleur en charge est conçu pour ajuster automatiquement la tension secondaire pendant le fonctionnement, et il intègre un relais de protection pour optimiser en permanence le rapport de transformation.

L'interrupteur de sélection peut être relevé pour faciliter les divers contrôles à effectuer, et l'huile du réservoir peut être remplacée de manière autonome. Le régleur en charge est doté d'un mécanisme motorisé permettant le contrôle à distance ou local.

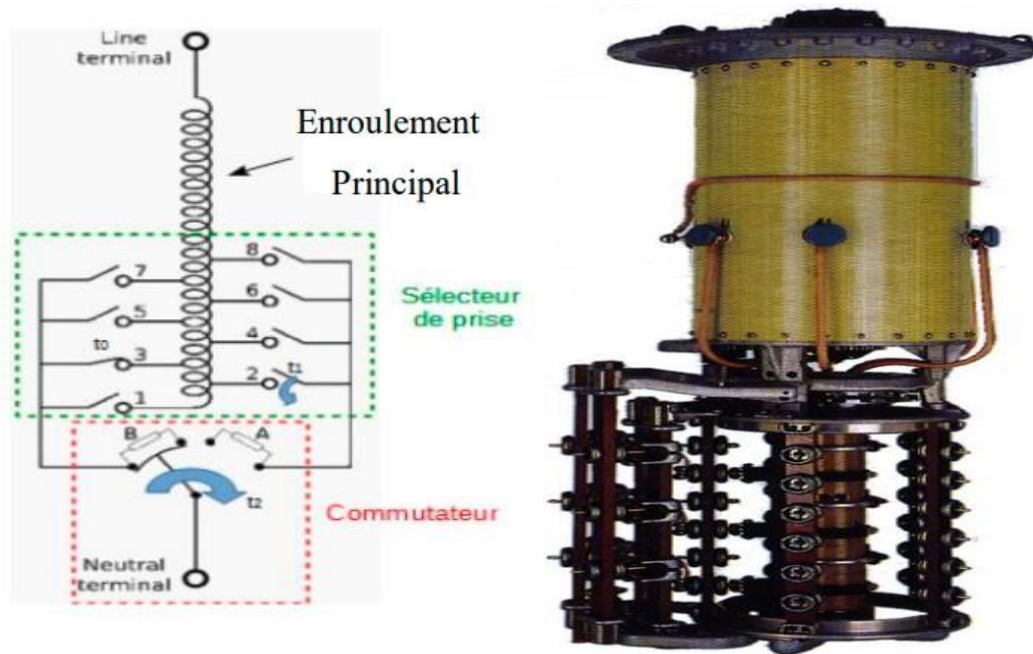


Figure II-25: Régleur en charge et Système de commutation

### II-11 Conclusion :

Le transformateur de puissance est une machine électrique statique qui convertit l'énergie électrique en utilisant la loi de l'induction électromagnétique. Ces équipements sont complexes et doivent résister à diverses contraintes tout au long de leur cycle de vie. Bien que leur fiabilité soit généralement élevée, les transformateurs demeurent des composants critiques pour tout réseau électrique. Les défaillances des transformateurs peuvent parfois avoir des conséquences dévastatrices.

Il est donc essentiel de garantir efficacement la maintenance et le dépannage des transformateurs afin d'optimiser leur fonctionnement et d'assurer une transmission fiable de l'énergie électrique à travers ces transformateurs.

# Chapitre III :

## Protection des transformateurs contre les surtensions

## Chapitre III :Protection des transformateurs contre les surtensions

### III-1 Introduction:

Les transformateurs sont des éléments cruciaux dans les réseaux électriques, nécessitant une protection efficace contre tous types de défauts. Les systèmes de protection sont conçus pour prévenir les conséquences dangereuses des incidents, tant pour les individus que pour le matériel. Leur rôle essentiel comprend :

- Réduire les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques subies par le matériel.
- Garantir la sécurité des personnes contre les risques électriques.
- Maintenir la stabilité du réseau.

Une approche consiste à renforcer l'isolement des installations en augmentant les distances d'isolement. De plus, il est crucial de limiter les surtensions à l'aide de dispositifs de protection comme les paratonnerres, parafoudres et éclateurs. Toutes ces mesures visent à détourner le courant vers la terre pour protéger contre les surtensions internes et externes.

### III-2 Protections internes :

#### III-2-1 Relais Buchholz :

Le relais Buchholz est crucial pour protéger et surveiller les transformateurs utilisant des liquides diélectriques. Il est équipé d'un bac de récupération et de bobines de mise à la terre, permettant également de contrôler séparément les traversées remplies d'huile ou les boîtes de connexion de câbles. Intégré au circuit de refroidissement de l'appareil à protéger, ce dispositif réagit aux anomalies telles que la formation de gaz, la perte de liquide diélectrique ou un débit excessif. Il émet des signaux d'alarme ou coupe l'alimentation pour éviter tout dommage grave voire la destruction du transformateur. Ses principales fonctions incluent :

- Détection et signalement d'une augmentation du pourcentage de gaz dans le réservoir.
- Déconnexion du transformateur en cas de court-circuit électrique ou d'augmentation significative du courant.
- Détection et déconnexion complète du transformateur lorsque le niveau d'huile dans le réservoir atteint un seuil critique, prévenant ainsi tout risque d'incendie. [34]

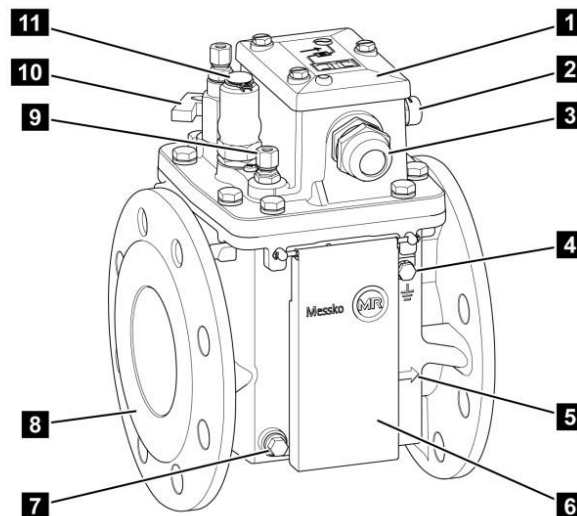


Figure : III-1 : Relais Buchholz

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

<b>1</b>	Boîte de raccordement	<b>2</b>	Compensateur de pression
<b>3</b>	Presse-étoupe (également présent sur le côté opposé)	<b>4</b>	Vis de mise à la terre
<b>5</b>	Repère de la position de montage	<b>6</b>	Couvercle du voyant (en option)
<b>7</b>	Bouchon de vidange d'huile (également présent sur le côté opposé)	<b>8</b>	Bride (également présente sur le côté opposé)
<b>9</b>	Raccordement pour le test pneumatique (en option)	<b>10</b>	Vanne de prélèvement de gaz
<b>11</b>	Bouton test avec douille couvrante		

**Tableau III-1 : Relais Buchholz**

### III-2-1-1 Fonctionnement :

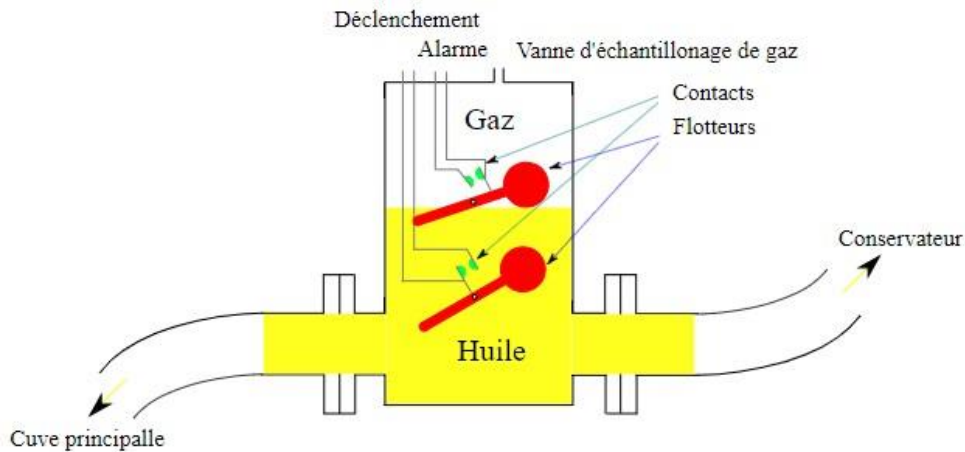
En général, les relais Buchholz sont équipés de deux contacts : l'un pour l'alarme et l'autre pour le déclenchement.

#### a) Fonction alarme :

Lors d'une surcharge, le gaz s'accumule progressivement dans la partie supérieure du relais, provoquant une baisse du niveau d'huile. Pour détecter cette situation, un système à flotteur est utilisé pour générer un signal d'alarme. Ce dispositif est également capable de repérer les fuites d'huile.

#### b) Fonction déclenchement :

En cas de défaut grave comme un court-circuit dans le bobinage ou entre les phases, ou encore un court-circuit à la masse, une grande quantité de gaz est générée, ce qui pousse un volume équivalent d'huile hors du transformateur. Ce déplacement d'huile active un commutateur relié à une palette positionnée dans le chemin de circulation de l'huile. Lors de cette opération, l'huile agit sur un flotteur qui arrête le processus et déclenche le disjoncteur avant que le défaut ne puisse causer plus de dommages.



**Figure III-2 :** relais Buchholz Fonction déclenchement

### III-2-2 Soupape de surpression :

Une soupape de sécurité, communément appelée soupape de décharge ou soupape de surpression (PRV), est utilisée pour réguler ou limiter la pression dans un système donné. Ce dispositif est conçu pour détecter et évacuer rapidement toute surpression imprévue dans la cuve du transformateur, assurant ainsi une ouverture rapide en cas de besoin. On la place habituellement sur la partie supérieure du transformateur, sinon la pression pourrait s'accumuler et causer une perturbation du processus, une défaillance de l'instrument ou de l'équipement, ou un incendie. En permettant au fluide sous pression de s'écouler d'un passage auxiliaire,

La conception ou la régulation de la soupape de décharge vise à s'ouvrir à une pression prédéfinie afin de préserver les récipients sous pression et autres équipements des pressions qui dépassent leurs limites de conception. La soupape de décharge devient le « chemin de moindre résistance » lorsque la pression de consigne est dépassée, car elle est contrainte de s'ouvrir et une partie du fluide est détournée par la voie auxiliaire.



**Figure III-3 :** Soupape de sécurité MPRV

## Chapitre III :Protection des transformateurs contre les surtensions

### III-2-3 DGPT :

Le Détecteur de Gaz, de Pression et de Température (DGPT) est crucial pour la protection des transformateurs utilisant des diélectriques liquides. Il surveille attentivement les anomalies telles que les décharges de gaz, les variations de pression et de température, susceptibles d'interrompre le fonctionnement du transformateur. Principalement installé sur les transformateurs entièrement immergés et hermétiquement fermés, il détecte les accumulations de gaz dans la partie supérieure du relais, déclenchant une alarme en cas de surpression. Le DGPT régule également la température de l'huile dans la cuve, déclenchant une alarme à 75°C et coupant l'alimentation à 80°C pour prévenir toute détérioration grave.[30]



Figure III-4 : DGPT2

### III-2-4 Indicateur de Niveau d'Huile :

L'indicateur de niveau d'huile des transformateurs est spécifiquement conçu pour évaluer et rapporter le niveau d'huile dans les réservoirs de transformateurs, les conservateurs d'huile et les changeurs de prises de soutien. Il est également désigné par l'abréviation OLI (pour Indicateur de Niveau de Liquide). Les deux types principaux d'indicateurs traditionnels sont la jauge à tube de verre et la jauge à aiguille pour le niveau d'huile.



Figure III-5 : Indicateur de Niveau d'Huile

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

Il génère une alarme de niveau haut ou bas pour les causes suivantes :

- Fuite d'huile
- Défaut du contact électrique
- Membrane du conservateur percée
- Manque ou excédant d'huile
- Problème de câblage
- Température ambiante anormalement

### III-2-5 Relais Image Thermique (Indicateur) :

L'image thermique repose sur le principe suivant : Une sonde de température est placée dans un puits au sommet du transformateur. La température de l'huile est transmise à un indicateur à travers un circuit électrique spécial (circuit de compensation). Ce circuit ajuste la température indiquée pour simuler, selon la charge, le point le plus chaud de l'enroulement. Le calibrage précis de ce circuit électrique permet d'estimer avec grande précision la température du point le plus chaud de l'enroulement en combinant la température de l'huile au sommet et celle du circuit de compensation.

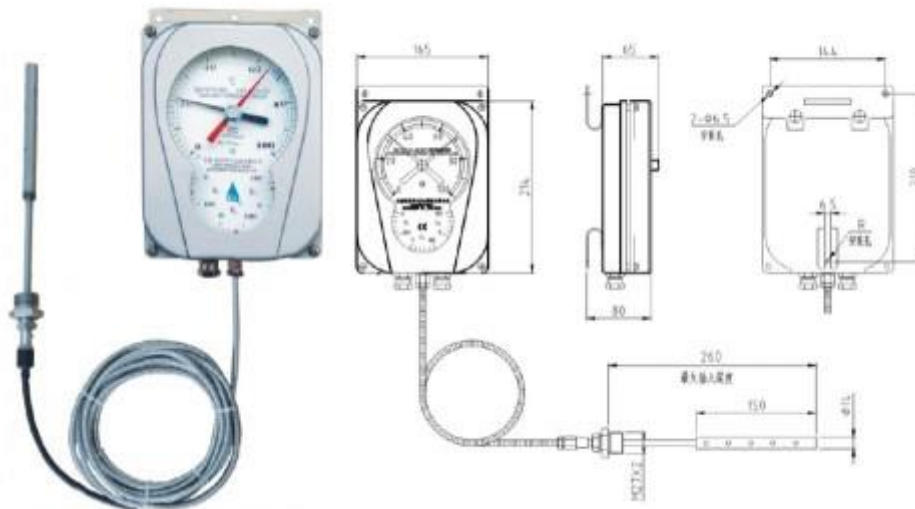


Figure III-6 : Indicateur de température de transformateur

### III-3 Protections externes :

#### III-3-1 La protection primaire :

Pour minimiser les dommages causés par la foudre, il est recommandé de sélectionner un point d'impact approprié qui protège le reste de la structure et facilite l'écoulement du courant vers le sol en réduisant l'impédance du chemin utilisé par la foudre.[31]

#### III-3-1-2 Paratonnerres :

Le principe repose sur la distance d'amorçage : une tige placée en haut de la structure à protéger capte la foudre et la dirige vers le réseau de terre. Il existe deux catégories de paratonnerres.

## Chapitre III :Protection des transformateurs contre les surtensions

### III-3-1-2-1 Le paratonnerre à tige simple (tige de Franklin) :[32]

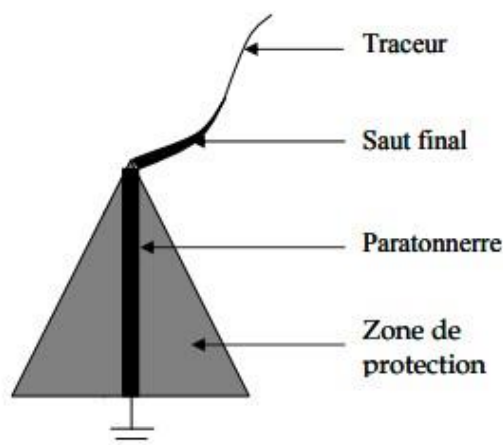
Il s'agit d'une simple tige en fer verticale et pointue installée en haut d'une structure pour servir de point d'impact en cas de foudre. Elle est reliée à la terre par une descente avec une prise de terre à faible impédance. Les rôles de cette tige sont les suivants :

- Amplifier le champ électrique à son extrémité pointue.
- Faciliter le départ de la décharge ascendante.
- Dévier la décharge descendante.
- Créer une zone de protection contre la foudre.



**Figure III-7:** Paratonnerre à tige simple

La zone de capture est l'espace précis où l'introduction d'un canal ionisé déclenchera immédiatement un coup de foudre au sommet de la tige.



**Figure III-8 :** Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple.

### III 3-1-2-2 Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA) :[33]

Il s'agit d'un paratonnerre à tige simple équipé d'un système électrique ou électronique qui génère une avance à l'amorçage, accélérant ainsi le processus de pré-décharge ascendante. Comparé à un paratonnerre à tige simple standard dans des conditions similaires, ce dispositif d'amorçage réduit le temps de propagation et de formation de la décharge ascendante. Il garantit une meilleure efficacité pour capturer la foudre qu'un paratonnerre passif à tige.

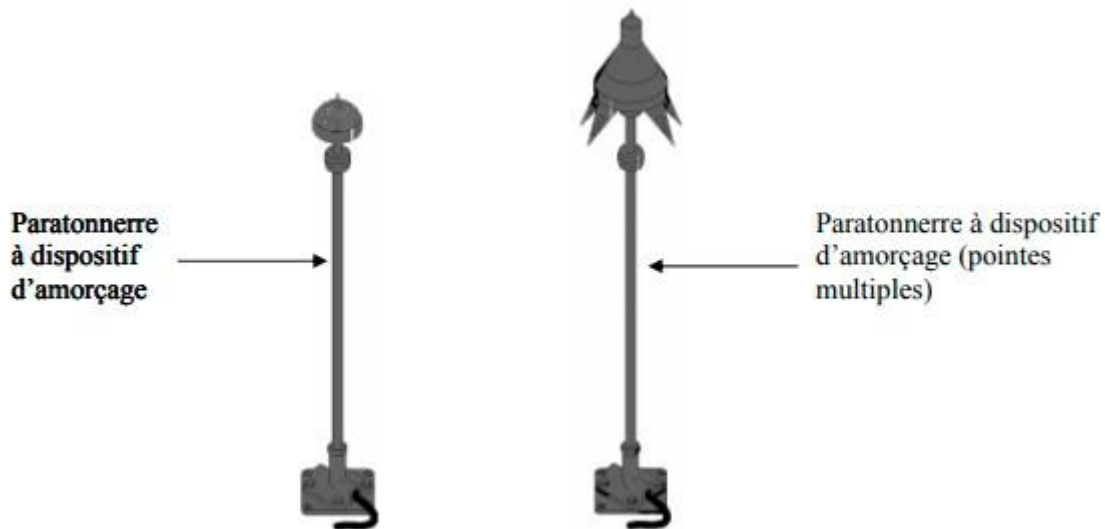


Figure III-9 : Paratonnerre à dispositif d'amorçage

### III 3-1-2-3 Le paratonnerre à cage maillée : (cage de Faraday) :

Le principe de la protection de type cage de Faraday est employé dans le paratonnerre à cage maillée. Ce système comprend un ensemble de conducteurs qui entourent une structure ou un bâtiment, caractérisé par la taille des mailles formées par les conducteurs disposés verticalement et horizontalement. Peu importe la finesse du maillage, la protection est assurée. Chaque point de la cage maillée est susceptible de subir un impact direct.

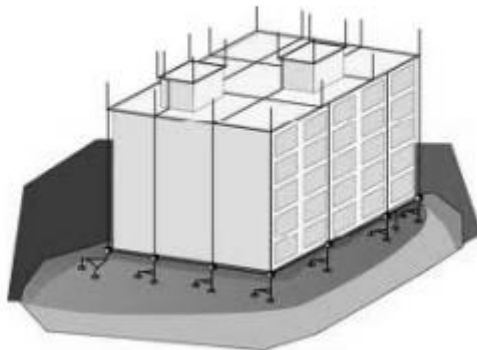


Figure III-10 : Paratonnerre à cage maillée

### III 3-1-2-4 Le paratonnerre à fils tendus (câbles de garde) :[34]

Ce système est composé d'un ou de plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger, reliant les câbles de garde, les conducteurs de phase, les pylônes et les chaînes d'isolateurs contre la foudre.

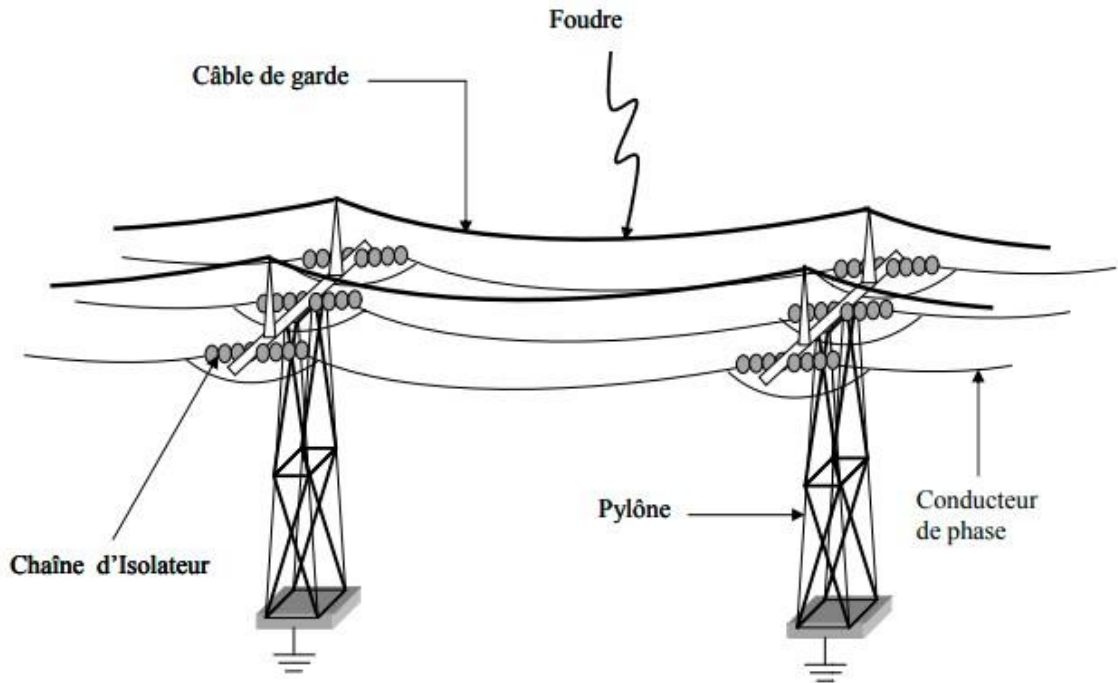


Figure III-11 : Schéma de câbles de garde

### III 3-1-2-5 Paratonnerre radioactif:

Ce système est composé d'un ou de plusieurs fils conducteurs tendus au-dessus des installations à protéger, reliant les câbles de garde, les conducteurs de phase, les pylônes et les chaînes d'isolateurs contre la foudre.



Figure III-12 :Paratonnerre radioactif

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

### III 3-1-2-6 Paratonnerre à haute tension impulsionnelle (pulsar) :

Ce type de paratonnerre est équipé d'un dispositif d'amorçage qui génère des impulsions de haute tension avec une fréquence et une amplitude contrôlée. Cela réduit le retard dans la formation de la décharge et favorise sa propagation dès les premières étapes de développement.

### III 3-1-2-7 Remarque :

Il y a environ dix ans, les câbles de garde étaient principalement installés aux entrées et sorties des postes pour des raisons principalement économiques. Aujourd'hui, SONELGAZ utilise ces câbles pour interconnecter l'ensemble du réseau national à haute tension (HT). Le diamètre du câble de garde est généralement inférieur ou égal à celui du conducteur de phase. En plus de son rôle protecteur, il contribue à l'amortissement des ondes de surtension dues à la foudre en réduisant l'impédance caractéristique des conducteurs de phase, et il peut également servir au blindage des lignes de télécommunications. Il est à noter que la plupart des coups de foudre sur les conducteurs entraînent des amorçages dans les réseaux dont les tensions ne dépassent pas 400 kV.

### III 3-2 Protection secondaire :

#### III 3-2-1 Les éclateurs :

La protection se compose généralement de deux électrodes : l'une est connectée à l'élément à protéger, tandis que l'autre est reliée à la terre, représentant ainsi le moyen le plus simple, le plus ancien, le plus robuste et le moins coûteux de mise à la terre. L'espace entre ces électrodes constitue un point de vulnérabilité dans le système électronique, généralement ajustable pour réguler la tension de déclenchement. Cette configuration permet d'éviter tout amorçage à des points critiques du réseau, ce qui pourrait avoir des conséquences graves.

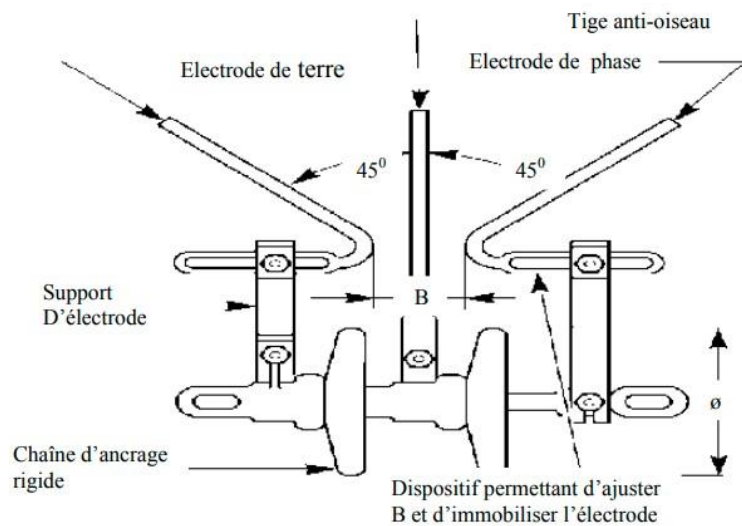


Figure III-13 : Eclateur avec tige anti-oiseaux

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

### III 3-2-1-1 Eclateur à tige : [35]

À l'intérieur du poste, des éclateurs à tiges sont utilisés pour les réseaux à neutre reliés à la terre, capables de supporter des courants de défaut franc pouvant atteindre 300 A.

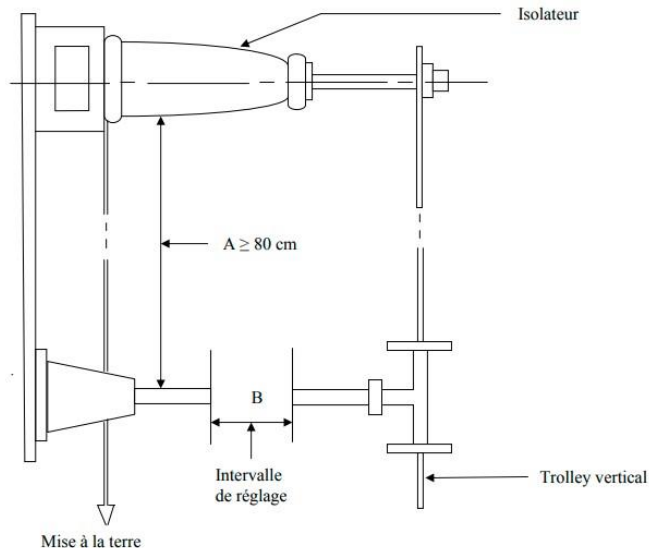


Figure III-14 : Eclateur a tige

### III 3-2-1-2 Avantage et inconvénients : [36]

- L'éclateur présente comme principal avantage son coût réduit. De plus, il est très robuste et facilement ajustable pour s'adapter à différentes fonctions. Cependant, ces avantages sont accompagnés de plusieurs inconvénients :
- Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur varient considérablement en fonction des conditions atmosphériques telles que la température, l'humidité et la pression, qui affectent l'ionisation de l'air entre les électrodes.
- La valeur de la surtension dépend de l'élément d'amorçage.
- Lorsqu'un éclateur est activé, un court-circuit se produit à la terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, qui persiste jusqu'à ce que les dispositifs de coupure l'interrompent (ce court-circuit est appelé courant de suite). Ainsi, l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de réenclenchement rapide est nécessaire.

### III 3-2-2 Les parafoudres : [37]

Les parafoudres sont des dispositifs de sécurité essentiels pour protéger les équipements de haute et moyenne tension contre les surtensions causées par des décharges de foudre ou des manœuvres de couplage dans les installations. Leur utilisation permet de réduire l'amplitude des surtensions et facilite le passage du courant vers la terre, contribuant ainsi à maintenir l'isolement des équipements et à améliorer la qualité du service. Bien que plus coûteux que les éclateurs, les parafoudres offrent une protection supérieure. Ils sont particulièrement adaptés à la protection des transformateurs, des câbles, des moteurs et d'autres équipements à haute et moyenne tension en raison de leur capacité à absorber l'énergie et de leur robustesse mécanique.

Sur le marché actuel, on trouve différents types de parafoudres :

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

---

- à oxyde de zinc avec enveloppe synthétique depuis les années 80,
- à oxyde de zinc depuis les années 70,
- au carbure de silicium et éclateurs (SiC).

Ces dispositifs ont des caractéristiques non linéaires, leur résistance interne diminuant fortement au-delà d'une certaine tension. Ils surpassent nettement les éclateurs en termes d'efficacité opérationnelle et ne présentent pas de retard significatif.



**Figure III-15 :** Parafoudre

### III 3-2-2-1 Parafoudre au carbure de silicium SiC à éclateurs :

Le parafoudre à SiC combine des résistances non linéaires en carbure de silicium avec des éclateurs. Lorsque la tension dépasse le seuil d'amorçage, les éclateurs s'activent, permettant au courant de décharge de circuler à travers les résistances. À mesure que la tension augmente, les résistances diminuent rapidement, réduisant ainsi la surtension. Une fois que la tension du réseau revient à la normale, le courant est maintenu à un faible niveau et peut être facilement interrompu par les éclateurs lors de son premier passage par zéro.

#### III 3-2-2-1-1 Principe de fonctionnement :

Dans ce type de parafoudre, un éclateur est associé à une varistance qui régule le courant après que l'onde de choc a été dissipée vers la terre. Une fois cette onde de choc déviée, le parafoudre est soumis uniquement à la tension du réseau, et le courant résiduel est contrôlé par la varistance. Cette dernière ajuste sa résistance pour maintenir la tension résiduelle près du niveau d'amorçage, diminuant à mesure que le courant augmente. Différentes méthodes ont été utilisées pour fabriquer des parafoudres intégrant varistances et éclateurs, avec la méthode traditionnelle utilisant des résistances en carbure de silicium (SiC).

#### Avantages :

- Le système est protégé contre les conditions atmosphériques grâce à une enveloppe étanche en porcelaine remplie de gaz sec (air ou azote).
- Un parafoudre à SiC peut efficacement réduire les surtensions de manœuvre, surtout en haute tension, améliorant ainsi le niveau de protection par rapport aux éclateurs.

## Chapitre III : Protection des transformateurs contre les surtensions

- Résout les problèmes sans nécessiter l'intervention de systèmes de protection supplémentaires comme les résistances en série avec les éclateurs, évitant ainsi la formation d'un front raide (onde coupée) lors de l'amorçage des éclateurs.

### Inconvénients :

- Pour un fonctionnement optimal, une répartition uniforme de la tension entre les éclateurs est cruciale, souvent réalisée avec des systèmes de répartition de tension résistifs ou capacitifs, ce qui complexifie et augmente le coût de l'appareil, potentiellement altérant sa fiabilité.

- Les céramiques en SiC ne supportent pas bien un écoulement prolongé de courant, donc un parafoudre ne doit pas être soumis à une tension continue temporaire, risquant autrement sa destruction en dissipant l'énergie requise.

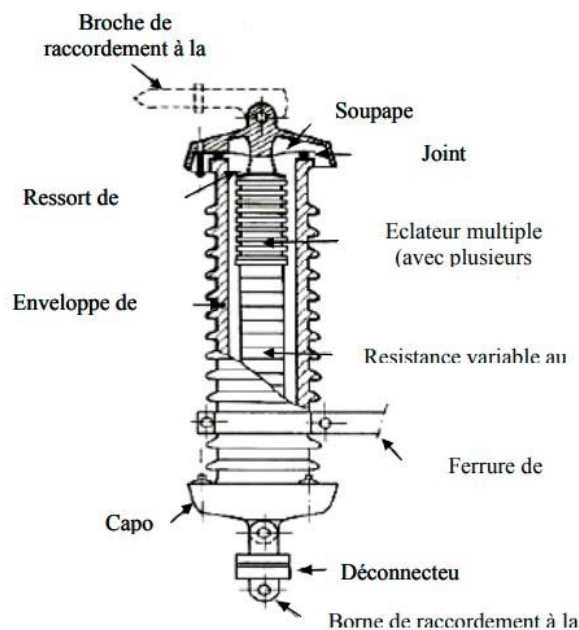


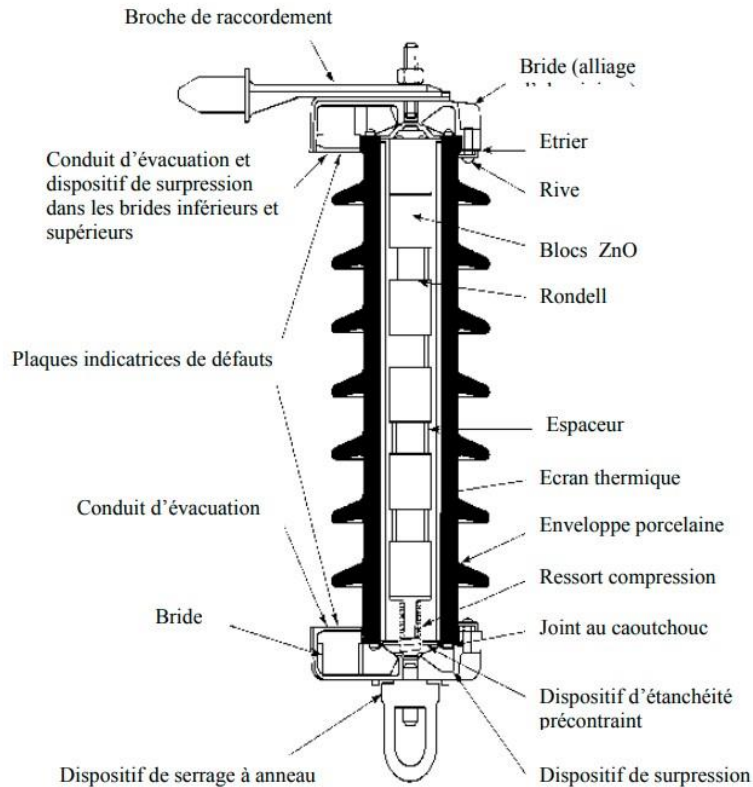
Figure III-16 : Parafoudre à résistance variable avec éclateur.

### III 3-2-2-2 parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) :

Le parafoudre à base d'oxyde de zinc (ZnO) est principalement constitué d'un montage en série de varistances ZnO, leur nombre déterminant la tension de fonctionnement. Grâce à l'avancée dans la fabrication de varistances ZnO aux caractéristiques exceptionnelles, la composition des parafoudres a évolué.

Certains fabricants se sont concentrés sur le développement de parafoudres exploitant ces varistances, offrant ainsi deux avantages majeurs :

- Ils possèdent une capacité d'absorption d'énergie élevée, adaptée à tous les types de réseaux, qu'il s'agisse d'équipements électroniques ou de transmissions à très haute tension (225 kV ou 400 kV).
- Leur coefficient de non-linéarité est si élevé qu'ils peuvent être conçus sans éclateurs ; leur partie active reste sous tension en permanence.



**Figure III-17 : Parafoudre à oxyde de zinc**

### III 3-2-2-1 Principe de fonctionnement :

Le parafoudre à base d'oxyde de zinc est constitué exclusivement d'une résistance variable fortement non linéaire. Lorsqu'il se produit une décharge, cette résistance passe de  $1,5 \text{ M}\Omega$  à la tension nominale de fonctionnement (avec un courant de fuite inférieur à  $10 \text{ mA}$ ) à environ  $15 \Omega$ . Une fois que le courant de décharge a traversé le parafoudre, sa tension aux bornes devient égale à celle du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre demeure extrêmement faible, proche de la valeur du courant de fuite vers la terre.

La forte non linéarité du parafoudre ZnO signifie qu'une variation importante du courant entraîne une faible variation de la tension aux bornes. [38]

#### Avantages :

- Grâce à leurs excellentes propriétés de varistances, les parafoudres à ZnO sont plus compacts que les parafoudres classiques.
- Ils offrent une réponse exceptionnelle aux surtensions à front raide en éliminant les éclateurs et en ayant une faible réponse temporelle des céramiques de ZnO. Cependant, des études sont en cours pour évaluer l'impact de l'inductance propre du parafoudre sur les surtensions à front très raide ( $< 100 \text{ ns}$ ).
- Les caractéristiques électriques des céramiques de ZnO restent stables après avoir absorbé des chocs énergétiques de très forts courants (quelques dizaines de nanosecondes).
- Les parafoudres à ZnO limitent les surtensions à des niveaux plus bas, assurant ainsi une protection améliorée du matériel.

## **Chapitre III :Protection des transformateurs contre les surtensions**

---

### **Inconvénients :**

- Ces avantages s'accompagnent d'un coût élevé par rapport aux éclateurs, bien que les parafoudres à ZnO soient plus économiques en haute tension qu'en moyenne tension par rapport aux parafoudres conventionnels.
- L'absorption de courants très élevés, comme ceux générés par la foudre, peut détériorer les caractéristiques électriques du parafoudre. Cela augmente la température à la tension de service et diminue sa capacité à absorber les chocs énergétiques, ce qui peut entraîner une accumulation de chaleur en conditions normales de fonctionnement.
- La caractéristique  $V(I)$  des varistances montre un coefficient de température négatif à faible courant. Une augmentation de la température ambiante accroît la consommation de puissance et, dans certaines conditions, peut entraîner une défaillance thermique du parafoudre.[39]

### **III-4 Conclusion :**

Les parafoudres à base d'oxyde métallique ont été discutés dans ce chapitre, illustrant la tendance mondiale à les utiliser comme protection contre les surtensions potentielles pouvant perturber le réseau de transport. Cela garantit ainsi le bon fonctionnement du système et la sécurité des clients. Il est crucial de comprendre les diverses contraintes électriques rencontrées dans le réseau, ainsi que la manière dont l'isolement répond à ces contraintes. Les caractéristiques des équipements de protection et les concepts et méthodes utilisés pour coordonner efficacement les isolations sont également essentiels pour une mise en œuvre réussie.

# Chapitre IV :

## Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

### V-1 Introduction :

Les données sur les pannes des transformateurs utilisés par SONELGAZ montrent que malgré une sélection éclairée, de nombreux transformateurs rencontrent des pannes ou des dysfonctionnements. Notre étude vise à examiner la protection contre les surtensions causées par les coups de foudre directs et indirects, qui sont parmi les principales causes de ces avaries. Deux principales méthodes de protection contre les surtensions sont principalement utilisées : les éclateurs et les parafoudres. Les parafoudres offrent une protection supérieure, mais à un coût nettement plus élevé. Les éclateurs, quant à eux, sont plus abordables et largement utilisés sur les réseaux aériens par SONELGAZ..

### IV-2 Etude du système de protection : [37]

#### -Positionnement correct du parafoudre pour protéger le transformateur :

Pour maintenir un taux d'échec inférieur à une valeur spécifique FR% tout au long de la durée de vie du transformateur, il est essentiel de positionner correctement le parafoudre. La protection adéquate du transformateur est indispensable pour atteindre ce taux d'échec inférieur à FR%.

#### -Nombre de coups de foudre pendant la durée de vie du transformateur :

Soit :

- $L_f$  : durée de vie du transformateur (années)
- $FR$  : taux d'échec maximal autorisé (%)
- $t_s$  : temps autorisé (années) =  $(L_f/FR).100$
- $N$  : nombre de coups de foudre par km<sup>2</sup>/an (fréquence de foudroiement)
- $X$  : facteur de réduction de la distance parafoudre-transformateur

Le nombre de coups de foudre  $N_s$  atteignant le transformateur pendant  $t_s$  est :  $N_s = N . t_s . X$

#### -Probabilité d'un coup de foudre en dehors de la période $t_s$ :

Pour éviter toute défaillance, il faut protéger le transformateur contre les coups de foudre aussi graves ou moins graves que ceux qui pourraient survenir une fois tous les  $N . t_s . X$  temps. La probabilité  $P_{10}$  d'obtenir un coup de foudre en dehors de cette période est :  $(P_{10}) = \left(\frac{1}{N.t_s.X}\right) . 100\%$

#### -Calcul de la distance parafoudre-transformateur :

Soit :

- $b$  : hauteur des fils de distribution (m)
- $Z$  : impédance de la ligne ( $\Omega$ )
- $H$  : hauteur du parafoudre (m)
- $S_f$  : facteur de blindage ( $0 < S_f < 1$ )
- $N_C$  : niveau de tenue à la foudre du transformateur (kV)
- $b_t$  : niveau de tenue à la foudre du transformateur (kV)

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

- $U_p$  : tension de protection du parafoudre (kV)
- $v$  : vitesse de propagation de l'onde (m/μs)
- $N_g$  : densité de foudroiement (coups/km<sup>2</sup>/an)

### -Données du système :

1-Tension de ligne : 30 kV

2-Nombre de fils de distribution : 3

3-Niveau céramique à l'emplacement : 24,15 jours

Soit :

$$b = 2.7 \text{ m}, Z = 450 \Omega, H = 11 \text{ m}, S_f = 0.5$$

$$N_C b_t = 170 \text{ KV}, U_p = 90 \text{ KV}, \text{ on exige :}$$

$$\text{un FR} = 5\%, L_f = 25 \text{ ans}, v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}.$$

En utilisant les formules :

- $N_g = 24.15_k^{(1.9 \pm 0.1)} (2.6 \pm 0.2) 10^{-3}$
- $N = 1.5(2.7 + 28.11^{0.6})(1 - 0.5) \cdot 10^{-6} \cdot 300$
- $t_s = \frac{25}{0.05} = 500 \text{ ans}$
- $P_{10} = \frac{1}{(0.0271 \times 500)} = 0.073$
- $P_{10} = e^{-0.02878 I_0} = 0.073 \Rightarrow I_0 = 91 \text{ kA}$
- $S_A = \frac{1}{\frac{1}{\frac{91}{2} \times \frac{450}{1.2}} + 1.5 \times 10^{-6} \cdot 300}} = 1966 \text{ kV}/\mu\text{s}$
- $l = \frac{(0.8 \times 170 - 90) \times 300}{2.1966} = 3.5 \text{ m}$

On obtient une distance parafoudre-transformateur de 3.5 m pour une protection efficace.

### -Limites du système de protection

Si un coup de foudre de même intensité  $I_0$  (91 kA) frappe après l'origine  $O$ , la protection deviendra inefficace car  $S_A$  dépassera sa conception initiale. Ainsi, même de faibles courants de foudre entre  $O$  et  $A$  peuvent entraîner une augmentation de  $S_A$ , pour laquelle la protection a été conçue. Cela peut conduire à des taux d'échec bien supérieurs à  $FR\%$ .

### IV-2-1 Model électromagnétique :

Ce processus consiste à identifier les points d'impact les plus probables des éclairs afin de choisir les dispositifs de protection les plus adaptés, en particulier pour déterminer la zone de protection. Ce modèle utilise une distance  $D$  appelée << distance d'amorçage >>, définie par:

$$D = 9.4 \times I^{\frac{2}{3}}$$

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

Où :

Dans cette formule,  $D$  représente la distance d'amorçage en mètres (m), tandis que  $I$  désigne le courant de foudre exprimé en kiloampères (kA)."

### IV-2-2 Méthode de la sphère fictive : [40]

On imagine que la pointe du paratonnerre est entourée par une sphère imaginaire de rayon  $D$ , suivant étroitement sa trajectoire avant l'impact au sol. Lorsque cette sphère fictive approche du sol, le premier objet qu'elle touche est l'impact de la foudre. Le processus fonctionne comme suit : en supposant que la sphère roule sur le sol dans toutes les directions sans entrer en contact avec le sol ou un objet élevé, elle peut entrer en contact avec les dispositifs de protection tels que les tiges verticales, les câbles horizontaux ou les nappes de protection. Pour éviter ce contact, il est nécessaire d'ajuster les dispositifs de protection jusqu'à ce qu'aucun contact ne se produise.

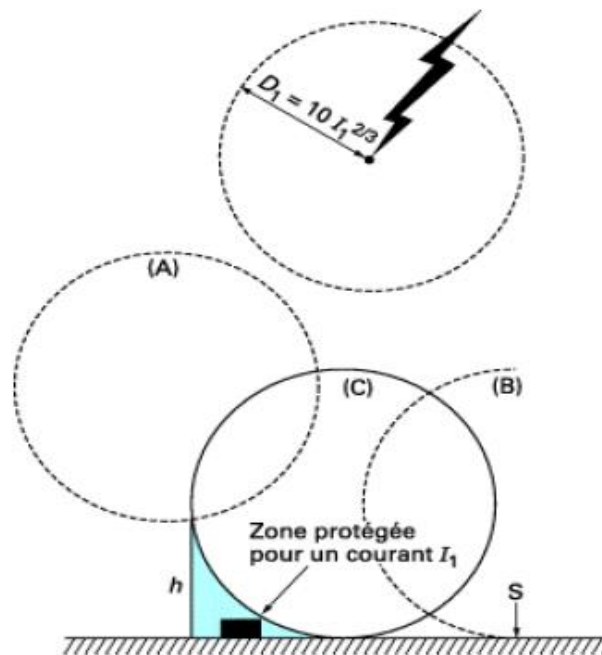


Figure IV-2 : Méthode de la sphère fictive

**Exemple d'application :**

**-Protection d'un transformateur de 160 kVA :**

Données du système

- Courant de foudre :  $I = 2$  kA
- Hauteur du pylône :  $h_1 = 11$  m
- Hauteur du paratonnerre :  $h_2 = 2$  m
- Hauteur totale :  $h = h_1 + h_2 = 13$  m

**-Calcul de la zone protégée :**

La méthode utilisée permet de déterminer la zone protégée autour du transformateur.

**Calcul du diamètre de la zone protégée :**

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

$$D = 9.4 \times 2^{\frac{2}{3}} = 14.92 \text{ m}$$

-Calcul du rayon de la zone protégée :

$$X = \sqrt{h^2 \left( \frac{2D}{h} - 1 \right)} \Rightarrow \sqrt{13^2 \left( \frac{2 \times 14.92}{13} - 1 \right)} = 14.79 \text{ m}$$

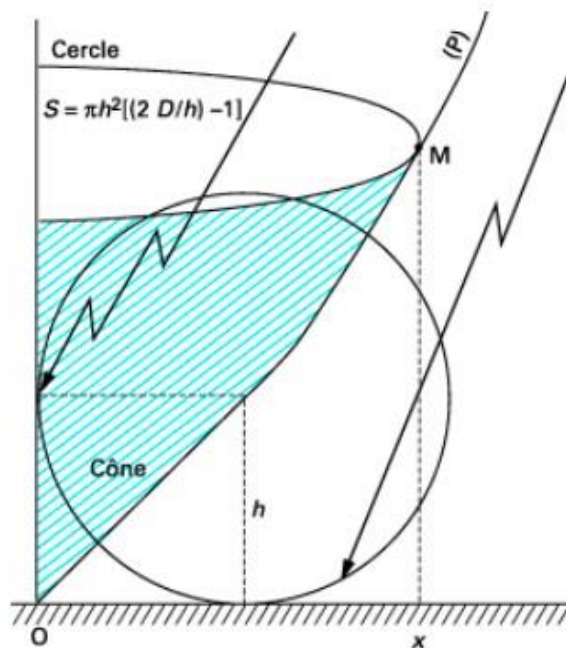
-Calcul de la surface de capture :

$$S = \pi h^2 \left( \frac{2D}{h} - 1 \right)$$

$$S = \pi 13^2 \left( \frac{2 \times 14.92}{13} - 1 \right)$$

$$S = 687.75 \text{ m}^2$$

Ainsi, la zone protégée autour du transformateur de 160 kVA a un rayon de 14.79 m et une surface de capture de 687.75 m<sup>2</sup>



FigureIV-3 :Parabole et surface de capture d'une tige verticale

### IV-2-3 Distance de protection du parafoudre :[34]

Les parafoudres agissent en réduisant les surtensions au niveau de leurs bornes, en écrétant l'onde pour maintenir le rapport  $dv/dt$  de son front de montée, ce qui peut induire une tension par réflexion au point d'ouverture. Il est crucial de respecter une distance maximale entre le parafoudre et l'appareillage du poste, étant donné la tension résiduelle élevée du parafoudre par rapport à la tension de tenue de l'appareillage.

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

---

### Exemple 1 : [4]

- La vitesse de l'onde de foudre est de 300 kV/s, générant ainsi un gradient de tension de 1 kV/m lors du passage du front de montée le long de la ligne.
- Le poste MT a une tenue aux chocs de 125 kV.
- Le parafoudre laisse une tension résiduelle de 75 kV.

La contrainte maximale au point ouvert est due à la réflexion de la crête de l'onde limitée par le parafoudre, atteignant le double de cette crête.

Pour respecter la limite de 125 kV du matériel, le parafoudre doit donc intervenir au plus tard quand l'onde incidente à son emplacement atteint:

$$\frac{125}{2} = 62.5 \text{ kV}$$

Son niveau de mise en conduction (approximativement au niveau de protection) étant de 75 kV, l'intervention ne peut se produire qu'avec la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie. Pour que l'onde réfléchie atteigne une valeur de 12.5 kV :

$$75 - 62.5 = 12.5 \text{ kV}$$

La différence de 50 kV entre la valeur incidente (62.5 kV) et la valeur réfléchie (12.5 kV) correspond au front d'onde réparti sur l'aller-retour entre le parafoudre et le point ouvert. Ainsi, la distance aller-retour maximale est de 50 m, ce qui donne une distance de protection maximale de 25 m.

Note : Le coefficient 2 ne signifie pas un doublement de la tension crête, mais plutôt la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie (voir figure IV-5).

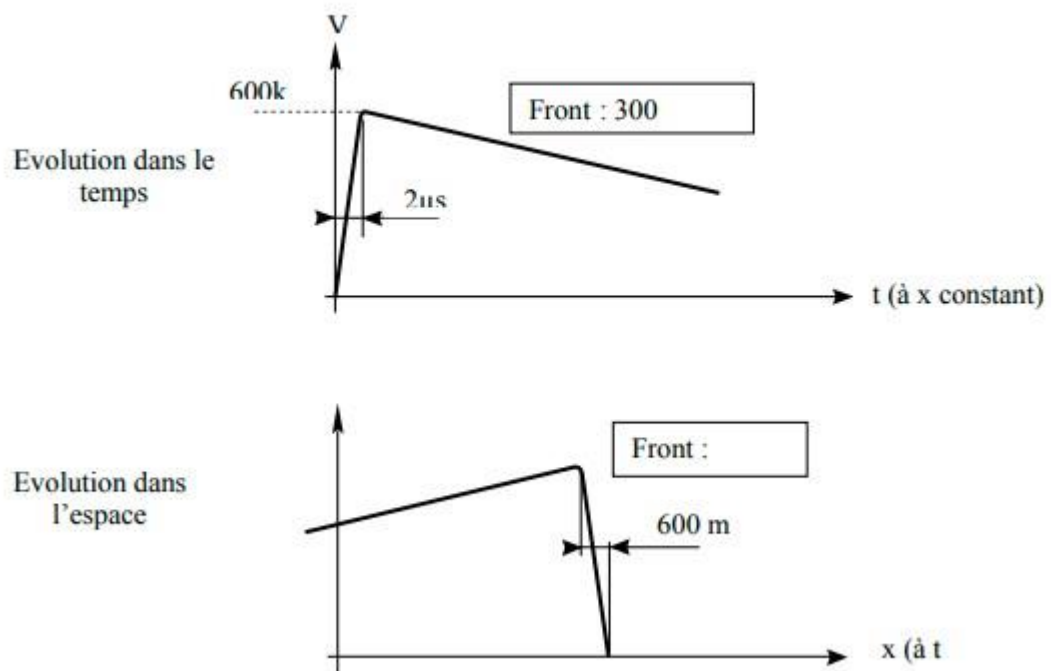


Figure IV-4 : Représentation dans le temps et dans l'espace d'une onde de foudre[41]

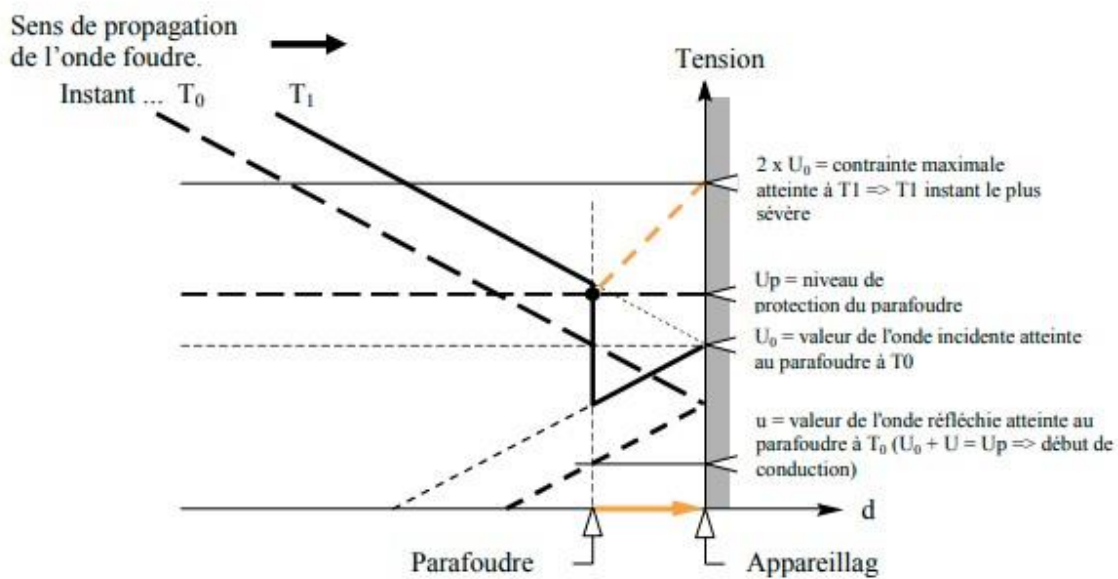
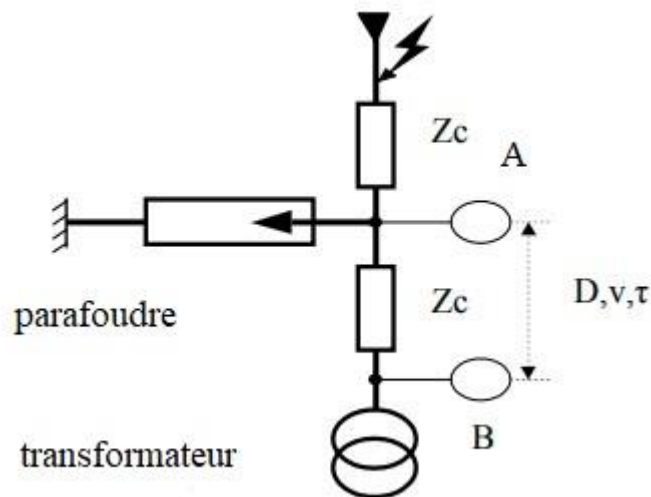


Figure IV-5 : Propagation et réflexion en présence d'un parafoudre.[41]

:



A et B : points de mesure

**Figure IV-6** : schéma d'un circuit (ligne et poste de transformation) pour l'étude de la propagation d'une onde de surtension de foudre.

- Impédance caractéristique  $Z_C$ .
- Vitesse de propagation  $v$ .
- Distance entre transformateur-parafoudre  $D$ .
- Temps de propagation:  $\tau = \frac{D}{v}$

### Parafoudre à caractéristique parfaite :

- Pour toute tension appliquée supérieure à  $V_p$ , il conduit instantanément et limite strictement à  $V_p$ .
- La prise de terre a une impédance nulle.

### Transformateur :

- Aux fréquences considérées, son impédance d'entrée est beaucoup plus élevée que  $Z_C$ , donc une onde de tension arrivant au transformateur est presque entièrement réfléchi (la tension au point de réflexion est doublée).

### Onde de surtension incidente :

- Elle a un front de montée constant  $r = dv/dt =$  et une tension constante en queue avec  $T = VP/r$  le temps nécessaire pour que le front d'onde atteigne  $V_p$  (voir figure IV-6).

Trois cas différents peuvent se présenter, comme résumé dans le tableau IV-1.

Si vous pouvez fournir plus de détails ou clarifications sur les termes spécifiques utilisés, je pourrai ajuster la reformulation en conséquence.

- ❖ Si la tension de choc maximale admissible par le transformateur est fixée à  $1,3.V_p$ , alors

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

$$1.3V_p \geq V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$$

Pour déterminer la distance maximale DDD entre le parafoudre et le transformateur, nous utilisons la formule suivante :

$$D \leq 0.15 \cdot V_p \cdot v / r = 0.15 \cdot T \cdot v D$$

En appliquant les valeurs numériques données :

- $V_p = 1200 \text{ kV}$
- $v = 300 \text{ m} / \mu\text{s}$
- $r = 2000 \text{ kV} / \mu\text{s}$

$$\Rightarrow D \leq 27 \text{ m.}$$

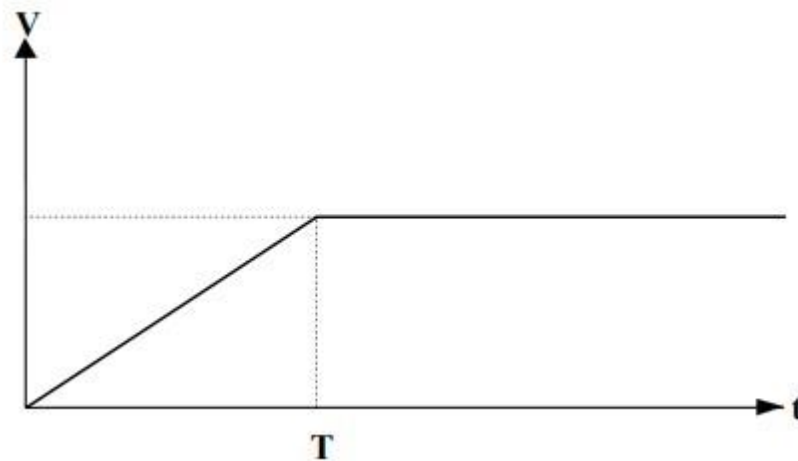


Figure IV-7 : Représentation d'une onde de surtension

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

Cas	Critère	Surtension maximale sur le transformateur	Commentaires
1	$D > \frac{v \cdot V_p}{2r}$ Soit : $T < 2\tau$	$2V_p$	front r raide, distance D importante. Pas d'effet de distance du parafoudre sur la tension maximale du transformateur, le parafoudre limite cette tension à $2 V_p$ .
2	$D < \frac{v \cdot V_p}{2r}$ Soit : $T > 2\tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ dépassement = $2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p \frac{2\tau}{T}$ $\Rightarrow V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p \left( 1 + \frac{2\tau}{T} \right)$	front r lent, distance D courte. La présence du parafoudre limite, par effet de distance, la tension maximale du transformateur : le dépassement du seuil $V_p$ est proportionnel à D et à r, d'où la notion de «distance de protection».
3	$D = \frac{v \cdot V_p}{2r}$ Soit : $T = 2\tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v} = V_p + V_p$ $= 2V_p$	Le cas limite entre 1 et 2

**Tableau IV-1** : Surtensions maximales sur le transformateur.[41]

### IV-3 Protection contre les coups de foudres directes :[40]

Pour protéger les installations contre les effets directs de la foudre, il est crucial d'installer des dispositifs conçus pour capter le courant de foudre et le diriger vers la terre sans endommager la structure ni les équipements. Le nombre de coups de foudre directs dépend de plusieurs facteurs :

1. La hauteur de la ligne.
2. La distance horizontale entre les conducteurs de phases.
3. Le facteur de blindage.
4. La densité de foudroiement au sol.

Le nombre de coups de foudre directs peut être calculé de la manière suivante :

$$N = N_s (b + 28H^{0.6}) (1 - S_f) 10^{-6} \text{ coups/km}$$

b : Portée horizontale (m)

H : Hauteur de la ligne (m)

Pour une disposition comme illustrée dans la figure IV-8, le facteur de blindage  $S_f$  varie selon la relation suivante :  $0,3 < S_f < 0,5$ . Dans ce système particulier, où  $h = H$  et  $x = H$ ,

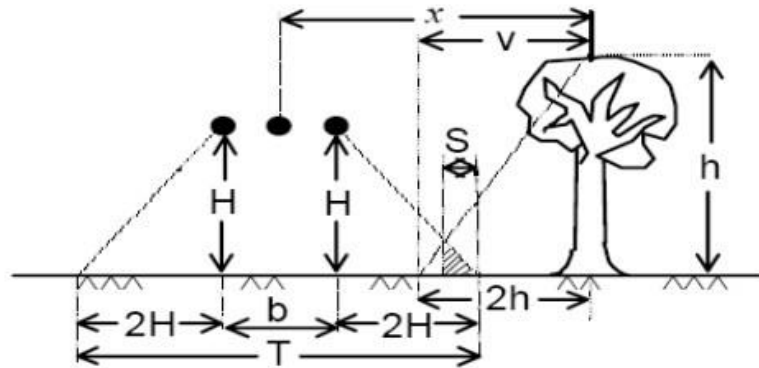


Figure IV-8 : protection en raison de proximité aux objets

### IV-3-1 Amélioration de la méthode de protection proposée :[42]

#### Analyse de la variation du courant de foudre $I_{0X}$ :

Lorsque le courant de foudre  $I_{0X}$  atteint la ligne à une distance  $X$  de  $A$ , la pente de l'onde incidente dépasse la valeur  $S_A$  à  $A$ . On peut calculer la valeur prévue de  $I_{0X}$  qui provoque cette situation :

$$I_{0X} = \frac{2t_f \times S_A}{(1 - S_A \times k \times X)Z}$$

Où :

- $I_{0X}$  : Courant de foudre qui dépasse la pente  $S_A$  au point  $A$ , à une distance  $X$  de  $A$  (kA)
- $t_f$  : Temps de front d'onde ( $\mu\text{s}$ )
- $S_A$  (de/dt) : Taux de montée de la tension à la réception  $A$  (en kilovolts par microseconde,  $\text{kV}/\mu\text{s}$ ).
- $X$  : Distance parcourue par l'onde de surtension de foudre (en mètres).
- $Z$  : Impédance caractéristique de la ligne (en ohms,  $\Omega$ ).
- $k$  : Constante d'amortissement ( $\mu\text{s}/\text{kV} \cdot \text{m}$ ).

#### -Calcul de la distance maximale $X$ :

En remplaçant  $S_0 = \left(\frac{I_0}{2}\right)\left(\frac{Z}{t_f}\right)$  dans  $S_A = \frac{1}{\frac{1}{S_0} + kX}$ , on obtient :

$$X = \left(1 - \frac{2t_f \times S_A}{285 \times Z}\right) \left(\frac{1}{S_A \times k}\right)$$

Pour l'exemple donné, avec  $S_A = 1966 \text{ kV}/\mu\text{s}$ , on obtient  $X = 326,67 \text{ m}$ .

#### -Analyse du nombre de coups de foudre sur le segment $\Delta x$ :

Le nombre de coups de foudre  $N$  atteignant le segment  $\Delta x$  de 327 m est :

$$N = N_g((b + 28H^{0,6})(1 - S_f)10^{0,6}\Delta x$$

## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

Δx Parmi ces coups de foudre, le nombre  $N_f$  provoquant un taux de montée de tension supérieur à  $S_A$  est :

$$N_f = P_{10} \times N_g \left( \frac{b + 28^{0,6}}{1 - S_f} \right) 10^{-6} \Delta x$$

Où  $P_{10}$  est la probabilité que le courant de foudre dépasse  $I_{0X}$ .

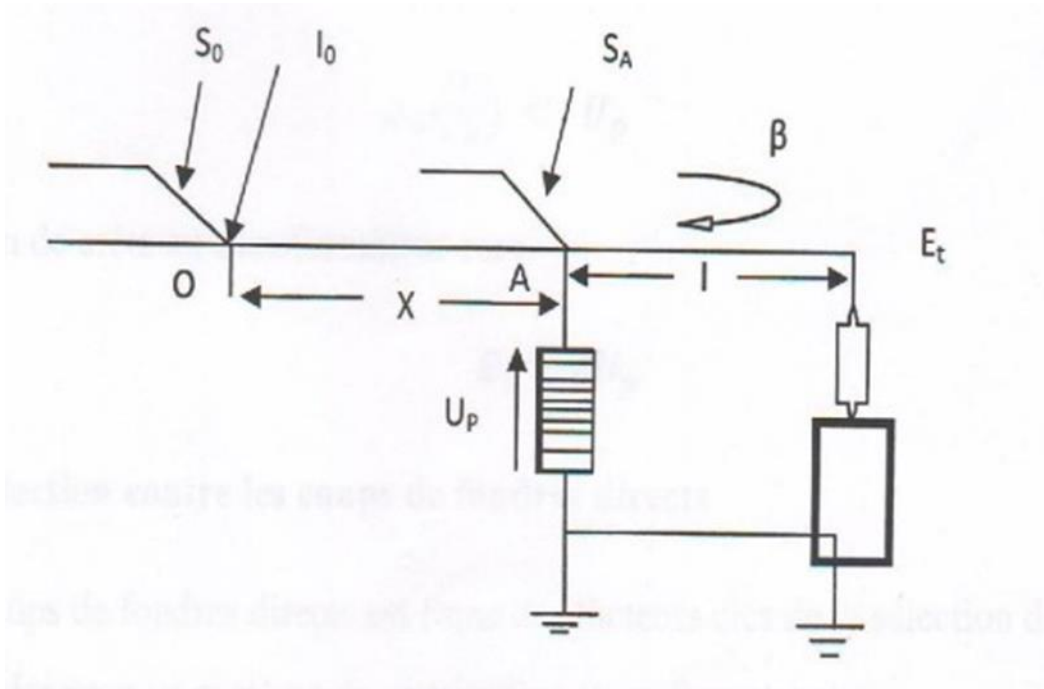


Figure IV-9 : Protection par parafoudre d'un transformateur

### -Optimisation de la protection :

En utilisant l'équation  $(FR) = L_f \times N_f 100\%$  on détermine que pour un taux d'échec FR de 5% sur 25 ans, la valeur acceptable de  $N_f$  est 0,002 coup/an. Pour :

$$N_f = \frac{0,05}{25} = 0,002$$

Cela conduit à recalculer  $S_A = 2640 \text{ kV}/\mu\text{s}$ , ce qui permet de réduire la distance parafoudre-transformateur à 2,6 m au lieu de 3,5 m initialement.

Comme :

$$l = \frac{(0,8 \times E_t - E_p)V}{2S_A} \Rightarrow \frac{(0,8 \times 170 - 90)300}{2 \times 2640} = 2,6 \text{ m}$$

Ainsi, pour assurer une protection adéquate, il est nécessaire de minimiser autant que possible la distance entre le parafoudre et le transformateur.

Cette méthode d'amélioration est proposée pour réduire le taux d'échec de la protection (voir figure IV-10) :

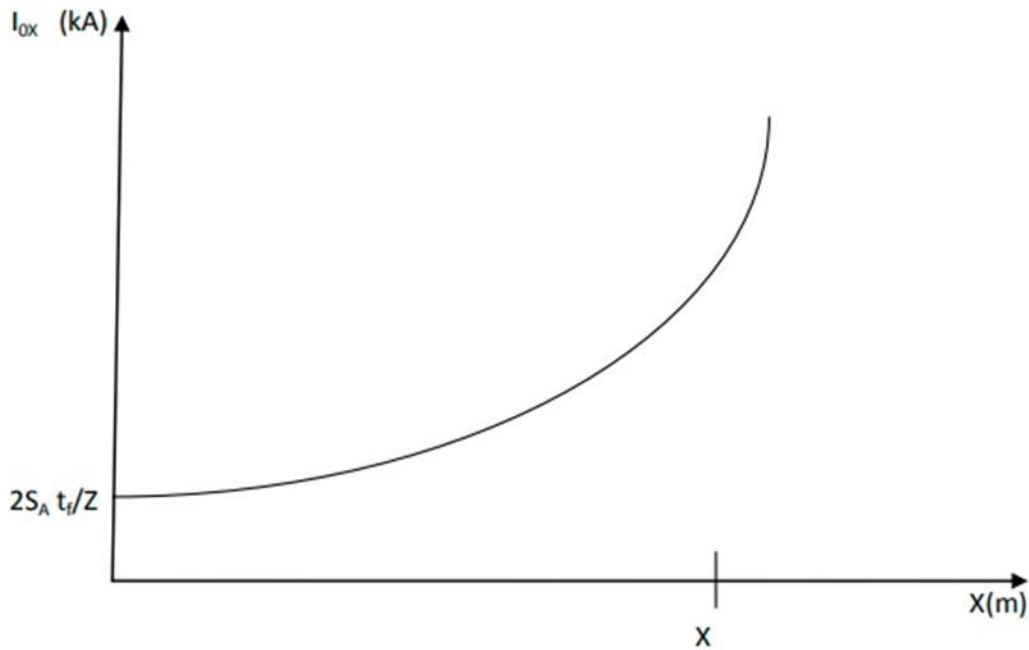


Figure IV-10 : Variation de  $I_{OX}$  (kA) en fonction de  $X$ (m)

### V-Partie simulation :

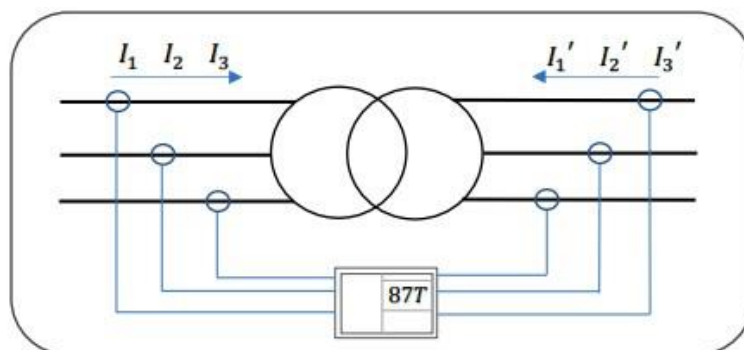
#### V-1 Introduction :

La protection différentielle est cruciale pour assurer la sécurité des transformateurs. Ce chapitre vise à approfondir notre compréhension de son fonctionnement. Les principaux défauts affectant les transformateurs sont les courts-circuits, qui génèrent des courants élevés. La protection différentielle utilise des dispositifs pour détecter et isoler tous les défauts internes du transformateur.

La saturation du noyau ferromagnétique du transformateur constitue la principale cause de courant d'appel transitoire. Ce phénomène survient lorsqu'il y a un changement soudain de la tension du système, souvent déclenché par des transitoires de commutation ou l'excitation d'un transformateur à vide.

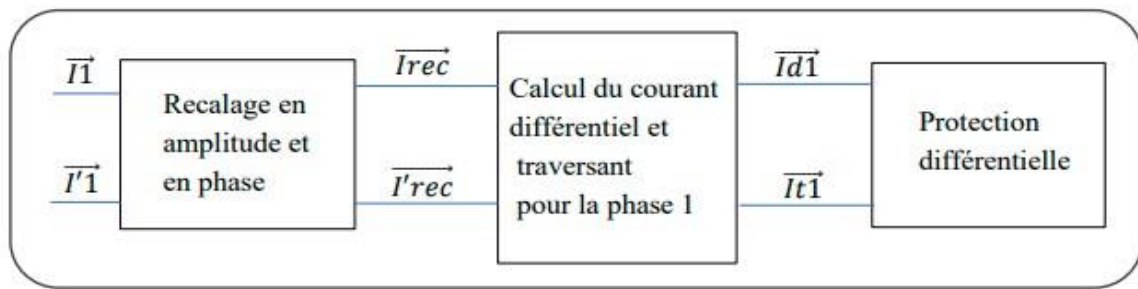
#### V-2 Principe de fonctionnement de la Protection différentielle :

La protection différentielle repose sur la comparaison de deux courants d'une même phase, qui sont normalement égaux. Cependant, pour la protection d'un transformateur, cette comparaison est un peu différente car les courants primaires et secondaires diffèrent en amplitude en raison du rapport de transformation, et en phase en fonction du mode de couplage du transformateur. Il est donc nécessaire de recalibrer les courants primaires et secondaires de chaque phase pour qu'ils soient égaux en amplitude et en phase lors d'un fonctionnement normal.



## Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

La fonction de protection différentielle du transformateur protège la zone entre les capteurs des courants principaux ( $I_1, I_2, I_3$ ) et les capteurs des courants supplémentaires ( $I'_1, I'_2, I'_3$ ).



À partir des courants recalés  $\vec{I}_{rec}$  et  $\vec{I}'_{rec}$  correspondants, les courants différentiels  $I_d$  et les courants traversant  $I_t$  de chaque phase sont calculés en suivant la convention de mesure des courants illustrée sur le schéma ci-dessus et en respectant le câblage recommandé.

### V-3 Les composants de système:

Grâce à l'utilisation de MATLAB, nous avons pu mettre en œuvre cette approche en simulant des systèmes de puissance dans divers scénarios opérationnels, afin d'analyser les phénomènes physiques associés à ces systèmes.

Simulink, un logiciel intégré à MATLAB, est utilisé pour simuler des systèmes dynamiques. Il s'agit d'une plate-forme de simulation multi-domaines qui permet de définir des modèles à l'aide de schémas bloc (diagrammes structurels). Simulink permet de visualiser la structure interne du système et facilite l'analyse des interactions entre les grandeurs internes et externes. Il offre également une interface graphique pour la visualisation des résultats, sous forme de graphiques ou de valeurs numériques.

Le système simulé comprend les éléments suivants :

- Une source de tension triphasée représentant l'alternateur (33 kV, 15 MVA, 50 Hz).
- Le transformateur étudié (33/11 kV, 10 MVA).
- Deux disjoncteurs triphasés, placés en amont et en aval du transformateur.
- Des instruments de mesure de courant et de tension.
- Une protection différentielle.
- Une charge représentant la consommation nominale (R).

Couplage du transformateur	Y/Y
Puissance nominale	10 MVA
Rapport de tension	33 / 11 kV
Fréquence nominale	50 HZ
Résistance d'enroulement primaire/phase	0.002 pu
Inductance d'enroulement primaire/phase	0.08 pu
Résistance d'enroulement secondaire/phase	0.002 pu
Inductance d'enroulement secondaire/phase	0.08 pu
Résistance à la magnétisation	500.02 pu

**Tableau V-1 : Paramètres principaux du transformateur[43]**

# Chapitre IV : Étude du système de protection du transformateur contre la foudre

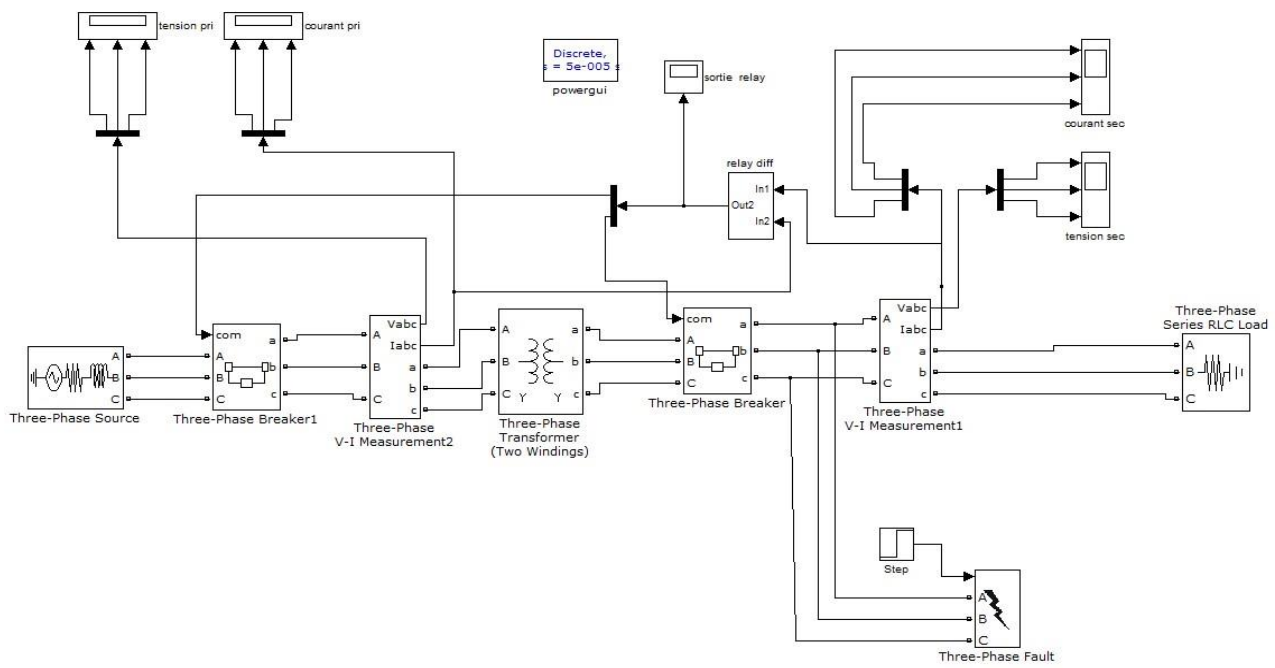
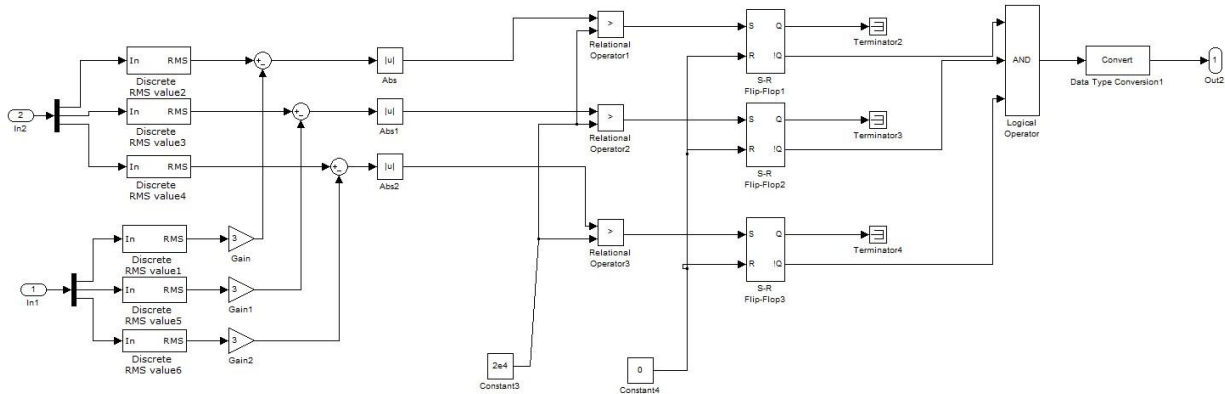


Figure V-1 :Modèle simulé

**V-4 Protection différentielle :**

Le bloc de la protection différentielle a été développé en simulant son mode de fonctionnement à l'aide de plusieurs blocs dans Simulink. On compare le courant d'entrée au courant de sortie après correction d'amplitude. Si cette différence dépasse un seuil préétabli, un ordre de déclenchement est envoyé aux disjoncteurs.



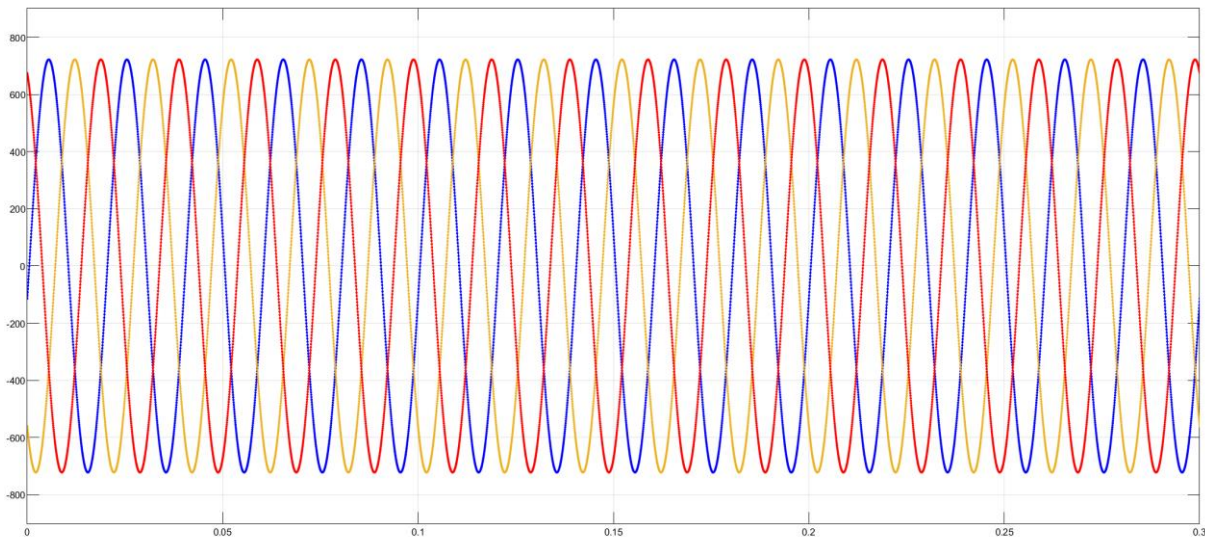
**Figure V-2** Système de protection différentielle

**V-5 LA SIMULATION :**

**V-5-1 Fonctionnement normal :**

Les formes d'onde des courants et des tensions primaires et secondaires d'un système triphasé.

**Secondaire :**



**Figure V-3 :** Courant secondaire (A)

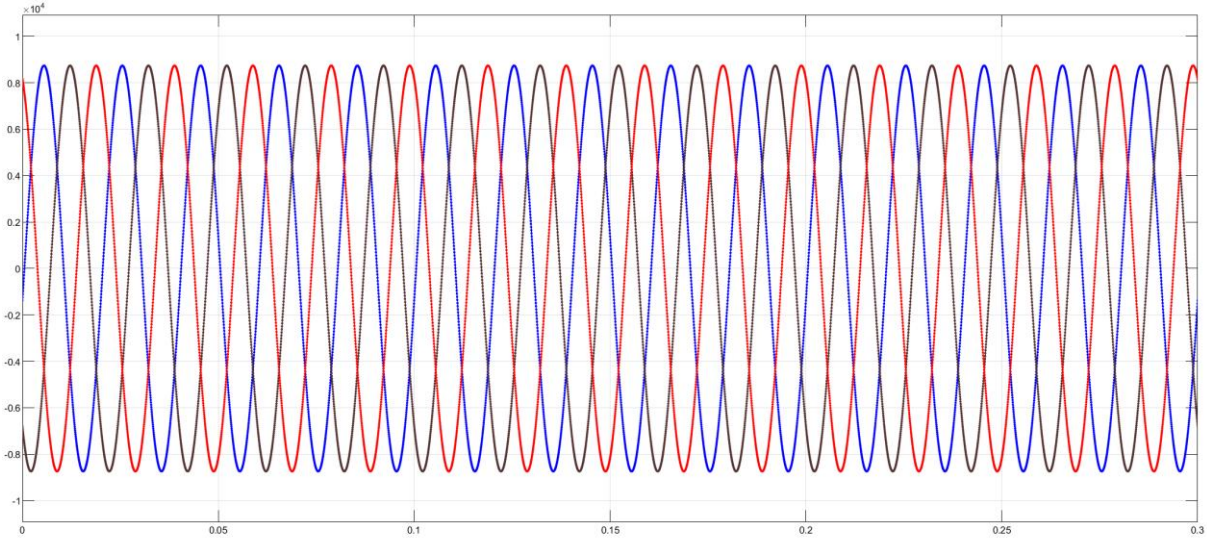


Figure V-4 : Tension secondaire ( $k_V$ )

Primaire :

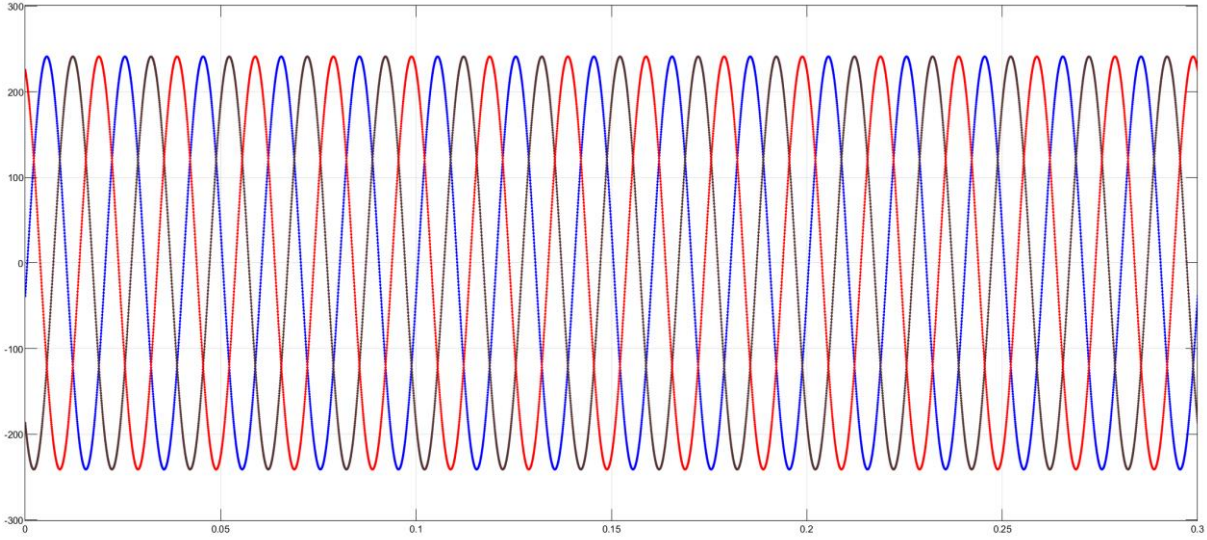
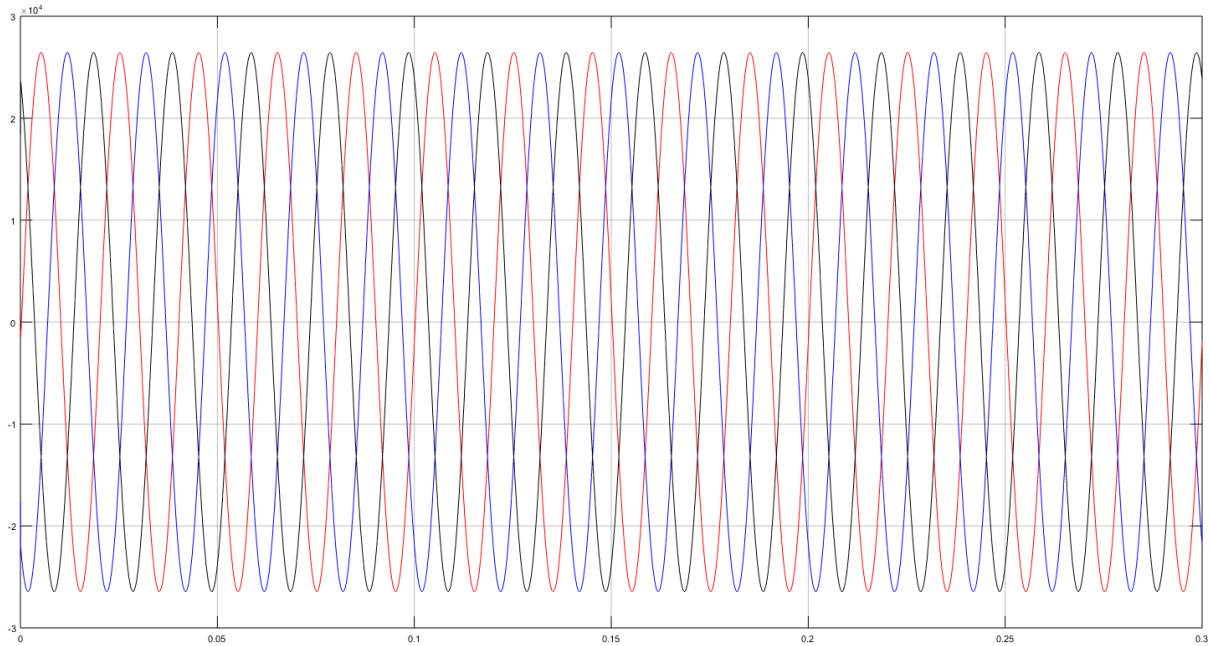
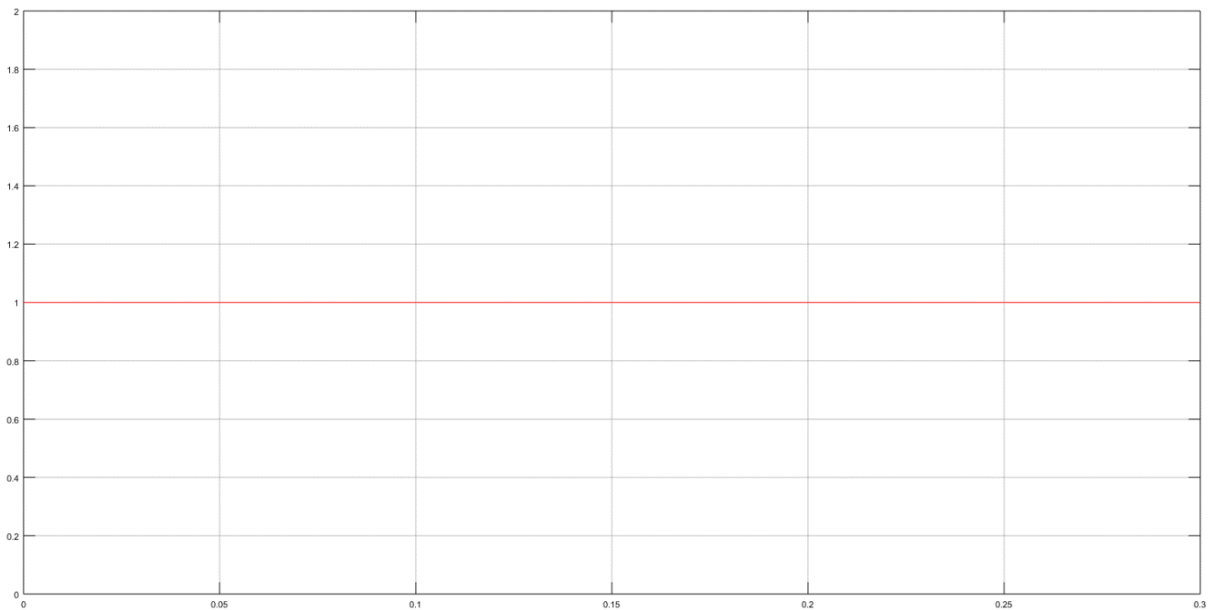


Figure V-5 : Courant primaire (A)



**Figure V-6 : Tension primaire ( $k_V$ )**

**La sortie de Relay :**



**Figure V-7 : Sortie de Relay en fonctionnement normal**

**V-5-1-1 Commentaire :**

Pendant le fonctionnement normal, les courants primaires et secondaires restent dans leurs valeurs nominales (figure V-5 et figure V-3), tandis que le relais différentiel reste à son état initial sans variation des valeurs nominales du courant (figure V-7). Aucun défaut n'affecte le transformateur et les disjoncteurs sont fermés.

V-5-2 Fonctionnement après le Défaut:

V-5-2-1 Le défaut :

À  $t=0.001$ , un défaut est appliqué à l'extérieur de la zone protégée, représentant un coup de foudre sur le conducteur de phase, soit en amont ou en aval du transformateur.

Secondaire :



Figure V-8 : Courant secondaire après le défaut (A)

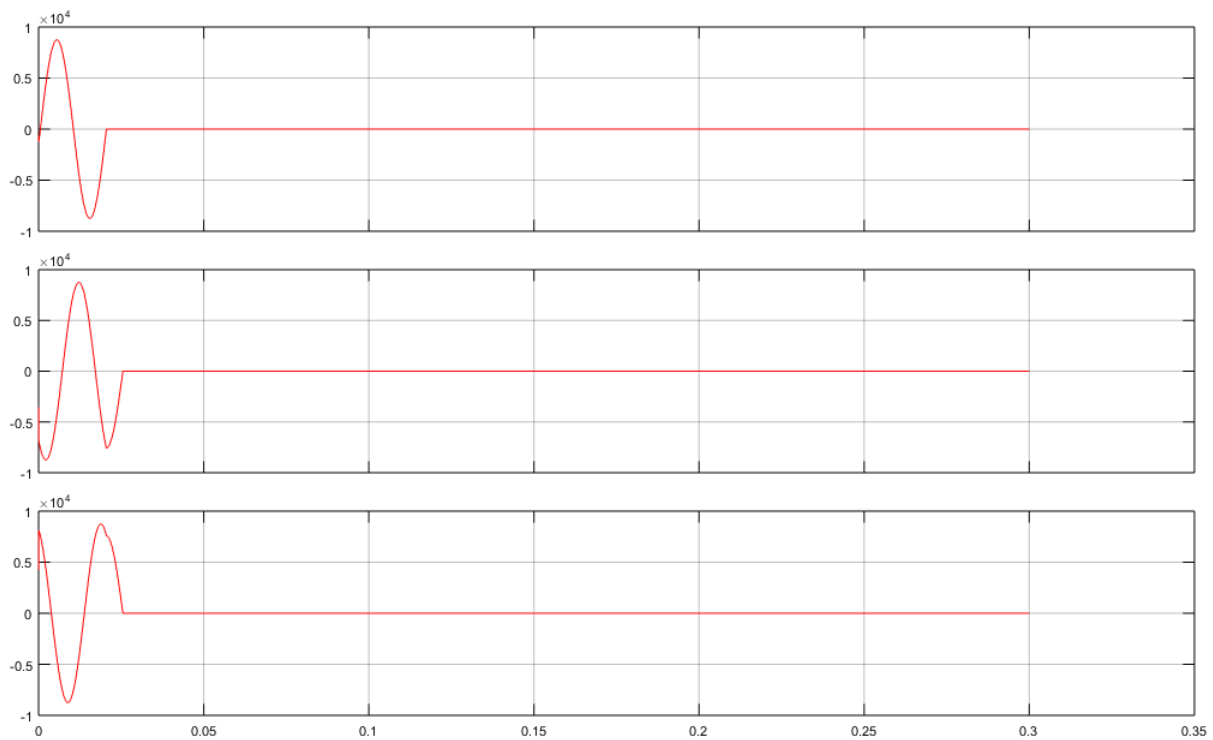


Figure V-9 : Tension secondaire après le défaut ( $k_V$ )

Primaire :

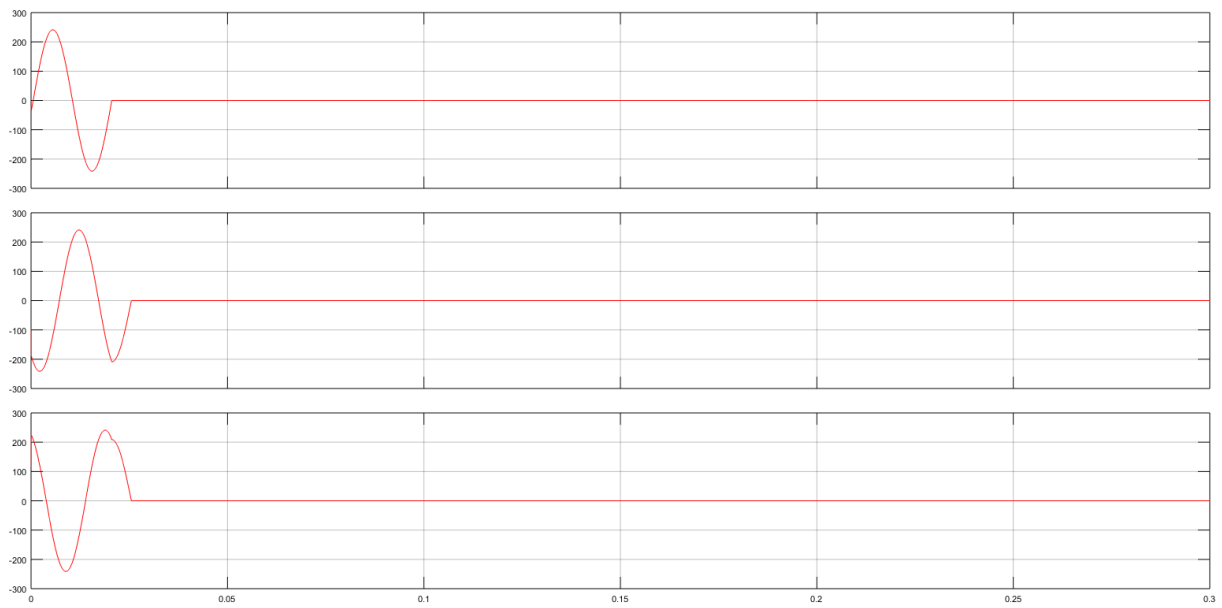


Figure V-10 : Courant primaire après le défaut (A)

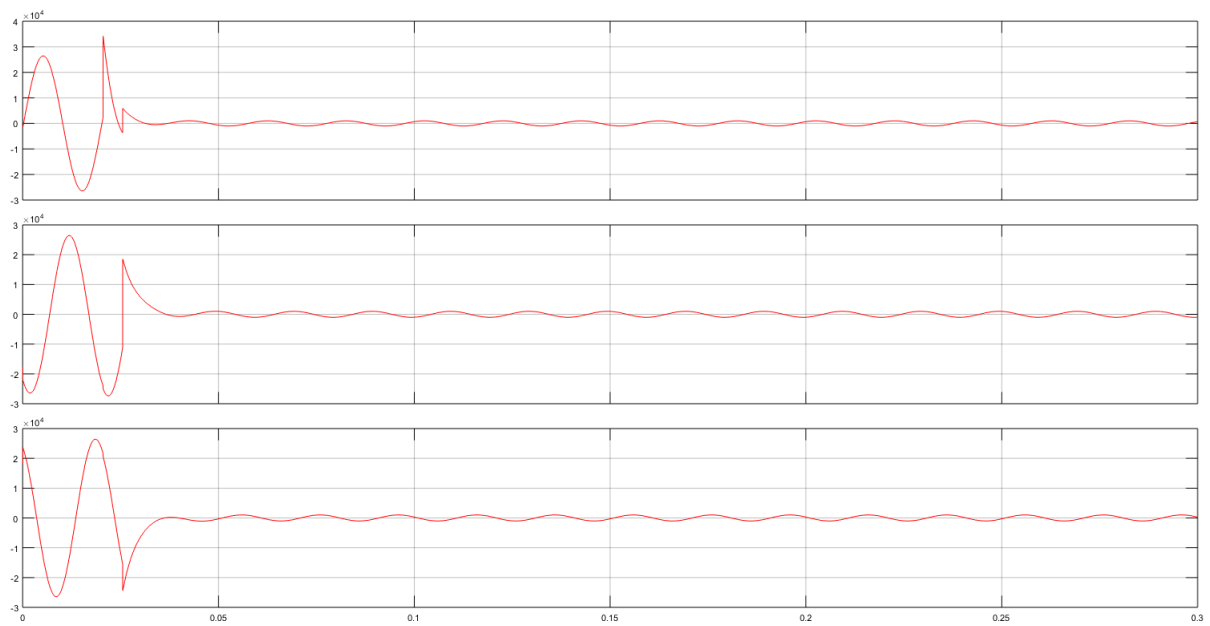
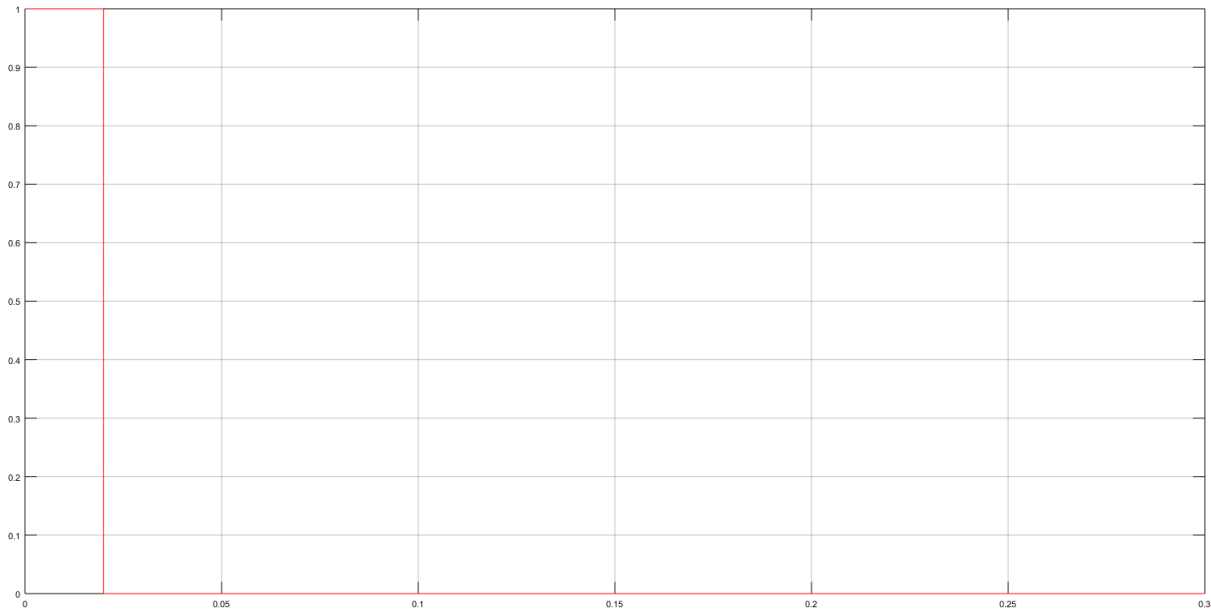


Figure V-11 : Tension primaire après le défaut ( $k_V$ )



**Figure V-12 :Sortie de Relay après le défaut**

**Commentaire :**

À l'instant  $t = 0.001$  s, un défaut survient. La protection réagit instantanément, comme illustré sur la Figure V-12. Immédiatement après l'apparition du défaut, le courant atteint des niveaux élevés.

Le courant différentiel n'atteint pas le seuil de déclenchement de la protection différentielle avant  $t = 0.001$  s, donc celle-ci ne s'active pas. Cependant, la tension augmente pendant la période de défaut dans la phase A primaire (voir Figure V-11), car le système ne peut pas fournir ce niveau de courant. Dans ce scénario, la protection contre les surintensités de phase doit intervenir pour protéger le transformateur contre ce défaut externe, car le transformateur ne peut pas se protéger par lui-même.

**V-6 Conclusion :**

Les surtensions sur les lignes MT sont souvent provoquées par des coups de foudre, et la protection des systèmes de distribution aérienne contre ces impacts directs (éclateurs, isolateurs, mise à la terre, paratonnerres) a été largement étudiée. Cependant, l'importance des incidents induits n'a été pleinement reconnue que récemment, nécessitant une évaluation de leur impact sur les lignes et les performances des transformateurs. Si la partie moyenne de la tension n'est pas correctement isolée, les surtensions peuvent être transférées vers la partie basse de la tension, nécessitant une analyse approfondie.

En se basant sur les données présentées dans ce document, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. La distance de séparation entre le parafoudre et le transformateur doit être minimisée pour assurer une protection efficace contre les surtensions. Cette distance dépend de divers paramètres tels que la densité des éclairs, la configuration de l'installation, les méthodes de protection, l'amortissement, et la probabilité de défaillance du transformateur.

2. Pour prévenir les surtensions sur les transformateurs, il est recommandé d'utiliser des parafoudres dont les tensions résiduelles sont inférieures à la moitié du niveau d'impulsion de base (BIL) acceptable du transformateur. Ces parafoudres doivent être correctement mis à la terre via les traverses de la ligne de transmission.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, une simulation du système de protection par relais différentiel d'un transformateur de puissance contre un coup de foudre direct a été effectuée. En cas de défaut, le courant différentiel augmente significativement et dépasse les seuils de déclenchement, ce qui active la protection différentielle. Les disjoncteurs isolent alors le transformateur pour assurer sa stabilité face aux défauts externes. Lorsqu'un courant excessif est détecté en raison d'un défaut externe, la protection contre les surintensités est également activée pour maintenir la sécurité du transformateur.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale :**

La distribution de l'électricité constitue la dernière étape des réseaux électriques, et pour SONELGAZ, l'objectif premier demeure la satisfaction des clients en garantissant la continuité et la qualité du service, tout en gérant efficacement l'aspect économique de l'entreprise.

Malgré la présence de mesures de protection telles que les éclateurs, les surtensions, en raison de leur amplitude, peuvent causer des dysfonctionnements graves pour les transformateurs MT/BT. Chaque poste de transformation est équipé de dispositifs de sécurité, comme les éclateurs, dont la configuration à la terre et la distance entre les électrodes doivent être soigneusement étudiées.

Cependant, en raison des limitations des éclateurs, nous envisageons l'installation d'une protection plus avancée. À cet effet, nous avons étudié l'installation de parafoudres en nous basant sur deux critères : la proximité du parafoudre par rapport au transformateur et le taux de réussite de la protection

Notre recherche a montré que plus la distance entre le parafoudre et le transformateur est réduite, plus la protection est efficace. Ainsi, pour une protection optimale, il est recommandé d'installer le parafoudre à proximité immédiate de l'équipement à protéger.

Par ailleurs, nous avons examiné et proposé une méthode opérationnelle de protection différentielle basée sur la simulation avec MATLAB et ses résultats. Les simulations ont confirmé l'efficacité de la protection différentielle en assurant une grande sensibilité aux défauts internes tout en maintenant la stabilité face aux défauts externes.

Nous espérons que cette étude suscitera l'intérêt et l'appréciation de tous ceux qui s'intéressent à la protection des transformateurs contre les effets de la foudre.

# Bibliographie

- [1] : D. FULCHIRON « Surtensions et coordination de l'isolement ». CT 151. Édition décembre 1992
- [2] : Boussad AIT MESSAOUD « Particularités des surtensions d'amorçage d'arc dans les réseaux de 110KV et 35KV ». Mémoire magister, université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou, 2016
- [3] : Alain SABOT et Jean MICHAUD « lignes et postes Choix et coordination des isolements » Techniques de l'Ingénieur D 4750
- [4] : USTO-MB <http://www.univ-usto.dz> › ETUDE ET REDUCTION DES SURTENSIONS
- [5] : Michel GRACIET & Joseph PINEL « Protection contre les perturbations ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique Doc. D 5 170
- [6] : KAROUT WASSILA, BELHADJ SOUMIA « ANALYSE DES SURTENSIONS ELECTRIQUES ET LEURS PROTECTIONS ». Mémoire magister, université BADJI MOKHTAR- ANNABA le 2019
- [7] : D. Fulchiron « surtensions et coordination de l'isolement » Merlin Gerin décembre 1992.
- [8] : M. Arezki, SIDIS. Abdenour « Étude des surtensions dues à la Ferro résonance en phases incomplètes » » Mémoire d'ingénieur Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU 2013
- [9] : Benoît de Metz–Noblat, “La foudre et les installations électriques HT”, Cahier Technique  
Merlin Gerin, N° 168 / p.5, édition juillet 1993
- [10] : Mr. OMARI Mohamed « Etude de l'environnement électromagnétique de la foudre » Mémoire DOCTORAT (L.M.D) UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN TIARET le 2018
- [11] : V. A. Rakov and M. A. Uman, “Lightning:Physics and Effets”. Cambridge, U.K. : Cambridge Univ. Press, 2003
- [12] : Dib Djalel « L'Impact de La Foudre Sur les Réseaux Electriques Etude, Analyse et Modélisation » Mémoire DOCTORAT -UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA le 22 Mai 2007
- [13] : MEGHEZZI Arezki et SIDI SAID Abdenour « Étude des surtensions dues à la ferro résonance en phases incomplètes » Projet de fin d'Études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2013
- [14] : Michel Graciet et Joseph Pinel : Protection contre les perturbations, Techniques de l'Ingénieur
- [15] : A. Tilmatine, « Techniques de la haute tension (chapitre 5 : la foudre) », Université Djilali LIABES.
- [16] : « Le risque foudre et les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement » Institut National de l'environnement Industriel et des Risques (INERIS).

- [17] : KULKARNI, S., & KHAPARDE, S. (2004). Transformer Engineering - Design and Practice. CRC Press.
- [18] : <https://tameson.fr/> Les transformateurs électriques expliqués Mars 23, 2022 par Anju Thangam Joy
- [19] : <https://www.electricalcity.net/الكهربائية-المحوالت-transformers/>
- [20] : djemaouniAbderafik « étude et analyse du procédé de la maintenance du Transformateur de puissance de la centrale thermique de Jijel » Mémoire du diplôme Master en Electromécanique Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel 2020
- [21] : AZOUAOU SADI, SYLIA SI FODIL « Optimisation de la construction d'un transformateur de puissance triphasé moyenne tension-moyenne tension fabriquée par Electro-Industries » Mémoire de MASTER PROFESSIONNEL UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2015
- [22] : Martin J. Heathcote, J&P Transformer Book, Oxford, Elsevier, 2007
- [23] : Jean SANCHEZ « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance » L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 7 août 2006
- [24] : SELLAMI Fateh « Techniques de bobinage des Transformateurs de distribution » Mémoire de master Université Mohamed Khider de Biskra Le : 07 juillet 2019
- [25] : Didier Nilly. Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance. Electromagnétisme. 2017
- [26] : MEZARI NAOUEL « DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCES » MEMOIRE DE MAGISTER UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU
- [27] : H. BEN AMMAR TITRE DE LA LEÇON : Les Transformateurs triphasés Electrotechnique – Niveau 3 2010-2011
- [28] : MOKRANE Amar . TOUNSI Hocine «Etude d'un transformateur de puissance HT/MT avec régulateur en charge » Mémoire de MASTER ACADEMIQUE UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU Le 28 Septembre 2014
- [29] : ElektromotorenundGerätebauBarleben Gmbh :  
[www.emb-online.de](http://www.emb-online.de)  
[www.buchholzrelay.com](http://www.buchholzrelay.com)
- [30] : GABANI Asma Dat Nitakin SERKOU Aroua Oum el-baha« Analyse d'huile d'un transformateur de puissance » memoir de Licence Professionnelle le 14 /06/2022
- [31] : Documentation HELITA, novembre 2006
- [32] : Documentation SONALGAZ
- [33] : Schneider Electric : « La protection des récepteurs contre les surtensions d'origine atmosphérique ».

- [34] : BIROUCHE. C CHERIFI. M « Thème Etude Des Protections Du Poste Source FREHA 60/30kV Contre Les Surtensions Atmosphériques » MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2011
- [35] : J Favraud : « fonctionnement et protection des réseaux de distribution » EDF 1996.
- [36] :Aouichat Cherif - BelaifaAbdallah « DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCES »MÉMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER En : Electrotechnique. Spécialité : Commande électrique.UNIVERSITE MOULOUUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, le 02/07/2023
- [37] : Safia KHEMRI Lila BESSEGHIR « Protection des transformateurs MT/BT contre les surtensions de foudre. » Mémoire de Master Académique UNIVERSITE MOULOUUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU le 03 juillet 2014
- [38] : Schneider Electric : « Guide de conception des réseaux électriques industriels ».
- [39] : Manuel SERRANO : « Etude du comportement électrique et thermique de parafoudres à Oxyde de Zinc » thèse de doctorat 1988
- [40] :DJOUDI.H . OURTI.B MEMOIRE DE MASTER « Protection d'un transformateur MT/BT contre les surtensions. » Université MOULOUUD MAMMERI de Tizi-Ouzou Année universitaire 2009/2010
- [41] : Cahier technique Merlin Gerin N0 151 et 168.
- [42] :Lounis SOULI Mémoire De MASTER « Etudes des protections contre les Surtensions de foudre » UNIVERSITE MOULOUUD MAMMERI DE TIZI OUZOU 25 septembre 2017
- [43] :DEMANE Ammar ; ALILI Abdelhak « Amélioration de la protection d'un transformateur de puissance » Mémoire De MASTERUniversité Mohamed Boudiaf - M'sila/2018

## Liste de figure :

Figure I-1 Classification et origines des surtensions.....	12
Figure I-2 : Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre. ....	13
Figure I-3 : Forme de décharge inductive due à la coupure d'un circuit avec inductance L, V0 tension aux bornes du circuit avant la coupure. ....	14
Figure I-4 : formes de la surtension lors du couplage au réseau d'une batterie unique de condensateurs. [5].....	14
Figure I-5 : Principe de la Ferro résonance.....	15
Figure I-6 : surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en défaut d'isolement. [8] .....	17
Figure I-7 : Ondes typiques dans le canal de la foudre .....	18
Figure I-8 : Oscillogramme d'un courant de foudre .....	18
Figure I-9 : Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE.....	19
Figure I-10 : Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE .....	19
Figure I-11 : Indication illustrative de la distribution de la charge électrique à l'intérieur et... autour d'un nuage orageux [11] .....	20
Figure I-12 : Schéma électrique équivalent de la foudre.....	20
Figure I-13 : Coup de foudre sur conducteur de phase et propagation bidirectionnelle .....	21
Figure I-14 : Coup de foudre sur conducteur garde et propagation bidirectionnelle .....	22
Figure I-15 : le mécanisme de la foudre .....	23
Figure I-16 : Décharges : schéma électrique .....	24
Figure I-17 : Classification des coups de foudre.....	24
Figure I-18 : forme du courant de la foudre.....	26
Figure I-19 : Onde de choc conventionnelle.....	26
Figure II-1 : Transformateur monophasé                      Figure II-2 : Transformateur triphasé. ....	29
Figure II-3 : Schéma équivalent d'un transformateur réel, monophasé .....	29
Figure II-4 : Schéma équivalent d'un transformateur triphasé simplifié d'un réseau à neutre isolé.....	30
Figure II-5 : Enroulements primaires (A) et secondaires (B) d'un transformateur enroulé sur un noyau magnétique (C).....	31
Figure II-6 : Les différents flux résultant lors du passage d'un courant électrique .....	31
Figure II-7 : transformateur monophasé .....	32
Figure II-8 : transformateur triphasé .....	33
Figure II-9 : Autotransformateur.....	33
Figure II-10 : Transformateur de puissance.....	34

Figure II-11 : Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.....	35
Figure II-12 : Constitutions d'un transformateur triphasé.....	36
Figure II-13 : Le conservateur d'huile.....	36
Figure II-14 : Le couvercle de transformateur.....	37
Figure II-15 : La cuve de transformateur.....	38
Figure II-16 : Les traversées de transformateur.....	38
Figure II-17-A : Circuit magnétique triphasé à 3.....	39
Figure II-17-B : Hystérésis du circuit magnétique.....	39
à 3 colonnes.....	39
Figure II-18 : La technologie en colonne.....	40
Figure II-19 : Colonne en galettes.....	40
Figure II-20 : Colonne en couches.....	41
Figure II-21 : La technologie en cuirassé.....	41
Figure II-22 : Couplage des Transformateurs triphasés [23].....	43
Figure II-23-1 : Couplage étoile-étoile d'un transformateur triphasé Avec /.....	43
Figure II-23-2 : Couplage triangle-étoile d'un transformateur triphasé.....	44
Figure II-23-3 : Couplage triangle triangle d'un transformateur triphasé.....	45
Figure II-23-4 : Couplage étoile-triangle d'un transformateur triphasé.....	45
Figure II-23-5 : Couplage étoile zig-zag d'un transformateur triphasé.....	46
Figure II-24 : Un régleur hors tension.....	48
Figure II-25 : Régleur en charge et Système de commutation.....	49
Figure : III-1 : relais Buchholz.....	51
Figure III-2 : relais Buchholz Fonction déclenchement.....	53
FigureIII-3 : Soupape de sécurité MPRV.....	53
Figure III-4 : DGPT2.....	54
FigureIII-5 : Indicateur de Niveau d'Huile.....	54
FigureIII-6 : Indicateur de température de transformateur.....	55
Figure III-7 : Paratonnerre à tige simple.....	56
Figure III-8 : Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple.....	56
FigureIII-9 : Paratonnerre à dispositif d'amorçage.....	57
Figure III-10 :Paratonnerre à cage maillée.....	57
FigureIII-11 : Schéma de câbles de garde.....	58
Figure III-12 :Paratonnerre radioactif.....	58
FigureIII-13 : Eclateur avec tige anti-oiseaux.....	59
Figure III-14 : Eclateur a tige.....	60

Figure III-15 :parafoudre .....	61
FigureIII-16 : Parafoudre à résistance variable avec éclateur.....	62
Figure III-17 : Parafoudre à oxyde de zinc .....	63
Figure IV-1 : Protection par parafoudre d'un transformateur... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Figure IV-2 : Méthode de la sphère fictive.....	67
Figure IV-3 : Parabole et surface de capture d'une tige verticale.....	68
Figure IV-4 : Représentation dans le temps et dans l'espace d'une onde de foudre [41] .....	70
Figure IV-5 : Propagation et réflexion en présence d'un parafoudre. [41] .....	70
Figure IV-6 : schéma d'un circuit (ligne et poste de transformation) pour l'étude de la propagation d'une onde de surtension de foudre. ....	71
Figure IV-7 : Représentation d'une onde de surtension .....	72
Figure IV-8 : protection en raison de proximité aux objets.....	74
Figure IV-9 : Protection par parafoudre d'untransformateur.....	74
Figure IV-10 : Variation de $I_{0X}$ (kA) en fonction de $X(m)$ ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Figure IV-10 : Protection par parafoudre d'un transformateur. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Figure V-1 : Modèle simulé.....	78
Figure V-2 système de protection différentielle .....	81
Figure V-3 : courant secondaire .....	81
Figure V-4 : tension secondaire .....	82
Figure V-5 : courant primaire .....	82
Figure V-6 : tension primaire.....	83
Figure V-7 : sortie de Relay en fonctionnement normal .....	83
Figure V-8 : courant secondaire après le défaut .....	84
Figure V-9 : tension secondaire après le défaut .....	84
Figure V-10 : courant primaire après le défaut .....	85
Figure V-11 : tension primaire après le défaut .....	85
Figure V-12 : sortie de Relay après le défaut .....	86

## **Liste de tableau :**

Tableau I-1 : Caractéristiques des coups de foudre.....	26
TableauII-1 :les éléments de ce transformateur.....	34
Tableau III-1 :relais Buchholz.....	50
Tableau IV-1 : Surtensions maximales sur le transformateur.....	73
Tableau V-1 :Paramètres principaux du transformateur.....	80

## Résumé

---

### Résumé :

Un transformateur est un dispositif immobile qui peut recevoir l'énergie électrique à une tension et un courant spécifiques, puis la restituer avec une tension et un courant différents à la même fréquence.

L'importance du transformateur dans les réseaux électriques (transport et distribution de l'énergie électrique) réside dans sa capacité à garantir la continuité de l'alimentation en électricité des consommateurs HTA et BT. Cependant, cela ne se produit pas toujours, car ces transformateurs sont fréquemment confrontés à des risques de diverses natures, comme les surtensions et les surintensités, qui peuvent entraîner la destruction de l'isolation du transformateur, ce qui entraîne des pertes et des désagréments pour les consommateurs.

Nous avons pour but d'analyser la capacité d'un transformateur MT/BT à être protégé contre les surtensions causées par les coups de foudre. En tant que méthode de protection, et SONELGAZ utilise des éclateurs et des parafoudres.

Et a subdivisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré généralité sur la surtension. état de l'art des transformateurs De puissance l'objet du second chapitre. Le troisième illustrera les différents organes de protection des transformateurs contre les surtensions. Le dernier chapitre fera l'objet d'une application et on présente de La protection différentielle principe de fonctionnement. Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

---

### ملخص:

لمحول هو جهاز ثابت يمكن أن يستقبل الطاقة الكهربائية بجهد وتيار محددين، ثم إعادتها بجهد وتيار تكمن أهمية المحول في شبكات الكهرباء (نقل وتوزيع الكهرباء) في قدرته على مختلفين بنفس التردد ضمان استمرارية إمداد المستهلكين بالتيار الكهربائي ذي الجهد العالي والجهد المنخفض. ومع ذلك، لا يحدث هذا دائماً، حيث تواجه هذه المحولات أحياناً مخاطر متنوعة، مثل الجهد الزائد والتيار الزائد، مما هدفنا هو تحليل قدرة محول. قد يؤدي إلى تدمير عزل المحول، مما ينتج عنه خسائر وإزعاج للمستهلكين جهد متوسط/جهد منخفض على الحماية من الجهد الزائد الناتج عن البرق. وكوسيلة للحماية، تستخدم :وقسمنا عملنا إلى أربعة فصول. الحواجز والدروع الواقية SONELGAZ

الفصل الأول سيكون مخصصاً للجهد الزائد بشكل عام.

الفصل الثاني موضوع حالة الفن للمحولات.

الفصل الثالث سيوضح الأجهزة الحماية المختلفة للمحولات ضد الجهد الزائد

الفصل الرابع سيكون موضوع تطبيق وعرض مبدأ عمل الحماية التفاضلية. وأخيراً، نخلص إلى استنتاج عام.