

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

*Présenté par*

**M<sup>elle</sup>. KASMI Naima**

**M<sup>r</sup>. MESBAHI Ammar**

Thème

# Etude du comportement du transformateur de puissance en régime impulsionnel

*Mémoire soutenu publiquement le 28 septembre 2014 devant le jury composé de :*

**SEDDIKI Hamid**

Maitre de Conférence Classe A, UMMTO, Président

**OTMANE CHERIF Tahar**

Maitre de Conférence Classe A, UMMTO, Rapporteur

**BECHOUCHE Ali**

Maitre de Conférence Classe B, UMMTO, Examineur

**MESBAH Kousseila**

Doctorant, UMMTO

Examineur

# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Mr : T.Otmane Cherif d'avoir accepté de nous encadrer, ainsi pour sa grande disponibilité lors de nos différentes sollicitations et pour ses précieux conseils afin de mener à bien la réalisation de notre projet.*

*Nous remercions l'ensemble des membres des jurys qui nous ferons l honneur d'examiner notre travail. Et un grand merci a tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*On tient également à remercier nous amis, et à tous ceux qui nous on accompagné par leur accueil, leur présence, leurs discussions, leurs générosité, leurs patience et leurs soutien et tous ceux qui ont contribué de près et de loin à l'élaboration et la finalisation de ce mémoire.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail aux être qui me sont les  
plus chers*

*« MES PARENTS »*

*Pour leurs AMOUR leur EDUCATION et leurs  
SACRIFICES. que DIEU les gardes pour moi, je leurs  
souhaite une longue vie ;*

*A mon très cher frère et mes sœurs, pour qui je  
souhaite la réussite dans leurs projets en avenir.*

*A mes chers amis (es) : zahir, mohammed et  
mohamed ;*

*A tous le département d'électrotechnique ainsi ma  
section réseaux électrique ;*

*Enfin tout ceux et celles qui me sont chers (es).*

*Ammar*

## DEDICACE

*Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec toutes les personnes que j'aime.*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*À ma très chère grande mère;*

*À mes parents;*

*À la mémoire de mon oncle: Khial Said;*

*À mes frères: Amar, Slimane, Kamal, Fateh;*

*À mes sœurs: Razika, Ratiba, Nassira;*

*À mes oncles et mes tantes;*

*À mes cousin (es);*

*À tous mes amis (es);*

*Et à tous ceux qui m'ont donnés de l'aide et de soutien durant mon travail;*

*À tous ceux qui m'aiment; et tous ceux que j'aime.*

*À la promo réseau électrique 2014*

*Naima*

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissances**

Introduction :.....	2
I.1 Définition :.....	2
I-2- Symboles électriques du transformateur.....	2
I.3 Constitution d'un transformateur :.....	3
I.3.1 Partie active :.....	3
a. Le noyau (circuit magnétique) :.....	4
b. Bobinage (Les enroulements) :.....	5
c. Représentation des enroulements :.....	6
d. Couplages des enroulements du transformateur triphasé :.....	7
d.1 Groupe de couplage :.....	8
d.2 Schémas de couplage :.....	9
d.3 Choix du couplage :.....	10
I.3.2 La partie constructive :.....	10
I.4 Isolation :.....	10
I.5 Principe de fonctionnement :.....	11
I.6 Types de transformateurs de puissance :.....	11
I.7 Rapport de transformation :.....	13
I.8 Mise en parallèle des transformateurs triphasés :.....	14
I.9 Puissances du transformateur :.....	14
I.10 Rendement du transformateur :.....	15
I.11 L'échauffement :.....	15
a. Pertes électriques :.....	15
b. Pertes dans le circuit magnétique :.....	15
c. Pertes dans les isolants :.....	16
I.12 Refroidissement de transformateur :.....	16
I.13 L'utilisation du transformateur :.....	17
Conclusion :.....	17

## **Chapitre II : Les diverses contraintes sur les transformateurs de puissances**

Introduction :.....	18
II.1. Court-circuit.....	18
II.2. Les surcharges.....	19
II.3. Les surtensions.....	20
II.3.1. Origine des surtensions.....	20
II.3.1.1. Surtension d'origine interne.....	20
II.3.1.1. a) Surtension de Ferro-résonance.....	20
II.3.1.1. b) Surtension de manœuvre.....	21
II.3.1.1. c) Surtension à fréquence industrielle.....	21
II.3.1.1. d) Surtension provoquée par un défaut d'isolement :.....	21
II.3.1.1.e) La rupture de continuité de neutre :.....	22

II.3.1.2. Surtensions d'origines externes .....	22
II.3.1.2. a) le coup de foudre directe.....	23
II.3.1.2. b) Le coup de foudre indirecte .....	24
II.3.1.2. c) Le mécanisme de la décharge de foudre : .....	25
II. 3.1.3. Surtension par décharges électrostatique : .....	26
II.3.2. Propagation de l'onde de surtension .....	27
II.3.3. Répartition des surtensions le long d'un transformateur .....	27
II.3.4. Répartition initiale de la tension sur un enroulement du transformateur: .....	30
II.3.4. a) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est mis à la terre : .....	30
II.3.4. b) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est isolé de la terre : .....	33
II.3.5. Effet des surtensions .....	36
Conclusion.....	36

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

Introduction : .....	37
III.1 Protection des transformateurs : .....	37
III.2 Les éclateurs : .....	38
III.3 Les parafoudres : .....	39
III.3.1 Définition : .....	39
III.3.2 Type des parafoudres : .....	39
III.3.3 Avantage des parafoudres : .....	41
III.3.4 Distance de protection .....	42
III.4 Le câble de garde : .....	42
III.4.1 Rôles du câble de garde : .....	43
III.5 Les sectionneurs : .....	43
III.6 Le DGPT : .....	44
III.6.1 Le schéma de principe : .....	44
III.6.2 Principe de fonctionnement : .....	45
III.7 Thermostat à maximum réglable : .....	46
III.8 Disjoncteurs : .....	46
III.8.1 Principe de fonctionnement : .....	46
III.8.2 Fonction assurées par le disjoncteur : .....	46
III.8.3 Disjoncteur à huile : .....	48
III.8.4 Les disjoncteurs à air comprimé : .....	49
III.8.5 Disjoncteur à haute tension au SF6 (hexafluorure de soufre) : .....	49
III.9 Relais de Bucholz : .....	52
Conclusion : .....	53

## Chapitre IV : Application et discussions des résultats de simulation

Introduction.....	54
IV.1. Caractéristiques du transformateur .....	54
IV.1. a) Caractéristiques électriques.....	54
IV.1.b) Caractéristiques géométriques .....	54
VI.2. Organisation d'Orcad 16.3 :.....	55
IV.3. Schéma équivalent de l'enroulement sur Orcad 16.3.....	56
IV.4. Simulation sur Orcad 16.3 avec le neutre mis à la terre.....	57
IV.4.1 interprétation des résultats : .....	57
IV.5. Simulation sur Orcad 16.3 avec le neutre isolé de la terre.....	58
IV.5.1. interprétation des résultats : .....	58
IV.6. Application d'un parafoudre .....	59
IV.6.1.Schéma équivalent de l'enroulement sur Orcad 16.3 avec parafoudre.....	59
IV.6.2 Simulation de l'enroulement lors d'application du parafoudre.....	59
IV.6.3. Interprétation des résultats : .....	60
Conclusion.....	60
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>60</b>

# **Introduction générale**

L'énergie électrique est l'une des premières bases de l'économie actuelle car elle est l'un des besoins les plus importants pour l'homme. Afin de la mettre à la disposition de l'utilisateur après qu'elle est produite dans ces centrales électriques loin des zones de consommation, il est nécessaire de construire des réseaux pour transporter cette énergie vers les centres urbains et les sites industriels. Le transport de cette énergie ne peut se faire qu'en haute tension, il faudra donc élever la tension fournie par les générateurs des centrales électriques avant de la transporter. La haute tension est très dangereuse et nécessite une isolation exceptionnelle entre conducteurs, il n'est pas alors question d'alimenter une installation domestique en haute tension. Il sera donc nécessaire, d'abaisser la tension avant de la distribuer. Seuls les transformateurs peuvent réaliser ces opérations d'une façon économique.

Le transformateur est l'un des plus importants éléments constituant les réseaux électriques.

Pour assurer la fiabilité de son bon fonctionnement, il doit être bien protégé contre tous types de contraintes à savoir : Les surintensités et les surtensions internes et externes. Les surtensions, sont à l'origine de la création des problèmes transitoires à front très raide qui peuvent engendrer des contraintes gênantes sur le fonctionnement des différents dispositifs des réseaux en particulier le transformateur.

Les plus dangereuses sont les surtensions de chocs de foudres. La foudre qui atteint un fil de ligne produit des ondes de tension dans le temps au point d'impact. Ces ondes se propagent de part et d'autre du point d'impact avec une vitesse voisine de celle de la lumière et une certaine déformation. Lorsque l'onde de surtension arrive en un point de raccordement d'éléments du réseau, tel le point de raccordement d'un transformateur avec la ligne aérienne par exemple, son amplitude augmente et continue à se propager dans l'enroulement du transformateur. Cette situation peut provoquer des amorçages dans le transformateur, éventuellement des incendies et même des accidents de personnes se trouvant au poste.

Les réseaux électriques sont l'objet à la fois des surtensions internes et externes et les transformateurs sont les éléments les plus affectés, La considération des problèmes liés à la propagation des surtensions le long des enroulements du transformateur a fait l'objet de plusieurs investigations.

## **Chapitre I**

# **Généralités sur les transformateurs de puissances**

## Introduction :

Le transformateur est un appareil électrique très simple, mais il est très important dans un réseau électrique car c'est une machine de base pour le transport d'énergie électrique. Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans un circuit.

Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

### I.1 Définition :

Le transformateur est un appareil électrique statique à induction électromagnétique qui permet de transformer une tension ou un courant d'une certaine fréquence en une autre tension ou courant de même fréquence. Il est composé d'un circuit magnétique sur lequel sont placés deux bobinages au moins.

Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixe, inductivement couplée et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, nombre de phases de l'énergie électrique a courant alternatif).

### I-2- Symboles électriques du transformateur

Le transformateur peut être représenté par l'un des symboles reportés sur les figures (I-1) et (I-2).

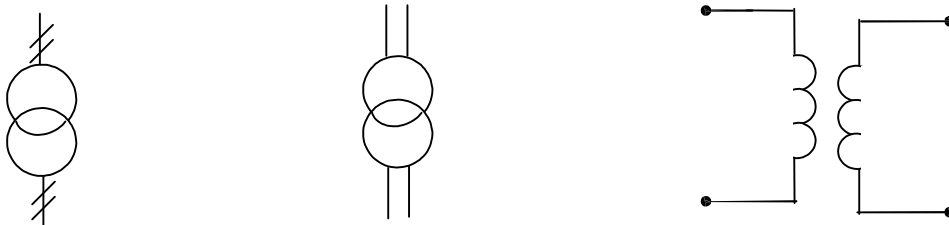


Fig. I-1 (symboles électriques du transformateur monophasé)

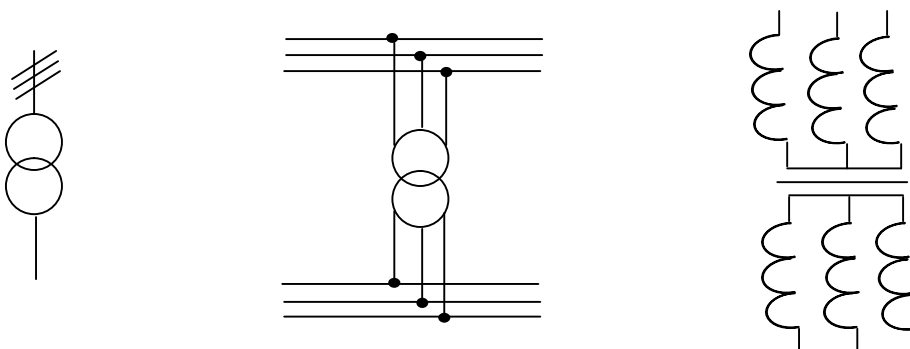


Fig. I-2 (symboles du transformateur triphasé)

### I.3 Constitution d'un transformateur :

Le transformateur est un appareil d'induction qui est composé de deux(2) parties principales qui sont :

- Partie active : Constitué essentiellement du circuit magnétique, électrique. Elle est destinée à conversion d'énergie électrique.
- Partie constructive : destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active

#### I.3.1 Partie active :

##### a. Le noyau (circuit magnétique) :

Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôle d'acier de bonne qualité, de plus pour minimiser les pertes dans le fer, les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique, les tôles utilisées sont en acier doux et ont une faible épaisseur et sont isolées entre elles avec du vernis. Le circuit se présente sous forme de trois colonnes et deux culasses, son rôle essentiel est de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes hystérésis et courant de Foucault.

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont :

- Transformateur à colonnes
- Transformateur cuirassé

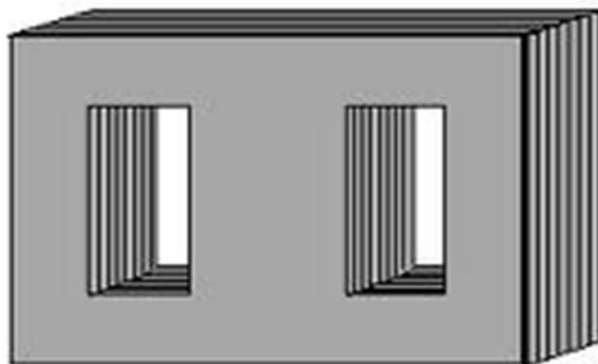
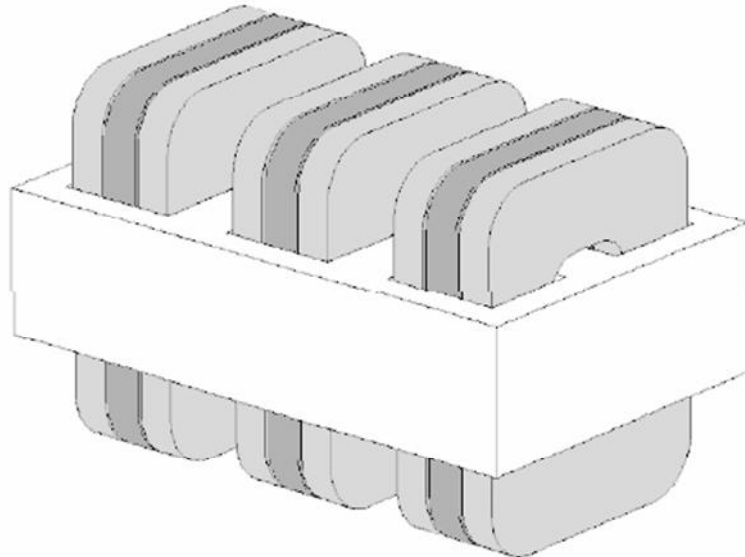


Fig. (I.3) : circuit magnétique d'un transformateur

### a.1 Transformateur cuirassé :

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux cotés. la cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines.



**Fig. (I.4) : transformateur cuirassé**

### a.2 Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé :

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonne. Mais il présente aussi certains inconvénients : ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande d'avantage de matériaux isolants pour la haute tension.

### a.3 Transformateur à colonne :

Le transformateur à colonne est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se ferme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux.

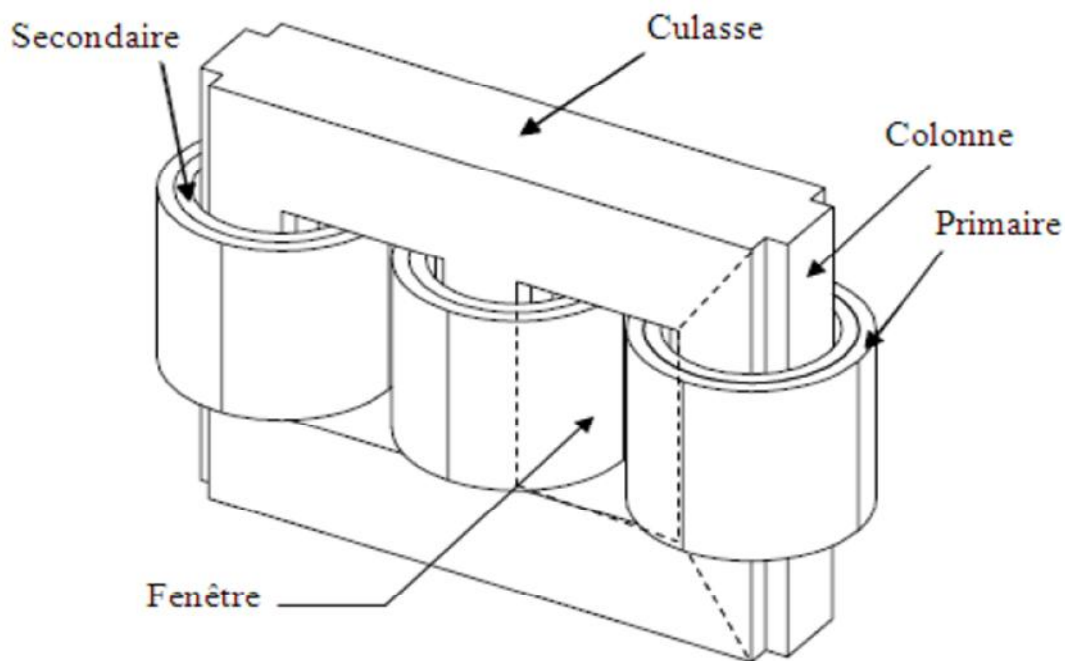


Fig. (I.5) : transformateur à colonne

### b. Bobinage (Les enroulements) :

Le transformateur est constitué d'un primaire et d'un secondaire constitué chacun de trois enroulements identiques. Ces enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

Les enroulements sont réalisés soit en cuivre soit en aluminium. Les bobinages sont effectués avec du fil rectangulaire isolé en papier en multicouches, en disque ou hélicoïdal.

Il y en a deux par colonne, l'un forme l'enroulement primaire et l'autre le secondaire tous deux électriquement distincts.

On désigne par les grandes lettres (A. B. C) les bornes d'enroulement haute tension et par les petites lettres (a. b. c) les bornes de la basse tension.

Les enroulements prennent différentes dispositions : En couche concentriques, et bi-concentriques et à galettes.

Les bobinages concentriques : Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques.

Les bobinages en galettes : Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les une des autres par une rondelle isolante.

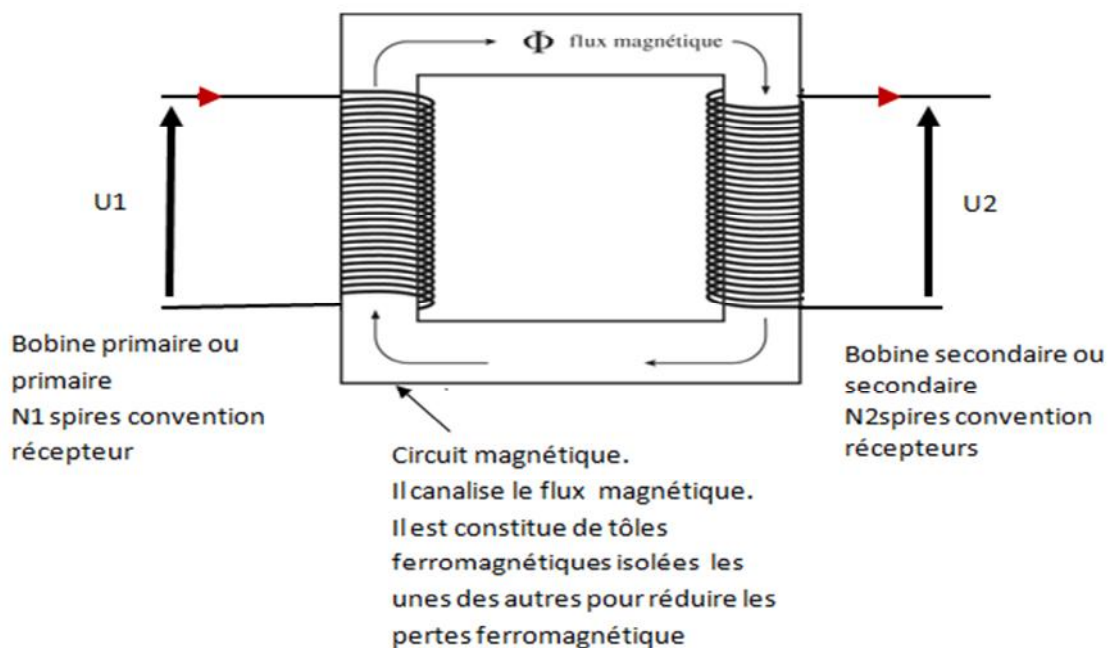


Fig. (I.6): bobines primaire et secondaire d'un transformateur

### c) Représentation des enroulements :

#### ➤ Enroulement primaire :

Le courant circulant dans l'enroulement est à faible d'intensité ; mais la tension très élevée à laquelle il est soumis impose une section de conducteur plus faible et l'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haut tension.

➤ **Enroulement secondaire :**

Le courant circulant dans cet enroulement est d'intensité très grande. Pour la réalisation de cette caractéristique, on impose un nombre de spires limité, et une section des conducteurs relativement importante.

**d. Couplages des enroulements du transformateur triphasé :**

Les enroulements sont en général concentriques pour minimiser les fuites de flux.

Le conducteur électrique utilisé dépende des applications, mais le cuivre est le matériau de choix pour toutes les applications à fortes puissances.

Pour les petites puissances, il suffit d'utiliser des conducteurs magnétiques émaillés pour assurer cette isolation. Dans les applications à plus fortes puissances, on entoure les conducteurs de papier diélectrique imprégné d'huile minérale pour assurer cette isolation.

Pour les fortes puissances, on utilise des conducteurs multibrins pour limiter l'effet de peau ainsi que les pertes par courant de Foucault.

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ces enroulements couplés en étoile ou en triangle. De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zigzag. (Fig. I-7)

	COUPLAGE		
	<b>Etoile Y</b>	<b>Triangle D</b>	<b>Zigzag Z</b>
Coté HT	<b>Y</b>	<b>D</b>	
Coté BT	<b>Y</b>	<b>d</b>	<b>z</b>

**Tableau. I-1 : représentation des différents couplages d'un transformateur**

Le couplage zigzag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six bobines. Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse.

### d.1 Groupe de couplage :

Pour un transformateur triphasé, les enroulements peuvent être connectés de trois manières différentes : -En étoile, représenté par la lettre Y.

-En triangle, représenté par la lettre D.

-En zigzag, représenté par la lettre Z.

Le couplage en étoile au primaire et au secondaire (Yy) est utilisé surtout pour les transformateurs de très haute tension, car il permet de réduire la tension aux bornes des enroulements d'un facteur  $\sqrt{3}$  et donc de réduire d'autant l'isolation.

Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles. Le courant traversant les bobines est réduit d'un facteur  $\sqrt{3}$ , ce qui est intéressant dans ces applications où le courant est particulièrement fort. Côté réseau, pour les mêmes raisons que précédemment, il est préférable de privilégier l'économie d'isolation.

Dans les réseaux de distribution électrique, un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est courant, car le couplage zigzag permet de réduire le déséquilibre de tension entre phases. Les particuliers étant connectés en monophasé, la charge n'est pas toujours bien répartie entre les phases et il est utile de lutter contre le phénomène.

Le couplage a également un rôle déterminant dans la détermination de l'impédance homopolaire du transformateur et dans la transmission du courant de 3<sup>e</sup> harmonique du primaire au secondaire.

Les couplages les plus utilisés :

- Le couplage triangle-étoile (Y y).
- Le couplage étoile-zigzag (Y d).
- Le couplage triangle-zigzag (Y z).

d.2 Schémas de couplage :

Etoile-étoile

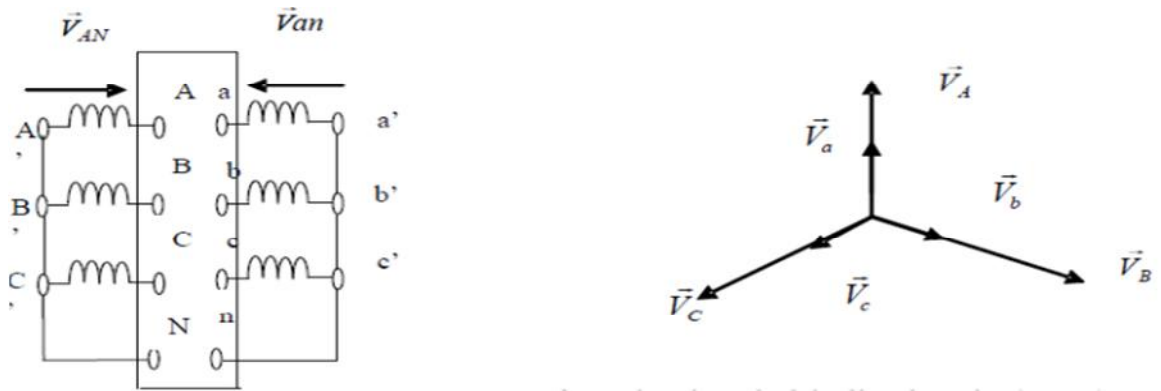


Fig. (I.7) : couplage Yy

Etoile -triangle

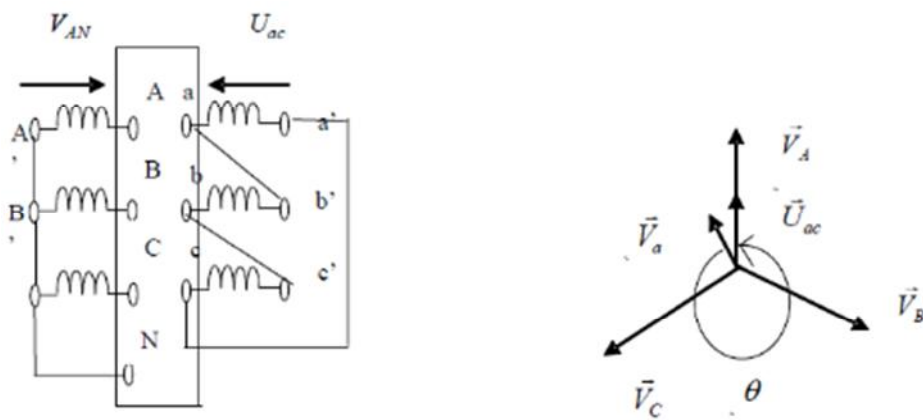


Fig. (I.8) : couplage Yd

Etoile- zigzag

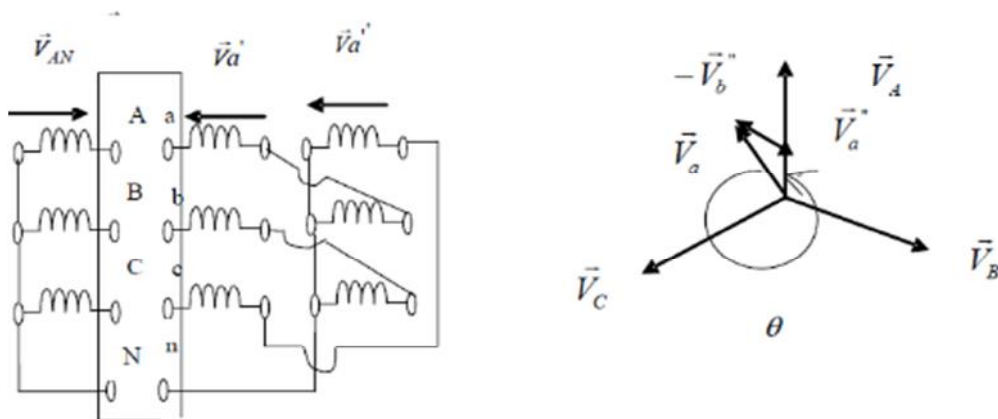


Fig. (I.9) : couplage Yz

### d.3 Choix du couplage :

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La charge peut nécessiter la présence du neutre (par exemple réseau BT). Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag.
- Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre  $I_n$  est VA Supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag.
- Côté haute tension, on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser).
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle.

### I.3.2 La partie constructive :

Les pièces constructives du transformateur sont :

#### ➤ La cuve

Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans l'huile, et assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement pour favoriser le refroidissement des bobinages.

#### ➤ Le couvercle

Il sert à couvrir la cuve. Il sert aussi de support aux accessoires, tels que : les isolateurs, le conservateur d'huile...

#### ➤ Le conservateur d'huile

Il permet le remplissage de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'aire extérieure humide.

#### ➤ Les isolateurs (HT)

Ils sont au nombre de trois et ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire(HT) et les lignes d'arrivées.

#### ➤ Les traversées (BT)

Ils sont au nombre de quatre. Ils sont formés de deux parties placées de part et d'autre de couvercle reliées par une tige entre les extrémités du secondaire (BT) et les lignes de départ.

### I.4 Isolation :

L'isolation des transformateurs de puissance est constituée d'huile et d'isolants celluloses (papiers). Ces matériaux ont des propriétés qui se complètent, pour permettre de réaliser l'isolement entre spires, entre bobinages, ou entre bobinages et masse, et de conférer à

l'ensemble une cohésion suffisante, pour supporter les efforts mécaniques, tout en assurant l'évacuation des pertes dissipées dans les enroulements (cuivre).

L'isolation diélectrique qu'elle soit solide ou liquide doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour ce faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur.

### I.5 Principe de fonctionnement :

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'inductions magnétique variable  $\Phi$  circule dans le circuit magnétique induit dans chacun des enroulements, une force électromotrice proportionnelle dans le temps au taux de changement  $d\Phi/dt$  et au nombre de spires que comporte cet enroulement. L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale. Il est donc traversé par un courant sinusoïdal et donne naissance à travers le circuit magnétique à un flux sinusoïdal. Ce flux engendre alors une force électromotrice induite  $E_1$  dans l'enroulement primaire et  $E_2$  dans l'enroulement secondaire.

Aux niveaux des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire, mais dont l'amplitude est différente.

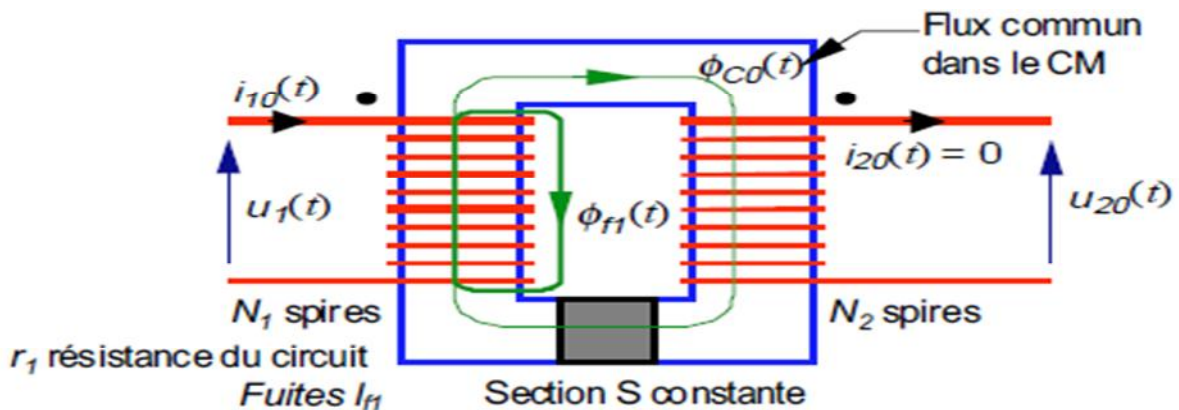


Fig. (I.10): notations de fonctionnement du transformateur

### I.6 Types de transformateurs de puissance :

#### I.6.1 Transformateur à huile minérale (immérgé) :

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement.

Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec. Il présente cependant des risques d'incendie et de pollution :

- Un défaut interne peut provoquer une surpression et une déformation de la cuve telles que des fuites d'huile peuvent apparaître. Suivant les circonstances, cela peut entraîner l'inflammation de l'huile ou encore une explosion.
- Les fuites d'huile peuvent aussi provenir d'un joint défectueux ou de la rupture d'une canalisation. Les huiles qui se répandent peuvent polluer la nappe phréatique. il faut donc prévoir sous le transformateur une fosse d'évacuation ou un bac de rétention d'huile.
- La combustion des huiles dégagent des produits toxiques et génèrent des fumées opaques gênant l'intervention des secours.



**Fig. (I.11) : transformateur immergé**

### **I.6.2 Transformateurs secs :**

Les enroulements BT et les enroulements HT sont concentriques et enrobés dans une résine époxy.

Le transformateur sec peut être disposé dans une enveloppe de protection qui permet de l'isoler du monde extérieur et d'assurer l'évacuation de la chaleur à travers de ses parois.

Le transformateur sec présente les meilleures garanties de sécurité contre l'incendie et contre la pollution (pas de fuite de liquide, pas de vapeurs nocives en cas d'incendie).

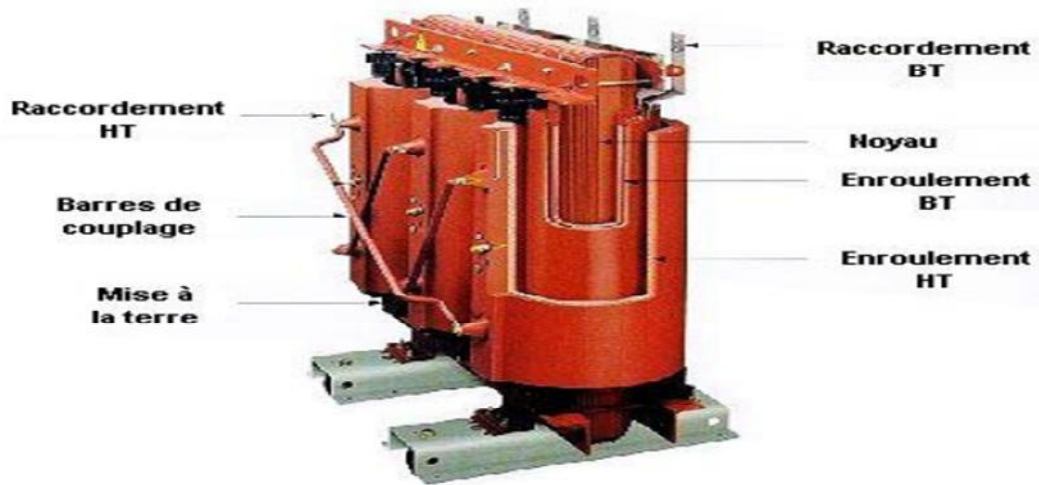


Fig. (I.12) : transformateur sec

## I.7 Rapport de transformation :

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire ne dépend plus uniquement des nombres de spires mais aussi du mode de couplage des enroulements. Dès lors qu'on parle d'un transformateur triphasé, on se doit donc d'en préciser les différents couplages.

### a) Le rapport de transformation par colonne $m_c$ :

Il est défini comme étant le rapport de nombre de spires secondaire par le primaire.

$$m_c = \frac{N_2}{N_1}$$

### b) Le rapport de transformation par phase $m_{ph}$ :

C'est le rapport de la tension composée secondaire à vide par la tension primaire composée :

$$m_{ph} = \frac{U_2}{U_1}$$

Remarque :

- \* si  $m < 1$  à  $U_2 < U_1$  : le transformateur est dit abaisseur.
- \* si  $m > 1$  à  $U_2 > U_1$  : le transformateur est dit élévateur.
- \* si  $m = 1$  à  $U_2 = U_1$  : le transformateur est dit d'isolement

### I.8 Mise en parallèle des transformateurs triphasés :

Pour des raisons économiques, techniques et de redondance, il peut être parfois intéressant de brancher plusieurs transformateurs en parallèle plutôt qu'un seul de plus forte puissance. Dans ce cas plusieurs conditions doivent être remplies

Les conditions nécessaires pour brancher deux transformateurs triphasés en parallèle sont:

- Même tension primaire et secondaire
- Même rapport de transformation
- Même déphasage ou indice horaire

Les tensions de court-circuit relatives (exprimées en pourcentage) des transformateurs doivent être identiques, avec une certaine tolérance.

### I.9 Puissances du transformateur :

Le transformateur parfait transmet intégralement au secondaire la puissance reçue au primaire.

$S_1$  : puissance apparente au absorbée primaire.

$S_2$  : puissance fournie au secondaire.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Le transformateur conserve le déphasage  $\varphi$ . Or, la puissance active  $P$  s'exprime comme :

$$P = S \cos \varphi$$

Tandis que la puissance réactive  $Q$  vérifie

$$Q = S \sin \varphi$$

Comme  $S$  et  $\varphi$  sont conservés alors il en va de même pour  $P$  et  $Q$ . Par contre dans le cas du transformateur idéal ; l'égalité des puissances apparentes.

$$S_1 = S_2 \quad \text{soit : } V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Dans le transformateur idéal conserve les puissances actives, réactives et apparentes, il conserve aussi le déphasage.

### I.10 Rendement du transformateur :

Le rendement d'un transformateur est égal à la puissance absorbée par le secondaire sur la somme des puissances :

$$\frac{\text{puissance fournie au secondaire}}{\text{puissance totale absorbée au primaire}} = \frac{P_2}{P_1} = \eta$$

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$V_1$ ;  $V_2$ : tension primaire et secondaire

$I_1$  ;  $I_2$  : courant primaire et secondaire

$\cos \varphi_1$ ;  $\cos \varphi_2$  : facteurs de puissance de primaire et secondaire

### I.11 L'échauffement :

L'échauffement se produit par les pertes d'énergie électrique dans la partie active du transformateur, pendant son fonctionnement. Ce qui nécessite le refroidissement de ce dernier, on distingue :

#### a. Pertes électriques :

Ce sont les pertes par effet joule, qui se produisent dans les enroulements, elles dépendent de la résistance de ces enroulements et d'intensité du courant qui les traverse.

Ces pertes sont données par l'expression suivante :

$$W = R I^2 T$$

$W$  : énergie électrique

$R$  : résistance des conducteurs des enroulements

$I$  : le courant circulant dans l'enroulement

$T$  : temps de fonctionnement

#### b. Pertes dans le circuit magnétique :

Les pertes dans le circuit magnétique, également appelées pertes fer, dépendent de la fréquence et de la tension d'alimentation. A fréquence constante on peut les considérer comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation.

- **Pertes par courant de Foucault :**

Le circuit magnétique qui est le siège d'une induction alternative, est parcouru par des courants induits appelés courants de Foucault, ces courants qui circulent dans des plans perpendiculaires aux lignes d'induction, tendent de s'enrouler autour de ces lignes, et produisent un dégagement de chaleur par effet joule. Ces pertes sont minimisées par l'utilisation des tôles magnétiques vernis (isolées entre elles électriquement) pour constituer un circuit magnétique.

- **Pertes par hystérésis :**

L'hystérésis est un décalage dans l'évolution d'un phénomène physique par rapport à sa cause.

Le phénomène d'hystérésis qui s'explique par le retard de l'induction sur le champ magnétique appliqué aux matériaux du circuit magnétique, Ce retard provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur, à chaque cycle du courant alternatif. Ces pertes sont minimisées par l'utilisation d'un métal ferromagnétique doux.

**c. Pertes dans les isolants :**

Malgré les conducteurs soient isolés par des isolants, il y a des faibles courants qui les traversent mais se sont généralement des courants négligeables.

## **I.12 Refroidissement de transformateur :**

Pour les transformateurs à basse et moyenne tension, on utilise le refroidissement naturel (l'air). La circulation de l'air est libre, ou bien activée par des ventilations.

Pour les transformateurs à puissance élevée la chaleur dégagée doit être dissipée par un transfert au milieu ambiant nécessitant la mise en œuvre des moyens de refroidissements.

- **Le refroidissement à ventilation forcée :**

L'échange de chaleur est activé par la mise en œuvre des ventilations qui soufflent l'air frais sur les parois de la cuve.

- **Le refroidissement à circulation forcée de l'huile :**

La circulation d'huile diminue la viscosité de l'huile et augmente sa vitesse dans les radiateurs.

### **I.13 L'utilisation du transformateur :**

Le transformateur joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique à longue distances, sert aussi à augmenter ou abaisser la tension sur un réseau.

Le transformateur permet à l'énergie électrique d'être transportée à de longues distances de façon économique et distribuée dans les industries et les habitations.

On l'utilise aussi dans les cas suivants :

- Liaison entre les gros alternateurs des centrales thermiques ou hydrauliques et les réseaux de haute tension sur lesquels ils débitent.
- Liaison entre les réseaux HT, MT et BT.
- Alimentation des services auxiliaires des centrales thermiques ou hydrauliques.

### **Conclusion :**

Les transformateurs à haute efficacité fonctionnent grâce à une technologie éprouvée et fiable qui existe déjà depuis des décennies. En choisissant les matériaux adéquats, de dimensions et une conception appropriée, Il est possible de réduire considérablement les pertes d'un transformateur, avec une moyenne de 70%. Ainsi, les transformateurs industriels offrent un grand potentiel d'économies de coûts et d'énergie.

En effet, en achetant un transformateur, il faut non seulement prendre en compte le prix d'achat, mais aussi le coût global de cycle de vie. Ce coût comprend à la fois les pertes à vide et les pertes en charge. Sur le plan économique, le transformateur ayant le plus faible coût global représente la meilleure option. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un modèle à haute efficacité. Il est ensuite essentiel de procéder à une étude du réseau afin de déterminer les niveaux d'harmoniques du réseau relié au transformateur, étant donné que ces harmoniques peuvent avoir de graves répercussions à la fois sur la durée de vie et sur les pertes du transformateur.

Les recommandations suivantes permettent d'éviter de façon simple les pertes importantes inutiles :

- En achetant un transformateur, toujours demandé au fournisseur de préciser une alternative à haut rendement énergétique en plus du modèle classique.
- Pour éviter d'effectuer une évaluation énergétique de chaque transformateur acheté, il peut être souhaitable de mettre en place la politique visant à n'acquérir que des transformateurs.
- Si des transformateurs de 40 ans ou plus sont encore utilisés, il est sage, sur le plan économique, de les remplacer par de nouveaux transformateurs à haute efficacité, même s'ils n'ont pas atteint la fin de leur durée de vie. En effet, ces plus vieux transformateurs subissent de telles pertes qu'il est justifié de les remplacer immédiatement.

## **Chapitre II**

# **Les diverses contraintes sur les transformateurs de Puissances**

## **Introduction**

Un réseau électrique doit fournir une énergie avec une meilleure qualité possible. Cette qualité se dégrade avec l'apparition des défauts dont la durée peut conduire à des arrêts des fonctionnements prolongés.

Pendant toute variation brusque d'une ou plusieurs grandeurs qui déterminent le fonctionnement d'un transformateur (tension, fréquence, charge, etc...), il se produit le passage d'un état à un autre. Généralement, ce passage dure un temps très court, mais tout de même, il peut être accompagné d'effets importants et dangereux pour le transformateur et affectent directement sur sa durée de vie.

L'étude de ces défauts à une très grande importance pour l'exploitation de transformateur, Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes et leurs conséquences.

### **II.1. Court-circuit**

Un court circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tension différente à la même source, ou la mise en connexion volontaire ou accidentelle de deux points ou plus d'un circuit électrique entre lesquels il ya une différence de potentiel.

#### **II.1.1. Causes des courts-circuits**

Un court circuit peut avoir différentes causes :

- Origine mécanique : erreur de câblage, rupture de conducteur contacte avec le conducteur voisin, présence d'une branche ou d'un animale.
- Origine climatique :

Ligne aérienne : coup de foudre sur une et balancement des conducteurs par le vent.

Ligne souterraines : mouvement de terrain ; infiltration d'humidité.

- Origine interne : surtension de manouvre.
- Isolation dégradés par l'user, la chaleur, l'humidité ou des produits corrosifs.

#### **II.1.2. Les conséquences des courts circuits**

Les conséquences des surintensités sont :

- Dégradation de matériel : La chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire foudre les métaux environnants, carboniser les isolants.

- Dégradation du circuit: Les efforts électrodynamiques des courants des courts circuits sont très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués.
- Incendie : L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court circuit est très important, il concentre ces effets sur les points faibles et déclenche les incendies.
- Les courants de court-circuit réduisent les capacités mécaniques des conducteurs.

### **II.1.3. Types de court circuit**

Sur le réseau triphasé, trois types de court circuit peuvent être observés :

- Monophasé : phase et neutre reliés (80%des cas) ;
- Biphasé : deux phases reliées ensemble (15% des cas) ;
- Triphasé : les trois phases sont raccordées (5% des cas).

## **II.2. Les surcharges**

Une surcharge est une intensité électrique supérieure à celle prévue par l'appareil ou par le circuit électrique. En générale, il y a surcharge quand trop d'appareils sont branchés sur le même circuit. A la différence du court-circuit qui est une surintensité de forte valeur et de courte durée, la surcharge est une sur intensité de faible valeur mais de longue durée.

Les surcharges sont dues essentiellement à une augmentation de la demande d'énergie, mais parfois aussi à un dimensionnement incorrect des équipements qui composent les installations électrique.

### **II.2.1. Les conséquences des surcharges**

Un régime de charge d'un transformateur au-delà des valeurs de la plaque signalétique a les conséquences suivantes :

- Les températures des enroulements, des calages, des connexions, des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.
- L'induction magnétique du flux de fuite en d'hors, du circuit magnétique augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courant de Foucault dans les parties métalliques embrassées par le flux de fuite.
- Comme la température varie, les taux d'humidité et teneur en gaz dans l'huile sont modifiés.

- Les traversées, les connexions d'extrémité du câble et les transformateurs de courant sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.
- Vieillesse thermique de l'isolation du transformateur, lié à l'augmentation des courants et des températures.

### **II.3. Les surtensions**

On appelle surtension toute élévation de la tension au-dessus de la tension de service maximale ou toute tension fonction de temps qui dépasse la tension de crête du régime permanent à sa tolérance maximale.

Les surtensions sont dangereuses sur un réseau de distribution ainsi que, sur les éléments constituant. En effet, les risques se situent essentiellement au niveau des dysfonctionnements de la destruction du matériel, en particulier les transformateurs de puissance (qui font l'objet de notre étude) subissent des contraintes de tension, qui peuvent être permanentes du fait de la tension de service, ou bien d'une courte durée du fait de surtension due à diverses origines.

#### **II.3.1. Origine des surtensions**

Elles peuvent être d'origine interne ou externe :

##### **II.3.1.1. Surtension d'origine interne**

Les surtensions d'origine interne ne dépendent que de réseaux lui-même, elles résultent d'un changement de régime en un point d'un réseau. (Commutation d'une partie de réseau qui comporte les machines de grande puissance, claquage ou contournement d'isolant). [Bel 84].

##### **II.3.1.1. a) Surtension de Ferro-résonance**

Le terme Ferro-résonance désigne des oscillations anormales dans un réseau électrique pouvant se stabiliser et dues à la saturation des matériaux magnétiques. [Gar 84].

Son amplitude est rarement spontanée, elle résulte généralement d'un défaut ou d'une manœuvre de disjoncteur [lors de l'enclenchement de circuit absorbant une forte puissance capacitive (ligne, câbles, ligne avec compensation série) et des inductances non linéaires (transformateurs réactance shunt)]. [Ber 79].

**II.3.1.1. b) Surtension de manœuvre**

Dans un réseau électrique c'est tout ce qui contribue à modifier la topologie de ce réseau, ouverture ou fermeture d'une liaison, court-circuit... **[Gar 84]**

Les surtensions de manœuvres dépendent uniquement des caractéristiques propre du réseau électrique, se traduisent par des régimes transitoires complexes et se manifestent par des oscillations fortement amorties avec fréquences allant jusqu'à quelques Kilohertz.

Les surtensions de manœuvre sont du essentiellement à :

- La coupure des lignes à vide ou de batteries de condensateur.
- L'enclenchement et ré enclenchement des lignes à vide.

**II.3.1.1. c) Surtension à fréquence industrielle**

Les surtensions à fréquence industrielle (50Hz ou 60Hz) sont causées souvent par :

- Un défaut à la terre
- Une rupture du conducteur neutre
- Un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régulateur en charge d'un transformateur.

Ces surtensions sont de longue durée (quelque seconde à quelque minute) et ne sont pas bien amorties.

**II.3.1.1. d) Surtension provoquée par un défaut d'isolement :**

Ces surtensions prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre une phase et la terre, dans le cas d'un réseau triphasé à neutre isolé de la terre la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumise, par rapport à la terre à la tension composé  $U = \sqrt{3}V$ . [Ful 92].

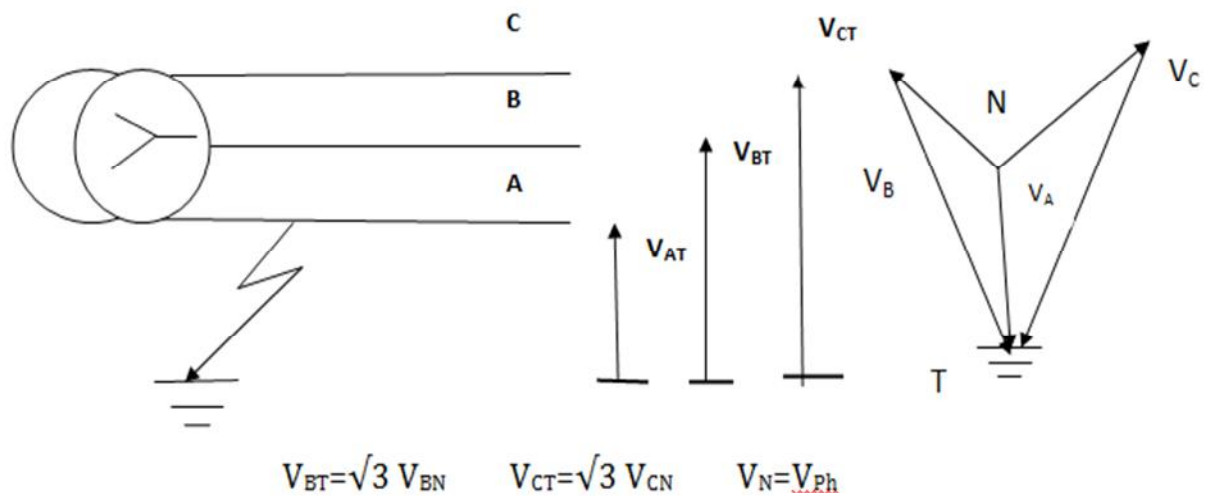


Fig. (II.1) : surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.

#### II.3.1.1.e) La rupture de continuité de neutre :

Les réseaux de distribution sont généralement triphasés, de nombreux appareillages sont monophasés. En fonction du besoin de chacun des abonnés BT, des déséquilibres de tension peuvent se produire. Le cas le plus contraignant est en fait la rupture de neutre qui peut induire une montée en potentiel dommageables pour des appareils prévus pour fonctionner sous une tension simple et qui se trouve alors sous une tension proche de la tension composée.

#### II.3.1.2. Surtensions d'origines externes

Les décharges atmosphériques (foudre) sont les causes principales des surtensions externes, qui sont indépendantes de la tension de réseau et c'est un phénomène naturel dangereux.

Les réseaux aériens sont les plus affectés par ces surtensions. L'amplitude et la raideur de ce type de surtensions sont très grandes, mais leurs durées sont courtes (quelques dizaines ou centaines de microsecondes).

Une distinction est souvent établie entre :

- Le coup de foudre "direct" touchant une ligne.

- Le coup de foudre “indirecte“ tombant à proximité d’une ligne, sur un pylône métallique, ou ce qui revient au même sur câble de garde (mis a la terre, ce câble relie les sommets des pylônes, il est destiné à protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs).



Fig. (II.2) : Image d’un coup de foudre

### II.3.1.2. a) le coup de foudre directe

La décharge frappe directement sur un ou plusieurs conducteurs de phase, elle se manifeste par l’injection dans la ligne d’une onde de courant de plusieurs dizaines de KA, celle-ci peut faire fondre les conducteurs, en se propageant de part et d’autre de point d’impact et provoque une augmentation de la tension  $U$  donnée par la formule ci-dessous [ful 92].

$$U(t) = Z_c * I_f / 2$$

$Z_c$  : impédance caractéristique du linge considéré.

$I_f$  : courant injecté.

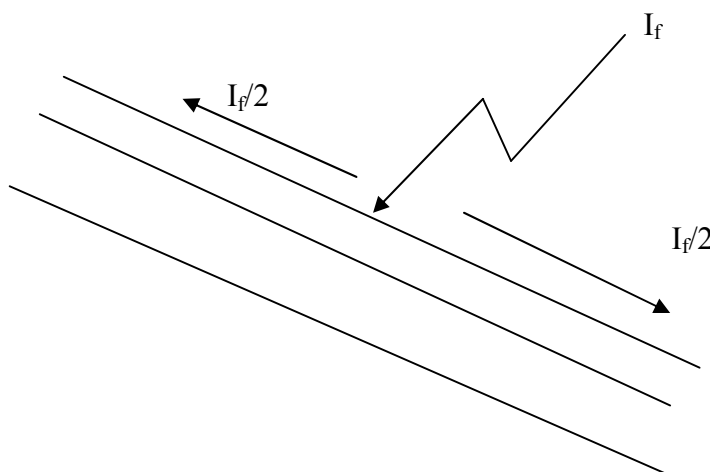


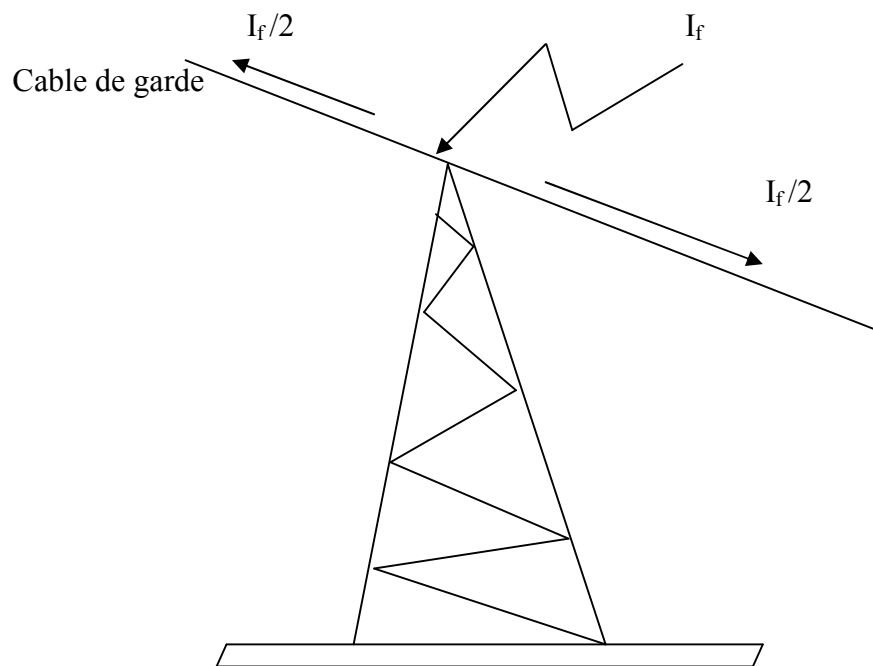
Fig. (II.3) : schéma d’ un coup de foudre direct

### II.3.1.2. b) Le coup de foudre indirecte

La tension apparaissant aux bornes de la chaîne d'isolateur dépende de la résistance  $R$  de la prise de terre, de l'inductance  $L$  de pylône et de la manière dont le courant se répartit de part et d'autre de point d'impact.

Lorsqu'il se produit sur un support, ou même simplement à proximité d'une ligne, des surtensions importantes sont générées dans le réseau. Ce deuxième cas, plus fréquent que le précédent, peut se révéler presque aussi dangereux. Si la foudre tombe sur le pylône ou sur le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique par rapport à la terre.

La surtension correspondante peut atteindre des centaines de KV, lorsque cette tension atteint la tension d'amorçage d'un isolateur, il se produit un amorçage en retour entre la structure métallique et un des conducteurs actifs. Alors la qualité de prise de terre joue ici un rôle très important.

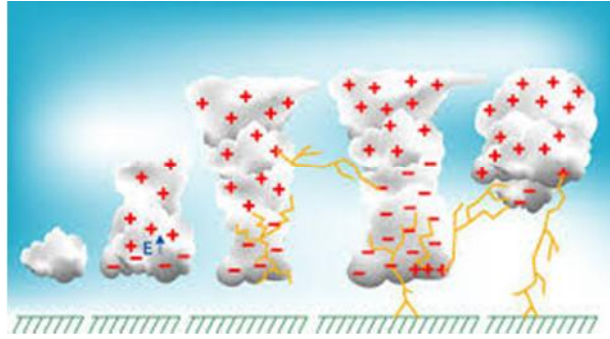


**Fig. (II.4) : (Schéma d'un coup de foudre sur un câble de garde)**

Pour la conception des lignes, pour minimiser le nombre de coup de foudre on doit tenir compte de différents facteurs, principalement : la hauteur des pylônes, le nombre et l'emplacement des fils de gardes, le nombre de disque d'isolateur par chaîne, l'impédance des pylônes et l'impédance pylône terre.

### II.3.1.2. c) Le mécanisme de la décharge de foudre :

Le nuage orageux est en général constitué en partie haute (partie froide) de cristaux de glace chargé positivement et en partie basse de gouttelette d'eau chargé négativement.



**Fig. (II.5) : Séparation des charges dans un nuage**

Cette séparation de charges due au mouvement d'air (l'air chauffé au voisinage de la terre repousse les vapeurs d'eau vers le haut ou elles se transforment en glace) crée des contraintes électriques à l'intérieur du nuage lui-même et entre le nuage et le sol. Les deux charges sont généralement séparées par plusieurs kilomètres. La différence de potentiel peut atteindre plusieurs dizaines de méga volts. Quand le champ électrique atteint la valeur critique, une décharge de foudre est initiée. La première décharge progresse vers le sol par bonds successifs (traceur). Le premier traceur s'éteint, un deuxième apparaît sur le même parcours qui était resté ionisé. On peut avoir 15 à 20 traceurs l'un derrière l'autre et chacun avançant un peu plus vers la terre. Quand le traceur de polarité négative arrive à 100 ou 150 mètres du sol, des effluves positifs jaillissent de la terre vers lui et se transforment en une colonne très brillante qui monte vers le nuage. Quelques temps après, un autre traceur descend du nuage vers le sol sur le même chemin et il est suivi d'une autre décharge de remontée analogue à la première.

Un éclair se compose de 3 à 5 décharges aller\_ retour successifs (leader et return stroke les) pour les coups de foudre négatifs. Tandis que les coups de foudre positifs sont constitués d'une seule décharge (aller-retour)

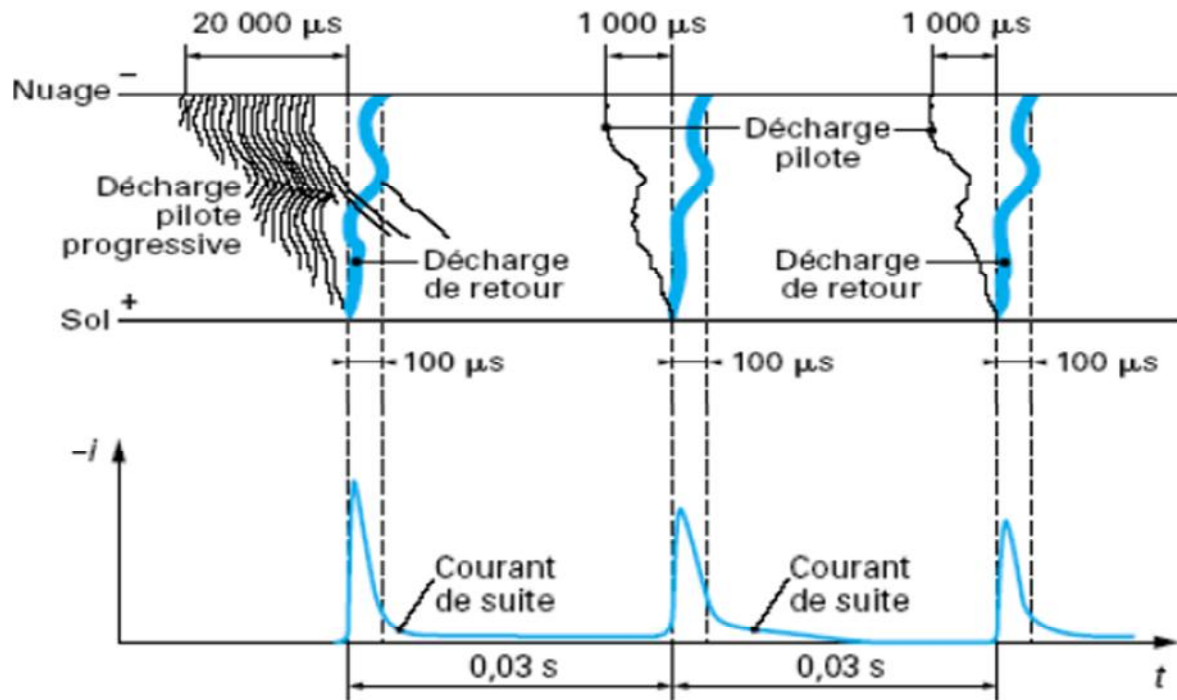


Fig. (II.5) : le mécanisme du coup de foudre.

**II. 3.1.3. Surtension par décharges électrostatique :**

Une ligne située à proximité d'un nuage électrisé se charge en électricité de signe contraire. Si le nuage se décharge brusquement à la terre, la charge de la ligne est libérée, il en résulte une surtension qui peut atteindre 500 kV en 1μs. Ce n'est dangereux que pour les réseaux MT et BT.

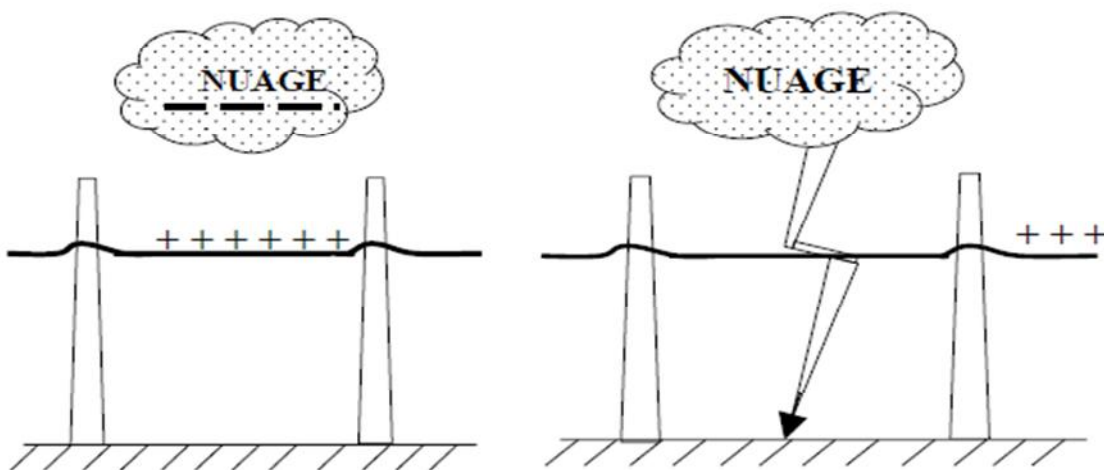


Fig. (II.6) : décharge électrostatique

### II.3.2. Propagation de l'onde de surtension

L'onde se propage le long de la ligne a une vitesse  $V = \sqrt{1/LC}$  ou L et C sont respectivement l'inductance et la capacité par unité de longueur de la ligne.

Cette vitesse est de l'ordre 300 000 km/s dans une ligne aérienne et de 100 à 150 000 km/s dans un câble isolé.

Au cours de sa propagation, l'onde s'aplatit, s'amortit et devient peu à peu moins dangereuse.

### II.3.3. Répartition des surtensions le long d'un transformateur

Lorsqu'une surtension transitoire parvient à l'entrée d'un bobinage de transformateur, elle se propage le long de celui-ci, la répartition de la tension qui en résulte est un phénomène très complexe durant lesquelles les surtensions entre les différentes bobines et même entre les différentes spires de l'enroulement peuvent dépasser de plusieurs fois la tension de régime permanent de fonctionnement de transformateur.

Le cas le plus dangereux pour un transformateur est celui où les trois phases sont traversées par les mêmes ondes de surtension, nous allons alors étudier dans ce qui suit le cas le plus simple des surtensions dans un transformateur lorsqu'un seul enroulement est soumis à une onde de surtension ; l'autre borne être mise ou isolé de la terre.

#### Le schéma équivalent :

Pour l'étude de ce phénomène on se limite à un schéma équivalent d'un enroulement du côté haute tension de transformateur fig. (II.7), il existe toujours un enroulement connecté en triangle joue le rôle d'un écran magnétique, nous assumerons aussi que les ondes agissant sur le transformateur ont des fréquences suffisamment importantes pour pouvoir négliger l'influence du noyau sur l'enroulement.

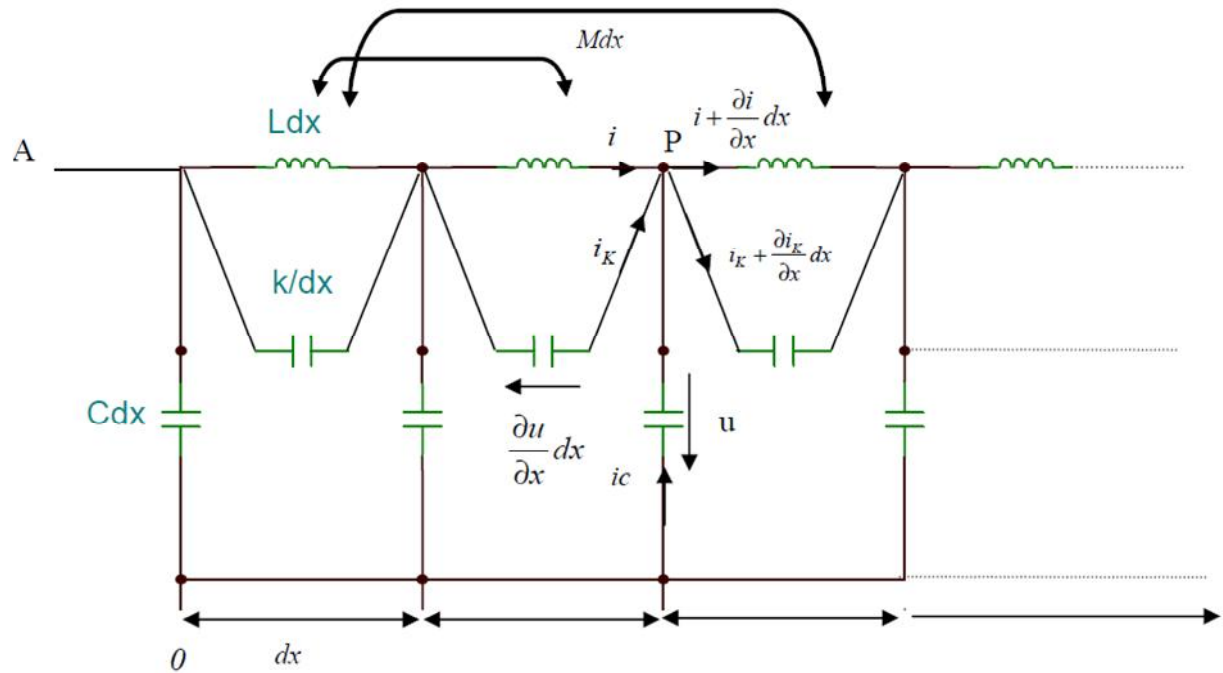


Fig. (II.7) : schéma équivalent de l'enroulement haute tension du transformateur

L (H/m) : Inductance propre des éléments de l'enroulement.

M (H/m): Inductance mutuelle entre enroulements.

K (F/m) : capacité longitudinale entre enroulements.

C (F/m) : capacité transversale de l'enroulement.

**Equations de circuit :**

L'application de l'équation de Kirchhoff au nœud P sur la figure (II.7) donne :

$$i + i_k = (i + \frac{\partial i}{\partial x} dx) + (i_k + \frac{\partial i_k}{\partial x} dx) - i_c$$

D'ou: 
$$i_c = -\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} dx \tag{A} \tag{II.1}$$

Comme : 
$$i_c = c dx \frac{\partial u}{\partial t} \tag{A} \tag{II.2}$$

De (II.1) et (II.2) on a :

$$\frac{\partial (i + i_k)}{\partial x} dx = - c dx \frac{\partial u}{\partial x} \tag{A/m} \tag{II.3}$$

Sur la capacité K, on a la relation suivante :

$$i_k = - \frac{K \partial^2 u}{d x \partial x \cdot \partial t} d x$$

D'où: 
$$i_k = - K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$$

Et : 
$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{II.4})$$

Sur l'inductance L on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} d x = - l d x \frac{\partial i}{\partial t}$$

D'où: 
$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t}$$

Et : 
$$\frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x}$$

En multipliant les deux membres par  $\frac{\partial t}{\partial x}$ , on aura :

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{II.5})$$

En sommant (II.4) et (II.5) ; on obtient :

$$\frac{\partial (i + i_k)}{\partial x} = -\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} - K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{II.6})$$

En égalant (II.3) et (II.6) puis en multipliant membre à membre  $L \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$ , on aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - L C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + L K \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t} = 0 \quad (\text{A/m}) \quad (\text{II.7})$$

La solution de l'équation (II.7) est de la forme :

$$u = U \cos(\omega t) \cdot \sin(\beta x) \quad \omega = 2\pi f : \text{ est la pulsation, } f \text{ étant la fréquence.}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$\beta$  : est la constante de propagation.

$\lambda$  : est la longueur d'onde.

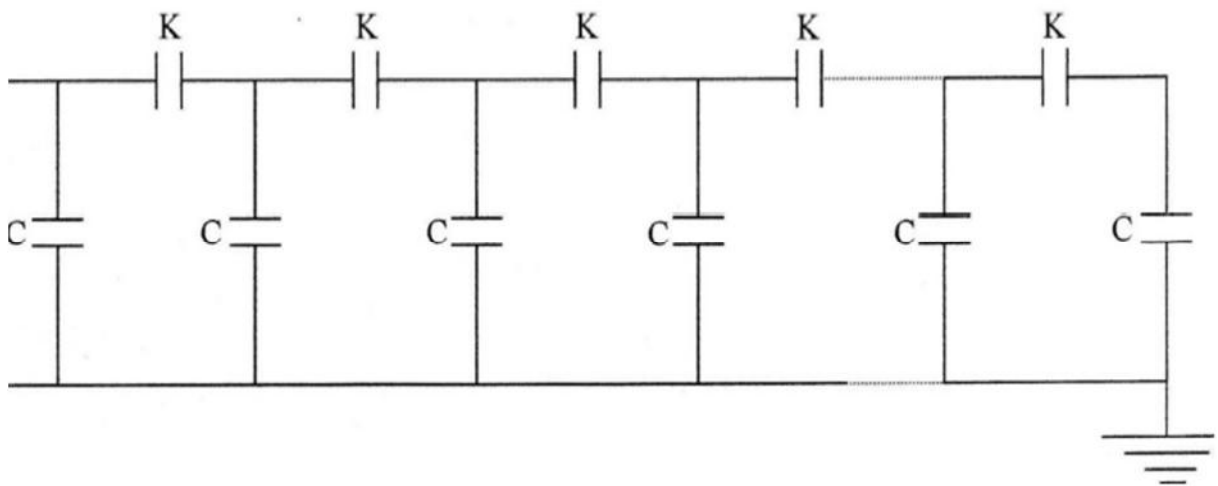
Cette solution représente une onde stationnaire.

### II.3.4. Répartition initiale de la tension sur un enroulement du transformateur:

Lorsqu'on étudie la répartition initiale de la tension en régime transitoire, sur un bobinage, la contribution des inductances est nul car le courant ne parcourt plus les spires à cause de leur forte réactance d'induction ( $\omega L$ ) et ne circule qu'à travers les capacités transversales ( $C$ ) et les capacités longitudinales ( $K$ ). C'est donc uniquement la répartition due à la présence des capacités que l'on prend en compte.

#### II.3.4. a) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est mis à la terre :

Pour calculer la distribution initiale de la tension, on admet que les réactances ( $\omega L$ ) égale à l'infinie, et on considère que la répartition de la tension ne dépend que des capacités.



**Fig. (II.8) : schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale de la tension.**

Examinons le schéma de la figure (II.8) et admettons que le neutre de l'enroulement est mis à la terre.

a) Si  $C = 0$ 

S'il n'y avait pas de capacités par rapport à la terre ( $C=0$ ), toutes les capacités  $K$  seraient en séries et le circuit de la (fig. II.8) serait parcouru par un courant de la même valeur. On obtient alors une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement (identique à la répartition au régime permanent).

- Le neutre est mis à la terre : la répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les points M et N qui correspondent respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement qui se trouve sous la tension  $U$  et à sa fin, dont le potentiel est nul (fig. II-9).
- Le neutre est isolé de la terre : la répartition est représentée par une droite horizontale  $M' N'$  (fig. II10).

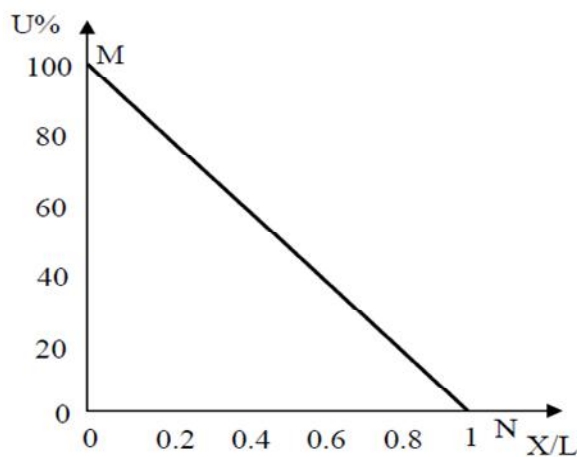


Fig. (II.9). Neutre mis à la terre

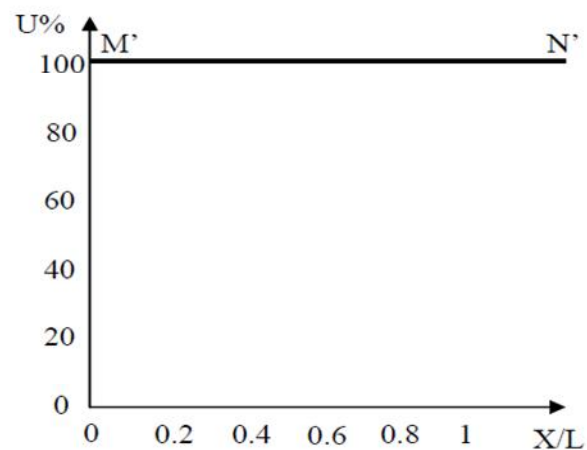
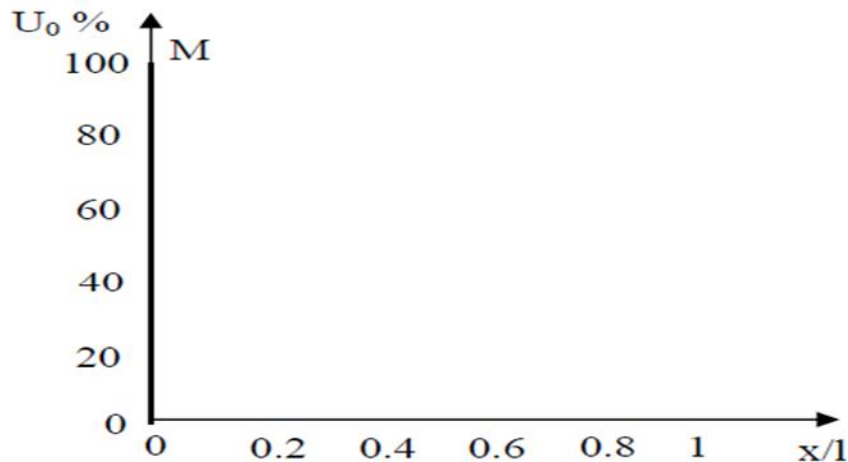


Fig. (II.10). Neutre isolé de la terre

a) Si  $K = 0$  :

Dans ce cas le courant de ligne se dirige vers la terre seulement à travers la première capacité  $C$  depuis le commencement de l'enroulement. Cela veut dire que toute la tension est concentrée sur la première spire qui est donc soumise à une très forte surtension, une telle répartition est représentée par une droite verticale réunissant les points M et O.

La répartition initiale réelle de la tension le long de l'enroulement se situe entre les droites MN et MO correspond respectivement aux limites ( $C = 0$  et  $K = 0$ ).

Fig. (II.11). (Si  $K=0$ )

Pour le calcul de la répartition initiale de la tension, dans l'hypothèse où ( $L \rightarrow \infty$ ), l'équation (II.7) devienne :

$$-c \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + K \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (\text{A/ms}) \quad (\text{II.8})$$

Pour ( $t=0$ ) : l'équation (II.8) s'écrit :

$$-C u_0(x) + K \frac{\partial^2 u_0(x)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{C/m}) \quad (\text{II.9})$$

On divise les deux membres de l'équation par  $K$ , on aura :

$$\frac{\partial^2 u_0(x)}{\partial x^2} - \frac{C}{K} u_0(x) = 0 \quad (\text{V/m}^2) \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II.10) est une équation différentielle de 2<sup>ème</sup> degré, tel que sa solution est de type :

$$u_0(x) = A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x} \quad (\text{II.11})$$

Avec :  $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$  : est le facteur de la répartition initiale.

### ➤ Détermination des constantes A et B :

Les conditions aux extrémités et aux limites d'après la figure (II.11) nous donnent :

- Pour  $x = 0$  : (entrée de l'enroulement) ;

$$u(x, 0) = u(0, 0) = U \quad (\text{II.12})$$

- Pour  $x=1$  : (point ou le neutre mis à la terre) ;

$$u(x, 0) = u(1, 0) \tag{II.13}$$

En introduisant les équations (II.12) et (II.13) dans l'expression (II.11) on aura :

- ❖ Pour  $x = 0$  :

$$U = A + B \Rightarrow B = U - A$$

- ❖ Pour  $x = 1$  :

$$Ae^{\alpha l} + e^{-\alpha l} = 0$$

Après les calculs, on trouve :

$$A = -U \frac{e^{-\alpha l}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}$$

$$B = U \frac{e^{-\alpha l}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}$$

En injectant A et B dans l'expression (II.12), on obtient :

$$u_0(x) = -U \frac{e^{-\alpha l}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} e^{\alpha x} + U \frac{e^{\alpha l}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} e^{-\alpha x}$$

$$u_0(x) = U \left( \frac{e^{\alpha(1-x)} - e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \right) \tag{II.14}$$

Ou :

$$u_0(x) = U \frac{\text{sh}[\alpha(1-x)]}{\text{sh}(\alpha l)}$$

Cette analyse mathématique montre que la tension le long de l'enroulement est répartie suivant une loi exponentielle.

**II.3.4. b) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est isolé de la terre :**

Examinons le schéma de la figure (II.8) et admettons que le neutre de l'enroulement est isolé de la terre.

Si  $C=0$  :

Nous aurons une répartition uniforme de la tension représentée par la droite horizontale (M'N') de la figure (II.10).

Si  $K=0$  :

Nous aurons la répartition initiale de la tension représentée par la droite verticale (M'O) de la figure (II.11).

La répartition réelle de la tension le long de l'enroulement se situe entre les droites (M'N') et (M'O), correspond respectivement aux limites ( $C = 0, K = 0$ ).

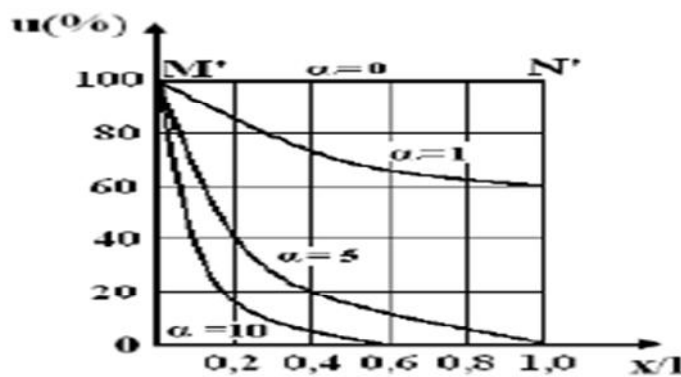


Fig. (II 12) :

✓ Les conditions aux extrémités sont inchangées tandis que les conditions aux limites seront modifiées par rapport au cas étudié précédemment.

❖ Pour  $x = 0$  :

$$u(x, 0) = u(0,0) = U \tag{II.15}$$

❖ Pour  $x = 1$  : (Dans ce cas le courant égal à zéro)

$$i + i_k = 0$$

Dans l'hypothèse où ( $L \rightarrow \infty$ ), l'équation (II.6) devienne :

$$\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} = -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \Rightarrow \int \frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx = -K \int \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} dx$$

$$(i + i_k)_{x=1} = -K \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=1} = 0$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x=1} = 0 \tag{II.16}$$

On introduisant (II.15) et (II.16) dans (II.11) on aura :

❖ Pour  $x = 0$  :

$$U = A + B$$

❖ Pour  $x = 1$  :

$$A\alpha e^{\alpha} - B\alpha e^{-\alpha} = 0$$

En calculant, on détermine que :

$$A = U \frac{e^{-\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}$$

$$B = U \frac{e^{\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}$$

En injectant A et B dans (II.), on aura :

$$u_0(x) = U \frac{e^{-\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}} e^{\alpha x} + U \frac{e^{\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}} e^{-\alpha x}$$

Ou :

$$u_0(x) = U \frac{ch[\alpha(1-x)]}{ch(\alpha)}$$

(II.17)

Aussi cette analyse mathématique montre que la tension le long de l'enroulement est répartie suivant une loi exponentielle.

**Répartition finale de la tension :**

Les courbes de répartition de la tension le long de l'enroulement représentées sur les figures (II.13) et (II.14) correspondent aux régimes transitoires, après un certain intervalle de temps suffisant les capacités seront chargées l'onde de surtension se répartie le long de l'enroulement, c'est l'apparition du régime permanent.

❖ Pour le cas où le neutre est mis à la terre, la répartition finale de la tension est représentée par une droite inclinée dans la figure (II.13), de fonction  $u(x) = U(-\frac{1}{t}x + 1)$  correspondante à  $\alpha = 0$  de la figure (II.12)

Pour le cas où le neutre est isolé de la terre la tension se repartie uniformément le long de l'enroulement, elle est représentée par une droite parallèle à l'axe des abscisses dans la figure (II.14) de fonction  $u(x) = U = cts$  correspondante à  $\alpha = 0$  de la figure (II.12)

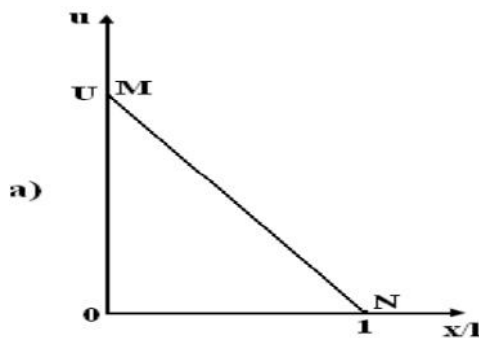


Fig. (II 13).neutre mis à la terre

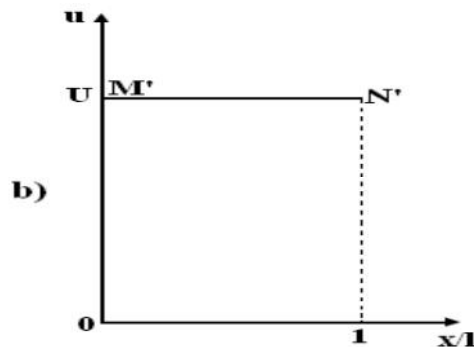


Fig. (II 14).neutre isolé de la terre

### II.3.5. Effet des surtensions

Dans ce paragraphe on va prendre en considération les principaux effets dus à la propagation de l'onde de surtension. A noter, que si l'onde arrive par la haute tension, elle peut atteindre tous les circuits électriques. Ces effets qui concernent donc tous les niveaux de tension sont :

- Claquage des isolants qui entraîne la mise hors service de transformateur et les perturbations des conditions normales.
- Destruction matérielles, fusion d'éléments, incendies, explosions.
- Les surtensions de courte durée augmentent le courant magnétisant des transformateurs, d'autant plus que leur circuit magnétique est saturé.
- Des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.
- Les défauts d'isolement entre spires d'un même enroulement.
- Réduction de la continuité de service par des interruptions longues ou courtes.

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une courte synthèse sur les surtensions en générale et de la foudre en particulier dans les installations électriques.

La foudre constitue de fait un facteur très contraignant pour les matériels, surtout les transformateurs, et déterminant la maîtrise de la coordination de l'isolement.

Alors pour contribuer à une meilleure qualité de l'énergie la protection des transformateurs du danger des surtensions est impérative.

## **Chapitre III**

# **Protection des transformateurs contre les surtensions**

**Introduction :**

Le problème de la protection des installations électriques contre les surtensions, est posé depuis la construction de premier réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique.

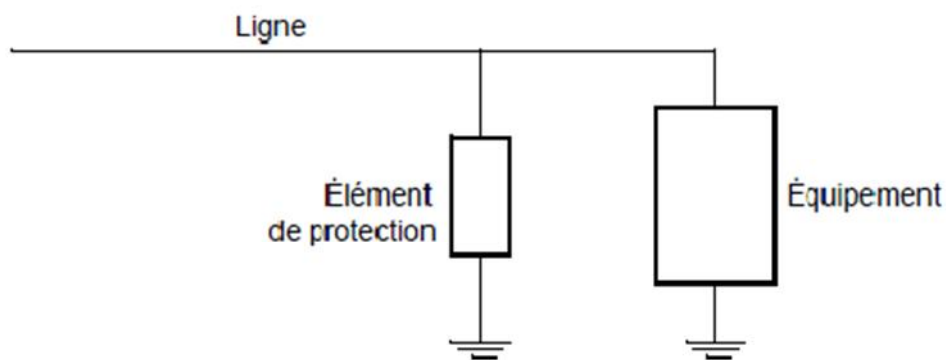
Le transformateur est un élément particulièrement important d'un réseau.

Il subit toutes les perturbations des réseaux HT amont (coups de foudre, coupures de ligne, etc.) et BT aval.

Il doit être protégé efficacement contre tous les défauts, d'origine externe ou interne, susceptibles de l'endommager

**III.1 Protection des transformateurs :**

La protection des équipements électriques(transformateur,...) contre les surtensions plus élevées que son niveau de tenue d'isolation peut être faite en connectant en parallèle avec l'équipement(entre phase et terre) un élément de protection comme montré sur la figure(III.1)



**Fig. (III.1) protection d'un équipement électrique par un élément de parallèle.**

Le rôle de l'élément de protection est de maintenir sa tension à un niveau maximal inférieur au niveau de tenue de l'équipement. La différence entre la tension de claquage de l'équipement et le niveau de protection maximale est la marge de protection.

L'élément de protection parallèle doit posséder les caractéristiques suivantes :

- Son impédance doit être la plus grande possible durant le fonctionnement normal du réseau afin de minimiser les pertes en régime permanent.
- Durant les surtensions, il doit être capable de dissiper ou stocker l'énergie du régime transitoire.
- Après les surtensions, il doit être capable de revenir à l'état « circuit ouvert »

## III.2 Les éclateurs :

### III.2.1 Fonctionnement :

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre.

A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protégé ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (voir la figure), par exemple,  $B=40\text{mm}$  sur le réseau 20kV.

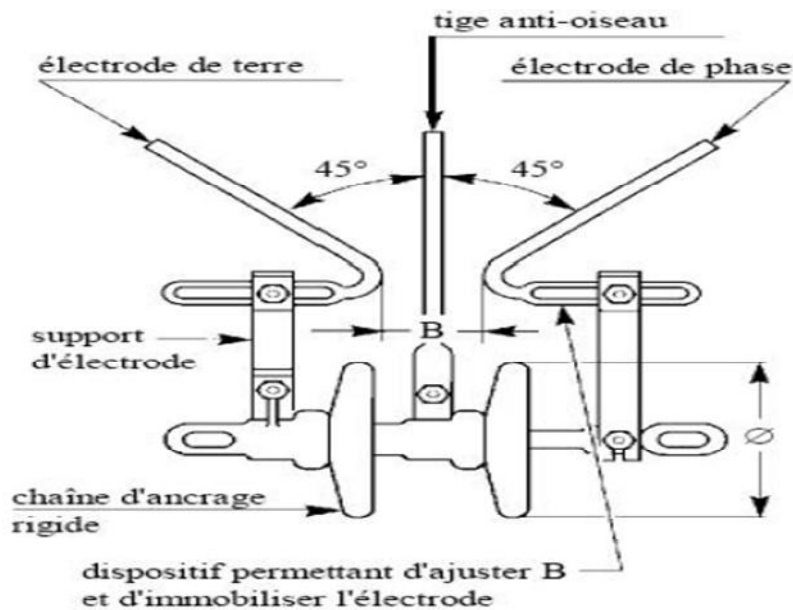


Fig. (III.2) : éclateur MT avec tige anti-oiseau

### III.2.2 Inconvénients des éclateurs :

Son mode de fonctionnement présente un certain nombre d'inconvénients :

- La tension d'amorçage présente une dispersion importante, fonction des conditions d'environnement (humidité, poussière, corps étrangers...).
- Le niveau de protection dépend de la raideur du front et de l'amplitude de la surtension. En effet, l'air présente un comportement « retard à l'amorçage » qui fait qu'une surtension importante à front très raide entraîne l'amorçage à une valeur de crête notablement supérieure au niveau de protection souhaité.
- Un courant de défaut à la terre, à fréquence industrielle, subsiste lors de l'intervention de l'éclateur. Ce courant « de suite », dont l'intensité dépend du mode de mise à la terre du

neutre du réseau, ne peut généralement pas s'éteindre spontanément et impose l'intervention d'une protection en amont.

- Le cuivre peut s'accumuler sur les électrodes et diminuer la distance inter électrodes, ce qui peut provoquer des fonctionnements intempestifs.
- Ne réagit pas aux surtensions de manœuvre
- L'amorçage provoque l'apparition d'une onde coupée à front raide susceptible d'endommager les enroulements (transformateurs et moteurs) situés à proximité.
- L'éclateur est inacceptable du point de vue continuité de service.

### III.2.3 Avantage des éclateurs :

- faible prix.
- pouvoir de transiter de grandes énergies et d'avoir une capacité parasite très faible.
- facile à régler.

Encore en place sur les réseaux, les éclateurs sont aujourd'hui de plus en plus remplacés par les parafoudres.

## III.3 Les parafoudres :

### III.3.1 Définition :

Un parafoudre est un dispositif de protection des appareillages électriques ou électroniques contre les surtensions électriques transitoires générées par exemple par la foudre ou certain équipements industriels.

La partie supérieure d'un parafoudre est reliée à la phase et la partie inférieure est connectée directement à la terre.

### III.3.2 Type des parafoudres :

Il existe aujourd'hui deux types de parafoudres sur le marché :

- L'un, dont la partie active est constituée d'éclateurs et de varistances au carbure de silicium (SiC), appelé dans la suite du texte parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs.
- L'autre, dont la partie active est constituée uniquement de varistances à base d'oxyde de zinc (ZnO), est dénommé parafoudre à oxyde de zinc.

#### III.3.2.1 Parafoudres à résistances variables et éclateurs :

Les modèles au carbure de silicium (SiC) ne sont pas capables de supporter de manière permanente la tension de service car leur courant résiduel est trop important et génère un

dégagement de chaleur inadmissible. Ils sont donc associés à un dispositif éclateur en série capable d'interrompre le courant résiduel et de tenir la tension de service.

Ce type de parafoudre associe en série des éclateurs et des résistances non linéaires (varistances) capables de limiter le courant après le passage de l'onde de choc. Après l'écoulement de l'onde de courant de décharge, le parafoudre n'est plus soumis qu'à la tension du réseau. Celle-ci maintient un arc sur l'éclateur, mais le courant correspondant, dit «courant de suite», traverse la résistance dont la valeur est maintenant élevée. Il est donc assez faible, pour ne pas endommager l'éclateur, et être interrompu lors du premier passage à zéro du courant (extinction naturelle de l'arc). La non linéarité des résistances permet de conserver une tension résiduelle, qui apparaît aux bornes de l'ensemble, proche du niveau d'amorçage car, plus le courant augmente, plus la résistance décroît. Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistances et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC). Certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflage de l'arc (aimants ou bobines pour un soufflage magnétique).

### Caractéristiques

Ce type de parafoudre est caractérisé par :

- sa tension d'extinction, ou tension assignée, qui est la tension à fréquence industrielle la plus élevée sous laquelle le parafoudre peut se désamorcer spontanément. Elle doit être supérieure à la plus forte surtension temporaire à fréquence industrielle susceptible d'apparaître sur le réseau.
- ses tensions d'amorçage suivant les formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre...); elles sont définies statistiquement.
- son pouvoir d'écoulement de courant de choc, c'est-à-dire la capacité de dissipation d'énergie. On traduit généralement la capacité d'absorption par la tenue à des ondes rectangulaires de courant

#### III.3.2.2 Parafoudre à oxyde de zinc :

##### a) Construction :

Les parafoudres à résistance variable avec éclateur sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleures.

##### b) principe de fonctionnement :

Dans ce type de parafoudre, on associe à un éclateur une résistance variable qui limite le courant après le passage de l'onde de choc.

Après écoulement de l'onde de choc à la terre, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

L'extinction de l'arc se fait systématiquement au passage à zéro de l'onde à 50 Hz du courant de défaut à la terre.

La tension résiduelle est maintenue proche du niveau d'amorçage grâce à la variation de la résistance, en effet, cette résistance diminue avec l'augmentation du courant.

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à résistance et éclateurs, la plus classique utilise une résistance au carbure de silicium, certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflage de l'arc (aimants ou bobines de soufflage magnétique).

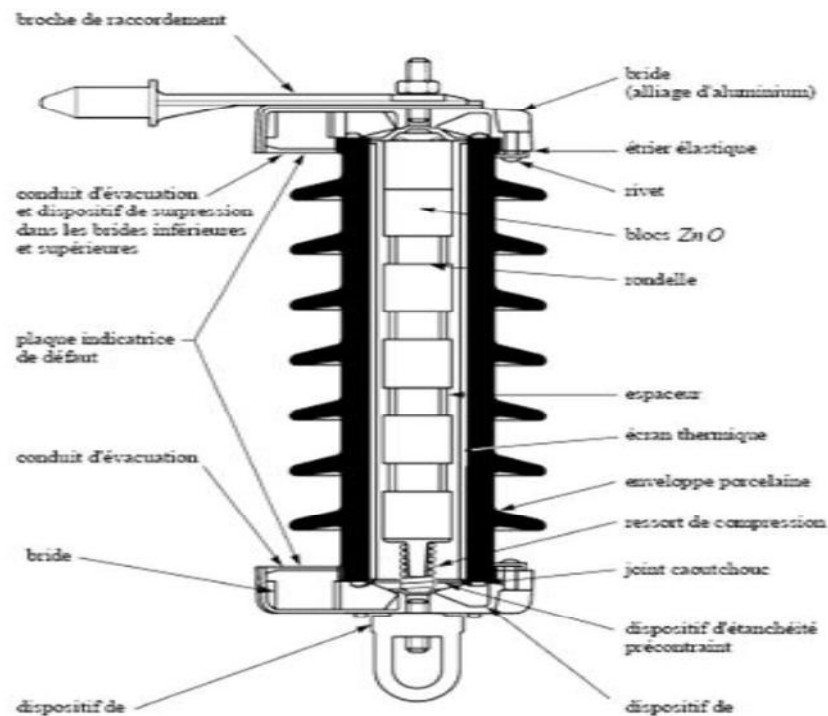


Fig. (III.3) : Parafoudre à Oxyde de Zinc en enveloppe porcelaine

### III.3.3 Avantage des parafoudres :

Leurs avantages est de ne pas présenter de courant de suite et d'éviter que le réseau soit mis en court circuit, puis hors tension après amorçage.

Leurs avantages sur les éclateurs sont :

- ✓ Une dispersion moins grande de la tension d'amorçage.
- ✓ Une extinction spontanée de l'arc, le parafoudre limite l'amplitude et la durée des courants de suites sans que les disjoncteurs du réseau n'aient à fonctionner.

- ✓ Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après l'amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde de tension coupée.
- ✓ Une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux agressions extérieures.

### III.3.4 Distance de protection

Le parafoudre ne joue son rôle protecteur que sur une distance limitée  $l$ . Ce paramètre est étroitement lié au niveau de protection du parafoudre (tension résiduelle  $U_p$ ) et à la raideur  $S$  du front de l'onde. Sa valeur est calculée avec l'équation donnée ci-dessous, et suppose le cas le plus défavorable avec réflexion d'onde complète à une extrémité ouverte. Sachant que les parafoudres n'offrent pas tous le même niveau de protection, leur distance de protection varie également.

Plus la distance séparant le parafoudre et l'équipement est courte, meilleure est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection maximale, le parafoudre doit être installé près de l'équipement, voire directement intégré à celui-ci. Cette notion de distance de protection doit impérativement être prise en compte lors de l'implantation, dans un poste, des parafoudres ou des éclateurs de protection des matériels.

$$S = K_i \frac{K_c}{K_m} L \quad (\text{m})$$

$K_i$  : coefficient dépendant du niveau de la protection.

$K_c$  : coefficient dépendant du nombre des descentes.

$K_m$  : coefficient dépend du matériau utilisé pour réaliser l'isolation.

### III.4 Le câble de garde :

Le câble de garde protège contre la foudre car il est placé juste au dessus des conducteurs, en cas de coup de foudre c'est lui qui est touché en premier. Après l'impact de la foudre il transfère le courant vers la terre à travers le pylône. La présence des câbles de garde n'empêche pas a coup sûr d'éviter les coups de foudre, ils sont néanmoins utiles dans la mesure où leur présence fait diminuer leur probabilité dans un rapport de 1,5 à 5 environ, selon l'activité orageuse de la région.

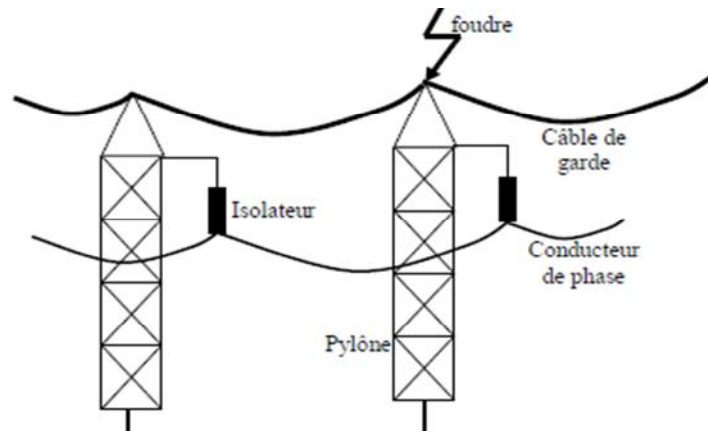


Fig. (III.4) : câble de garde

#### III.4.1 Rôles du câble de garde :

Le câble de garde (ou câble protecteur) est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à un niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône.

Le câble de garde, dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de foudre, joue un certain nombre d'autres rôles parallèles :

- Rôle statique.
- Rôle dynamique.

##### III.4.1.1 Rôle statique :

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne placés sous un nuage orageux. Ceci n'est valable que si les conducteurs de phases sont laissés flottants, ce qui en pratique n'est jamais le cas. En effet, les lignes sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité.

##### III.4.1.2 Rôle dynamique :

Les rôles dynamiques du câble de garde sont du type :

- Protection contre l'impact direct de la foudre.
- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.

- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension sur les lignes de télécommunications.

### III.5 Les sectionneurs :

Contrairement aux interrupteurs à cornes, les sectionneurs ne sont dotés d'aucun pouvoir de coupure. Ils ne permettent d'ouvrir un circuit qu'en l'absence de tout courant. Ils servent à séparer et à isoler, par exemple les lignes et les disjoncteurs des autres parties du réseau.

La commande de ces derniers peut être manuelle directe, ou bien manuelle à distance par exemple une perche, il est muni d'un dispositif de verrouillage qui l'empêche de s'ouvrir sous l'action des forces électromagnétique intenses produites par les courants de court-circuit.



**Fig. (III.5) : Sectionneur à haute tension à isolement dans l'air**

### III.6 Le DGPT :

Cet appareil réagit aux paramètres suivants : dégagement de gaz, dépassement de la pression et de la température. Au-delà des seuils consignés, associé à un boîtier source de tension auxiliaire, il protège contre les défauts impudents, les courts circuits et contre les surcharges tant le transformateur que les liaisons HT et BT, si leur section totale a été prévue pour les valeurs et les temps des défauts admis.

Le DGPT ne s'utilise pas que sur les transformateurs à remplissage intégral (ERI) ou à remplissage total (ERT) avec ou non une réserve tampon de diélectrique, soit sur des transformateurs de type respirant avec un conservateur.

#### III.6.1 Le schéma de principe :

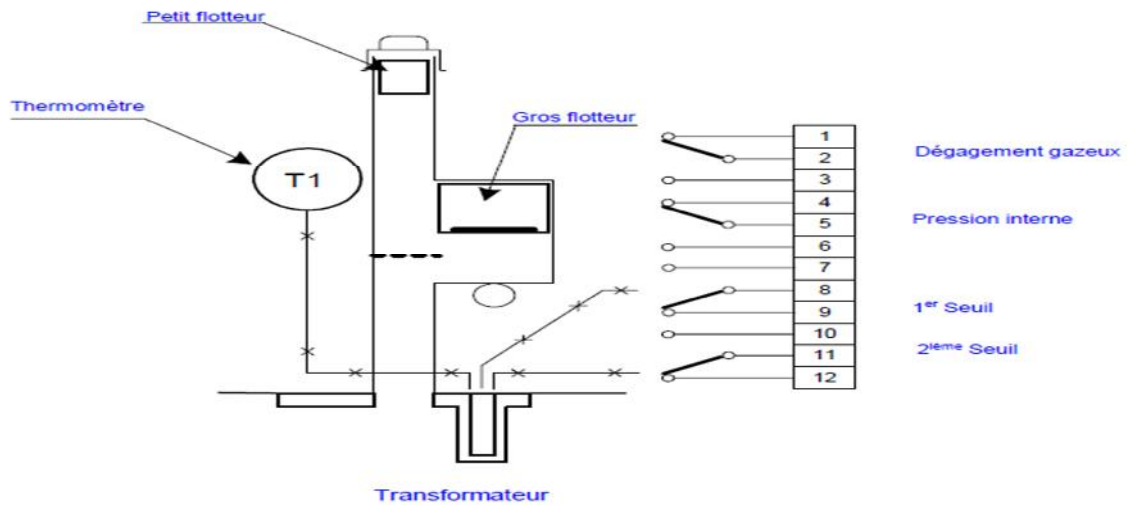


Fig. (III.6) : le DGPT 01 et 02

### III.6.2 Principe de fonctionnement :

**Dégagement gazeux :** en cas d'avaries interne du transformateur, un flotteur va se déplacer à l'intérieur du corps tubulaire de l'appareil en faisant basculer un contact. Ce contact peut être exploité en alarme ou en déclenchement.

**Augmentation de pression :** en cas d'une avarie interne grave, il se produit un violent dégagement gazeux qui provoque à l'intérieur du transformateur un gonflement du diélectrique et un mouvement ascendant de celui-ci. Cette suppression est détectée et va provoquer le basculement d'un contact. Ce contact sera exploité uniquement en déclenchement.

**Augmentation de température :** Un échauffement anormal du liquide peut être détecté par le DGPT (1 à 1 thermostat, 2 à 2 thermostats). Deux seuils différents sont obtenus grâce aux deux thermostats indépendants. Dans le cas du DGPT1, le contact peut être utilisé soit en alarme, soit en coupure. Dans le cas du DGPT2, le contact du thermostat 1 est à utiliser en alarme, Le contact du thermostat 2 est à utiliser en déclenchement. Un thermomètre solidaire de l'appareil peut être utilisé aux cours de rondes pour contrôler la tendance de la température du diélectrique.

### III.7 Thermostat à maximum réglable :

Le thermostat muni de 1 ou 2 seuils permet soit l'alarme soit le déclenchement de l'alimentation du transformateur au-delà d'une certaine température de consigne de l'huile.

### **III.8 Disjoncteurs :**

Dans le cas des protections, les disjoncteurs servent à interrompre le courant, y-compris de court-circuit, circulant dans le réseau. Une de leur qualité indispensable est une grande fiabilité et une bonne rapidité. En règle générale, un disjoncteur a besoin de 1 à 3 cycles pour s'ouvrir, ce qui correspond à 20 jusqu'à 60 ms pour un réseau 50 Hz. La norme spécifie une coupure en 2 cycles pour les disjoncteurs de tension assignée supérieure ou égale à 245 kV.

Les disjoncteurs à haute tension sont capables de couper trois fois leur courant de court-circuit assigné en une ou trois minutes.

#### **III.8.1 Principe de fonctionnement :**

Pour les disjoncteurs à haute tension, le principe de coupure retenu est la coupure du courant lorsqu'il passe par zéro (ceci se produit toutes les dix millisecondes dans le cas d'un courant alternatif à 50 Hz). En effet, c'est à cet instant que la puissance qui est fournie à l'arc par le réseau est minimale (cette puissance fournie est même nulle à l'instant où la valeur instantanée du courant est nulle), on peut donc espérer, moyennant un soufflage suffisant, mettre à profit cet intervalle de temps pendant lequel le courant est de faible intensité pour refroidir suffisamment l'arc afin que sa température diminue et que l'espace entre les contacts redevienne isolant.

#### **III.8.2 Fonction assurées par le disjoncteur :**

##### **III.8.2.1 Protection contre les surcharges :**

La protection contre les surcharges est assurée par la coupure du circuit qui doit intervenir avant un échauffement anormal de la canalisation.

C'est le rôle des déclencheurs thermique qui peuvent détecter de faibles surcharges.

Le principe de fonctionnement est analogue à celui du relais thermique.

La protection contre les surcharges est assurée par le déclencheur thermique, dont le principe de fonctionnement est basé sur la différence de dilatation de deux lames de métal.

L'une ayant un coefficient de dilatation petit et l'autre très élevé.

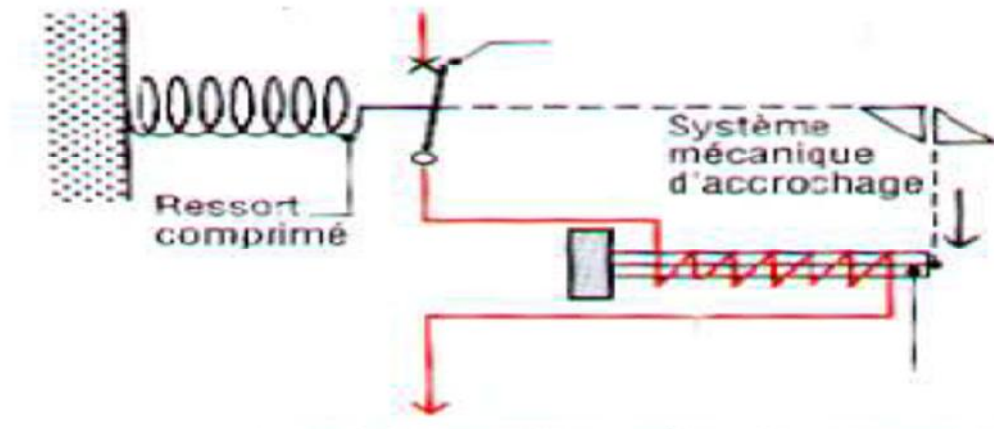


Fig. (III.7) : fonctionnement de la protection contre La surcharge

En cas de surcharge, le bilame se déforme et entraîne dans le sens de la flèche le système d'accrochage qui libère la partie pôle de coupure. Le ressort qui était comprimé se détend et provoque une coupure brusque du circuit électrique. La coupure n'est pas instantanée.

### III.8.2.2 Protection contre les courts-circuits :

C'est le rôle des déclencheurs électromagnétique. Ceux-ci interviennent au-delà des courants de surcharge et jusqu'à l'intensité maximale du courant de court-circuit. Un court circuit est une surintensité très importante. Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) n'est limité que par l'impédance de la ligne.

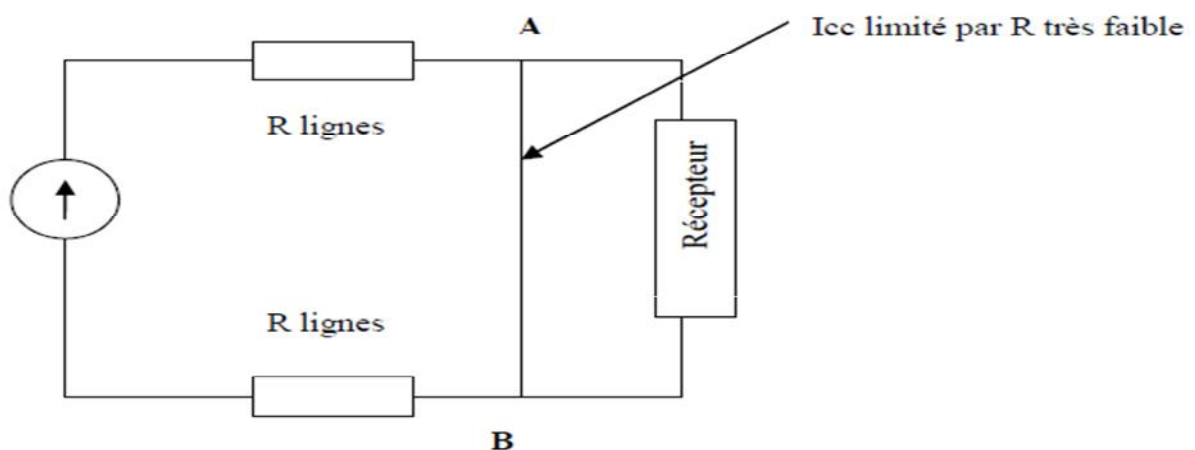


Fig. (III.8) : court-circuit aux bornes d'un récepteur

Un courant de court-circuit peut atteindre des milliers d'ampères. Il est impératif que le disjoncteur coupe rapidement le circuit afin d'éviter toute détérioration.

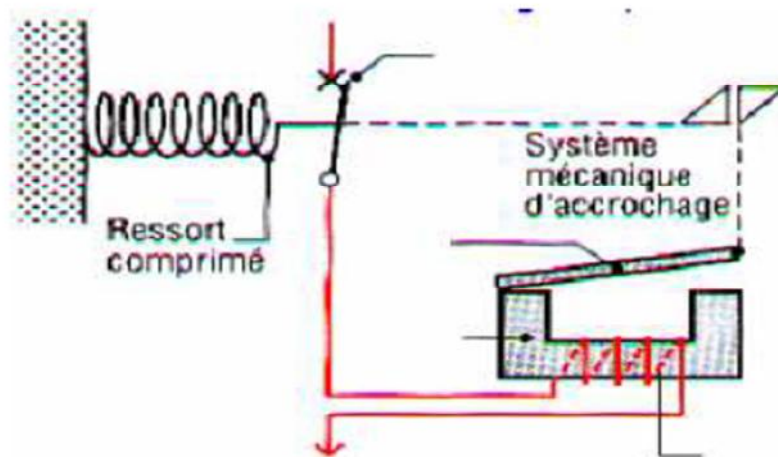
Dans tous les cas le temps de coupure doit être très court afin de limiter les effets néfastes de  $I_{cc}$  sur le matériel. La coupure est quasi-instantanée.

La protection contre les courts-circuits est assurée par un déclencheur magnétique.

Ce déclencheur est basé sur la création d'un champ magnétique lors du passage d'un courant.

Le système comporte un circuit magnétique ayant une partie mobile, une bobine parcourue par un courant.

L'association du circuit magnétique et de la bobine donne un électro-aimant.



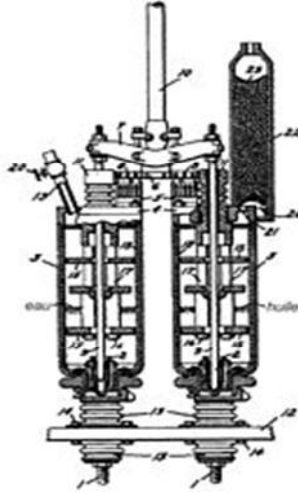
**Fig. (III.9) : protection contre les courts circuits**

En cas de court-circuit, l'armature mobile est attirée par la partie de l'électro-aimant. Elle entraîne le système d'accrochage. Le contact est repoussé par le ressort qui était comprimé. Le fonctionnement est instantané.

Les disjoncteurs les plus réponsus sont :

### III.8.3 Disjoncteur à huile :

Ils se composent d'une cuve contenant de l'huile isolante, de bornes d'entrée en porcelaine à l'extrémité desquelles se trouvent les contacts fixes, et d'un contact mobile actionné par le déplacement d'une tige isolante. Le courant d'une phase pénètre par l'une des bornes d'entrée, traverse le premier contact fixe et sort de la deuxième borne. Ces bornes s'appellent traversées.



**Fig. (III.10) : disjoncteur a huile**

Ces disjoncteurs avaient pour principaux inconvénients de nécessiter de nombreux éléments de coupure en série (pour tenir la tension), et de nécessiter un entretien important et délicat (remplacement de l'huile usagée). Ils ont été supplantés par les disjoncteurs à SF<sub>6</sub> qui nécessitent peu de maintenance et ont une longue durée de vie.

#### **III.8.4 Les disjoncteurs à air comprimé :**

Le gaz contenu dans les disjoncteurs à air comprimé est maintenu sous haute pression (20 à 35 bars) à l'aide d'un compresseur. Cette haute pression permet d'assurer la tenue diélectrique et de provoquer le soufflage de l'arc pour la coupure. Et ce soufflage intense exercé dans ces disjoncteurs a permis d'obtenir de très hautes performances (courant coupé jusqu'à 100kA sous haute tension) et avec une durée d'élimination du défaut très courte permettant d'assurer une bonne stabilité du réseau en cas de défaut.

L'inconvénient de ces disjoncteurs est leur bruit très important à l'ouverture et aussi il nécessite un entretien périodique, en particulier, de leur compresseur.



**Fig. (III.11) : disjoncteur a air comprimé**

### **III.8.5 Disjoncteur à haute tension au SF6 (hexafluorure de soufre) :**

Le disjoncteur SF6 est de type soufflant, conçu pour des tensions de réseau de 75.5 à 800 KV pour des pouvoirs de coupure jusqu'à 63 kA. La conception de l'élément de coupure est basée sur l'expérience acquise des techniques de soufflage de conceptions antérieures.

Les disjoncteurs avec un élément de coupure par pôle peuvent être équipés d'un mécanisme de commande tripolaire. Tous les disjoncteurs peuvent être équipés d'un mécanisme par pôle.



**Fig. (III.12) : disjoncteur au SF6**

### III.8.5.1 Disjoncteur auto-pneumatique :

Lorsque le disjoncteur est en position "fermé", le courant transite par des contacts dits "permanents" qui sont situés sur le diamètre extérieur de la partie active. Lors d'un déclenchement du disjoncteur, la partie mobile se déplace vers le bas, entraînant la séparation des contacts permanents. Le courant passe alors par une autre série de contacts, appelés "contacts d'arc". Quand la partie mobile a fait une course suffisante, les contacts d'arc se séparent, ce qui provoque l'amorçage d'un arc entre ces contacts. Les contacts d'arc sont réalisés avec des matériaux à base de tungstène de manière à pouvoir supporter sans dommage les effets de l'arc électrique.

Pendant la manœuvre d'ouverture, le disjoncteur produit lui-même la compression du gaz nécessaire au soufflage de l'arc. Le déplacement relatif du cylindre de soufflage par rapport au piston fixe crée une surpression dans le cylindre qui s'évacue à l'intérieur de la buse et refroidit l'arc, permettant ainsi son extinction.

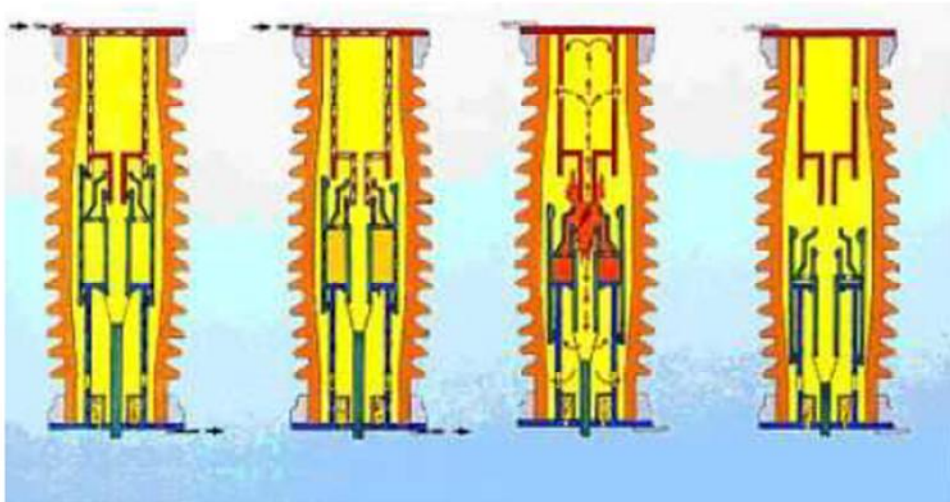


Fig. (III.13) : principe des disjoncteurs auto pneumatique.

### III.8.6 Caractéristiques des disjoncteurs SF6 :

Sur le plan technique, plusieurs caractéristiques des disjoncteurs SF6 peuvent expliquer leurs succès :

- La simplicité de la chambre de coupure qui ne nécessite pas de chambre auxiliaire pour la coupure.
- L'autonomie des appareils apportée par la technique auto-pneumatique (sans compresseur de gaz).

- La possibilité d'obtenir les performances les plus élevées, jusqu'à 63 KV, avec un nombre réduit de chambres de coupure : une seule chambre est nécessaire en 245 KV.
- Une durée d'élimination de défaut courte.
- Une grande endurance électrique qui permet de garantir une durée d'au moins 52ans.
- Un faible niveau de bruit.

### III.9 Relais de Bucholz :

Les relais de Bucholz sont montés essentiellement sur les grands moteurs tandis que les DGPT (1et 2) sont montés essentiellement sur les transformateurs de distribution à couvercle scellés.

#### III.9.1 Schéma de principe et son fonctionnement :

Le corps du relais (voir figure ci-dessous) renferme deux flotteurs b1 et b2 qui peuvent pivoter respectivement autour des axes 01 et 02 et commander ainsi les contacts à mercure c1 et c2. Ces deux contacts ferment (ou ouvrent sur demande) chacun un circuit.

Le circuit du contact c1 actionne signal d'alarme. Le circuit du contact c2 actionne le dispositif de déclenchement.

Le relais de Bucholz protège toujours le transformateur en cas de fuite du diélectrique à condition toutefois qu'elle se manifeste au dessous de relais.

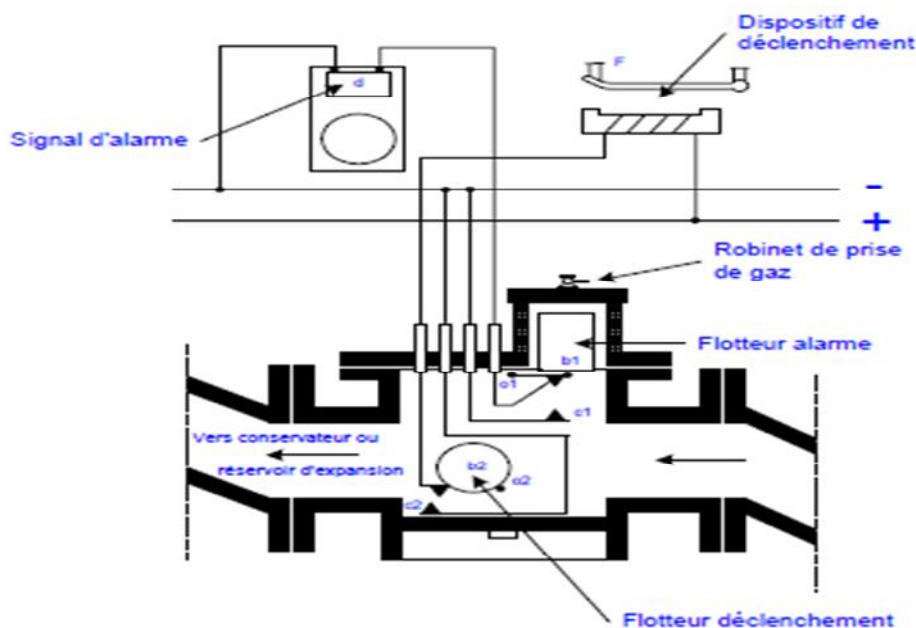


Fig. (III.13) : relais Bucholz

Il a pour rôle les détections des anomalies internes (court-circuit, mauvais contact dans les connexions, détérioration de l'isolation...). Lors d'un dysfonctionnement un jet

d'huile vers le conservateur entraîne le déplacement d'un flotteur qui coupe la liaison entre le transformateur et le réseau.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques méthodes utilisées pour la protection des transformateurs contre les surtensions de foudre, un choix prudent des éléments de protections peut permettre un gain considérable au niveau des coûts et offre une protection adéquate.

La protection contre la foudre consiste à prendre en compte tous les dispositifs mis en jeu depuis le dispositif de capture jusqu'à ses extrémités les plus lointaines.

## Chapitre IV

# **Application et discussions des résultats de simulation**

## Introduction

La foudre tombant sur les lignes ou d'autres événements comme l'ouverture ou la fermeture de disjoncteur dans le réseau peuvent causer des surtensions aux bornes des enroulements du transformateur. Dans ce cas, les phénomènes impliquant des fréquences de l'ordre du kHz au MHz, une modélisation du transformateur uniquement inductive, dans laquelle la tension est également répartie dans l'ensemble de l'enroulement, n'est plus possible.

Pour limiter l'impact de ces surtensions, des parafoudres sont fréquemment placés sur les lignes menant aux transformateurs, ils permettent d'abaisser la valeur maximale de la tension apparaissant aux bornes des bobines.

L'objectif de ce chapitre est l'étude de l'influence du régime de neutre avec ou sans parafoudre sur les surtensions dans l'enroulement de transformateur.

### IV.1. Caractéristiques du transformateur

Comme application notre étude s'est portée sur le transformateur 500/15.75 KV portant les indications suivantes :

#### IV.1. a) Caractéristiques électriques

$S_n = 200 \text{MVA}$  : Puissance apparente nominale.

$U_{HT} = 500 \text{KV}$  : Tension nominale de l'enroulement haut tension.

$U_{BT} = 15.75 \text{KV}$  : Tension nominale de l'enroulement basse tension.

$U_{CC} = 12.5\%$  : Tension de court-circuit.

$\Delta P_{CC} = 700 \text{W}$  : Pertes de puissance en court-circuit.

$\Delta P_0 = 175 \text{W}$  : Pertes de puissances à vide.

$I_0 = 0.35\%$  : Courant à vide.

#### IV.1.b) Caractéristiques géométriques

$d_{\text{extHT}} = 2770 \text{ mm}$  : diamètre extérieur de l'enroulement haute tension.

$d_{\text{intHT}} = 1760 \text{ mm}$  : diamètre intérieur de l'enroulement haut tension.

$d_{\text{extBT}} = 2770$  : diamètre extérieur de l'enroulement basse tension.

$d_{\text{intBT}} = 1760$  : diamètre intérieur de l'enroulement basse tension.

$d_n = 1100 \text{ mm}$  : diamètre de noyau.

$d_c = 5000 \text{ mm}$  : diamètre de la cuve.

$L_{\text{en}} = 2360 \text{ mm}$  : Longueur de l'enroulement.

Dans notre transformateur le mode de couplage utilisé est étoile/triangle.

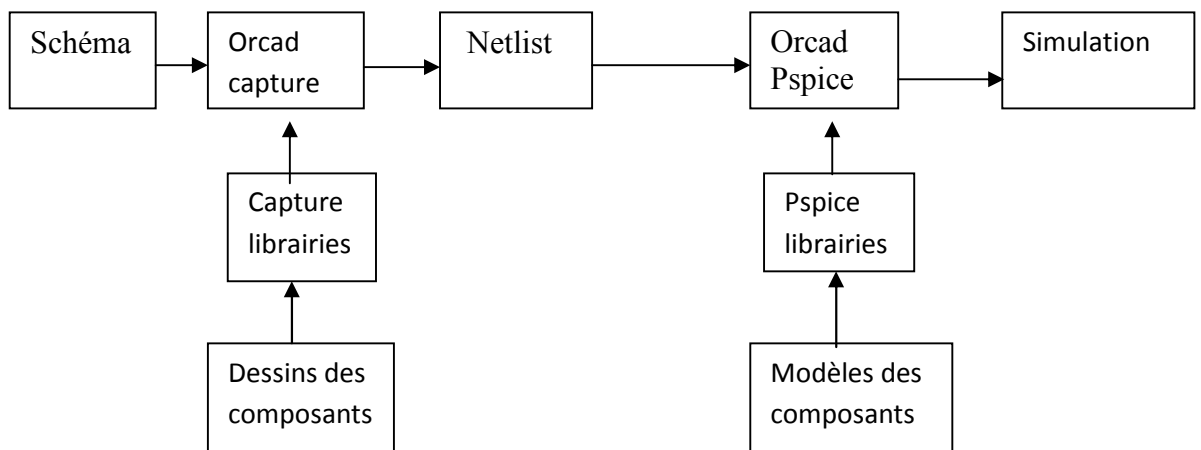
La modélisation comportementale est le processus qui permet de développer un modèle pour un courant d'un dispositif ou d'un système du point de vue comportement extérieur observé plutôt que d'une description microscopique. Deux applications importantes sont envisagées du point de vue comportemental dans le domaine de la simulation analogique : modéliser de nouveaux types de dispositif, et modéliser une boîte noire pour les systèmes complexes.

## VI.2. Organisation d'Orcad 16.3 :

La réalisation d'une simulation peut se décomposer en différentes étapes, ou le respect et la minutie de réalisation des étapes sont primordiaux pour obtenir une simulation correcte.

Les différentes étapes sont les suivantes :

- La saisie du schéma sous Orcad capture.
- La recherche et la saisie des modèles PSPICE.
- La simulation du schéma.
- L'analyse des résultats obtenus.
- La sortie des résultats.



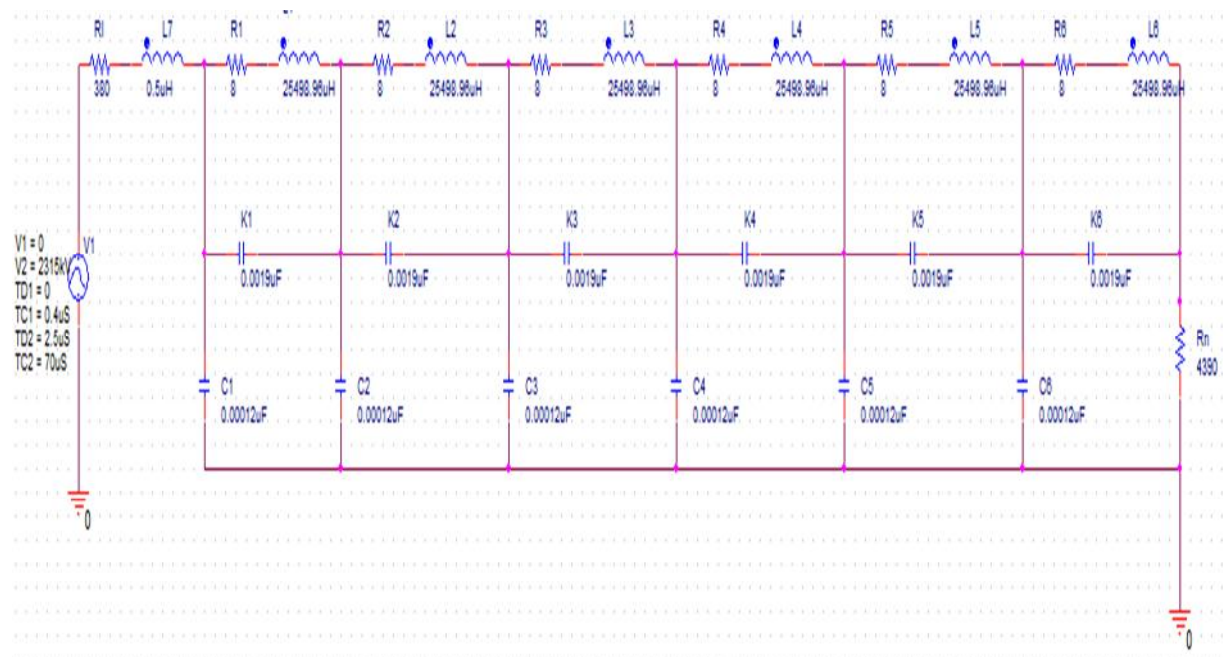
On saisit le schéma sous Orcad capture, à l'aide de symboles qui sont contenus, dans des librairies que l'on chargera obligatoirement à partir du répertoire Pspice, et suivant les besoins. Une fois le schéma fini et vérifié, on crée le profile de simulation. C'est ce fichier qui va définir quel type de simulation l'on désire réaliser. Il faut donc que le schéma soit correct. En changeant la netlist, Orcad Pspice va chercher les modèles de simulations dans les librairies. Il faut alors ouvrir le logiciel Probe pour afficher les résultats. Il restera alors à interpréter les résultats, et les faire sortir sur imprimante en cas de besoin.

### Le principe de la simulation :

Le principe de la simulation des enroulements de transformateur consiste à trois cas, pour chacun on a :

- Insérer un parafoudre à l'entrée de l'enroulement HT.
- Appliquer une surtension à coté de l'enroulement HT.
- Effectuer deux simulations pour chaque cas.
- Relever les courbes des tensions sur les différents nœuds pour chaque schéma équivalent.

### IV.3. Schéma équivalent de l'enroulement sur Orcad 16.3



**Fig. IV.1 :** Schéma block de simulation de l'enroulement HT

Pour justifier ces modèles, il est impotent de remarquer qu'en fonctionnement normal, à la fréquence industrielle, le passage du courant s'effectue à travers les résistances et les réactances des enroulements. Les courants de fuite à travers les capacités existantes entre spires, entre galettes, entre enroulements ou entre enroulement et masse restent négligeables.

Par contre, les phénomènes liés aux surtensions sont de nature oscillatoire, à fréquence très élevée, de sorte que pour ces régimes, les réactances inductives deviennent très grandes tandis que les réactances capacitives diminuent. La modélisation du transformateur en vu de

l'étude de la distribution de la tension le long de l'enroulement doit donc tenir compte, non seulement des résistances et des inductances mais surtout des capacités.

#### IV.4. Simulation sur Orcad 16.3 avec le neutre mis à la terre

On mit a la terre la sortie du transformateur, la figure suivante représente les valeurs de la tension a la sortie de transformateur.

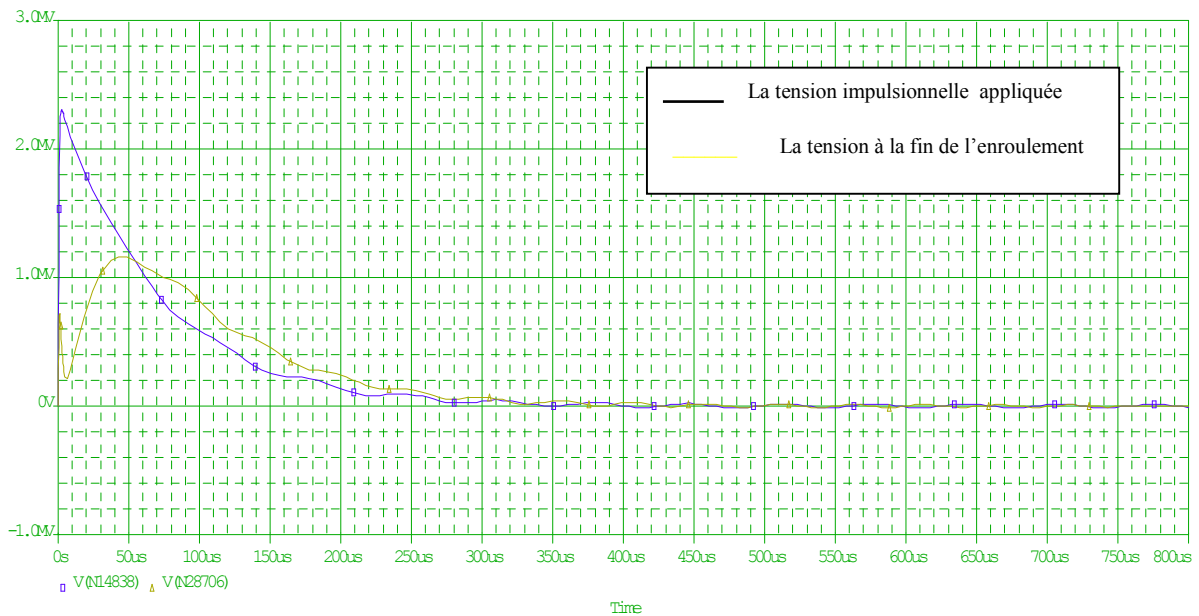


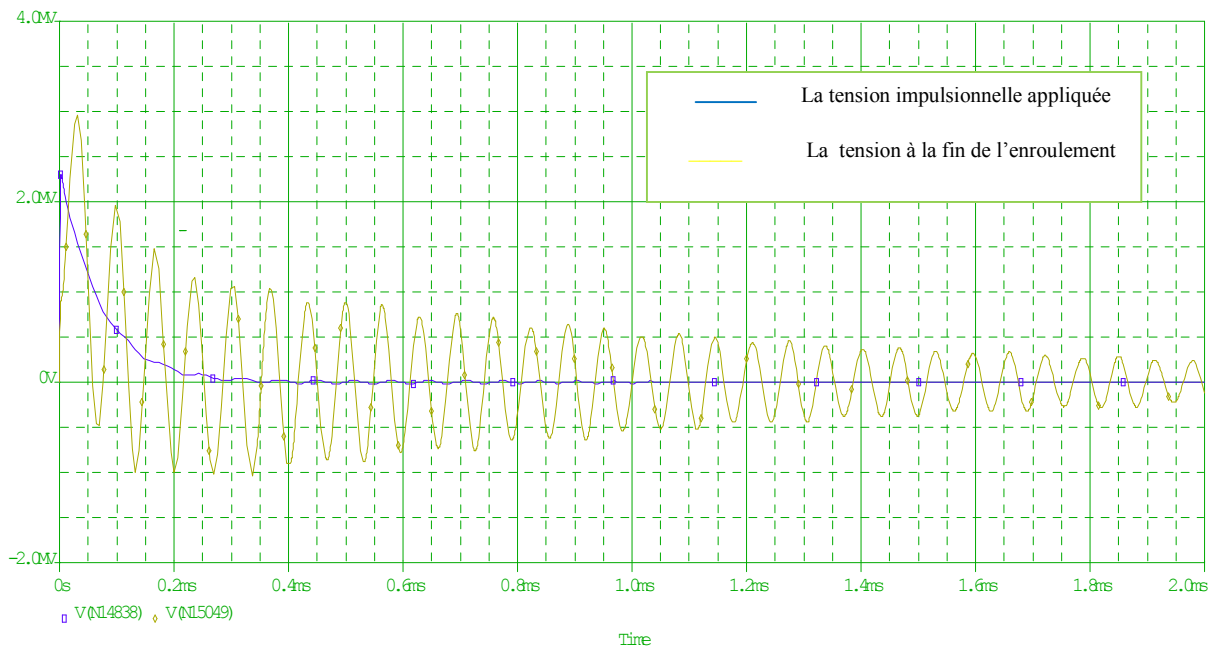
Fig. IV.2 Tensions de l'enroulement HT avec le neutre mis à la terre

##### IV.4.1 interprétation des résultats :

Le neutre du transformateur est mis à la terre à travers une résistance, la fig. IV.2 représente les valeurs de la tension sur le neutre de l'enroulement du transformateur.

Dans la partie de milieu de cet enroulement, on observe une augmentation des surtensions. Puis les surtensions diminuent jusqu'à zéro.

### IV.5. Simulation sur Orcad 16.3 avec le neutre isolé de la terre



**Fig. IV3 :** Tensions de l'enroulement lors de simulation avec le neutre isolé de la terre.

#### IV.5.1. interprétation des résultats :

La valeur de la tension sur le neutre de l'enroulement est isolée de la terre (3000kV) est plus grande que la tension appliquée à l'entrée de l'enroulement, le neutre isolé de la terre provoque la réflexion des oscillations dangereuses peuvent aller jusqu'au doublement de la tension initiale. Elles sont du même ordre de grandeurs aux premiers instants, le long de l'enroulement, contrairement au cas précédent où les amplitudes diminuent. Cette remarque fait penser aux répartitions initiales respectives, de la tension le long de l'enroulement, avec neutre à la terre ou isolé de la terre.

Comme on voit de la courbe (IV.3), le neutre isolé de la terre présente un grand danger pour les transformateurs, mais la mise a la terre de neutre représente une solution intéressante pour Leur protection.

### IV.6. Application d'un parafoudre

#### IV.6.1. Schéma équivalent de l'enroulement sur Orcad 16.3 avec parafoudre

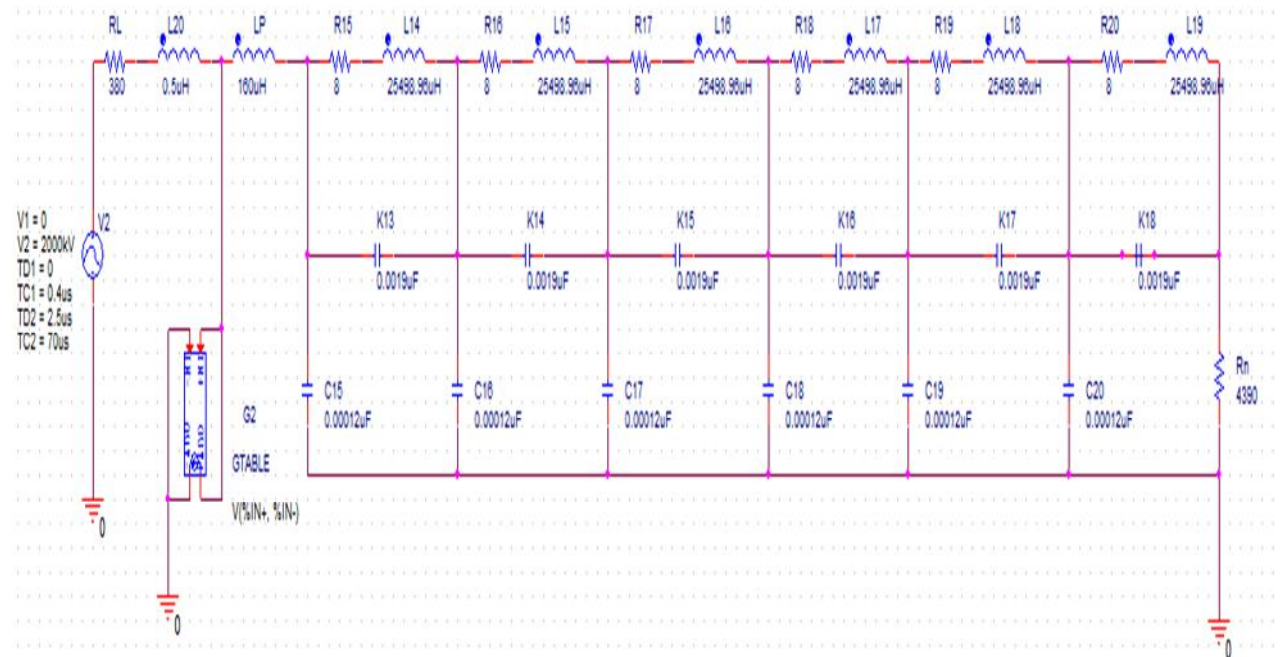


Fig. IV.4 : Schéma block de simulation de l'enroulement HT avec parafoudre

#### IV.6.2 Simulation de l'enroulement lors d'application du parafoudre

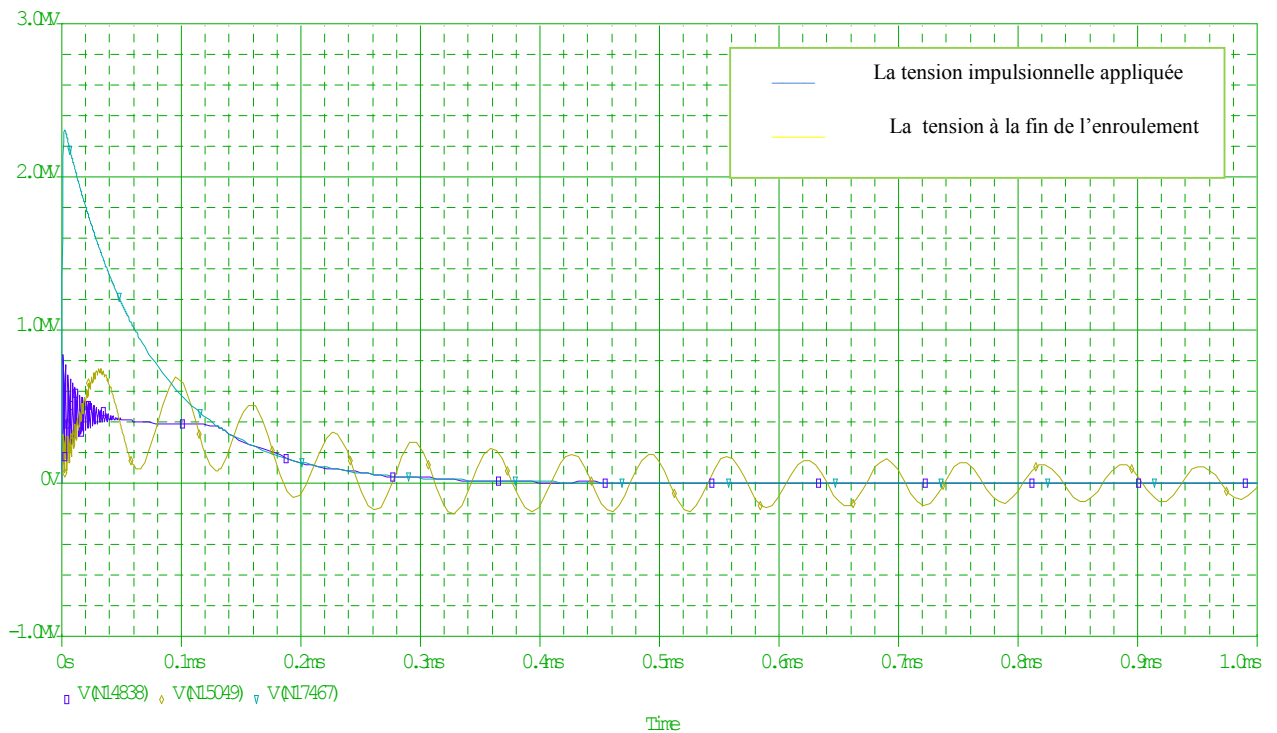


Fig. IV.5 : Tensions de l'enroulement HT avec parafoudre

### IV.6.3. Interprétation des résultats :

En appliquant une surtension d'ordre de 2315 KV, le maximum de la tension sur le neutre de l'enroulement et à l'entrée de l'enroulement est très inférieur à la tension appliquée, par contre, il est beaucoup plus importante par rapport au cas sans parafoudre, alors dans ce cas on dit que la tension est limitée par le parafoudre.

### Conclusion :

Le neutre isolé de la terre entraîne des risques de surtensions élevée qui favorisent l'apparition des défauts multiples, une surveillance de l'isolement obligatoire.

Le neutre mis à la terre entraîne très généralement un déclenchement obligatoire au premier défaut, mais, par contre, il amortit les surtensions et conduit à des protections simples sélectives. Il autorise l'emploi de matériel et en particulier de câble ayant un niveau d'isolement plus réduit que pour le neutre isolé.

La mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ou réactance sont souvent les solutions les plus intéressantes.

# **Conclusion Générale**

Le comportement d'un réseau électrique lors de phénomène transitoire dépend du comportement de chacun de ses constituants. Ceux-ci, partant d'un état stable, vont influencer sur le comportement transitoire de l'ensemble. Il importe donc de connaître le comportement de chacun d'eux pour pouvoir déterminer le comportement de l'ensemble du réseau électrique considéré. Notamment le comportement du transformateur.

Dans ce travail, on a essayé d'aborder les principaux aspects de la foudre, sur les plans qualitatif et quantitatif, ses effets sur les installations électriques, les moyens de protection, en mettant en avant le transformateur.

Le modèle que nous avons jugé le plus adéquat pour notre étude est celui basé sur les inductances propres et mutuelles, car il permet de traduire les différents phénomènes qui se produisent le long des enroulements du transformateur. Ce modèle permettra de modéliser les transformateurs de grande puissance et d'étudier leurs comportements internes (répartition de la tension le long de l'enroulement...) cependant, il est important de trouver les bonnes procédures qui permettront le calcul des paramètres du modèle afin d'avoir une bonne précision dans les résultats.

La méthode proposée a été ensuite testée sur un transformateur de puissance 500/15.75kV-200MVA-50Hz.

On détermine le mode de mise à la terre en réalisant un compromis entre trois exigences souvent contradictoires :

- amortir convenablement les surtensions.
- limiter l'importance des dégâts et des perturbations dus à un défaut à la terre.
- permettre la réalisation d'une protection simple et sélective.

Le neutre isolé entraîne des risques de surtensions élevée qui favorisent l'apparition de défauts multiples, l'emploi de matériels sur isolé, une surveillance de l'isolement obligatoire.

Le neutre mis à la terre entraîne très généralement un déclenchement obligatoire au premier défaut, mais, par contre, il amortit les surtensions et conduit à des protections simples sélectives, faibles. Il autorise l'emploi de matériel et en particulier de câble ayant un niveau d'isolement plus réduit que pour le neutre isolé.

La mise à la terre par l'intermédiaire d'une résistance ou réactance sont souvent les solutions les plus intéressantes.

Dans la protection par parafoudres, plus la distance séparant le parafoudre et l'équipement est courte, meilleure est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection maximale, le parafoudre doit être installé près de l'équipement à protéger, voire directement intégré à celui-ci. Ceci est possible grâce aux nouvelles technologies d'isolations.

Les avantages d'une protection contre les surtensions réalisée par un parafoudre intégré sont indéniables: non seulement la protection est plus performante et plus efficace (plus particulièrement en cas de transitoires rapides), mais elle présente aussi un intérêt économique grâce au gain d'espace, à la réduction des coûts d'installation..., ce type d'intégration a déjà été réalisé avec succès dans le cas de transformateurs ; le parafoudre est alors immergé dans l'huile de la cuve. A la rigueur, dans l'avenir l'isolation elle-même pourrait être dotée des propriétés d'un parafoudre.

Nous espérons que ce présent travail puisse être un outil de base et une analyse complémentaire pour les futures études concernant l'étude de comportement de transformateur de puissance en régime transitoire.

## **Références Bibliographiques**

## Bibliographie

[SCHNE 00] : SCHNEIDER Eclectique ; << La protection des installations contre la foudre>> 2000.

[B.HOCHART] : << Le transformateur de puissance >> Edition 1988.

[Gar 84] : C.Gary, G.Leory, B.Hutzler, J.Lalot et C.Dubanto, << Les propriétés diélectriques de l'air en très haute tension>> .

[Ber 79] : U.Berger, << Coordination de l'isolement et choix du parafoudre>>, Revue : Brown.Berni, 4-79, 1979.

[Bel 84] : R.Belaicha, << Contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans les cas des terres mauvaises conductrices >> Thèse magister 1984.

[Ful 92] : D.Fulchiron, << Cahier technique No : 151 >> Edition Décembre 1992.

[CHABA 01] : N.CHABANE, << L'influence de la tension de service sur les surtensions dans les enroulements de transformateur fonctionnant dans les conditions réelles d'exploitation>> Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O; 2001.

[Mast/ETH/2013] : <<Influence du régime de neutre sur les surtensions dans un enroulement de transformateur sur MTLAB Simuling>>, mémoire de master académique machines électriques, U.M.M.T.O, 2013.

[ING.ETH.2007] : <<Etude des surtensions de foudre sur un transformateur de puissance en tenant compte du circuit magnétique>> : mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2007.

[N.MUFIDZADA, T.OTMANE-CHERIF] : <<Etude de l'influence du noyau sur les surtensions impulsionnelle dans les enroulements du transformateur>> 2009.

[B.HOCHART] : <<Le transformateur de puissance>> Edition LAVOISIER 1988.

[A.RAKOTOMALA] : << contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régime haute fréquence>>, Thèse de doctorat université de LYON, 1996.

**[J.C SABONNADIÈRE, N.HADJSAID]** : << Lignes et réseaux électrique>> , Edition Lavoisier 2007.

**[C.Corroyer, P.DUVEAU]** :<< protection des réseaux de transport et de répartition >> Techniques d'ingénieur traité électrique D4 806.

**[SCHNE 00]** : SCHNEIDER Electric, << La protection des installations contre la foudre >> 2000.

**[ECYC]** : Encyclopédie des sciences industrielles électricité, Electronique application, Quillait paris 1973.

**[ALAIN 94]** : ALAIN SCHMITH, THIEVY DEFLENDE <<cahiers de l'ingénieur >> EDF. Origine et effet des surtensions. Mars 1994.