

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI 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*  
**Noureddine GAHFIF**  
**Meziane GASMI**

Thème

# Impact de la surtension atmosphérique sur les enroulements du transformateur de puissance

*Mémoire soutenu publiquement le 08 décembre 2014 devant le jury composé de :*

**Mr C. BIROUCHE**

M. Assistant A, Université M.M.T.O, Président

**Mr T. OTMANE CHERIF**

M. De conférence A, Université M.M.T.O Rapporteur

**Mr A. MIOUAT**

M. Assistant A, Université M.M.T.O, Examineur

**Mr A. KIMOUCHE**

M. Assistant A, Université M.M.T.O, Examineur

# REMERCIEMENTS

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour Mr: T. ATHMANE CHERIF Pour avoir accepté de diriger notre travail, ainsi que pour Mr : C. BIROUCHE pour son aide et son encouragement dans les moments les plus durs.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements, d'une façon particulière à Mlle NAIT DJOUDI ingénieure à l'ENEL, pour ses conseils et son orientation durant la période de l'élaboration de notre modeste travail.*

*Toutes nos reconnaissances aux membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre modeste travail.*

*Dans le souci de n'avoir oublié personne, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce que ce travail soit réalisé.*

*« Une personne qui n'a jamais commis d'erreur...  
...n'a jamais tenté d'innover »*

*Albert Einstein*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents, pour leur amour, sacrifices et leur soutien*

*Mes chères sœurs (Fazia, Tassadit et Farida) et leurs maris et fils*

*Mon frère Yanis*

*Toute ma famille*

*Tous mes amis (es)*

*Et tout particulièrement à ma chère Nadia*

*...À tous ceux qui aiment le savoir...*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

- ✓ *Mes chers parents,*
- ✓ *A mes frères et ma sœur (Karim, Moumouh et Lamia)*
- ✓ *A toute ma famille (mon grand père, ma grand-mère, mes oncles et mes tentes, mes cousins et cousines).*
- ✓ *A mon camarade <Meziane>, et sa famille.*
- ✓ *A tous mes amis(es) et à toute la promotion réseau 2014 en particulier (Naïma et Boussâd).*

*Noureddine*

# **Sommaire**

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

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

Introduction .....	3
I.1 Le rôle de transformateur .....	3
I.2 Symboles électriques du transformateur .....	3
I.3 Principe de fonctionnement de transformateur .....	4
I.4 Classification des transformateurs .....	4
I.5 Types de transformateurs de puissance .....	5
I.5.1 Transformateur à huile minérale(immergé) .....	5
I.5.2 Transformateurs secs .....	5
I.6 Principaux constituants des transformateurs de puissance .....	6
I.6.1 Partie active .....	6
I.6.1.1 Circuit magnétique .....	6
I.6.1.2 Les Enroulements .....	7
I.6.1.3 Représentation des enroulements .....	8
I.6.1.4 Groupe de couplage .....	9
I.6.2. La partie constructive .....	11
I.6.2.1 La cuve .....	11
I.7 Isolation et refroidissement du circuit magnétique et des enroulements.....	11
I.7.1 Refroidissement .....	11
I.7.2 Isolation .....	13
I.8 Les Accessoires .....	13
I.8.1. Conservateur .....	13
I.8.2 le dessiccateur d'air .....	14
I.8.3 Les Traversées .....	14
I.8.4 Les régleurs .....	15
I.9 Les pertes dans un transformateur .....	16
I.9.1 Les Pertes dans les enroulements .....	16
I.9.2 Les Pertes dans le Circuit Magnétique .....	16
Conclusion .....	17

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

Introduction .....	18
II.1. Les surcharges .....	18
II.1.1. Les causes des surcharges .....	18
II.1.2. Les conséquences des surcharges .....	18
II.2. Les courts-circuits .....	19
II.2.1. Causes des courts-circuits .....	19
II.2.2. Les conséquences des courts circuits .....	19
II.2.3. Types de court circuit .....	20
II.3. Les surtensions .....	20
II.3.1. Origine des surtensions .....	20

II.3.1.1. Surtension d'origine interne .....	20
II.3.1.2. Surtensions d'origines externes .....	22
II.3.2. Propagation de l'onde de surtension .....	28
II.3.3. Répartition des surtensions le long d'un transformateur .....	28
a. Le schéma équivalent .....	28
b. Equations de circuit .....	29
II.3.4. Répartition initiale de la tension sur un enroulement du transformateur .....	31
a) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est mis à la terre.....	31
b) Répartition initiale de la tension sur un enroulement dont le neutre est isolé de la terre .....	35
II.3.5 Répartition finale de la tension .....	36
II.3.6 Effet des surtensions .....	37
Conclusion.....	38

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

Introduction .....	39
III.1. Système de protection .....	39
III.1.1 Définition .....	39
III.1.2 Rôle d'un système de protection .....	39
III.1.3 Qualité d'un système de protection .....	39
III.2. Protection des transformateurs .....	40
III.3. Les éclateurs .....	40
III.3.1 Fonctionnement .....	40
III.3.2 Inconvénients des éclateurs .....	41
III.3.3 Avantage des éclateurs .....	42
III.4 Les parafoudres .....	42
III.4.1 Définition .....	42
III.4.2 Type des parafoudres .....	42
III.4.3 Avantage des parafoudres .....	44
III.4.4 Distance de protection .....	44
III.5 Le câble de garde .....	45
III.5.1 Rôles du câble de garde .....	45
III.6 Les sectionneurs .....	46
III.7 Le DGPT .....	47
III.7.1 Le schéma de principe .....	47
III.7.2 Principe de fonctionnement .....	48
III.8 Les disjoncteurs .....	48
III.8.1 Principe de fonctionnement .....	48

III.8.2 Fonctions assurées par le disjoncteur .....	49
a. Protection contre les surcharges .....	49
b. Protection contre les courts-circuits .....	49
III.8.3 Les types de disjoncteur .....	51
III.9 Relais de Bucholz .....	54
III.9.1 Schéma de principe et son fonctionnement .....	54
Conclusion .....	55

## **Chapitre VI : Application et discussion des résultats de simulation**

Introduction.....	56
IV.1. Caractéristiques du transformateur .....	56
a. Caractéristiques électriques .....	56
b. Caractéristiques géométriques .....	56
c. Paramètres calculés du transformateur .....	57
IV.2. Le principe de la simulation .....	57
IV.3. Schéma équivalent de l'enroulement sur Orcad 16.0 .....	58
IV.4. Simulation sur Orcad 16.0 avec le neutre isolé de la terre .....	59
IV.4.1 interprétation des résultats .....	59
IV.5. Simulation sur Orcad 16.0 avec le neutre mis à la terre .....	59
IV.5.1. Neutre mis à la terre a travers une résistance .....	59
IV.5.1.1. Interprétation des résultats .....	61
IV.5.2. Neutre mis à travers une inductance .....	61
IV.5.2.1. Interprétation des résultats .....	63
IV.6. Schéma équivalent de l'enroulement HT avec l'application d'un parafoudre .....	64
IV.7. Simulation par orcad 16.0 de l'enroulement HT avec neutre isolé de la terre .....	65
IV.7.1. Interprétation des résultats .....	66
IV.8. Simulation par orcad 16.0 de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre .....	66
IV.8.1. Mis a la terre a travers une résistance .....	66
IV.8.1.1. Interprétation des résultats .....	68
IV.8.2. Mis a la terre a travers une inductance .....	69
IV.8.2.1. Interprétation des résultats .....	71
Conclusion .....	71
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>72</b>

# **Introduction générale**

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, s'effectue principalement sous forme de tension et de courant alternatif. Il est difficile de produire ou de distribuer cette énergie à haute tension. Par contre un transport économique de cette énergie à grandes distances ne peut être réalisé qu'en haute tension. Ce problème est résolu à l'aide du transformateur.

Ce dernier est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883 et qu'il a eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique et plus particulièrement en courant alternatif.

Ce convertisseur est une machine statique capable de recevoir l'énergie électrique sous une tension et un courant à fréquence donnée, et la restituer avec une autre tension et un autre courant à la même fréquence.

On outre, le transformateur dans un réseau peut être soumis à des surtensions en provenance du réseau. Elles sont dues à des manœuvres en amont (ouverture d'appareils de commutation, ouverture d'appareils de commandes...). Ces surtensions sont dangereuses pour le matériel. Les plus dangereuses sont les surtensions d'origine atmosphérique (chocs de foudres directs ou indirects). Les décharges nuage-sol directes ou au voisinage des structures sont à l'origine, chaque années, de nombreuses dégradations et des catastrophes humaines.

Ce travail s'articule essentiellement sur l'impact de la surtension due au choc de foudre sur les enroulements d'un transformateur de puissance.

Ce présent mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les transformateurs dont les principaux types et leurs spécificités conceptuelles, en passant par un rappel sur le grand rôle de cette machine importante dans le réseau de distribution.

Le deuxième chapitre traitera les différentes contraintes sur les transformateurs de puissance, nous exposerons leurs définitions en premier temps et leurs causes et conséquences. Dans un second temps on s'intéressera à la surtension de foudre, et sa répartition le long des enroulements de transformateur en tenant compte du régime de neutre.

Le troisième chapitre aura comme objet de présenter les différents moyens de protection contre les surtensions. On se focalisant sur les moyens les plus usuels (éclateurs, parafoudres.....).

Le quatrième chapitre nous présenterons les résultats obtenus par la simulation d'un enroulement HT d'un transformateur de puissance, avec une discussion des résultats d'une manière objective et chronologique afin de porter un aspect méthodique à notre travail.

Le problème est étudié par la modélisation des enroulements du transformateur sous le logiciel ORCAD 16.0 qui est choisi pour sa rapidité et sa précision.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous présenterons un résumé des résultats obtenus et quelques perspectives.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les transformateurs de puissance**

## Introduction

On appelle transformateur un convertisseur statique à induction, comportant deux ou plusieurs enroulements fixes, destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phases) de l'énergie électrique à courant alternatif.

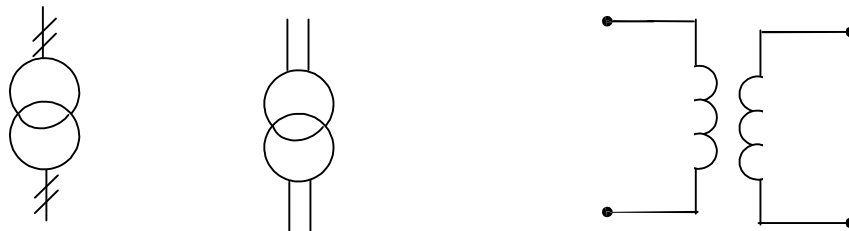
Les transformateurs, en tant qu'élevateurs, sont des éléments qui permettent de réaliser le transport des grandes puissances de façon économique en réduisant les pertes d'énergies, les sections des câbles ainsi que la taille des pylônes. Quand ils sont abaisseurs, ils adaptent la tension à des valeurs adéquates pour assurer l'alimentation permanente des consommateurs en toute sécurité.

### I.1 Le rôle de transformateur [1]

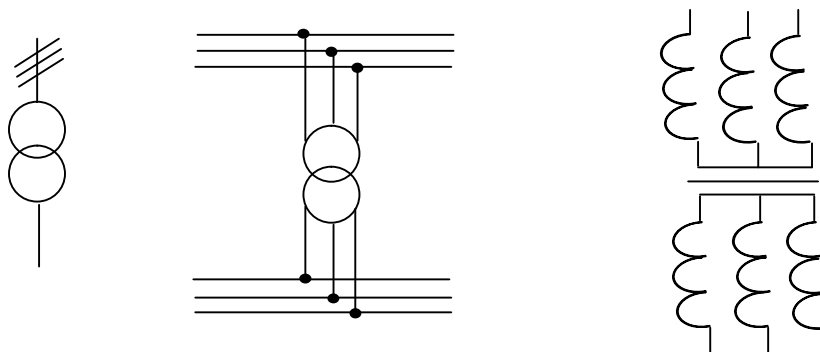
Un transformateur est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Il est constitué d'un noyau ferromagnétique, sur lequel sont bobinés deux enroulements. L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique.

### 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 Principe de fonctionnement de transformateur [2]

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps au changement ( $d\phi/dt$ ) et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

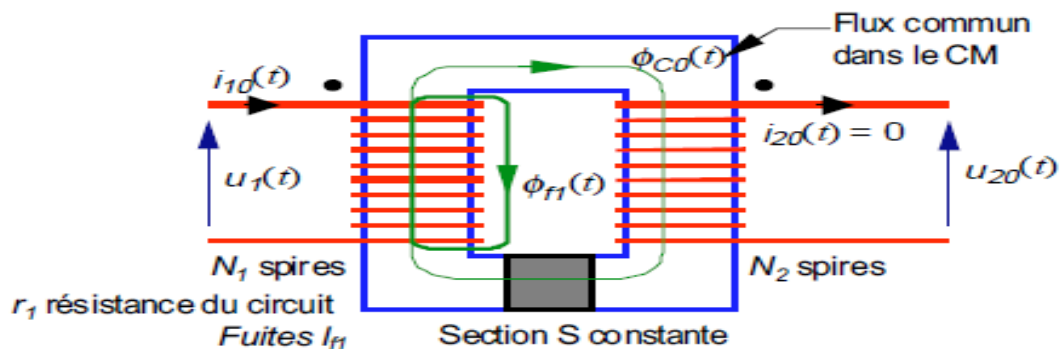


Fig. (I.3): notations de fonctionnement du transformateur à vide

### I.4 Classification des transformateurs

- **Par leurs fonctions :** Élévateur/abaisseur, de Puissance, de courant, de potentiel.
- **Par leurs services :** Transformateurs de génération, transformateurs de postes (interconnexion, distribution), transformateurs spéciaux (Traction, Fours, déphaseurs).
- **Par leurs constructions :** A colonne, cuirassé.
- **Par leurs nombre de phases :** Triphasé, Monophasé.
- **Par type d'isolation :** Les transformateurs peuvent être classés par le type d'isolation de la partie active, les types d'isolation sont :
  - ✓ Transformateurs immergés.
  - ✓ Transformateurs secs.
- **Par type de respiration :** Deux principes sont utilisés :
  - ✓ Transformateurs dits « respirant ».
  - ✓ Transformateurs dits « hermétique ».
- **Par le nombre d'enroulement :** Transformateur de puissance avec Tertiaire.

## I.5 Types de transformateurs de puissance

### I.5.1 Transformateur à huile minérale (immergé)

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.4) : transformateur immergé**

### I.5.2 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 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).

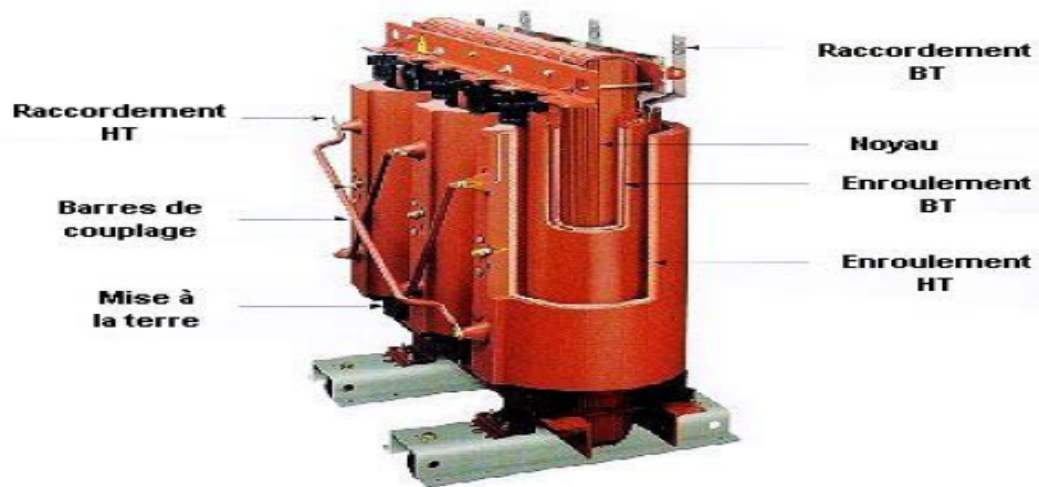


Fig. (I.5) : transformateur sec

## I.6 Principaux constituants des transformateurs de puissance

En triphasé, le circuit magnétique comporte généralement trois colonnes. Sur chaque colonne, un enroulement primaire est concentrique avec un enroulement secondaire.

En fonction des couplages utilisés, il est adopté des barrettes pour assurer les connexions des enroulements.

### I.6.1 Partie active [3]

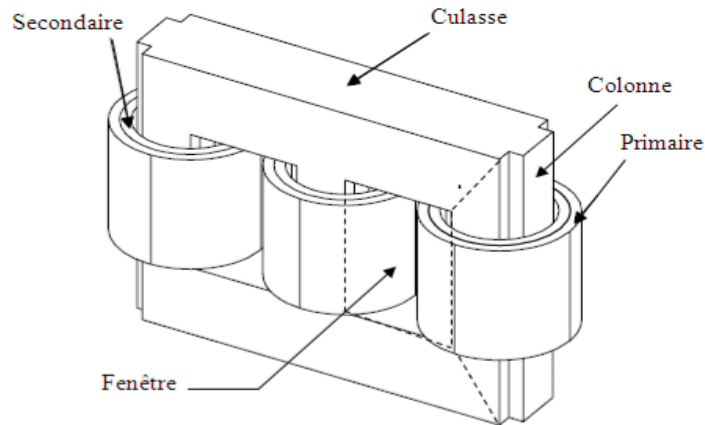
#### I.6.1.1 Circuit magnétique

Le circuit magnétique peut avoir différentes formes:

##### a) Circuit magnétique à colonnes

Formés par un empilage de tôles décalées avec des noyaux reliés par deux culasses.

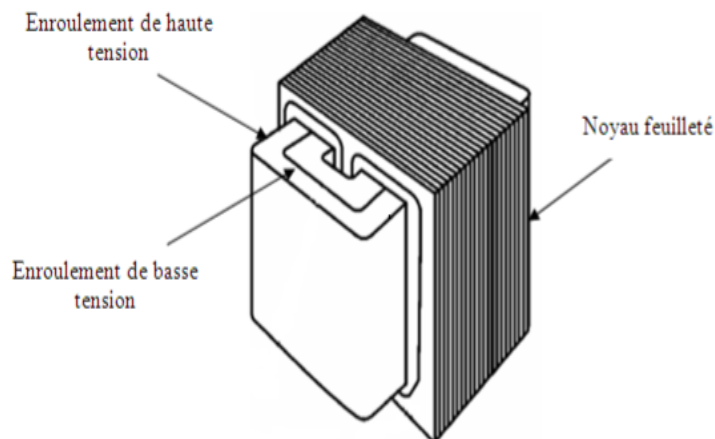
Ils peuvent être à trois ou à cinq colonnes :



**Fig. I.6 : CM à colonnes**

### b) Circuit magnétique cuirassé

Cette technologie est simple, sûre et flexible, permet de résoudre tous les problèmes liés aux contraintes mécaniques, thermiques, diélectriques, électrodynamiques et spécifiques des transformateurs de grandes puissances, cependant elle est coûteuse :



**Fig. I.7 : CM cuirassé**

#### I.6.1.2 Les Enroulements

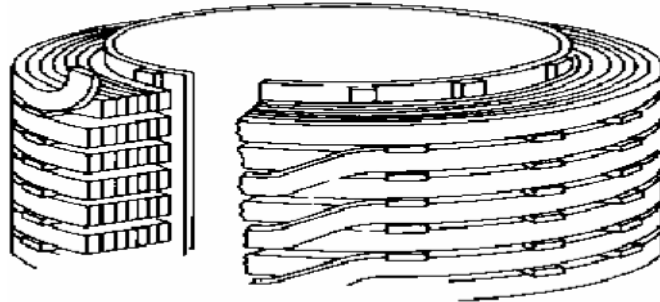
La réalisation des bobinages s'effectue sous plusieurs formes, on trouve :

##### a) Les bobinages concentriques

Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques concentriques.

**b) 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.8 : Bobinages en galettes**

**c) Les bobinages mixtes**

C'est un mélange entre les deux premiers bobinages (galette et concentrique), le bobinage est concentrique mais l'enroulement HT est en galette.

**I.6.1.3 Représentation des enroulements****a) Enroulement primaire**

Le courant circulant dans l'enroulement est à faible 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 haute tension.

**b) 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.

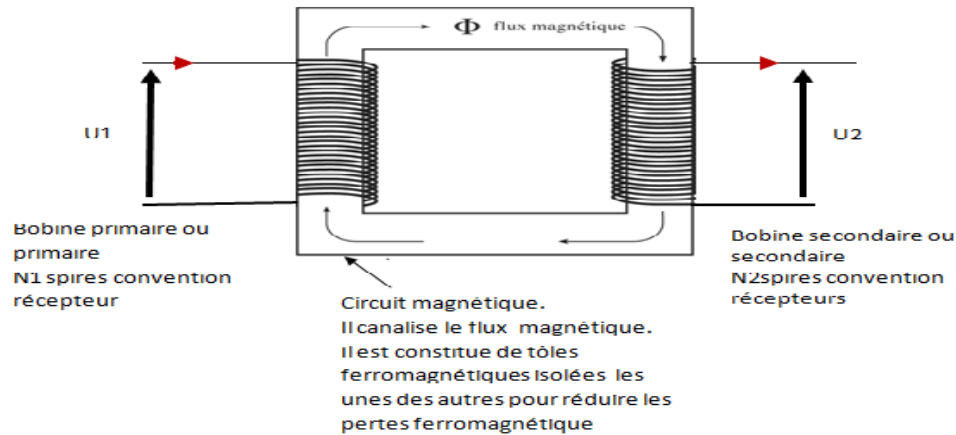


Fig. (I.9) : bobines primaire et secondaire d'un transformateur

#### I.6.1.4 Groupe de couplage

Le groupe de couplage désigne l'association des couplages des enroulements choisis pour la haute tension et pour la basse tension. L'enroulement haute tension d'un transformateur triphasé de nombre de spires  $N_1$  peut être connecté en étoile (symbole Y) ou en triangle (symbole D). L'enroulement basse tension avec un nombre de spires  $N_2$  peut être connecté en étoile (symbole y). En triangle (symbole d) ou en zigzag (symbole z). Les systèmes des tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont en générale déphasés avec un angle  $\theta$ . Comme cette angle est multiple de  $\frac{\pi}{6}$ , on définit l'indice horaire par :  $I = \theta / (\pi/6)$ .

Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés Yy 0, Dy 11, Yz 11

##### a) Couplage étoile-étoile

Pour le couplage étoile-étoile, les tensions aux bornes des bobines du primaire et du secondaire de la même colonne sont des tensions simples. Ce qui permet de construire le diagramme vectoriel.

Le rapport de transformation est  $m = N_2 / N_1$ .

Le déphasage de basse tension par rapport à la haute tension est nul, ce qui donne un indice horaire  $I=0$ .

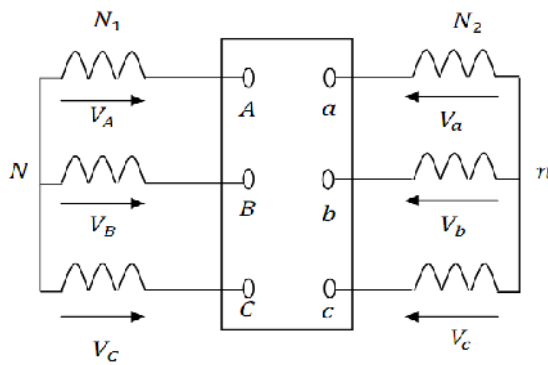


Fig. I.10-a: Couplage Yy0

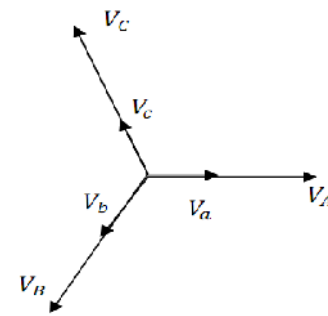


Fig. I.10-b: Diagramme vectoriel

b) Couplage triangle-étoile

Pour le couplage triangle, la tension aux bornes d’une phase du primaire est une tension composée, alors que la tension aux bornes de la phase correspondante du secondaire est une tension simple. Le rapport de transformation est  $m= 3.(N_2/N_1)$ . Le déphasage entre les tensions du primaire et le secondaire est de  $(-\pi/6)$ , ce qui veut dire l’indice horaire est  $I = 11$ .

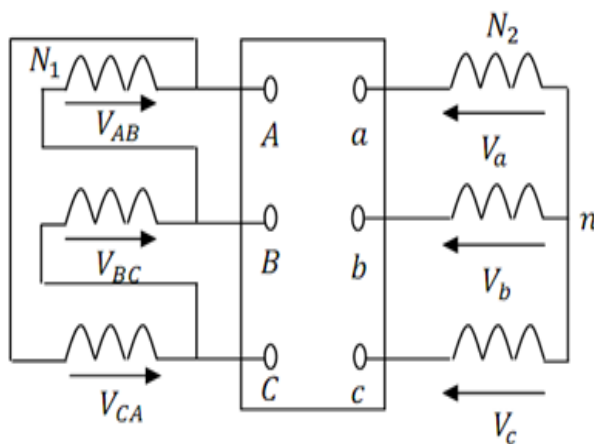


Fig. I.11-a: Couplage Dy11

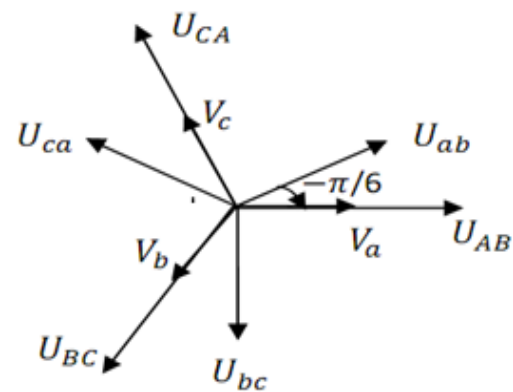


Fig. I.11-b: Diagramme vectoriel

c) Couplage étoile-zigzag

Pour le couplage étoile zigzag, la tension aux bornes d’une phase du primaire est une tension simple, alors qu’une tension aux bornes d’une phase du secondaire est la somme des deux tensions aux bornes de demi bobines ce qui permet de construire le diagramme vectoriel. Le rapport de transformation est  $m=\sqrt{3}.(N_2/N_1)$ .

Le déphasage entre les tensions est de  $(-\pi/6)$ , en choisissant la première détermination position positif de l’angle, ce qui veut dire l’indice horaire est  $I=11$ .

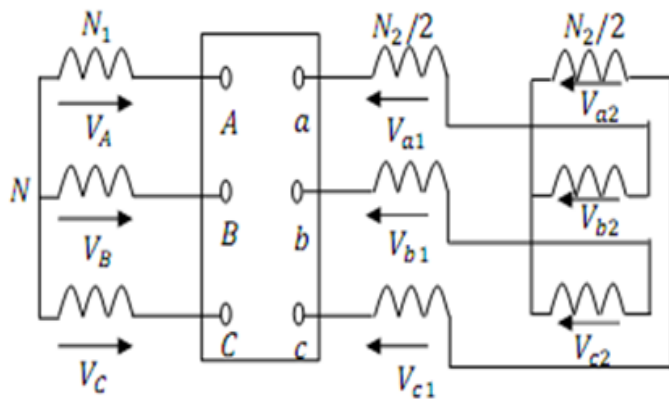


Fig. I.12-a: Couplage Yz11

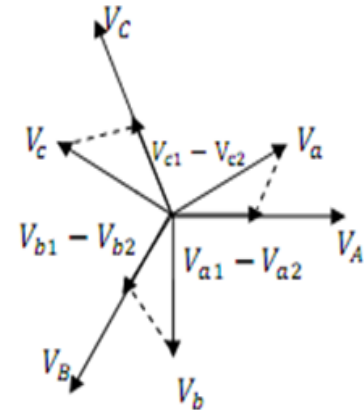


Fig. I.12-b: Diagramme vectoriel

## I.6.2. La partie constructive [2]

### I.6.2.1 La cuve

La cuve sert de réservoir d'huile dans les transformateurs immergés. Elle est généralement en tôles pliées pour former des ondes qui favorisent l'échange thermique avec l'extérieur. La profondeur et la période de ces ondulations dépendent de la puissance du transformateur. La cuve joue le rôle d'isolation en empêchant l'accès aux parties actives du transformateur. Le circuit magnétique est isolé de la cuve, qui est elle-même reliée à la terre.

La cuve est généralement en tôle d'acier à joints soudés ou boulonnés. On distingue deux types de cuves :

- a) **Cuve classique** : Partie active fixée au couvercle.
- b) **Cuve à cloche** : Partie active maintenue en fond de cuve.

## I.7 Isolation et refroidissement du circuit magnétique et des enroulements [4]

### I.7.1 Refroidissement

Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège de pertes, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux :

- Le circuit magnétique: Ces pertes dépendent de l'induction c'est-à-dire de la tension appliquée.
- Les enroulements: Les pertes cuivre qui dépendent du courant de charge.

En dernier lieu, les flux de fuites sont susceptibles d'induire dans les pièces avoisinantes non actives (pièces de serrage, cuve, couvercle) des courants de Foucault qui entraînent des pertes parasites.

Toutes ces pertes, ont pour conséquence un échauffement du transformateur, ce qui nécessite la mise en œuvre de moyens de réfrigération adéquat.

### a) Système de Refroidissement

Le système de refroidissement est composé de : Radiateurs, ventilateurs, pompes et de système d'asservissement.

La mise en route du fonctionnement des ventilateurs et des pompes est asservie par l'élévation de la température de l'huile du transformateur mesurée, au moyen de thermostats.

### b) Modes de Refroidissement

Le mode de refroidissement est désigné par le constructeur au moyen de quatre lettres, le tableau suivant indique la disposition des symboles :

1 <sup>ère</sup> lettre	2 <sup>ème</sup> lettre	3 <sup>ème</sup> lettre	4 <sup>ème</sup> lettre
Nature du diélectrique	Mode de circulation du diélectrique	Fluide de refroidissement	Mode de circulation de fluide
<b>O</b> : Huile minérale <b>L</b> : Diélectrique chloré <b>G</b> : Gaz <b>A</b> : Air <b>S</b> : Isolant solide	<b>N</b> : Naturel <b>F</b> : Forcée <b>D</b> : Forcée et dirigée dans les enroulements	Mêmes symboles que pour la 1 <sup>ère</sup> lettre	Mêmes symboles que pour la 2 <sup>ème</sup> lettre.

Tableau I.1 Disposition des symboles

Ils existent différents modes de refroidissement d'huile à savoir : **ONAN**, **ONAF**, **OFAF**, **ODAF**.

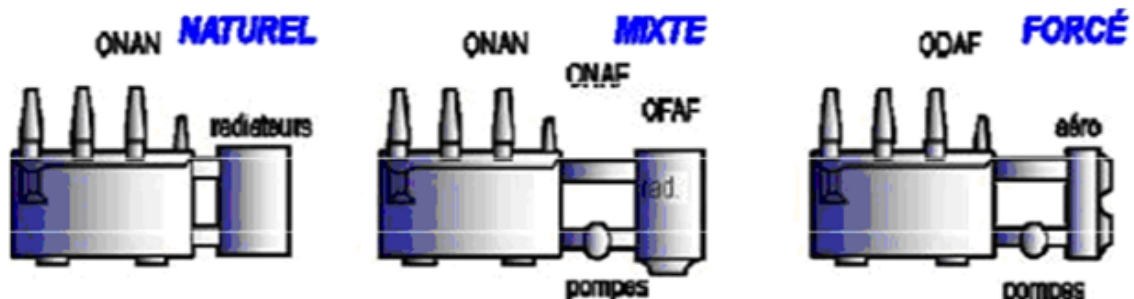


Fig. I.13 : Modes de Refroidissement

### I.7.2 Isolation

Dans la partie active d'un transformateur, entre les éléments portés à des potentiels électriques différents, l'isolation est assurée par des isolants sous deux états :

#### a) Isolants Solides

Les isolants solides comprennent deux catégories :

- ❖ Les isolants organiques qui se carbonisent à température élevée pour les transformateurs immergés dans un diélectrique liquide.

Ces matériaux doivent présenter un ensemble de caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques qui garantissent leur comportement correct à la température limite (105 °C).

Ils servent à torsader les conducteurs et à fabriquer des cylindres isolants (Presspahn, kraft).

La rigidité d'un diélectrique est liée à plusieurs facteurs à savoir l'épaisseur, la température, la fréquence et la durée d'application de la tension.

- ❖ Les isolants minéraux qui résistent aux températures élevées (porcelaine), servent à protéger les bornes de liaisons.

#### b) Isolants liquides

L'huile isolante est l'un des composants les plus importants dans la conception des transformateurs, en particulier dans les transformateurs de haute tension. Elle doit être conforme à la Norme **CEI 296**.

Le choix d'une huile isolante dépend de certaines caractéristiques physico-chimiques fondamentales qui garantissent une isolation convenable en exploitation.

Ces caractéristiques sont :

- Une rigidité électrique élevée afin de supporter les contraintes électriques en service.
- Une viscosité suffisamment faible pour ne pas freiner la circulation ni diminuer le transfert de chaleur.
- Des propriétés d'écoulement à basses températures appropriées et pour les conditions climatiques les plus basses.
- Une résistance à l'oxydation convenable, afin d'assurer une longue durée de service.

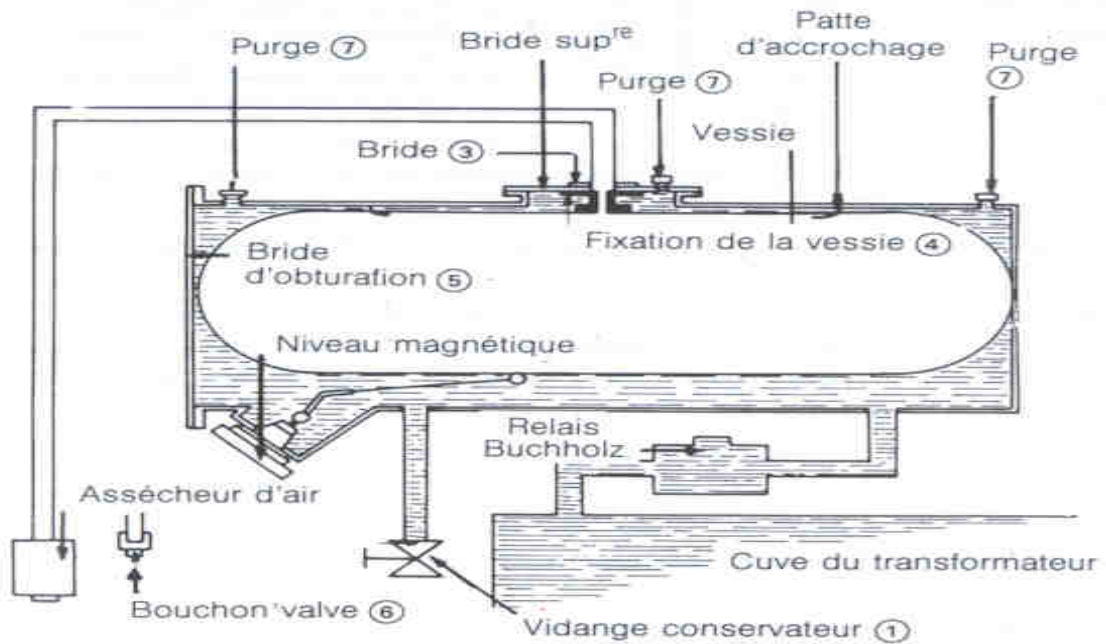
## I.8 Les Accessoires [2]

### I.8.1. Conservateur

Le conservateur sous forme de citerne est un dispositif important pour les transformateurs, dits 'respirant', il n'est pas rempli complètement d'huile. La surface du diélectrique peut être en contact avec l'air ambiant ou l'azote déshumidifié grâce au dessiccateur « **conservateur classique** » ou séparée par une paroi étanche souple « **conservateur à diaphragme** ».

Le conservateur peut avoir deux compartiments séparés:

- Le compartiment principal pour le transformateur lui-même.
- Le compartiment secondaire pour le régleur en charge (commutateur).



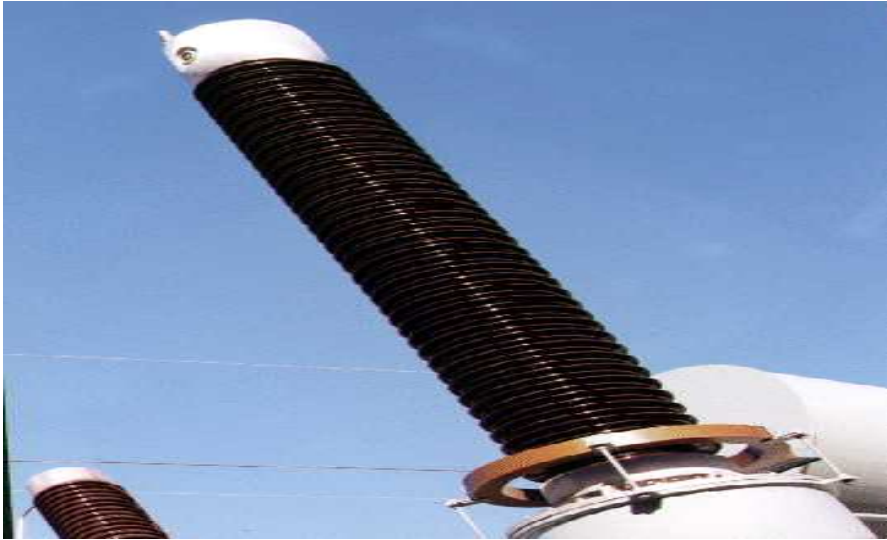
**Fig. I.14 : Conservateur à diaphragme**

### I.8.2 Le dessiccateur d'air

Le dessiccateur d'air est un appareil à travers lequel les échanges avec l'extérieur se font. Il comprend du gel de silice (silicagel), qui change de couleur lorsqu'il est chargé d'humidité.

### I.8.3 Les Traversées

Elle se présente sous la forme monobloc composée d'un tube en cuivre qui constitue l'ossature de la traversée et sur lequel sera fixés le corps isolant de porcelaine, de la prise supérieure et la bride de fixation. Le corps isolant est composé de papier roulé avec interposition d'électrodes pour répartir linéairement le champ électrique.



**Fig. I.15 : Traversée**

Il existe deux types de traversées :

- **Type sec** : la partie active dans la porcelaine n'est pas enrobée avec du papier.
- **Type condensateur à l'huile** : la partie active dans la porcelaine est enrobée avec du papier

#### 1.8.4 Les régleurs

Il existe deux types : régleurs en charge et à vide. Un transformateur peut être équipé d'un ou plusieurs régleurs qui peuvent être mono ou triphasé.

##### a) Régleurs en charge

Le régleur en charge permet de réguler la tension secondaire du transformateur sans la mise hors tension de ce dernier.

Le régleur en charge peut être commandé automatiquement par l'action d'un régulateur de tension ou manuellement par l'action de l'exploitant en fonction des orientations du centre de conduite.

Les éléments essentiels du régleur en charge sont : la tête ; le récipient d'huile ; le Commutateur et le sélecteur de prises.

Le commutateur du régleur en charge peut être en contact direct avec l'huile du transformateur (régleur en charge non séparé), ou séparé, le commutateur est logé dans un bâti distinct du reste du transformateur.

**b) Régleur à vide**

Ce régleur est manœuvré toujours à vide.

**I.9 Les pertes dans un transformateur [5]**

La conversion de l'énergie dans un transformateur s'accompagne de diverses pertes qui déterminent le niveau de l'échauffement et le rendement.

**I.9.1 Les Pertes dans les enroulements****a) Les pertes par effets joule**

Les pertes par effets joules dans les enroulements sont appelées également pertes cuivre, elles dépendent de la résistance de ces enroulement et de l'intensité du courant qui les traverse, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

$$P_J = \sum_i R_i I_i^2 \quad (I.1)$$

$R_i$  : Résistance de l'enroulement,

$I_i$  : Intensité du courant qui le traverse.

Les pertes par effets joules, fonction du courant imposé augmentent avec la résistance et la température.

**b) Les pertes supplémentaires**

Ce sont des pertes dues aux courants de Foucault dans les enroulements ou dans les pièces métalliques avoisinantes.

$$P_{cc} = P_j + P_s \longrightarrow P_s = P_{cc} - P_j \quad (I.2)$$

$P_{cc}$  : ce sont les pertes dues à la charge.

Les pertes supplémentaires, fonction de la tension induite, varient en sens inverse que les pertes joule.

**I.9.2 Les Pertes dans le Circuit Magnétique**

Les pertes dans le fer comprennent les pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis.

**a) Les Pertes par Courants de Foucault**

Le circuit magnétique à une induction sinusoïdal "B" est le siège des courants induits appelés courants de Foucault.

Ces courants qui circulent dans des plans perpendiculaires aux lignes d'induction tendent à s'enrouler autour de ces lignes.

Ils produisent par effet joule un dégagement de chaleur dans le circuit magnétique, ces pertes sont données par la relation suivante :

$$P = K \cdot e^2 B_m^2 f^2 \quad W/kg \quad (I.3)$$

\*  $B_m$  : Induction max (T).

\*  $f$  : Fréquence (HZ).

\*  $e$  : Epaisseur de la masse (m).

\*  $K$  : Coefficient déterminé par mesure sur un échantillon.

\* : Résistivité (  $\Omega \cdot m$  ).

Pour réduire ces pertes, on est amené à utiliser des tôles minces isolées entre elles.

### b) Les Pertes Par Hystérésis

La surface du cycle d'hystérésis s'exprime en joule /m<sup>3</sup>. Elle correspond à un échauffement du matériau dû aux frottements des moments magnétiques. Ainsi la puissance perdue par hystérésis est donnée par :

$$P_h = K f V S_h \quad f V (B_{max})^2 \quad (I.4t)$$

- $K$  : Coefficient déterminé par mesure sur un échantillon
- $f$  : est la fréquence de l'excitation magnétique
- $V$  : est le volume de fer subissant le cycle
- $S_h$  : est la surface du cycle qu'on admet être proportionnelle à  $(B_{max})^2$

Pour les réduire, on doit utiliser des tôles de qualité, qui ont des cycles d'hystérésis très étroits.

### Conclusion

Le transformateur de puissance est une machine électrique statique qui permet la conversion de l'énergie électrique basé sur la loi de l'induction électromagnétique.

Chacun des ses éléments constitutifs a un rôle bien déterminé pour garantir un fonctionnement permanent avec une qualité d'alimentation correcte et un rendement optimal.

Dans les réseaux d'exploitations, les transformateurs de puissance sont soumis à de nombreuses contraintes, lors de leur fonctionnement. Ces dernières ont des effets nocifs sur les transformateurs qui peuvent aller jusqu'à la destruction et la défaillance de tout le dispositif de distribution de l'énergie électrique. Pour cela l'élaboration d'un système de protection est inévitable dont la fiabilité est une exigence.

## **Chapitre II**

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

## 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 qui affectent directement 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. Les surcharges [6]

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.

#### II.1.1. Les causes des surcharges

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.1.2. Les conséquences des surcharges

Un régime en 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 courants 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.2. Les 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.2.1. 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 ligne et balancement des conducteurs par le vent. Ligne souterraines : mouvement de terrain ; infiltration d'humidité.

- Origine interne : surtension de manouvre.
- Isolation dégradées ( la chaleur, l'humidité ou des produits corrosifs...).

### II.2.2. 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 fondre 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.2.3. 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.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 de dysfonctionnement et 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 dues aux diverses origines.

#### II.3.1. Origine des surtensions [7]

Elles peuvent être d'origine interne ou externe :

##### II.3.1.1. Surtensions d'origine interne

Les surtensions d'origine interne ne dépendent que du réseau 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).

##### a) Surtensions de Ferro-résonance [8]

Le terme Ferro- résonance désigne des oscillations anormales dans un réseau électrique pouvant le déstabiliser qui sont dues à la saturation des matériaux magnétiques.

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)].

**b) Surtensions de manœuvre**

Dans un réseau électrique une manœuvre c'est tout ce qui contribue à modifier la topologie de ce réseau, ouverture ou fermeture d'une liaison, court-circuit...etc.

Les surtensions de manœuvres dépendent uniquement des caractéristiques propres 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 dues essentiellement à :

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

**c) Surtensions à fréquence industrielle**

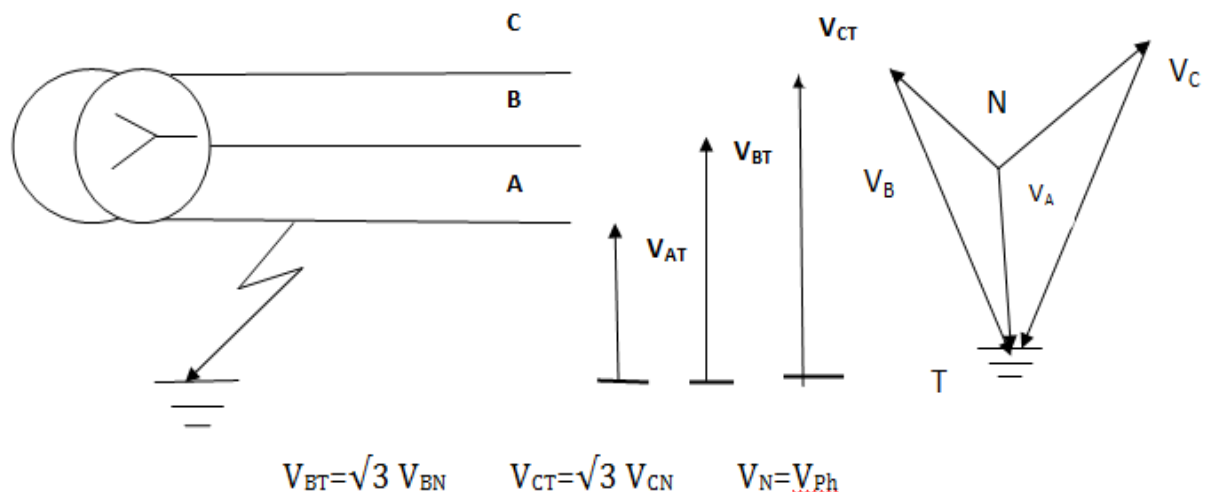
Les surtensions à fréquences industrielles (50Hz ou 60Hz) sont causées souvent par :

- 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.

**d) Surtension provoquée par un défaut d'isolement [9]**

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 soumises, par rapport à la terre à la tension composée  $U = \sqrt{3}V$ .



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

#### 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 composé.

#### II.3.1.2. Surtensions d'origines externes [6] [7]

##### a) les surtensions d'origine électrostatique

Elles sont dues aux charges statiques à l'équilibre qui entraînent l'apparition d'un champ électrique en fonction de son intensité, peut provoquer :

- Des déplacements des particules.
- Des perturbations physiologiques.
- De perturbations des composants et des systèmes électroniques.
- Des destructions de diélectriques aussi bien utilisés en électronique qu'en haute tension.

Ces champs donnent naissance à des tensions dont les ordres de grandeur peuvent aller jusqu'à 150kV. Elles peuvent être provoquées par diverses causes dont :

- L'ionisation de l'aire (effet couronne).
- L'humification de l'aire.
- L'utilisation de matière solide ou liquide partiellement conductrice.
- L'arc
- La mise à la masse ou à la terre

Dans le cas d'un corps de décharge isolant on parlera d'une fermeture capacitive, dans le cas d'un conducteur on parlera d'une fermeture résistive.

Un circuit de décharge électrostatique est par conséquent assimilable aux circuits classiques de choc de courant. Il est à remarquer qu'il ne faudra pas négliger de prendre en considération les phénomènes transitoires d'influence électrostatique apparaissant simultanément, faisant intervenir des tensions et des courants transitoires dans des parties insoupçonnées du système (cage blindées).

### **b) Surtensions d'origine de la foudre**

Elles proviennent soit d'un impact direct de la foudre sur un système électrique, soit par l'influence à la suite d'un coup de foudre dans l'environnement du système.

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 doit être faite entre les deux types de coup de foudre :

- 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 à 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**

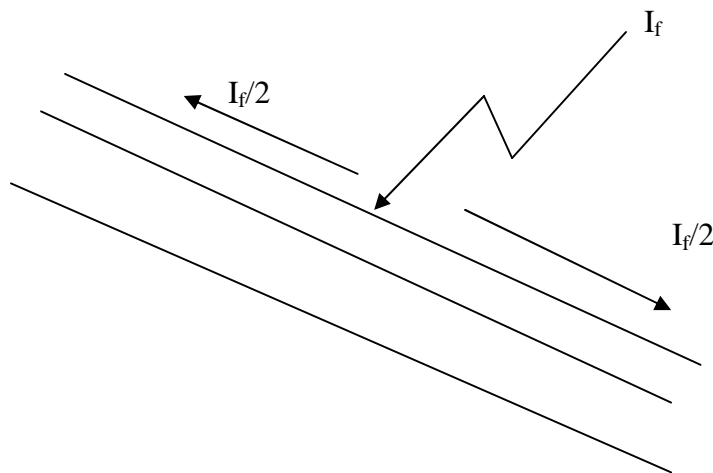
### b).1. Le coup de foudre directe [9]

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.

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

$Z_c$  : impédance caractéristique de la ligne considérée.

$I_f$  : courant injecté.



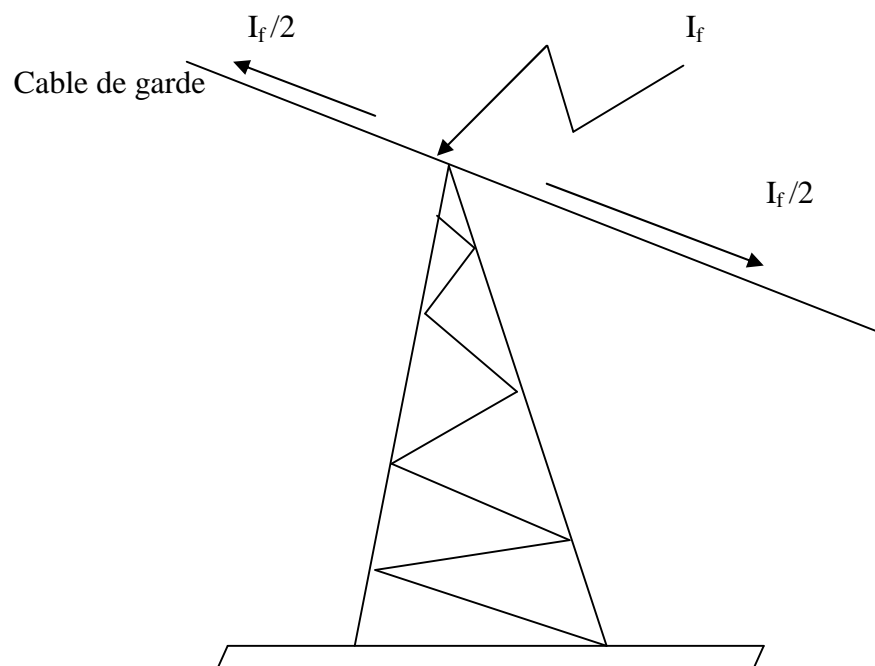
**Fig. (II.3) : Schéma d' un coup de foudre direct**

### b).2. Le coup de foudre indirecte [8] [9]

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.

### c) Classification des coups de foudre [10]

#### c).1. Classification par leur polarité

On distingue deux types :

- Les coups de foudre positifs (décharge d'un nuage chargé positivement), qui sont constitués d'une seule décharge durant 0,1 à 0,2s. la durée du front de l'onde est longue, elle varie entre 20 et 50 $\mu$ s, et l'amplitude du courant peut atteindre de très fortes valeurs supérieures à 100 kA.
- Les coups de foudre négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement), qui sont caractérisés par plusieurs décharges successives .En générale, un coup de foudre complet dure de 0,2à1s et comporte en moyenne quatre décharges partielles. La durée de front et l'amplitude de la première décharge partielle sont plus faibles que pour les décharges secondaires, d'amplitude plus faible que celle de la première.

#### c).2. Classement selon le sens de développement du leader

On distingue deux types :

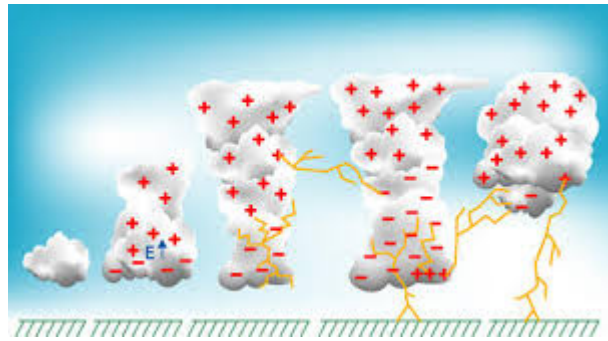
- Les coups de foudre ascendants: dans ce type le développement de leader est a partir du sol
- Les coups de foudre descendants : dans ce type le développement de leader est a partir du nuage polarisé.

Les coups de foudre ascendants se produisent plus fréquemment à partir d'objets très élevés et pointus. Un pylône situé sur une crête peut, par exemple, donner lieu à une décharge ascendante.

### d) Le mécanisme de la décharge de foudre [11]

Appelé par les météorologues cumulo-nimbus, un nuage orageux est, en générale, constitué en partie haute de cristaux glace chargés positivement et en partie basse formée de gouttelettes d'eau chargées négativement. Cette séparation de charge, due aux mouvements d'air, crée des contraintes électriques à l'intérieure du nuage lui-même et entre le nuage et le sol (la différence de potentiel peut atteindre plusieurs dizaines de méga volts).

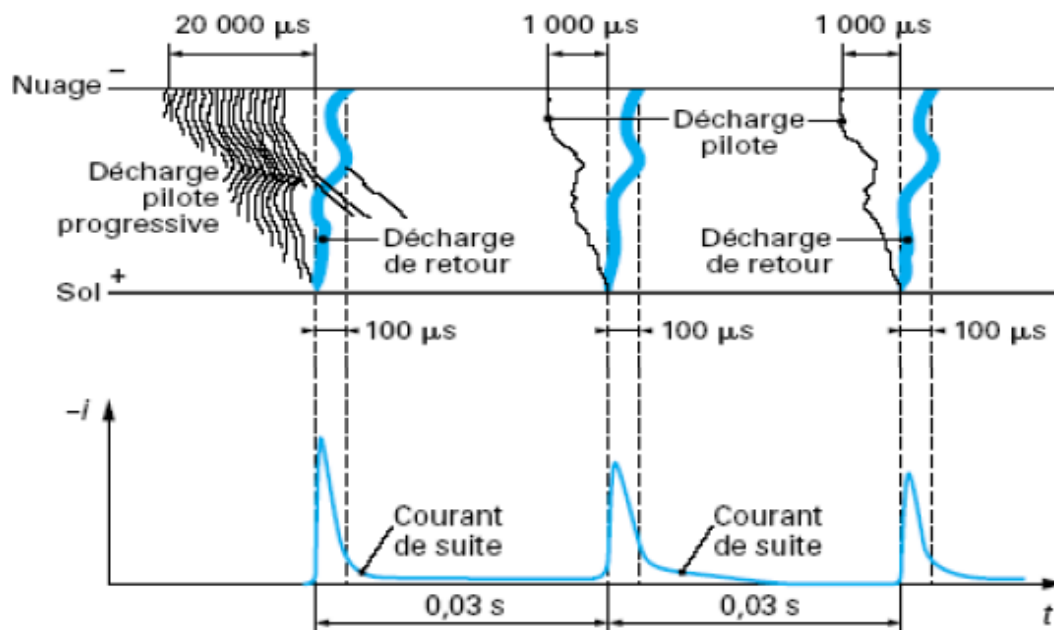
Lorsque le gradient limite de claquage dans l'air est atteint, une décharge se produit soit à l'intérieur du nuage ou entre deux nuages voisins, soit entre le nuage et le sol.



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

. 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) pour les coups de foudre négatifs. Tandis que les coups de foudre positifs sont constitués d'une seule décharge (aller-retour).



**Fig. (II.6) : Le mécanisme du coup de foudre.**

### II.3.2. Propagation de l'onde de surtension [12]

L'onde se propage le long de la ligne à 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.

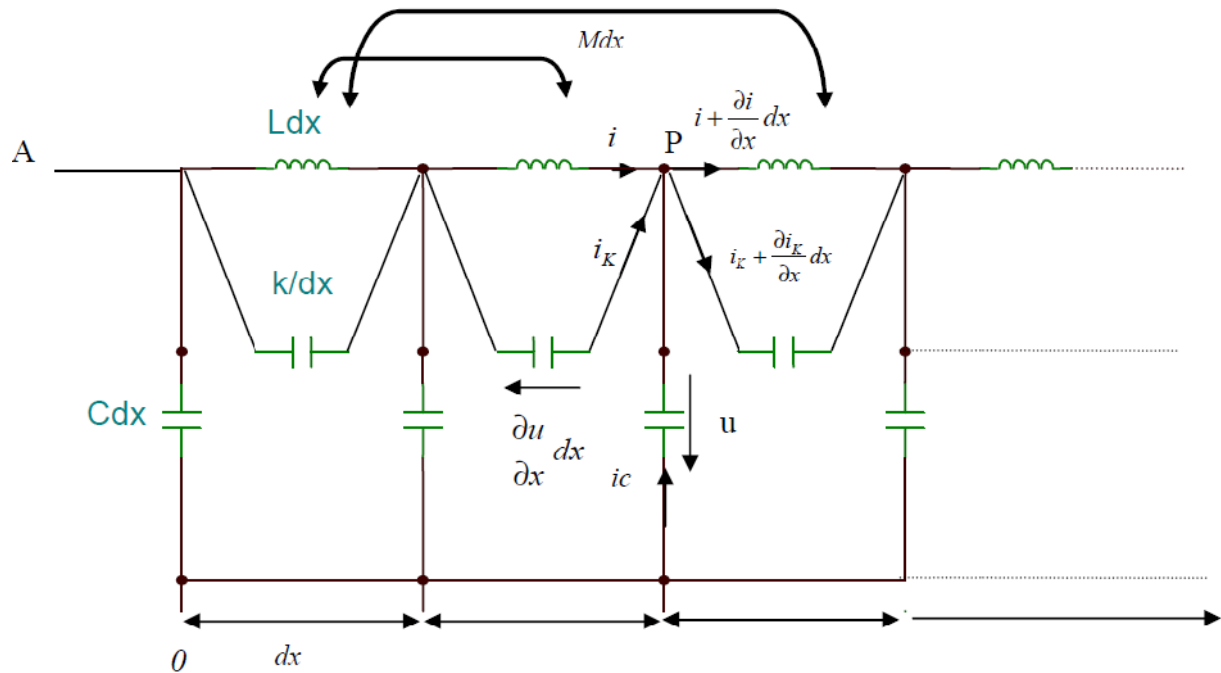
### II.3.3. Répartition des surtensions le long d'un transformateur

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 lequel 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.

#### a) 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.

**b) Equations de circuit**

L'application de l'équation de Kirchhoff au nœud P donne :

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

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

Comme : 
$$i_c = c dx \frac{\partial u}{\partial t}$$
 [A] (II.2)

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

$$\frac{\partial (i + i_k)}{\partial x} dx = -c dx \frac{\partial u}{\partial t}$$
 [A/m] (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 : 
$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad [A/m] \quad (II.4)$$

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 :

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

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

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

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

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

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.

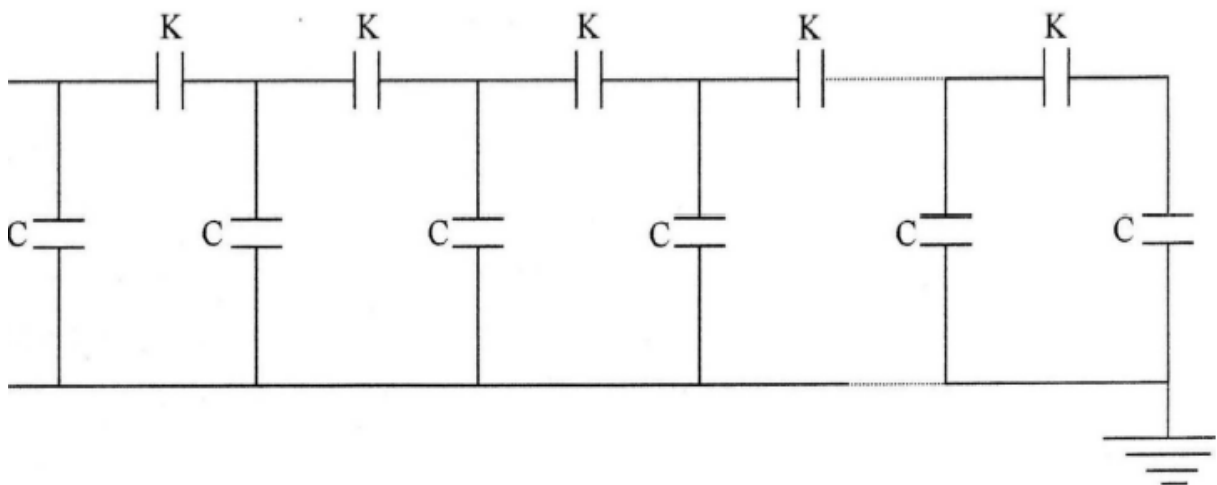
Cette solution représente une onde stationnaire.

### 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 ( $L\omega$ ) 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 ( $L\omega$ ) égale à l'infinie, et on considère que la répartition de la tension ne dépend que des capacités.



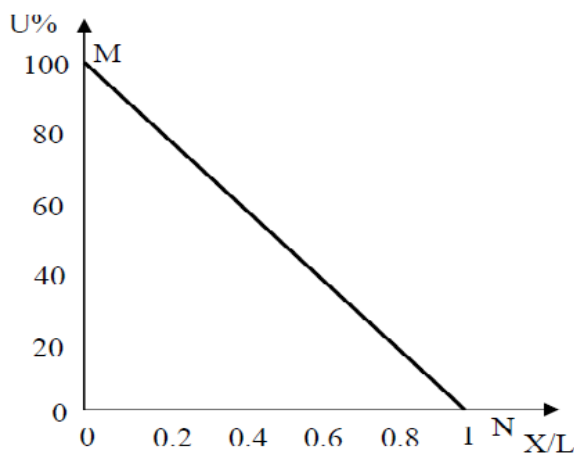
**Fig. (II.8) : Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale de la tension.**

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

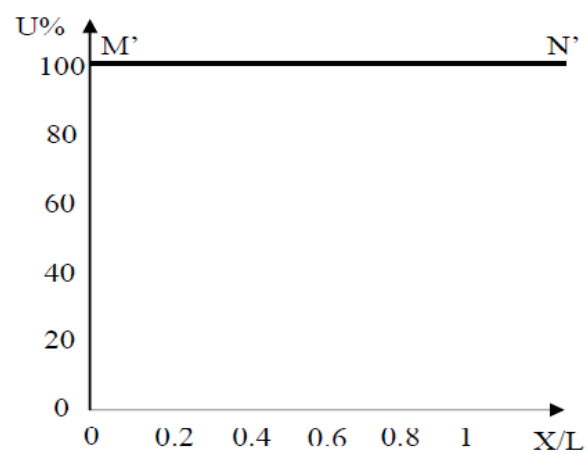
**a) Si  $C = 0$**

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**

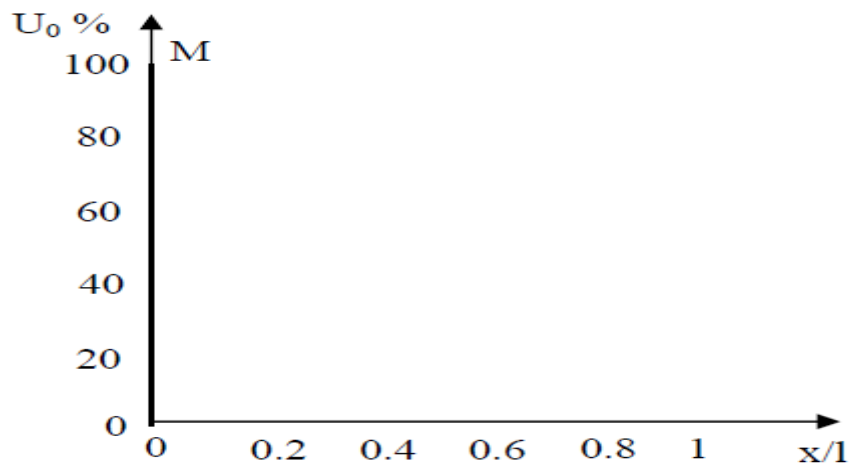


**Fig. (II.10). Neutre isolé de la terre**

**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) ;

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

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  $x = 1$  :

$$Ae^{\alpha 1} + e^{-\alpha 1} = 0$$

Après les calculs, on trouve :

$$A = -U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} - e^{-\alpha 1}}$$

$$B = U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} - e^{-\alpha 1}}$$

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

$$u_0(x) = -U \frac{e^{-\alpha 1}}{e^{\alpha 1} - e^{-\alpha 1}} e^{\alpha x} + U \frac{e^{\alpha 1}}{e^{\alpha 1} - e^{-\alpha 1}} e^{-\alpha x}$$

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

Ou :

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

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.

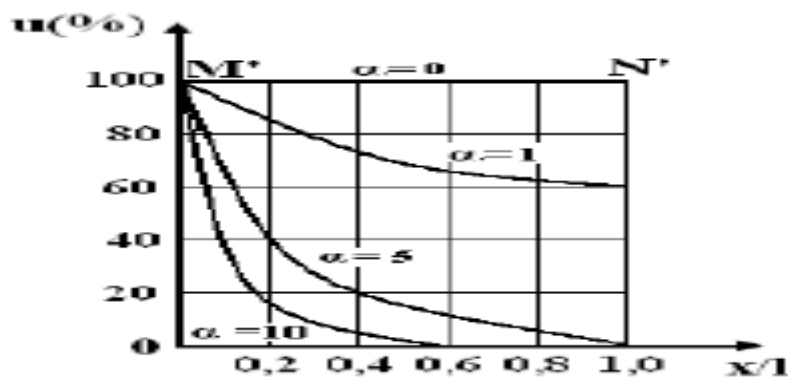
**Si  $C=0$  :**

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) : Répartition initiale selon la valeur de**

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

❖ Pour  $x = 0$  :

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

❖ 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) devient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} &= -K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \Rightarrow \int \frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx = -K \int \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} dx \\ (i + i_k)_{x=1} &= -K \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=1} = 0 \\ \Rightarrow \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=1} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

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 :

$$\begin{aligned} A &= U \frac{e^{-\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}} \\ B &= U \frac{e^{\alpha}}{e^{\alpha} + e^{-\alpha}} \end{aligned}$$

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 :

$$u_0(x) = U \frac{\text{ch}[\alpha(1-x)]}{\text{ch}(\alpha)} \quad (\text{II.17})$$

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

### II.3.5 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 répartie 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)

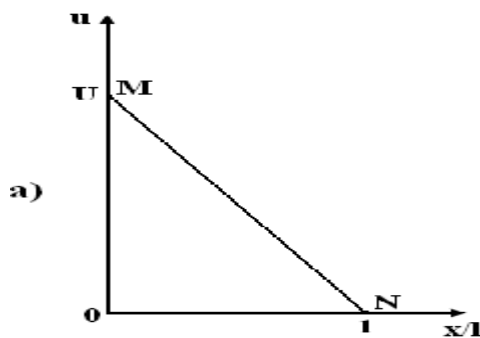


Fig. (II 13).neutre mis à la terre

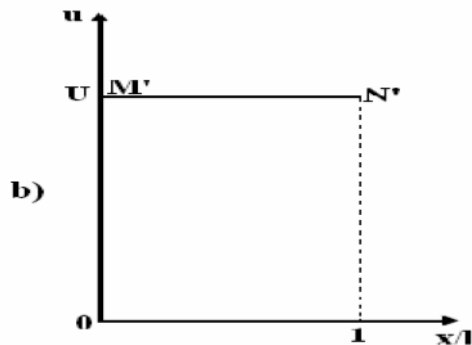


Fig. (II 14).neutre isolé de la terre

### II.3.6 Effet des surtensions [11]

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.
- Dstructions 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.

**Conclusion**

Les surtensions indiquées dans ce chapitre ont été l'objet d'investigations dans de nombreux laboratoires dans le monde, bien qu'elles ne soient pas les seules à exister, celles-ci ont des caractéristiques communes, et certaines d'entre elles sont très difficiles à prévoir.

Nous avons mis le point sur les surtensions de foudre car elles demeurent un facteur qui exige l'élaboration d'un système de protection des installations électriques afin d'assurer la continuité de service et la bonne distribution d'énergie électrique. Ceci fera l'objet du prochain chapitre, dans le quel on expose les divers moyens de protection contre les surtensions.

## **Chapitre III**

# **Protection des transformateurs contre les Surtensions**

## Introduction

La connaissance des sollicitations aux quelles est soumis l'enroulement du transformateur est particulièrement importante, pour le calcul de l'isolement et la conception technologique de l'appareil, ainsi que pour l'analyse des dommages qui peuvent survenir en cours d'exploitation.

Ce chapitre décrit la protection au niveau de transformateurs par les divers moyens qu'ont peut mettre en œuvre afin d'assurer la continuité de service sans interruptions ; souvent causées par les effets nocifs des surtensions qui arrivent à l'entrée du transformateur et peuvent se propager le long de ses enroulements.

### III.1. Système de protection [13]

#### III.1.1 Définition

C'est un dispositif de surveillance continue de l'état électrique du réseau. Il est destiné à donner des ordres de mise hors tension du circuit de ce réseau, sièges d'un fonctionnement anormal ou d'un défaut lorsque les grandeurs électriques qui l'alimentent franchissent un seuil prédéterminé.

#### III.1.2 Rôle d'un système de protection

Le système de protection électrique désigne l'ensemble des appareils de surveillance et de Protection assurant la stabilité d'un réseau électrique.

Ces systèmes de protection permettent d'éviter les conséquences des incidents qui peuvent être dangereuses pour les personnes et pour le matériel. Pour cela, ils doivent :

- Assurer la protection des personnes contre tout danger électrique.
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles il est soumis le matériel.

#### III.1.3 Qualité d'un système de protection

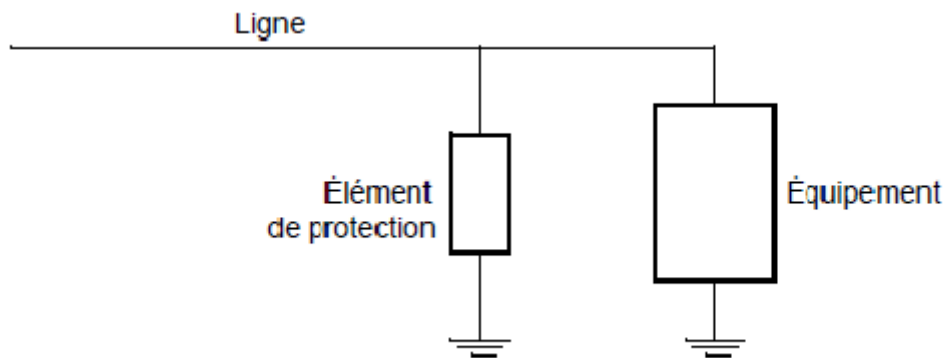
Pour qu'un système de protection accomplisse convenablement sa mission, il doit présenter les qualités suivantes :

- **Fiabilité** : Un dispositif de protection doit être précis dans ses décisions.
- **Sélectivité** : Isoler seulement l'élément en défaut.
- **Rapidité d'action** : Pour éviter l'augmentation de la zone perturbée.
- **Sensibilité** : Doit détecter la moindre variation des paramètres de l'élément surveillé.
- **Consommation** : Il doit avoir une consommation réduite.

### III.2. 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.3. Les éclateurs [14]

#### III.3.1 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 protège 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.

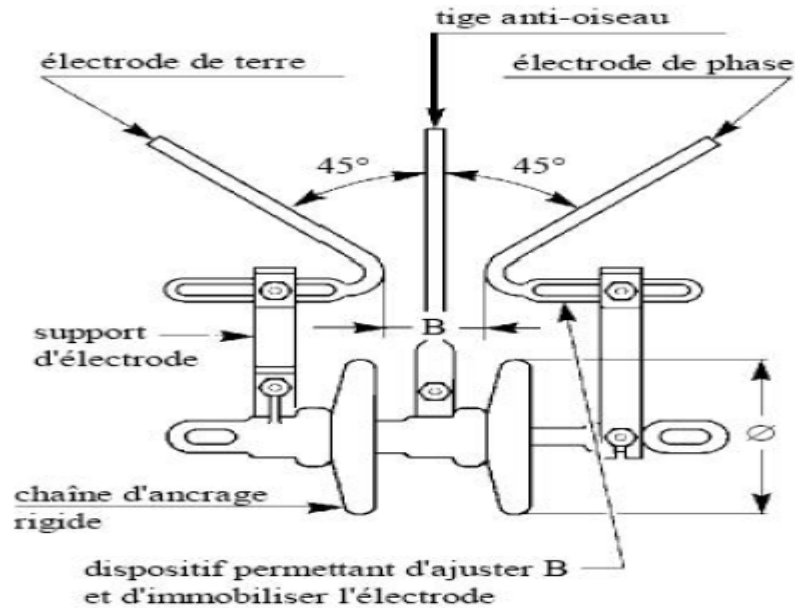


Fig. (III.2) : éclateur MT avec tige anti-oiseau

### III.3.2 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.3.3 Avantage des éclateurs

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

Les éclateurs sont aujourd'hui de plus en plus remplacés par les parafoudres.

## III.4 Les parafoudres [14] [15]

### III.4.1 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.4.2 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.

#### a) 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

#### **b) Parafoudre à oxyde de zinc**

##### ➤ **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.

##### ➤ **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).

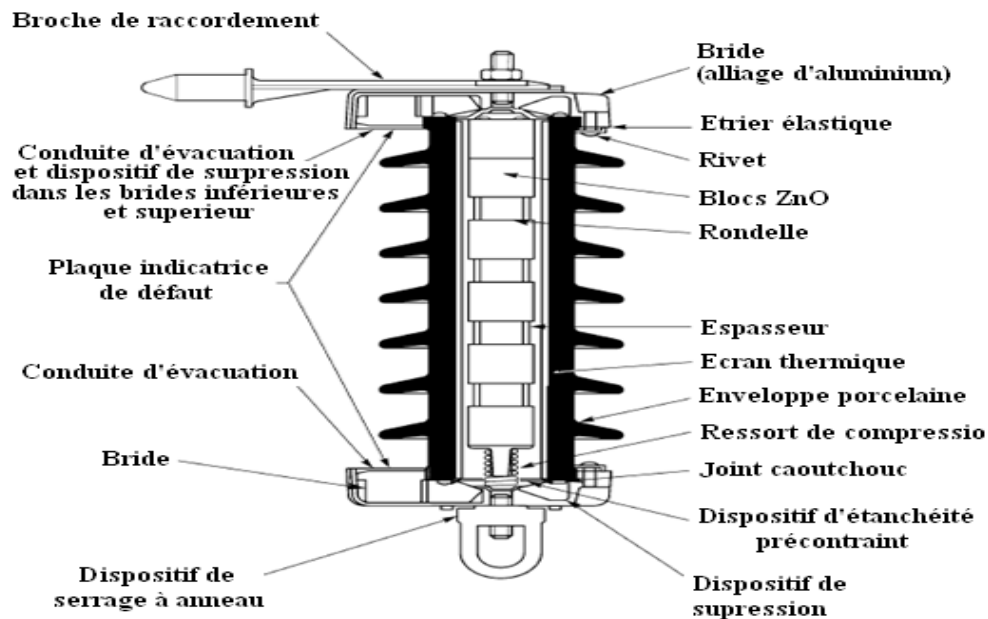


Fig. (III.3) : Parafoudre à Oxyde de Zinc en enveloppe porcelaine

### III.4.3 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.4.4 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.5 Le câble de garde [14]

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.

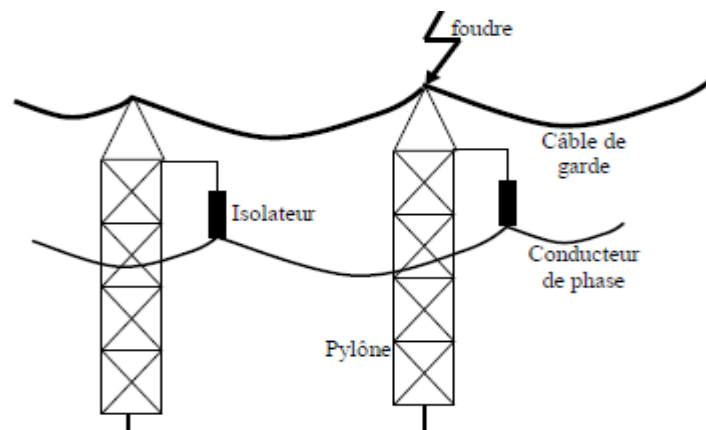


Fig. (III.4) : câble de garde

#### III.5.1 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.

#### a) 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.

#### b) 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.6 Les sectionneurs [14]

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.



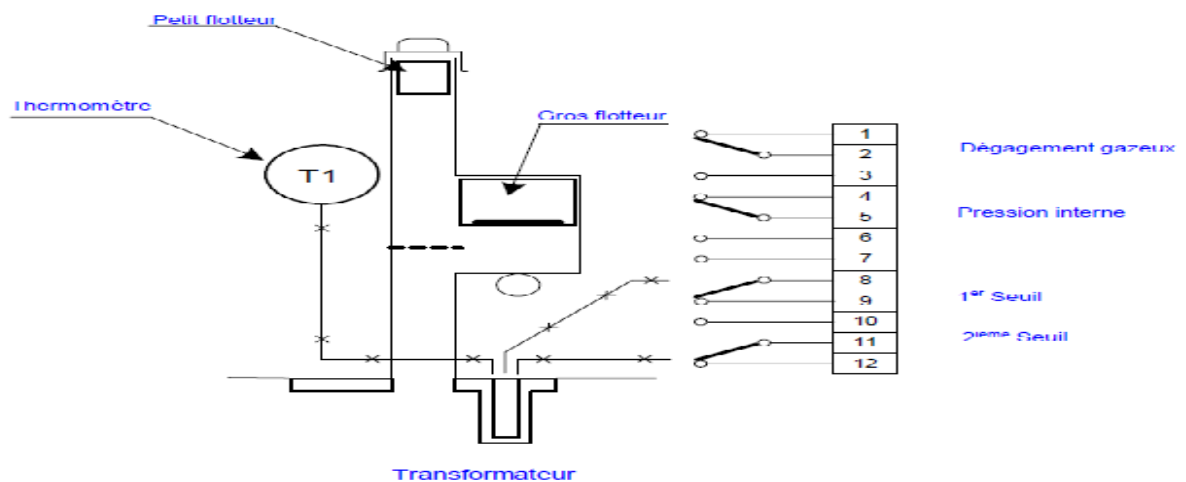
**Fig. (III.5) : Sectionneur à haute tension à isolement dans l'air**

**III.7 Le DGPT [13] [14]**

Cet appareil réagit aux paramètres suivants : dégagement de gaz, dépassement de la pression et de la température. Au-delà des seuils consignés, associe à un boîtier source de tension auxiliaire, il protège contre les défauts impudents, les courts circuits et contre les surcharges dans le transformateur que pour les liaisons HT et BT, si leur section totale à 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.7.1 Le schéma de principe**



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

### III.7.2 Principe de fonctionnement

- **Dégagement gazeux** : en cas d'avarie 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.8 Les 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 Fonctions assurées par le disjoncteur

#### a) 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.

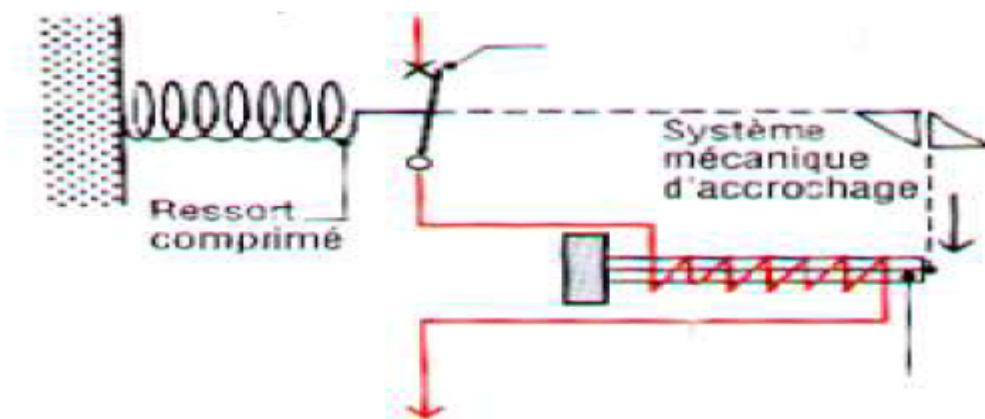
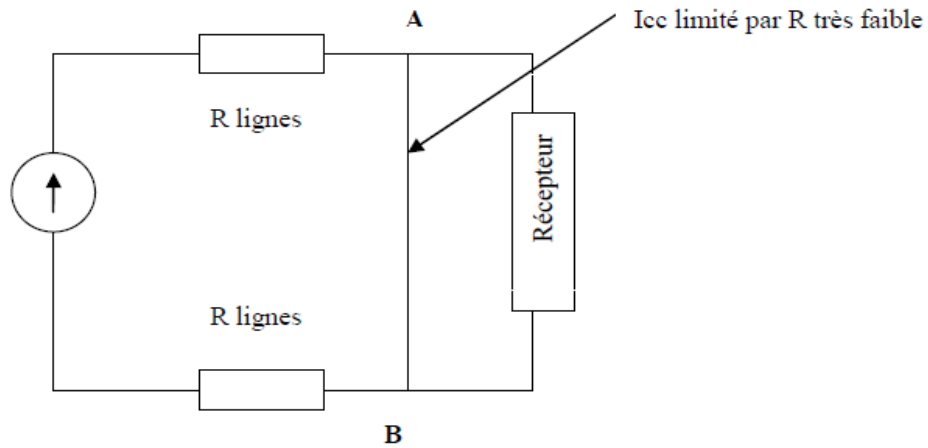


Fig. (III.7) : Fonctionnement de la protection contre La surcharge

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.

#### b) 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.

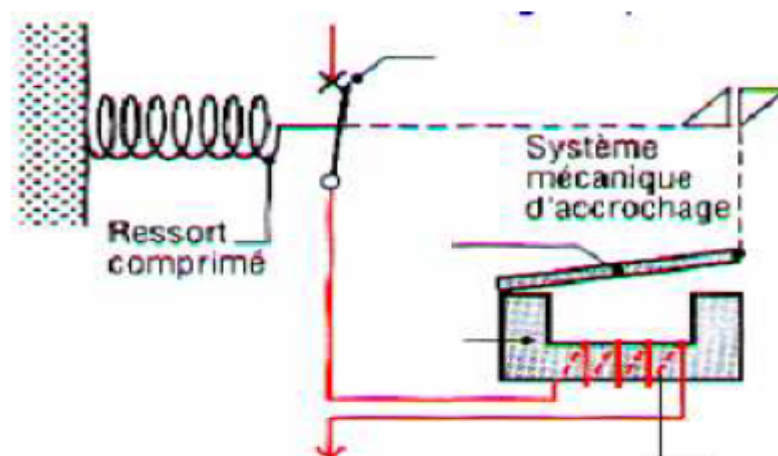
Dans tous les cas le temps de coupure doit être très court afin de limiter les effets néfastes de  $I_{cc}$  sur le matériel. La coupure est quasi-instantanée.

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.

### III.8.3 Les types de disjoncteur

Les disjoncteurs les plus répandus sont :

#### a) 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 contacte 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.

#### b) 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 à air comprimé**

**c) Disjoncteur à haute tension au SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre)**

Le disjoncteur SF<sub>6</sub> 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**

- **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.

**d) 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.9 Relais de Bucholz [16]

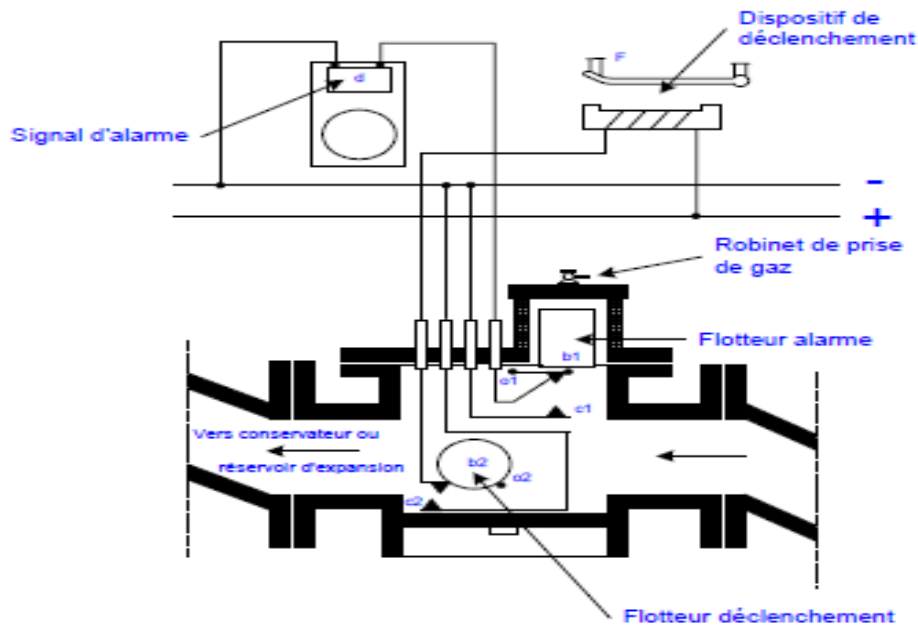
Les relais de Bucholz sont montés essentiellement sur les grands moteurs tandis que les DGPT (1et 2) sont montés essentiellement sur les transformateurs de distribution à couvercles scellés.

#### 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 O1 et O2 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 couts 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 capteur jusqu'à ses extrémités les plus lointaines.

## **Chapitre IV**

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

## Introduction

Les enroulements du transformateur de puissance sont souvent affectés par le phénomène de la surtension d'origine atmosphérique, un problème qui est résolu à l'aide des parafoudres placés sur les lignes menant aux transformateurs, ils permettent d'abaisser la valeur maximale de la surtension qui arrive à ses bornes.

L'objectif de ce chapitre est l'étude de l'impact de la surtension de foudre sur les enroulements d'un transformateur du 110 kV en tenant compte des divers régimes de neutre et avec ou sans parafoudre en se basant sur les résultats obtenus par simulation sous ORCAD 16.0 de l'enroulement HT du transformateur.

### IV.1. Caractéristiques du transformateur [10]

Comme application notre étude s'est portée sur le transformateur (110kV/125MVA) portant les indications suivantes :

#### a) Caractéristiques électriques

- Puissance nominale apparente :  $S_n = 125 \text{ MVA}$
- Tension de service nominale :  $U_n = 121 \text{ kV}$
- Pertes de puissance à vide :  $P_0 = 120 \text{ kW}$
- Tension de court-circuit :  $U_{cc} = 10,5\%$
- Courant à vide :  $I_0 = 0,55\%$
- Fréquence de service de transformateur :  $f = 50 \text{ Hz}$
- Facteur de répartition initiale de la tension :  $= 3,00$

#### b) Caractéristiques géométriques

- $d_{\text{extHT}} = 1640 \text{ mm}$  : diamètre extérieur de l'enroulement haute tension.
- $d_{\text{intHT}} = 1160 \text{ mm}$  : diamètre intérieur de l'enroulement haute tension.
- $d_{\text{extBT}} = 1120 \text{ mm}$  : diamètre extérieur de l'enroulement basse tension.
- $d_{\text{intBT}} = 920 \text{ mm}$  : diamètre intérieur de l'enroulement basse tension.
- $L_{\text{en}} = 2380 \text{ mm}$  : Longueur de l'enroulement.
- $a = 1900 \text{ mm}$  : La distance entre deux éléments haute tension.
- $b = 140 \text{ mm}$  : La distance de l'enroulement haute tension et toutes parties mises à la terre.

Le type de couplage utilisé dans ce transformateur est l'étoile triangle. L'enroulement a été divisé en 6 éléments de longueurs égales.

### c) Paramètres calculés du transformateur

- La résistance de l'enroulement HT correspondant à la fréquence de 50 Hz :  $R_{tr} = 0,32$
- La résistance d'un élément de l'enroulement :  $R_{élé} = R_{tr} / 6 = 0,0533$
- L'inductance propre de l'enroulement HT :  $L_{tr} = 2546 \mu\text{H}$
- L'inductance propre d'un élément de l'enroulement :  $L_{élé} = L_{tr} / 6 = 424,33 \mu\text{H}$
- La capacité transversale de l'enroulement HT :  $C_{tr} = 0,0002 \mu\text{F}$
- La capacité transversale d'un élément de l'enroulement :  $C_{tr} / 6 = 0,000033 \mu\text{F}$
- La capacité longitudinale de l'enroulement HT :  $K_{tr} = 0,00395 \mu\text{F}$
- La capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement :  $K_{tr} \cdot 6 = 0,0237 \mu\text{F}$

## IV.2 Le principe de la simulation sous ORCAD 16.0

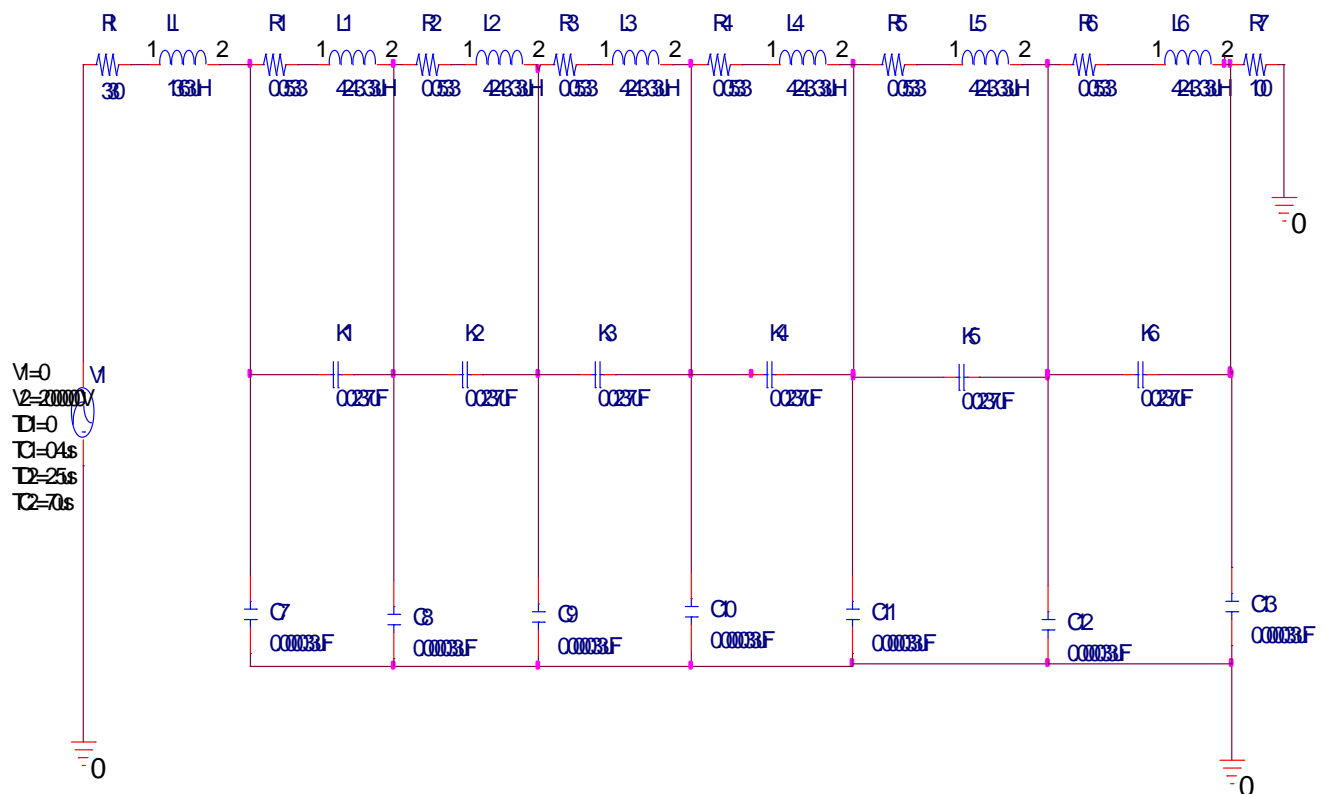
On saisit le schéma sous Orcad capture, à l'aide de symboles qui sont contenus, dans des bibliothèques que l'on chargera obligatoirement à partir du répertoire Pspice, et suivant les besoins. Une fois le schéma fini et vérifié, on crée le profil de simulation. C'est ce fichier qui va définir quel type 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 bibliothèques. 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 des enroulements HT de transformateur consiste :

- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec neutre isolé de terre
- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre à travers des différentes valeurs de résistance.
- Appliquer une surtension de 2MV à côté de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre à travers des différentes valeurs de l'inductance.
- Emplacement d'un parafoudre 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 16.0



**Fig. IV.1 :** Schéma block de simulation de l'enroulement HT (sous orcad 16.0)

Pour justifier ce modèle, il est important 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 enroulements et masse sont négligeables.

On tien compte des capacités dans notre modélisation car en régime transitoire les réactances inductives deviennent très grandes tandis que les réactances capacitives diminuent.

#### IV.4. Simulation sur ORCAD 16.0 avec le neutre isolé de la terre

Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) avec neutre isolé de la terre, les résultats sont illustrés par la figure ci-dessous :

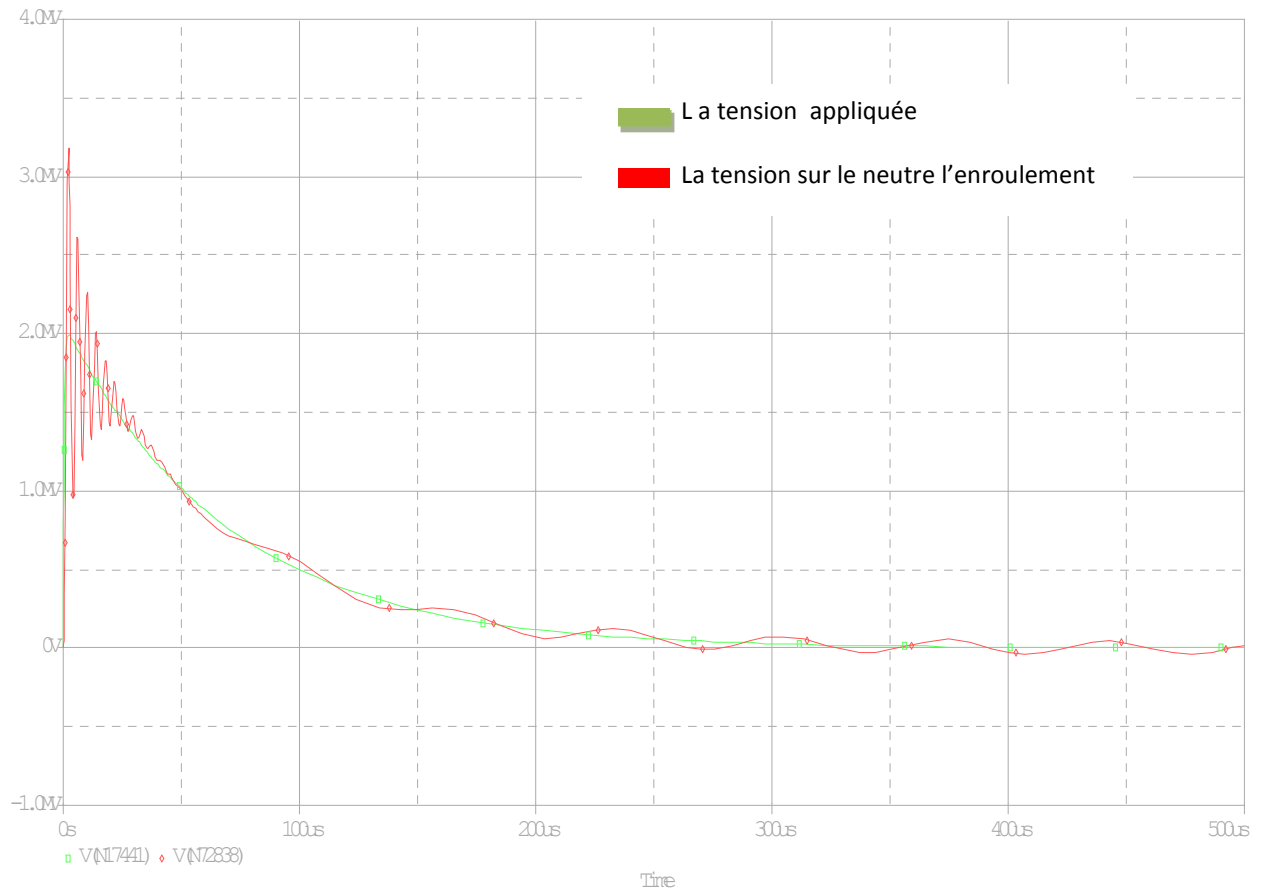


Fig. IV.2 Surtension sur le neutre isolé de la terre

##### IV.4.1 interprétation des résultats

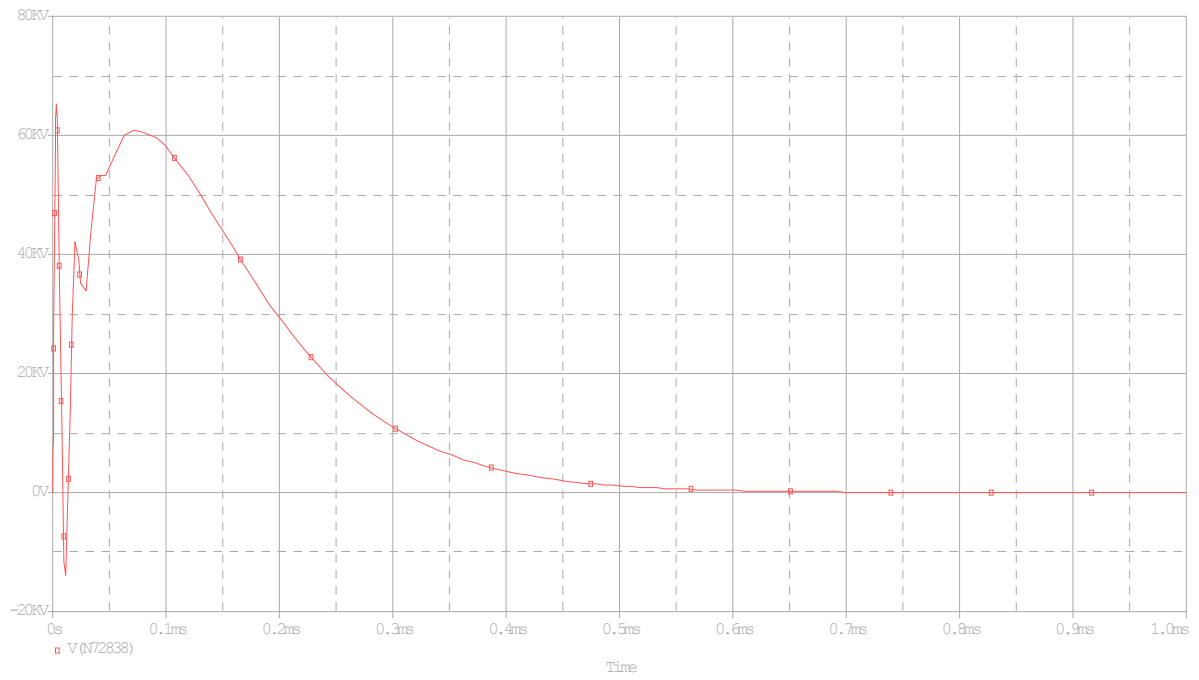
la tension sur le neutre de l'enroulement isolé de la terre est de 3186 kV est plus grande que la tension appliquée à l'entrée de l'enroulement, le neutre isolé de la terre provoque une réflexion de l'onde incidente avec un coefficient qui peut aller jusqu'à  $N=1$  (réflexion totale) provoquant des oscillations dangereuses pouvant aller au doublement de la surtension initiale.

#### IV.5. Simulation sur ORCAD 16.0 avec le neutre mis à la terre

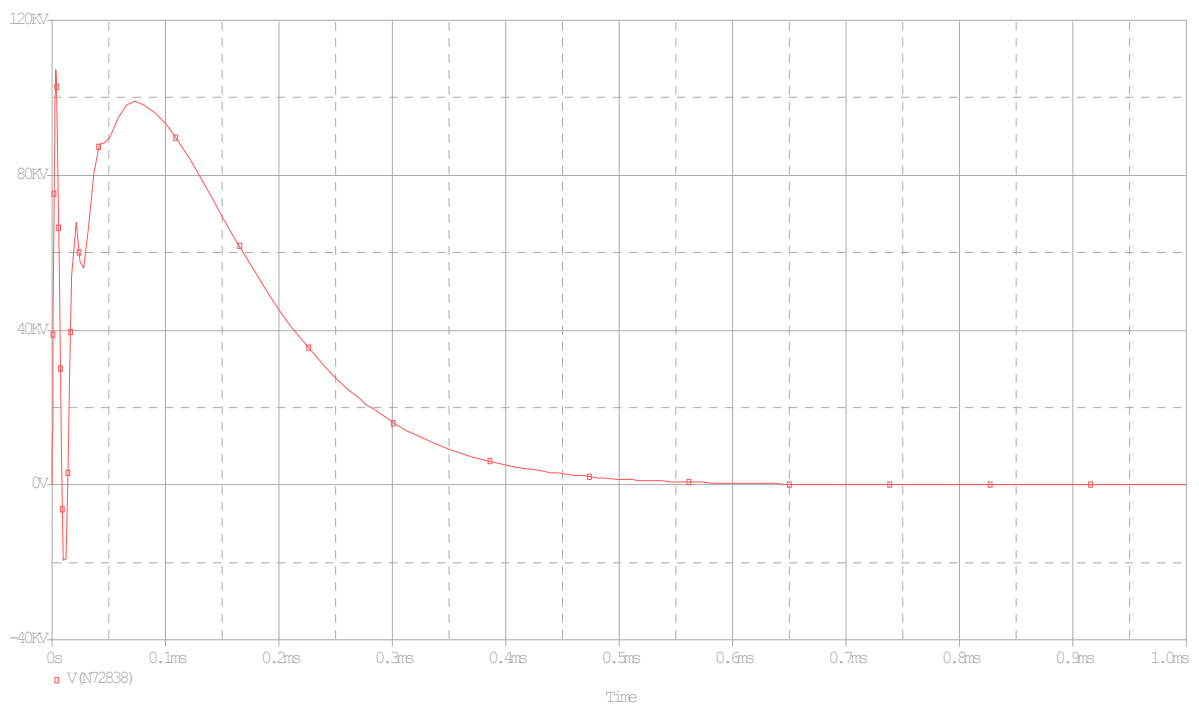
##### IV.5.1. Neutre mis à la terre à travers une résistance

Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis à la terre à travers une résistance.

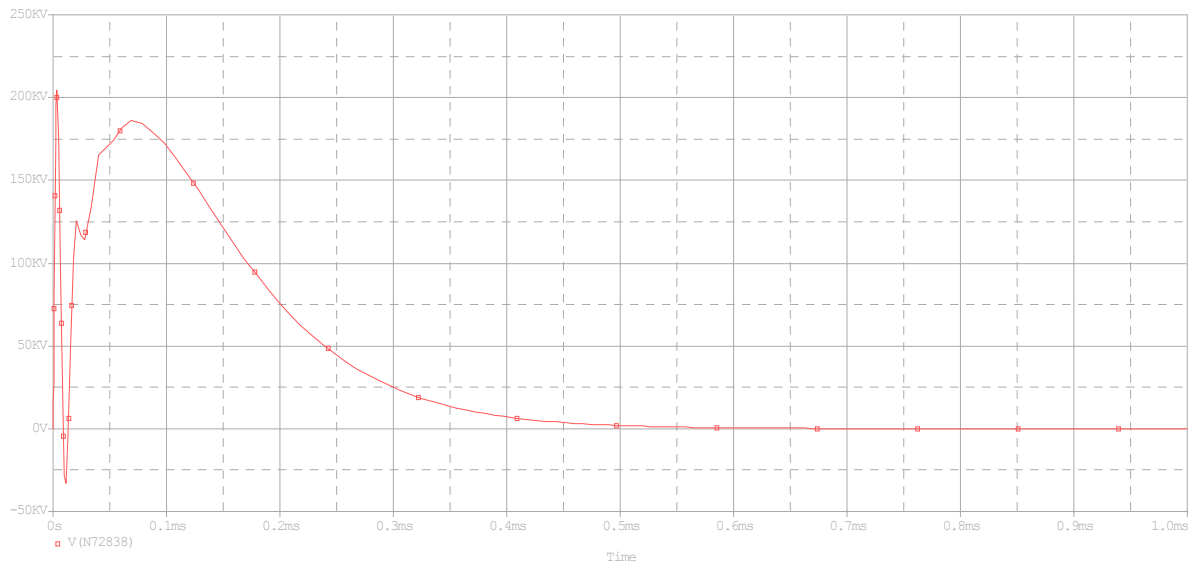
Les figures ci-dessous représentent la tension sur le neutre pour des différentes valeurs de la résistance :



**R=30**



**R=50**



**R=100**

**Fig. (IV.3.4.5) :** La tension sur le neutre mis à la terre a travers une résistance

**IV.5.1.1. Interprétation des résultats**

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de résistance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

R=30	R=50	R=100
65,366kV	107,29kV	204,742kV

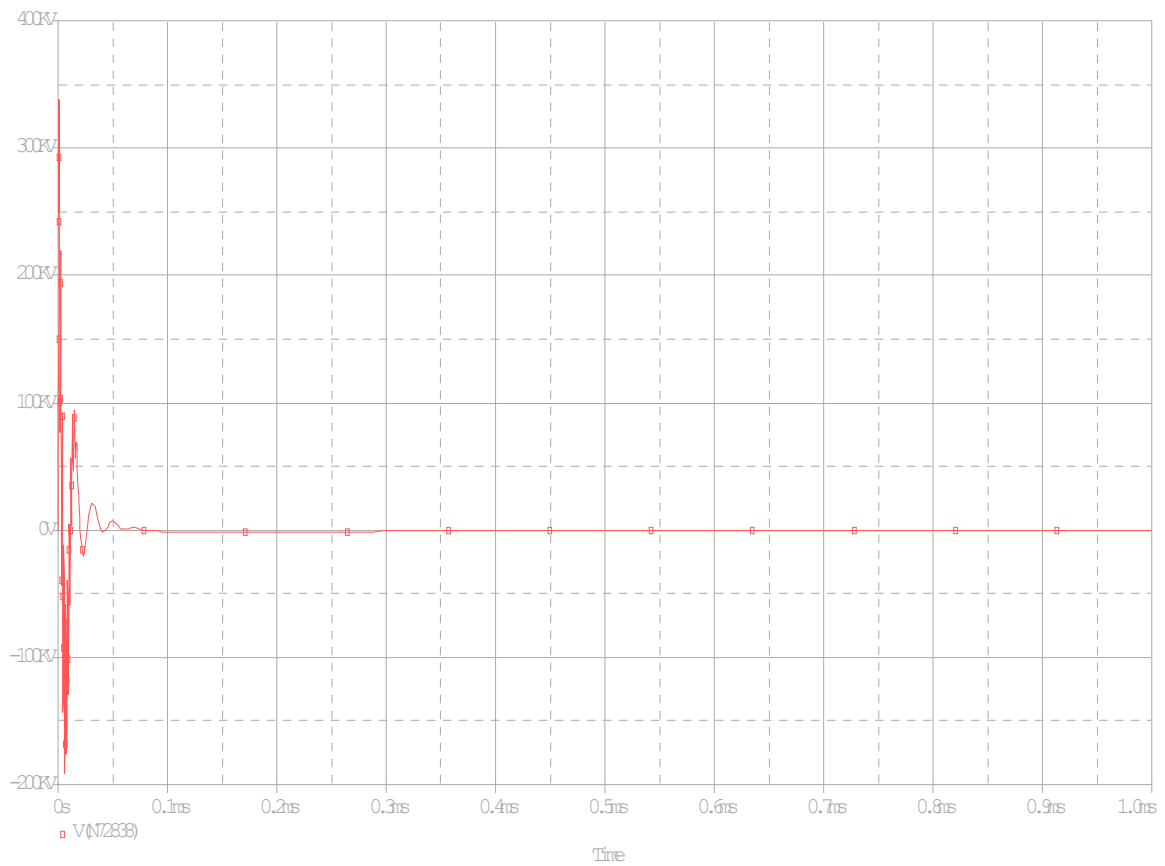
**Tableau (IV.1) :** Valeurs maximales de la tension sur le neutre

On observe que pour les différentes valeurs de la résistance, la valeur de la tension a la sortie de l'enroulement est inférieure a la tension appliquée a l'entrée. Car avec la mise a la terre de neutre il y'aura une réflexion de l'onde incidente avec un coefficient qui peut aller jusqu'à N= -1 (réflexion totale) alors une annulation de la surtension.

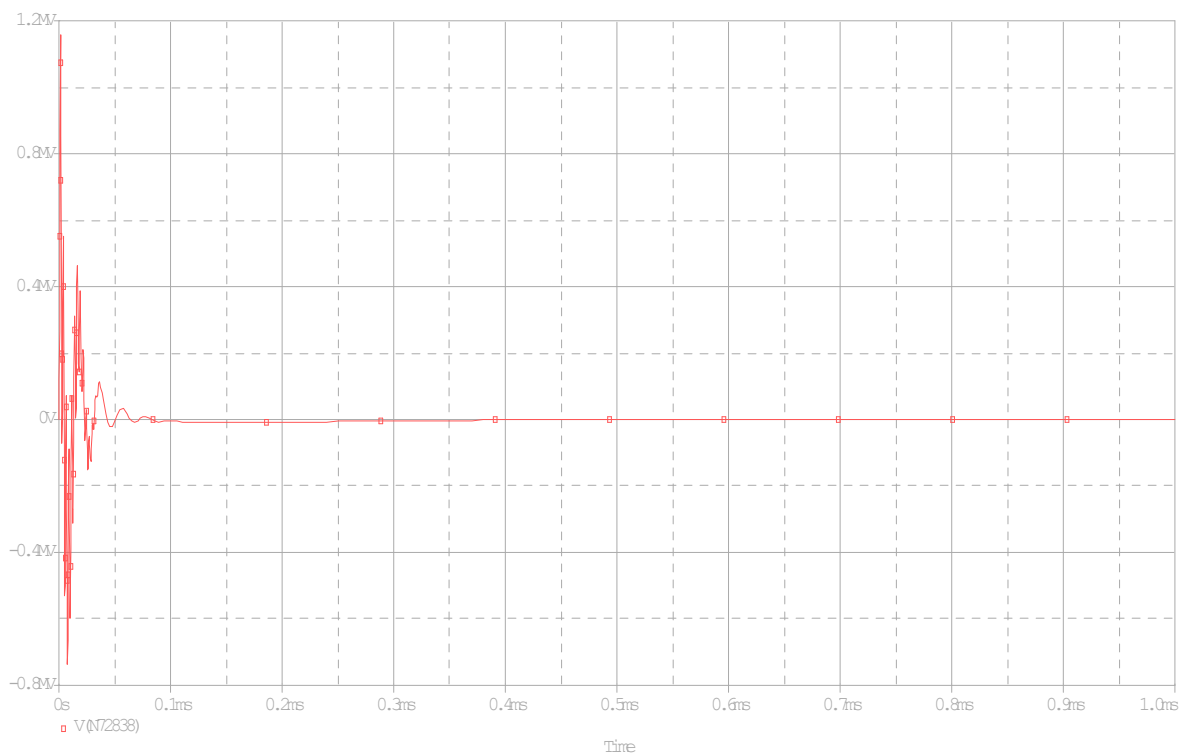
La liaison proportionnelle entre valeurs de la résistance est celles de la tension montre que quand on augmente la résistance on approche de régime isolé.

**IV.5.2. Neutre mis à travers une inductance**

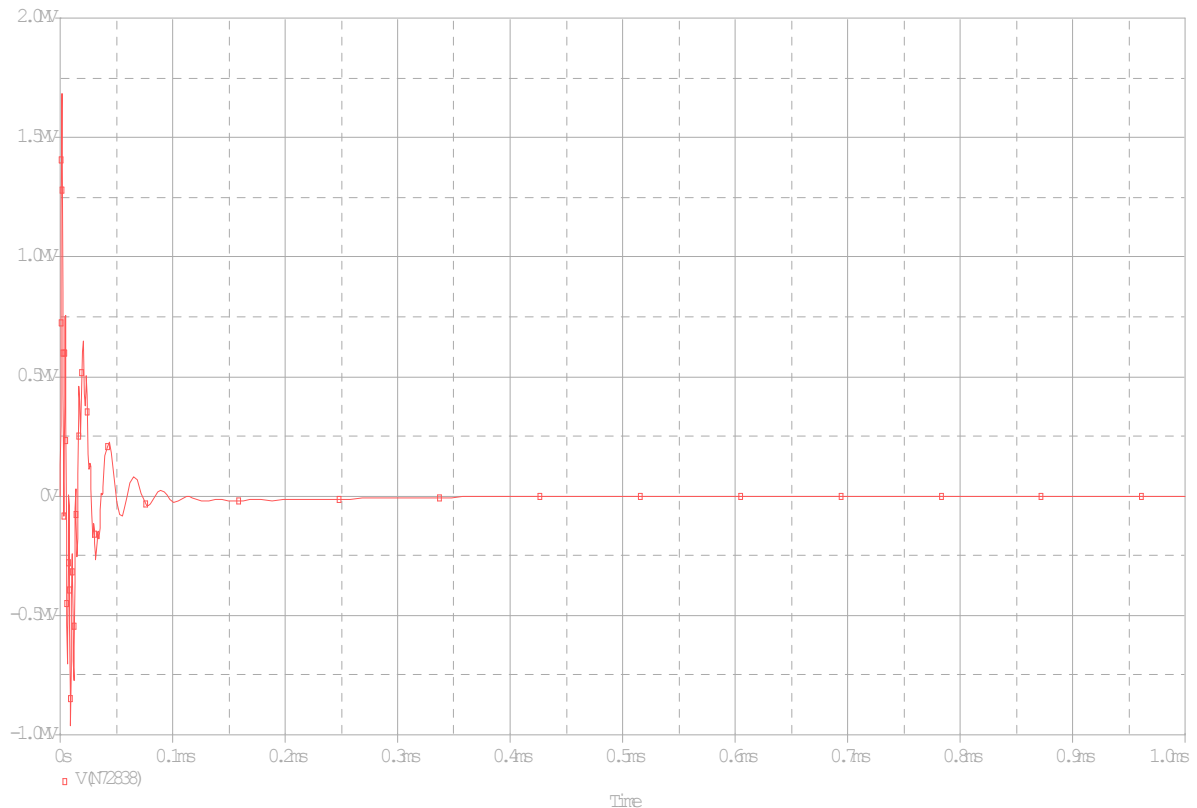
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis à la terre a travers une inductance, les figures ci-dessous représentent la tension sur le neutre pour des différentes valeurs de l'inductance :



**L = 0,00022H**



**L = 0,00095H**



**L = 0,00195H**

**Fig. (IV.6.7.8) :** la tension sur le neutre mis a la terre a travers une inductance

**IV.5.2.1. Interprétation des résultats**

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de résistance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

L = 0,00022H	L = 0,00095H	L = 0,00195H
337,634kV	1156kV	1684,7kV

**Tableau (IV.2) :** Valeurs maximales de tension sur le neutre

On observe que pour les différentes valeurs de l'inductance, la valeur de la tension a la sortie de l'enroulement est inférieure a la tension appliquée a l'entrée.

La liaison proportionnelle entre valeur de l'inductance est celle de la tension montre que quand on augmente la inductance on approche au régime de neutre fortement impédant ou bien le régime de neutre isolé.

IV.6. Schéma équivalent de l'enroulement HT avec l'application d'un parafoudre :

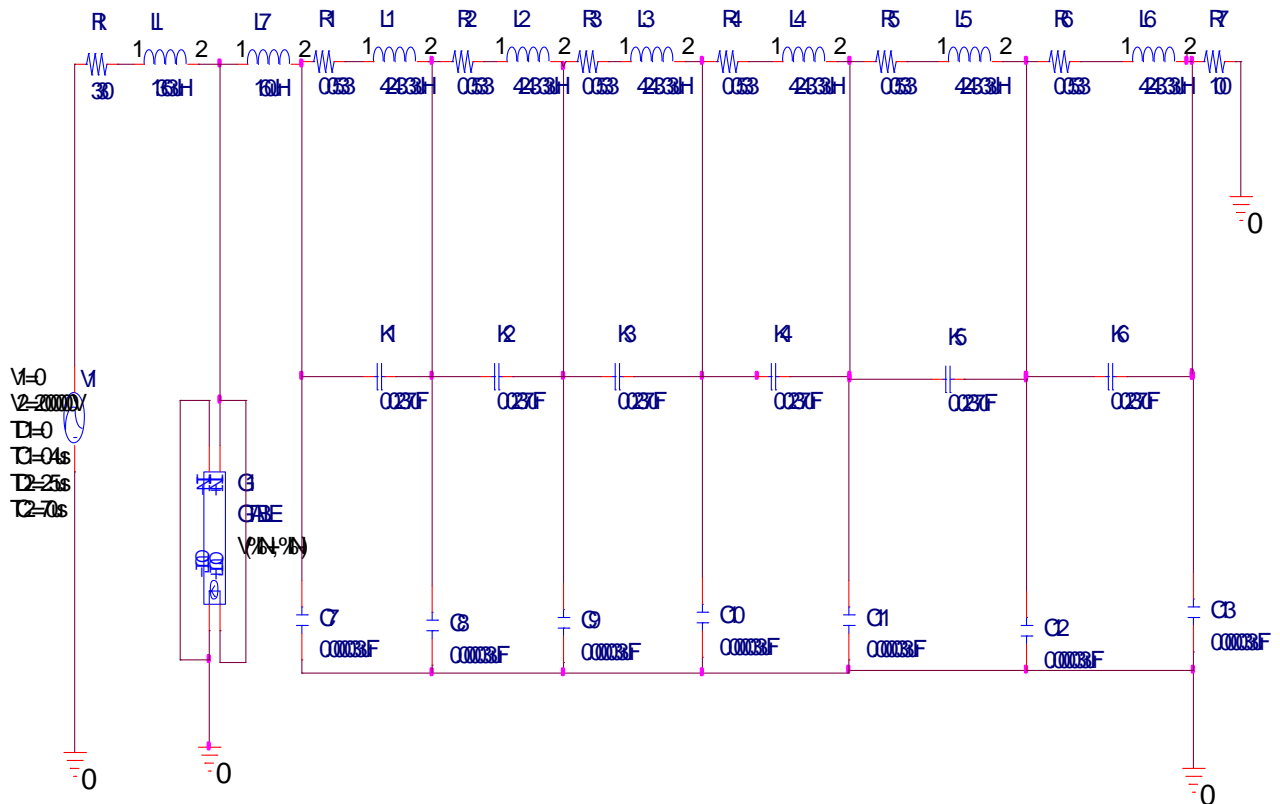


Fig. (IV.9) : Schéma block de simulation de l'enroulement HT avec parafoudre (sous ORCAN 16.0)

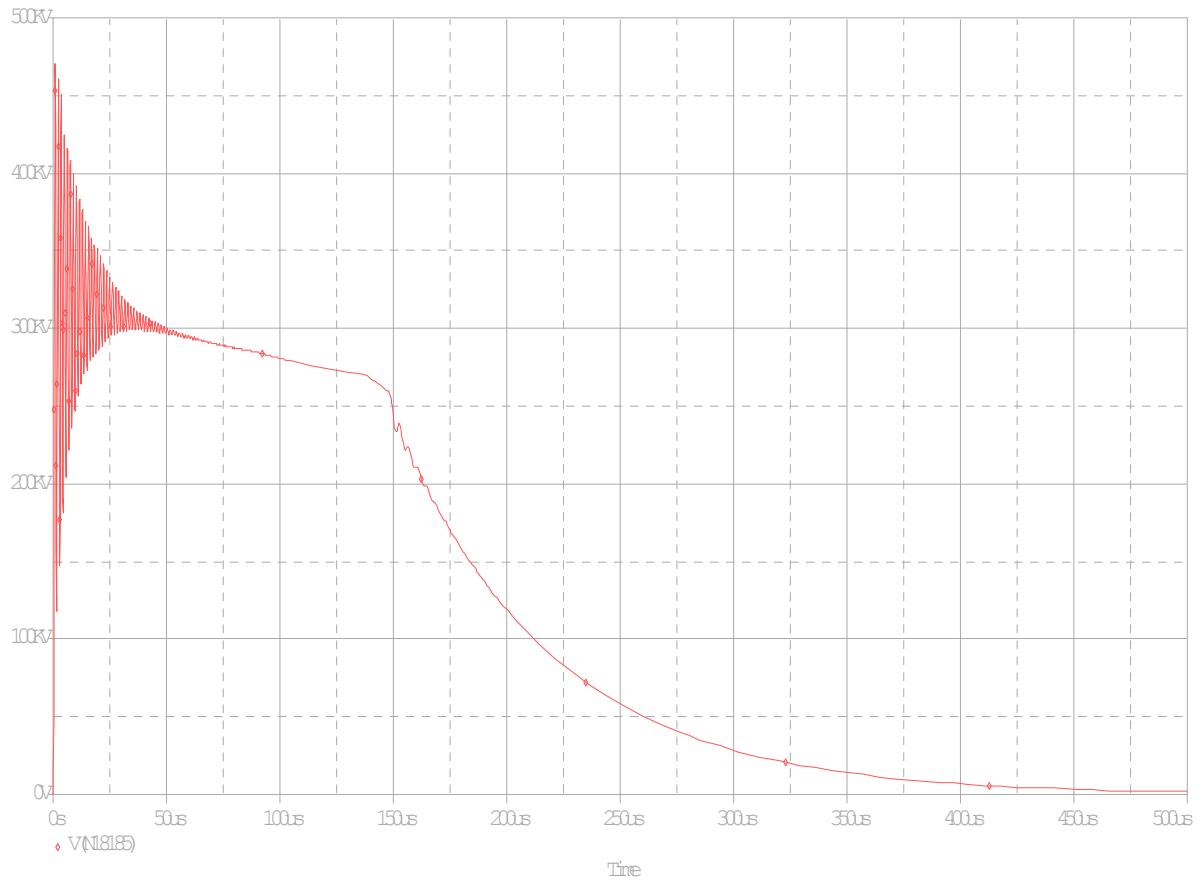
Dans notre travail on a opté pour le parafoudre 150 KV qui est installé en amont par rapport aux enroulements HT de transformateur 110KV. Portant les caractéristiques suivantes

Tension de parafoudre (KV)	Caractéristiques (VOLT-AMPER)
150	(0 0) (255kV 1) (260kV 10) (270kV 100) (285kV 1kA) (305kV 3kA) (330kV 5kA) (365Kv 10kA)

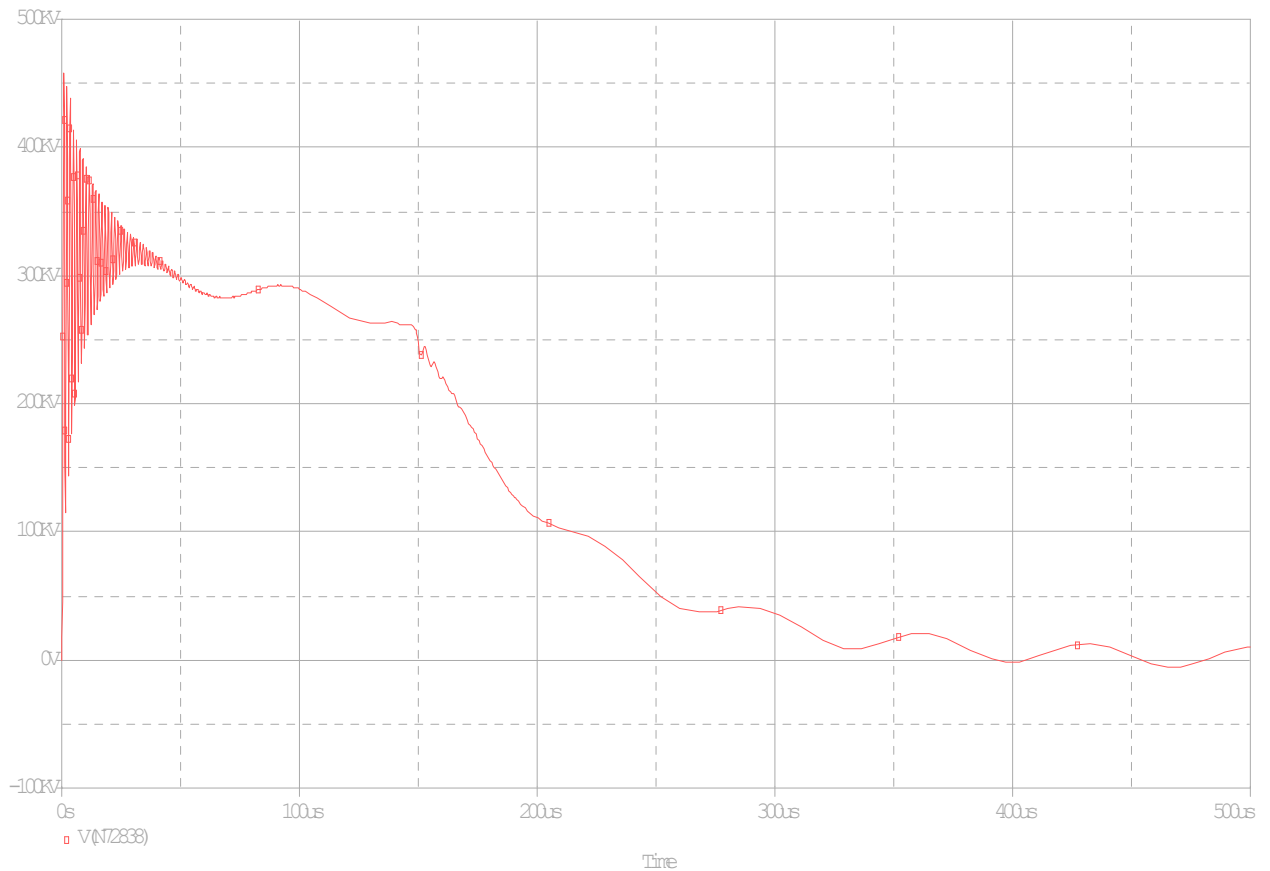
Tableau(IV.3) : Caractéristiques de parafoudre [17]

**IV.7.Simulation par ORCAD 16.0 de l'enroulement HT avec neutre isolé de la terre**

Dans ce cas on a effectué une simulation de l'enroulement HT dont le neutre isolé de la terre et un parafoudre installé a son entrée, les résultats sont illustrés par les figures ci-dessous :



**Fig. (IV.10):** La tension a l'entrée de l'enroulement HT



**Fig. (IV.11):** La tension a la sortie de l'enroulement HT

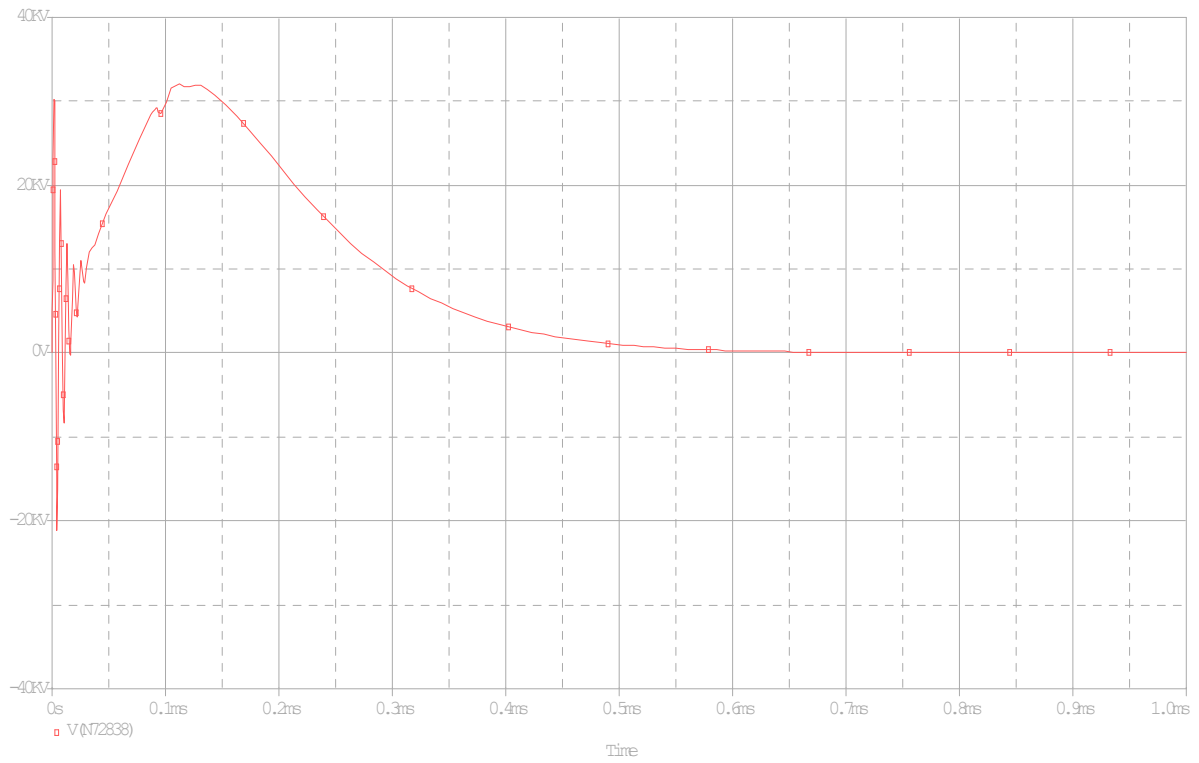
#### IV.7.1. Interprétation des résultats

On observe que la valeur de la tension a l'entrée de l'enroulement est de 471.03kV est celle de la sortie est de 457.60kV, elles sont inférieures a la tension appliquée, ce qui est expliqué par la limitation de la surtension par le parafoudre.

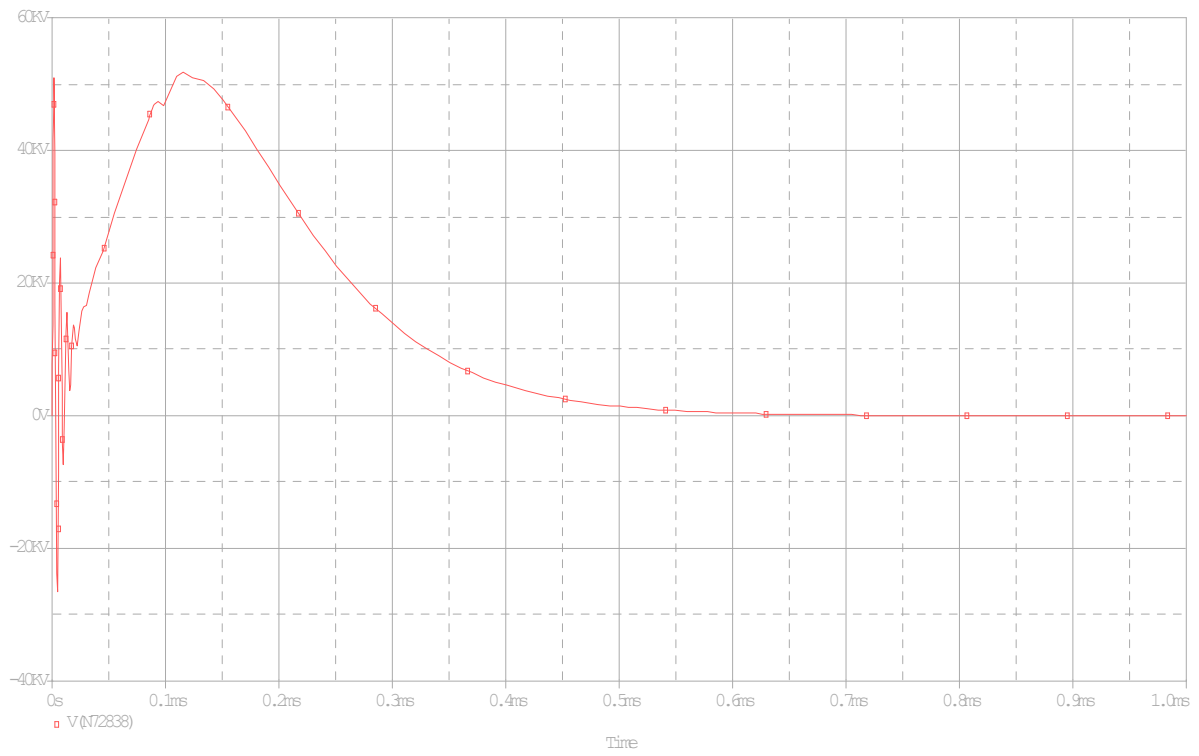
#### IV.8. Simulation par ORCAD 16.0 de l'enroulement HT avec neutre mis à la terre

##### IV.8.1. Mis a la terre a travers une résistance

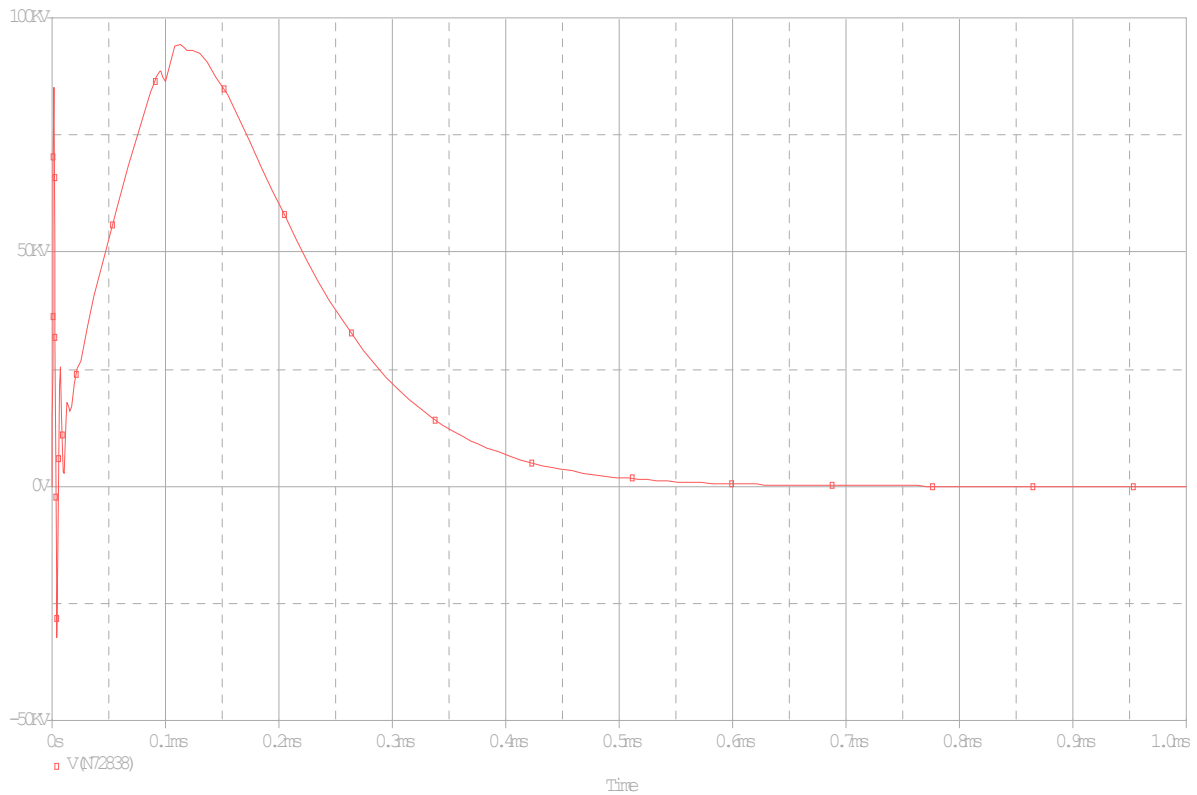
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis a la terre a travers une résistance avec un parafoudre installé a son entrée, les figures ci-dessous représentent les résultats pour des différentes valeurs de la résistance :



**R=30**



**R=50**



**R=100**

**Fig. (IV.12.13.14) :** La tension sur le neutre de l’enroulement mis a la terre a travers une résistance (application de parafoudre)

**IV.8.1.1. Interprétation des résultats**

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de résistance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

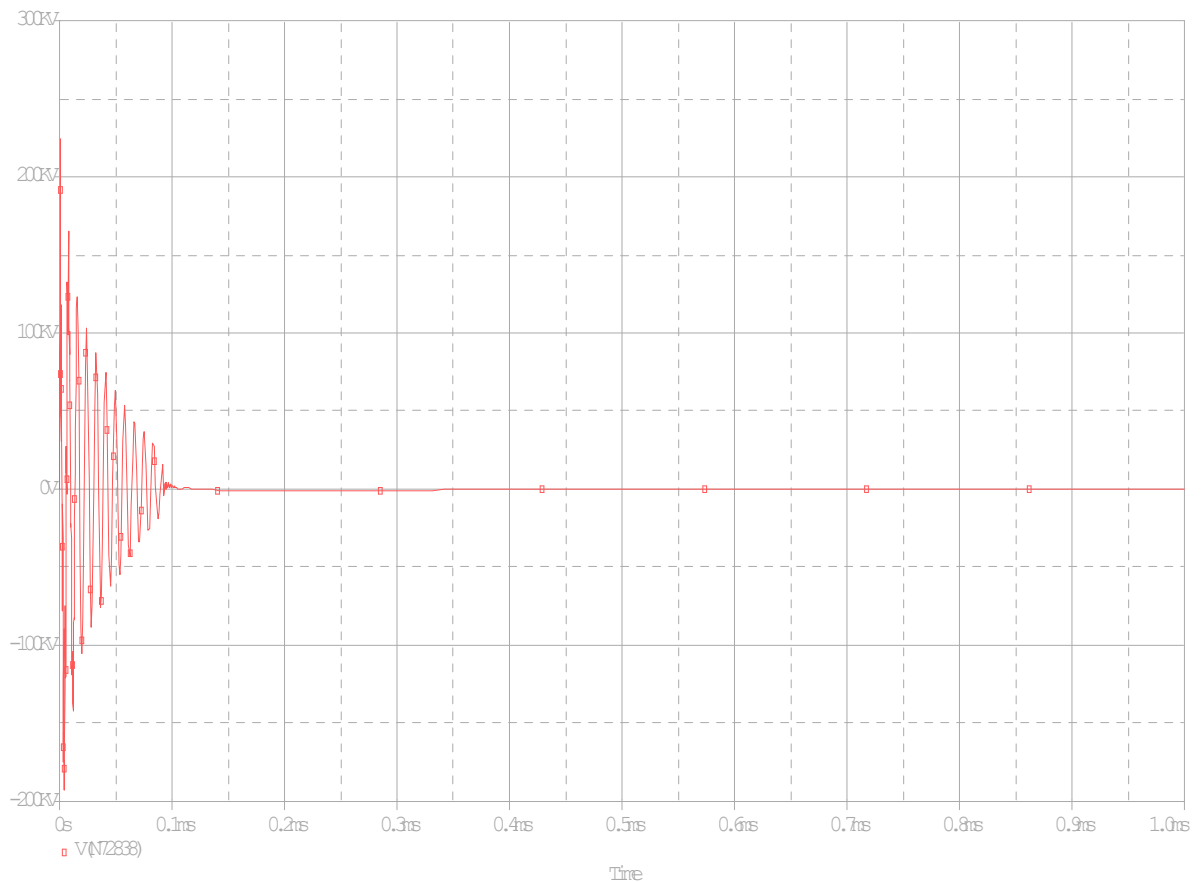
R=30	R=50	R=100
32.043kV	51.75kV	94.28kV

**Tableau (IV.4) :** Valeurs maximales de tension sur le neutre mis à la terre a travers une résistance

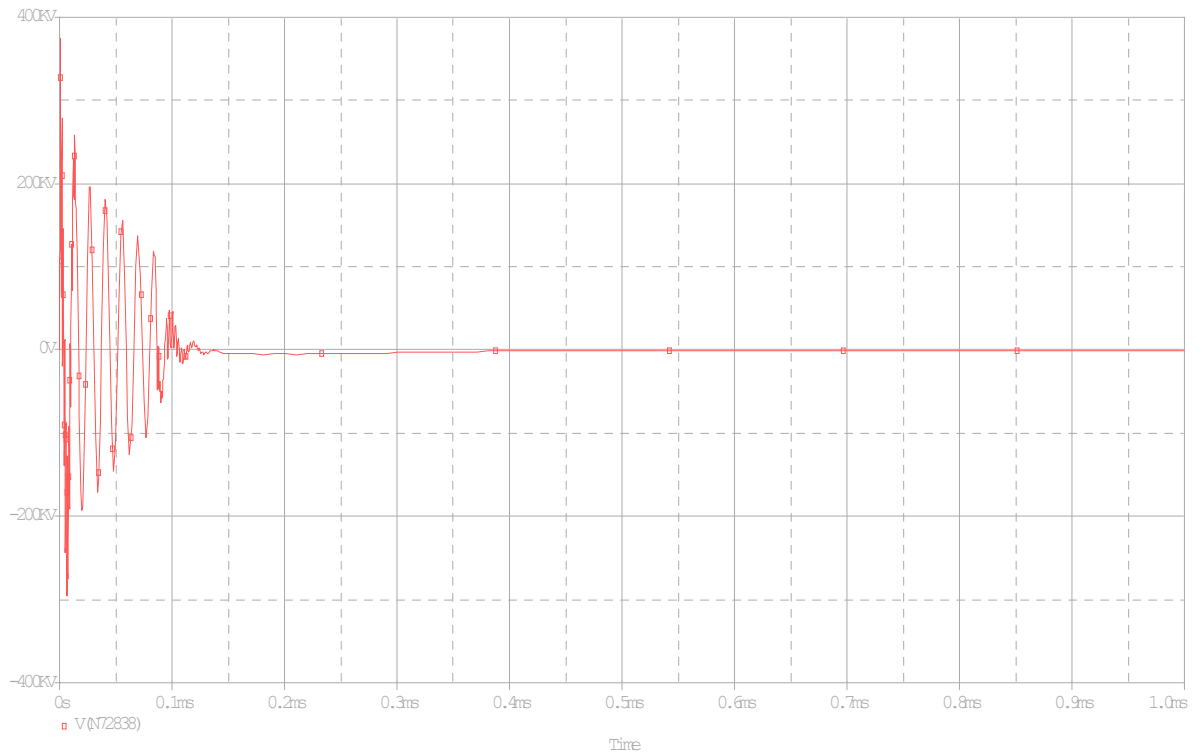
On observe que pour les différentes valeurs de la résistance, la tension sur le neutre ou bien a la sortie de l’enroulement est vraiment inférieure a la tension appliquée. il ya eu une limitation énorme de la surtension par le parafoudre.

### IV.8.2. Mis a la terre a travers une inductance

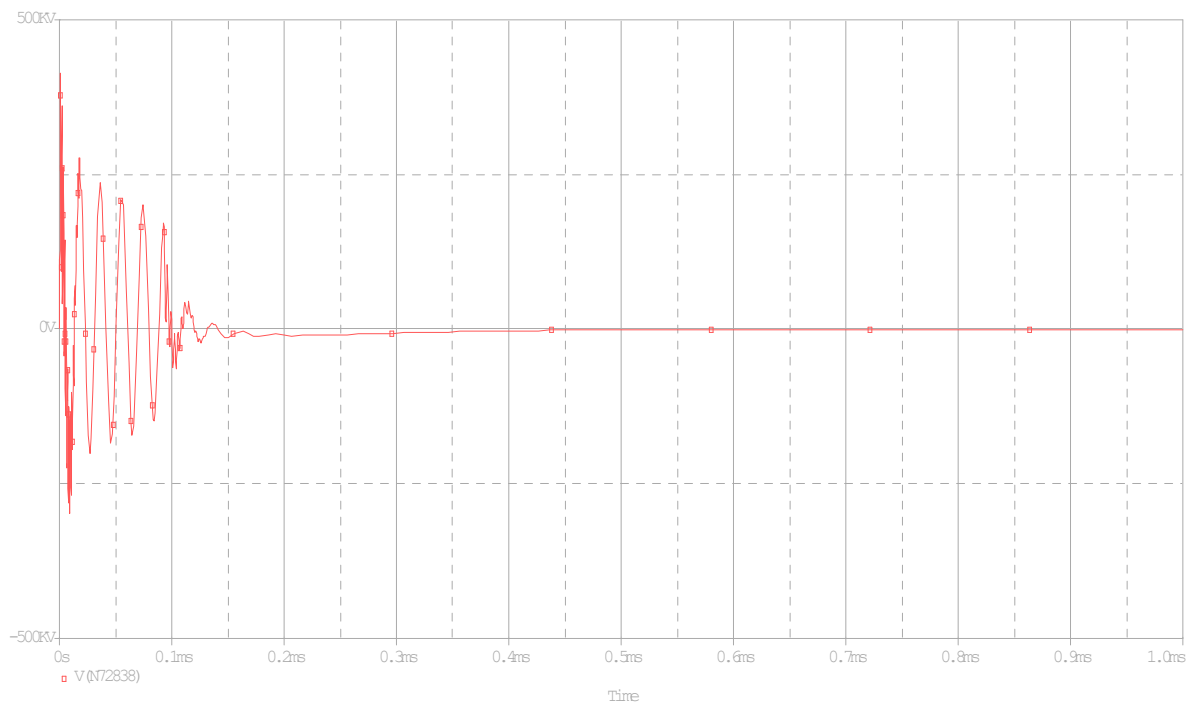
Dans ce cas on va effectuer une simulation de l'enroulement HT qui subit une surtension de 2MV (surtension de foudre) dont le neutre est mis a la terre a travers une inductance avec un parafoudre installé a son entrée les figures ci-dessous représentent la tension sur le neutre pour des différentes valeurs de l'inductance :



**L=0.00022H**



**L=0.00095H**



**L=0.00195H**

**Fig. (IV.15.16.17) :** La tension sur le neutre de l'enroulement mis a la terre a travers une inductance

### IV.8.2.1. Interprétation des résultats

Les différentes valeurs maximales de la tension sur le neutre de transformateur pour les différentes valeurs de l'inductance sont résumées dans le tableau ci-dessous :

L = 0,00022H	L = 0,00095H	L = 0,00195H
224.31kV	375.027kV	414.33kV

**Tableau (IV.5) :** Valeurs maximales de la tension sur le neutre mis à la terre a travers une inductance

On observe que pour toutes les valeurs de l'inductance, la tension sur le neutre ou bien sur la sortie de l'enroulement est vraiment inférieure a celle appliquée a son entrée. Il y'a eu une limitation de la surtension par le parafoudre.

### Conclusion

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

Le neutre mis a la terre a travers une résistance ou bien une inductance entraine très généralement un déclenchement obligatoire au premier défaut, mais, par contre, il amortie les surtensions et conduit à des protections simples sélectives.

L'utilisation d'un parafoudre comme moyenne de protection est une solution adéquate qui peut être utilisée avec les deux régimes de neutre avec un niveau de fiabilité plus élevée pour le neutre mis à la terre.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Le transformateur est un élément essentiel dans un réseau de distribution de l'énergie électrique. Il est donc important de connaître son comportement lors des différents régimes afin d'élaborer un système de protection qui nous permet d'éviter la destruction de l'équipement et l'interruption de service.

Dans ce travail, on a essayé d'apporter un plus dans l'étude des surtensions et leurs effets sur les transformateurs de puissance en abordant les principaux aspects de la foudre, sur les plans qualitatif et quantitatif. Pour cela on a opté pour la simulation sous le logiciel ORCAD 16.0 de l'enroulement HT d'un transformateur de puissance en tenant compte des différents régimes de neutre que on puisse réaliser.

Après avoir tiré les résultats de la simulation on a procédé à la discussion et l'analyse afin de récapituler ce qu'on a jugé utile à sauvegarder.

Notre expérience nous a mené à conclure que :

- La valeur de la surtension sur l'enroulement de transformateur est supérieure à la surtension appliquée quand le neutre est isolé de la terre ce qui représente un grand danger pour le transformateur et la continuité de service.
- Le neutre mis à la terre à travers une résistance ou une inductance amortie les surtensions et mène souvent à un déclenchement au premier défaut.
- Lors de l'application d'un parafoudre, on observe une limitation de la surtension sur les enroulements de transformateur avec les différents régimes de neutre.
- On a conclu que l'application d'un parafoudre avec le neutre mis à la terre à travers une résistance ou bien une inductance est la solution la plus intéressante et la plus adéquate afin de protéger le transformateur et assurer la continuité de service.

Les surtensions se traduisent souvent par un échauffement de matériels électriques, nous proposons en perspective pour ce travail une étude sur l'évaluation de température des fluides isolants dans les transformateurs.

Nous espérons que ce présent travail puisse être un outil de base et une analyse complémentaire pour les futures études dans le domaine de l'électrotechnique.

## **Références Bibliographiques**

- [1] : P. BOUCHARD et G. OLIVIER « Electrotechnique » Edition de l'école polytechnique de MONTREAL.
- [2] : ANTHONY LEFEVRE « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs » thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 27 octobre 2006
- [3] : L. PASTOURIAUX et A. VAROUQUAUX « Electricité industrielle ; machines électriques ». Paris Librairie, 1965.
- [4] : F. AOUD, F. LARABI mémoire d'ingénieur « Calcul et dimensionnement d'un transformateur triphasé » UMMTO 2009.
- [5] : H. HOUASSEINE, TOUATI mémoire d'ingénieur « Etude des défauts dans un réseau moyenne tension » Université de Médéa.
- [6] : MEZRI NAOUEL mémoire de magister « diagnostic des transformateurs de puissance » UMMTO.2009
- [7] : R. BELAICHA, « Contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans les cas des terres mauvaises conductrices » Thèse magister 1984.
- [8] : C. GAREY, G. LEOREY, B. HUTZLER, J. LALOT et C. DUBANTO, « Les propriétés diélectriques de l'air en très haute tension ».
- [9] : D. FULCHIROU, « Cahier technique No : 151 » Edition Décembre 1992.
- [10] : H. HOUASSEINE, N. KHIDER mémoire d'ingénieur « Approche de protection des postes de transformation haute tension ». UMMTO 2008.
- [11] : J-F. AFFOLTER, Haute tension : école d'ingénieurs du canton de Vaud, (octobre 2000) .
- [12] : M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKY « Machine Electrique » Tome I. Edition MIR MOSCOU 1996.
- [13] : SCNIEDER ELECTRIQUE « La protection des installations électriques contre la foudre » NOVEMBRE 2000.

## Références bibliographiques

---

[14] : SCNEIDER ELECTRIQUE « Guide de conception des réseaux électriques industriels 6 883 427/A.

[15] : « Parafoudre », technique de l'ingénieur traité génie électrique D4577. Année 2002.

[16] : A.BADJI, mémoire DEUA « Etude et optimisation de transformateur de distribution. 2009 UMMTO

[17] : A. IMARAZENE, S. BOUZID mémoire master académique « Modernisation de la protection des autotransformateurs contre les surtensions atmosphériques » UMMTO.2014.