

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 : Réseaux Electriques

*Présenté par*  
**Sadia BOUZID**  
**Amel IMARAZENE**

Thème

# Modernisation de la protection des autotransformateurs contre les surtensions atmosphériques

*Mémoire soutenu publiquement le 25 juin 2014 devant le jury composé de :*

**M<sup>R</sup> Mustapha MOUDOUD**  
Maitre de conférence B, UMMTO, Président

**M<sup>R</sup> Nahid MUFIDZADA**  
Professeur, UMMTO, Rapporteur

**M<sup>R</sup> Belkacem MOULA**  
Maitre Assistant-B, UMMTO, Examineur

**M<sup>R</sup> Hakim DJOUDI**  
Maitre Assistant-A, UMMTO, Examineur

# Remerciements

*En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, maître des cieux et de terre, qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements pour Mr MUFIDZADA, Professeur à UMMTO, pour avoir accepté de diriger notre travail, et pour leurs encouragements, leur patience et leur soutien qui nous ont été d'une aide précieuse. Leur encadrement et surtout les conseils avisés qu'ils nous ont prodigués, témoignent de leurs qualités scientifiques et humaines.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements, d'une façon particulière à M. CHIRIFI KARIM (notre Co-promoteur) pour nous avoir accueillis à la centrale de production d'énergie (SPE) de RAS JINET-BOUMERDER, pour ces orientations ainsi qu'à toute la documentation qu'il a mit à notre disposition.*

*Nos humbles remerciements vont également à M. ONKOUN ainsi qu'à tout les membres de LA SOCIETE DE GROUPE SONELGAZ (GRTE), HAMMA-ALGER pour leur accueil, leur gentillesse, leurs conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement M. MEDJEK INGENIEUR au poste de distribution d'énergie (GRTE) OUED AISSI, Tizi-Ouzou, pour la documentation et les explications.*

*Que les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude. C'est pour nous un honneur que vous ayez accepté d'évaluer ce modeste travail.*

*Que tous les enseignants de la faculté de Génie Electrique particulièrement département d'Electrotechnique, ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.*

*Nous remercions toutes celles et ceux qui de près ou de loin, nous ont prêté main forte (Ne serai-ce que par une parole), pour la réalisation et la finalisation de ce projet.*

# Dédicace



*Je dédie humblement ce travail à :*

- *La mémoire de mon très cher exemple « mon père », qui ma appris le sens de la patience et du travail, que son âme repose en paix et dieu lui ouvre les portes de paradis.*
- *Ma chère mère, symbole de sacrifice, pour sa tendresse précieuse et ses encouragements profonds toute au long de mon parcours d'étude.*
- *Ma grand-mère, qui ne se lâche pas de m'offrir tout son aide morale et financière.*
- *Mes adorables sœurs : LYNDA et MASSILA à qui je souhaite la réussite.*
- *Mes chers frères : SAID, AHMED, KOUCEILA et SOFIANE.*
- *Une spéciale dédicace à M<sup>R</sup>.BELKACEM CHALLAL, qui ne cessait jamais de me motiver et me soutenir toute au long de mon cursus universitaire (je lui dois une profonde gratitude), sans oublier sa famille*
- *Ma tante OUARDIA, pour ses sincères soutènements et ses conseils.*
  - *Mon adorable tante SAMIA, son époux et ses filles.*
  - *Ma très chère sœur LYDIA et sa famille.*
  - *Mon binôme et sa famille.*
- *Tous mes amis, la section Réseau Electrique et toute la promotion d'Electrotechnique 2014.*



SADIA





# Dédicace

*Je dédier ce travail à mes chers parents*

*Mes frères et sœurs.*

*Mon chère marie qui ma beaucoup soutenus*

*et sa famille.*

*A mon âme sœur MOUNA et sa famille*

*A mon binôme et sa famille*

*A mes amies.*

*A tous ceux qui mon soutenus de prés ou de loin*

*Amel*



# *SOMMAIRE*

<b>Introduction général</b> .....	1
<b><i>CHAPITRE I : Généralités sur les transformateurs et autotransformateurs</i></b>	
<b>I-1</b> -Définition d'un transformateur .....	3
<b>I-2</b> -Principe de fonctionnement .....	4
<b>I-3</b> - Caractéristique et grandeurs nominaux du transformateur .....	5
<b>I-4</b> -Constitution d'un transformateur .....	6
I-4-1-Partie active .....	7
I-4-1-a-Circuit magnétique .....	7
I-4-1-b-Les enroulements .....	8
I-4-2 -Partie constructive .....	10
I-4-2-a-La cuve .....	10
I-4-2-b-Le couvercle .....	11
I-4-2- Les traversées .....	11
<b>I-5</b> -Couplage des enroulements .....	11
<b>I-6</b> -Les différents types des transformateurs .....	13
I-6-a-Principaux types de transformateurs .....	13
I-6-b-Définition d'un autotransformateur .....	14
<b>I-7</b> -Avantages et inconvénient de l'autotransformateur .....	15
I-7-a-Avantage .....	15
I-7-b-Les inconvénients .....	16
<b>I-8</b> -Domaines d'utilisation de l'autotransformateur .....	16
<b>I-9</b> -Processus d'échauffement des transformateurs .....	16
<b>I-10</b> -Mode de refroidissement des transformateurs .....	17
<b>I-11</b> -Les défauts entraînant les transformateurs et autotransformateur .....	17

## ***CHAPITRE II : Régimes transitoire dans les enroulements des autotransformateurs.***

<b>II-1-Phénomène transitoire dans les transformateurs .....</b>	<b>18</b>
<b>II-2-Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur soumis aux surtensions .....</b>	<b>19</b>
II-2-1 Equation du circuit .....	20
<b>II-3-Répartition de la surtension le long d'un enroulement dont le neutre est mis à la terre .....</b>	<b>22</b>
II-3-1 Répartition initiale de la tension .....	23
II-3-1-1-Démonstration .....	26
II-3-1-2-Gradient de la tension .....	28
II-3-2- Répartition finale de la tension .....	28
II-3-3-Phénomène transitoire de la tension .....	29
<b>II-4-Régime transitoire dans l'autotransformateur .....</b>	<b>32</b>

## ***CHAPITRE III : protection des autotransformateurs contre les sur tensions atmosphériques***

<b>III-1-Les surtension. ....</b>	<b>34</b>
<b>III-2-Origines des surtensions.....</b>	<b>34</b>
III-2-1-les surtensions d'origines internes.....	34
III-2-1-a-Phénomène de commutation.....	35
III-2-1-b-Phénomène à caractère d'avaries.....	35
III-2-1-c-Phénomène de Ferro-résonance.....	35
III-2-2-Les surtensions d'origines externes.....	35
III-2-2-a-Phénomène atmosphériques.....	35
III-2-2-b-Les manifestations de la foudre : éclair et tonnerre.....	36
III-2-2-c-Condition d'apparition de la foudre.....	36
III-2-2-d-Formation d'un nuage orageux.....	37
III-2-2-e-Mécanisme du coup de foudre.....	38
III-2-2-f-Schéma électrique équivalent.....	38

III-2-3-Types de coups de foudre.....	39
III-2-4-Caractéristiques électriques des coups de foudre.....	40
III-2-5-Effets de la foudre sur les installations.....	44
III-2-6-Points d'impact de la foudre.....	48
III-2-6-A-Impact direct.....	49
III-2-6-B-Impact induit (indirect) .....	50
<b>III-3-Transmission des surtensions du primaire au secondaire des transformateurs .....</b>	<b>51</b>
III-3-1-Transmission inductive des surtensions.....	51
III-3-2-Transmission capacitive des surtensions.....	52
<b>III-4-La tenue des transformateurs aux ondes de choc, de foudre.....</b>	<b>54</b>
<b>III-5-La protection des autotransformateurs contre les surtensions atmosphériques.....</b>	<b>56</b>
III-5-1-Coordination de l'isolement.....	56
III-5-2-Principe de la coordination de l'isolement.....	56
III-5-3-But de la protection.....	56
<b>III-6-Les dispositifs de la protection contre les surtensions externes.....</b>	<b>56</b>
III-6-1-Eclateur.....	57
III-6-1-a-Tension d'amorçage d'un éclateur.....	59
III-6-1-b-Avantages et inconvénients des éclateurs.....	60
III-6-2-Parafoudre.....	61
III-6-2-a-Définition.....	61
III-6-2-b-Les principaux types des parafoudres.....	62
III-6-2-b-1- Parafoudre à carbure de silicium et éclateur.....	62
III-6-2-b-2-Parafoudre à oxyde de zinc.....	65
III-6-2-b-3- Parafoudre à oxyde de zinc et à enveloppe synthétique....	69
III-6-2-c-Dimensionnement d'un parafoudre.....	70
III-6-2-d-Le câblage et la distance de protection des parafoudres.....	71
III-6-2-e-Les grandeurs caractéristiques.....	73

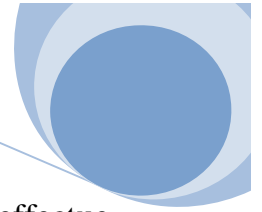
III-6-2-f-Le niveau de la protection.....	74
III-6-3-Les fils de garde.....	74
III-6-3-1-Rôle de fil de garde.....	75
<b>III-7-Choix des moyens de protection.....</b>	<b>76</b>
III-7-1-Utilisation des éclateurs.....	76
III-7-2-Utilisation des parafoudres.....	78
<b>III-8-Zone de la protection d'un dispositif de protection.....</b>	<b>78</b>
<b>III-9-Relation entre le mode d'exploitation d'un réseau et choix des isolements.....</b>	<b>78</b>

## ***CHAPITRE IV : Modélisation et calcul des paramètres des enroulements des autotransformateurs***

<b>IV-1-Caractéristique de l'autotransformateur.....</b>	<b>80</b>
IV-1-1-Caractéristique électrique.....	80
IV-1-2-Caractéristique géométriques.....	80
<b>IV-2-Calcul des paramètres.....</b>	<b>83</b>
IV-2-1-Calcul des résistances.....	83
IV-2-2-Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités.....	84
IV-2-2-1-Calcul des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement haut tension.....	89
IV-2-2-2-Calcul des inductances de mutualités entre enroulement haut tension et moyen tension.....	90
IV-2-2-3-Calcul des coefficients de mutualités entre enroulement haut tension et moyen tension.....	91
IV-2-3-Calcul des capacités transversales.....	92
IV-2-4-Calcul des capacités longitudinales.....	93

***CHAPITRE V : Détermination et analyse de surtensions dans les enroulements des autotransformateurs***

<b>V-1</b>	Equation de l'enroulement.....	96
V-1-1	Mise en équation du schéma équivalent.....	98
V-1-1-1	Equation différentielles du poste.....	98
a-	Système (1) Equation des tensions .....	98
b-	Système ( 2) Equation des courants.....	102
V-1-1-2	Ecriture matricielle des équations du circuit électrique.....	103
<b>V-2</b>	Le principe de la simulation.....	108
<b>V-3</b>	Interprétation et analyse des résultants.....	108
<b>Conclusion générale</b> .....		120



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 en 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.

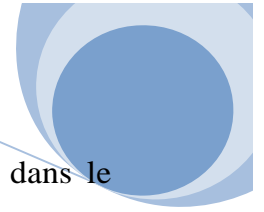
On outre, Le transformateur ou l'autotransformateur dans un réseau peut être soumis à des surtensions en provenance du réseau. Elles sont dues à des manœuvres en amont (ouverture d'appareils de commutation, fermetures ouvertures d'appareils de commandes...). Ces surtensions sont dangereuses pour le matériel.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

La foudre qui atteint un fil de ligne produit des ondes de tension dans le temps au point d'impact. Ces ondes se propagent de part et d'autre du point d'impact avec une vitesse voisine de celle de la lumière et une certaine déformation.

Lorsque l'onde de surtension arrive en un point de raccordement d'un transformateur son amplitude augmente et continue à se propager dans l'enroulement du transformateur. Cette situation peut provoquer des amorçages dans le transformateur, éventuellement des incendies et même des accidents de personnes se trouvant au poste.

La protection des transformateurs contre les surtensions présentait un intérêt exceptionnel. Ces protections peuvent être intérieures ou extérieures. Les mesures de protection internes sont le renforcement adéquat de l'isolation des bobines d'entrée et d'extrémité, ou peuvent apparaître les plus grands gradients de tension.

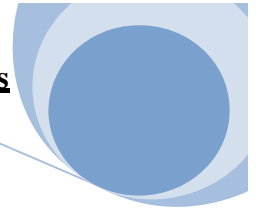
## Introduction générale



Les mesures de tension extérieures ont pour but d'atténuer l'onde qui arrive dans le transformateur en diminuant son amplitude et en la rendant moins raide, au moyen d'un élément capable d'absorber une grande partie de l'énergie transportée par la surtension en l'écoulant vers la terre. On distingue les deux types répandus : les parafoudres et les éclateurs.

Notre étude est basée essentiellement sur la simplification de la protection de l'enroulement haute tension et moyenne tension contre les surtensions pour assurer leur exploitation normale.

Le problème est étudié par la modélisation mathématique et pour le calcul numérique, nous avons choisi le logiciel P-SPICE (ORCAD 16.3) pour sa rapidité et sa précision.



Ce chapitre donne des rappels non exhaustifs sur le transformateur et l'autotransformateur. Outre les définitions, il contient quelques rappels sur leur principe de fonctionnement, leur construction, les différents types, couplage des enroulements, le mode de refroidissement et les processus d'échauffements et par la suite, les avantages et inconvénient qui existe dans littérature spécialisée en particulier sur les autotransformateurs.

## I-1-Définition d'un transformateur : [1]

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation.

Un transformateur se compose d'un noyau, de deux ou plusieurs enroulements liés par voie magnétique et dans le cas particulier, d'un autotransformateur ayant les liaisons magnétiques et électriques. Selon le nombre d'enroulements le transformateur est dit à deux, trois ou à plusieurs enroulements. Conformément au genre du courant on distingue les transformateurs monophasés, triphasés et polyphasés. L'enroulement du transformateur qui est alimenté s'appelle « enroulement primaire », l'autre enroulement est appelé « enroulement secondaire ». Figure. I. 1.

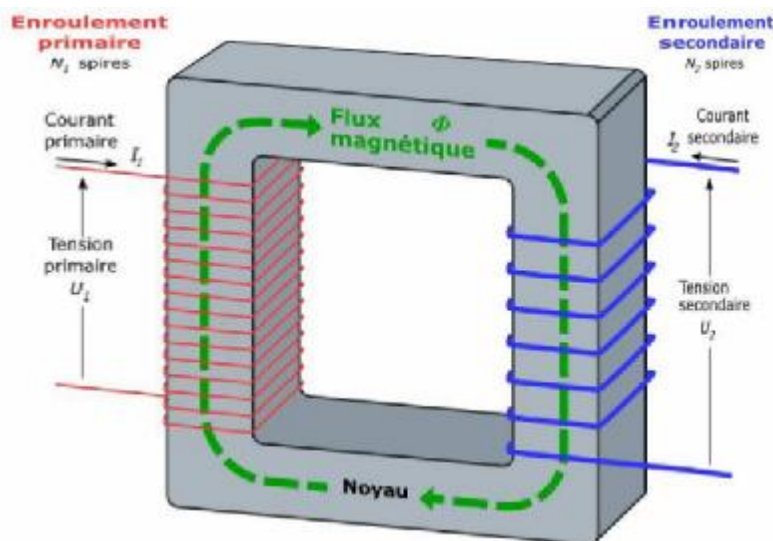
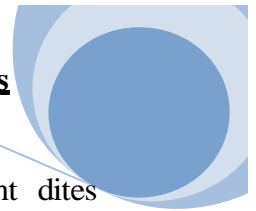


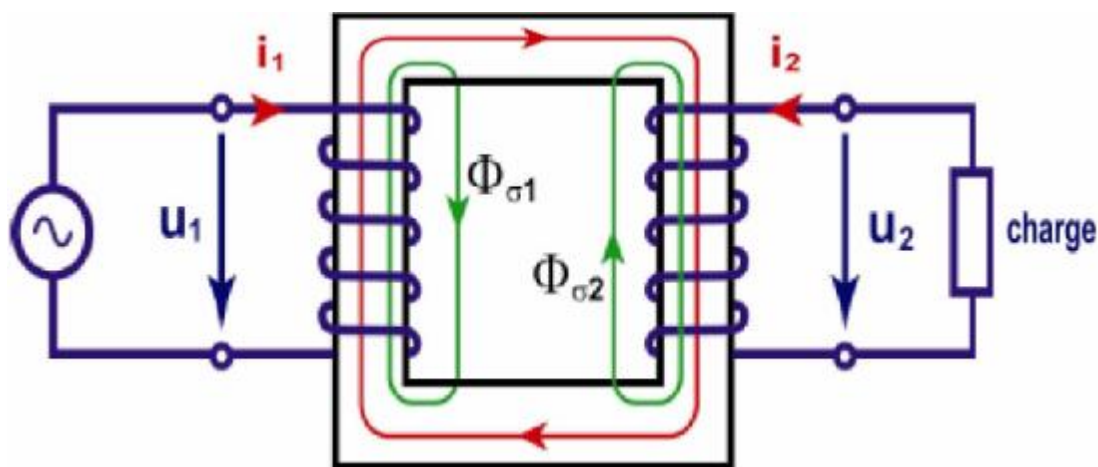
Figure. I.1 Schéma de principe d'un transformateur monophasé.

Conformément aux appellations des enroulements toutes les grandeurs qui se rapportent à l'enroulement primaire, la puissance, la tension, le courant, etc..., sont



appelées primaires et celles qui se rapportent à l'enroulement secondaire sont dites secondaires. On appelle l'enroulement connecté au réseau à tension plus élevée « enroulement haute tension », l'enroulement connecté au réseau de tension inférieure est appelé « enroulement basse tension ». Si la tension secondaire est inférieure à celle du primaire, le transformateur est appelé « transformateur abaisseur », dans le cas contraire, le transformateur est appelé « transformateur élévateur ».

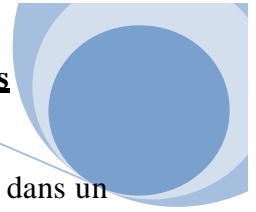
### I-2-Principe de fonctionnement :[2]



Pour transformer la tension et le courant primaire en tension et courant secondaire, il faut calculer et exécuter convenablement les enroulements primaire et secondaire.

Les enroulements fixes primaires et secondaires du transformateur sont inductivement couplés grâce au circuit magnétique à faible reluctance qui assure une concentration élevée des lignes de champ.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires  $n_1$  du primaire et de la tension appliquée. Le flux mutuel couplé avec l'enroulement secondaire y induit une f.e.m  $e_2 = \frac{-d\phi}{dt}$  proportionnelle au nombre de spires  $n_2$  de cet enroulement. La fermeture du circuit secondaire sur une charge provoque la circulation d'un courant  $i_2$ .



On voit que par principe même, un transformateur statique ne fonctionne que dans un réseau à courant alternatif. En dehors de l'avantage de l'interconnexion des réseaux, d'autres avantages apparaissent :

- En courant continu, le passage de l'énergie d'un circuit à un autre exige une liaison mécanique (groupe convertisseur), en courant alternatif, par le transformateur statique, la liaison est magnétique et tous les organes sont fixes.
- Le transformateur statique assure l'isolement électrique du circuit primaire et de circuit secondaire.

Les avantages sont si importants, qu'ils ont fait préférer, dans le transport et la distribution le courant alternatif au courant continu.

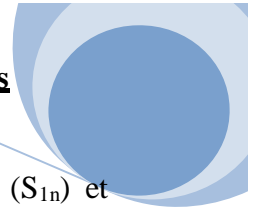
### **I-3- Caractéristiques et grandeurs nominales du transformateur : [3]**

Un transformateur est caractérisé principalement par :

- Sa puissance apparente ;
- Sa tension primaire (tension du réseau d'alimentation);
- Sa tension secondaire ;
- La fréquence ;
- Les couplages des enroulements ;
- Le lieu d'installation, intérieur ou extérieur ;
- Le mode de refroidissement.

Les puissances, les tensions, les fréquences, les courants et les autres paramètres qui caractérisent le régime de fonctionnement auquel le transformateur est destiné par son constructeur, sont appelées grandeurs nominales : Elles sont indiquées sur la plaque signalétique du transformateur qui doit être visible. Mais le terme « nominal » peut être appliqué également aux grandeurs qui ne sont pas indiquées sur la plaque signalétique, mais qui se rapportent au régime nominal : le rendement, la tension de court circuit  $U_{cc}$ , le courant à vide  $I_0$ , les pertes de puissance à vide  $\Delta P_0$ , les pertes de puissances en court circuit  $\Delta P_{cc}$  et les conditions nominales de température du milieu de refroidissement.....etc.

La puissance nominale d'un transformateur est sa puissance apparente  $S$  exprimée en KVA ou MVA.



Dans un transformateur à deux enroulements, les puissances nominales primaires ( $S_{1n}$ ) et secondaire ( $S_{2n}$ ) sont les mêmes.

La tension nominale est la tension composée entre les bornes de phase de chacun des enroulements  $U_{1n}$  et  $U_{2n}$ .

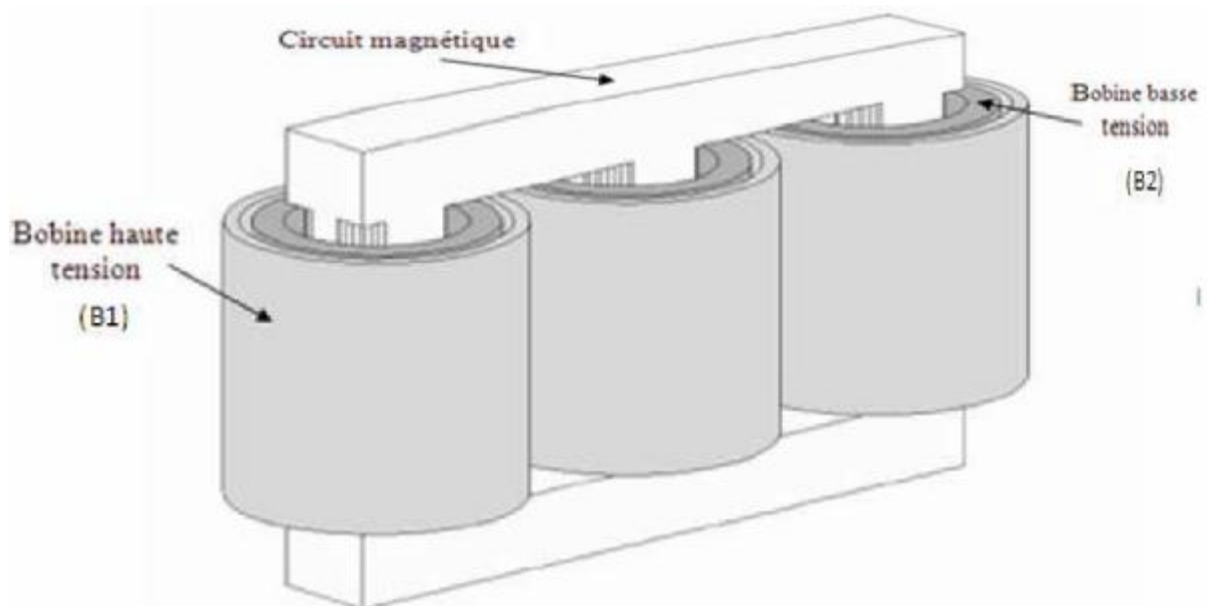
Les courants nominaux sont déterminés d'après la puissance nominale et la tension nominale de l'enroulement  $I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}$ .

### **I-4-Constitution d'un transformateur :[1]**

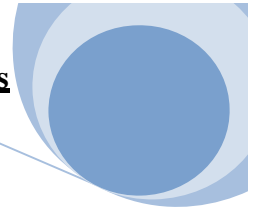
Le transformateur est une machine d'induction qui comporte deux parties essentielles :

- Partie active constituée par : le circuit magnétique et les enroulements primaire et secondaire
- Partie constructive formée : de la cuve, du couvercle et des traversées.

La **figure I.1** représente un schéma d'un transformateur de puissance à colonne.



**Figure I-2 : Schéma d'un transformateur de puissance à colonne**



### **I-4-1- Partie active : [4]**

Les composantes actives du transformateur assurant la conversion du courant sont le circuit magnétique et les enroulements.

En matière de conception électromécanique des appareils de grandes puissances, on rencontre principalement les technologies suivantes:

**-Pour le circuit magnétique** : les transformateurs peuvent être à colonnes ou cuirassés.

**-Pour les enroulements** : les bobinages peuvent être en couches (concentriques) ou en galettes (empilés).

#### **I-4-1-a-Circuit magnétique: [4]**

Le circuit magnétique est un assemblage de tôles fines d'épaisseur moyenne de quelques dixièmes de millimètres disposées dans un même plan parallèlement et perpendiculairement les unes aux autres.

La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire pour qu'il y ait un trajet minimal et un facteur de couplage maximal avec l'enroulement secondaire et sert comme support aux enroulements.

Pour une meilleure efficacité, la tôle du circuit magnétique doit :

- Etre fabriquée en matériau ferromagnétique à haute perméabilité pour une transformation suffisamment efficace de l'énergie électrique.
- Etre isolé pour diminuer les courants de Foucault.
- Etre laminé pour avoir une perméabilité plus élevées dans la direction du flux.

Le noyau présente trois colonnes et deux culasses dans les transformateurs triphasés tels que le montre la **figure I-3**.

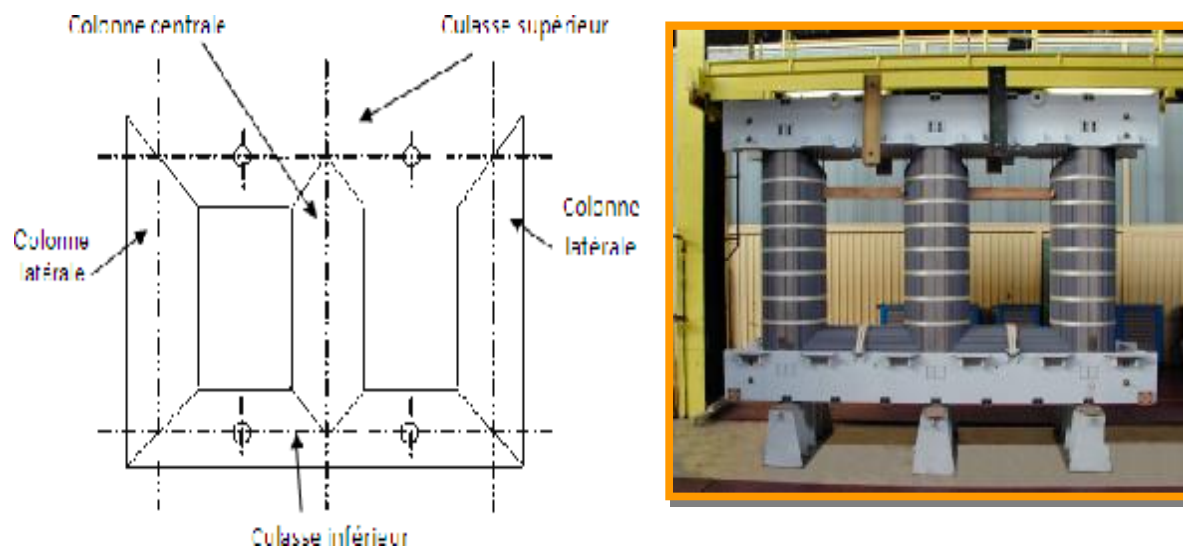
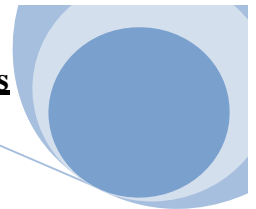
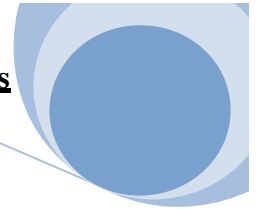


Figure I-3 : Vue de face d'un noyau [20]

#### I-4-1-b-Les enroulements :[4]

Les enroulements sont formés d'un matériau bon conducteur, en cuivre ou en aluminium, de section circulaire ou rectangulaire. Ils sont généralement cylindriques disposées concentriquement sur la même colonne, ils sont à couches ou à galettes. Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions:

- L'enroulement doit être économique en tenant compte du prix du cuivre et du rendement du transformateur.
- Il faut diminuer les intervalles entre les deux enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance active, le dimensionnement du transformateur et aussi le poids.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégage sous forme calorifique.
- L'enroulement doit être isolé avec un isolant résistant à l'évaluation de la température, les courts-circuits et les surtensions lors du fonctionnement.

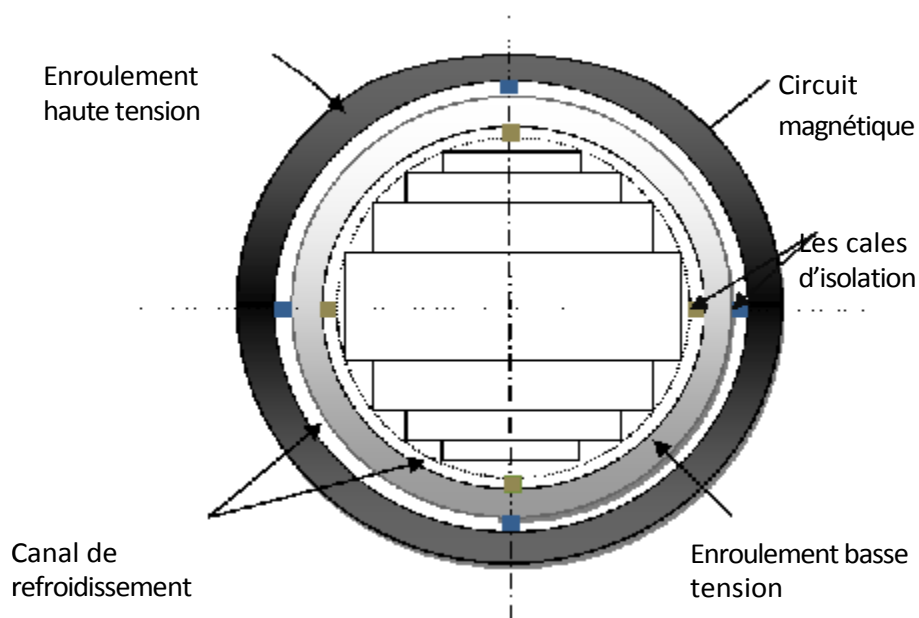


> **Enroulement primaire:**

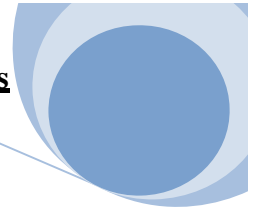
Le rôle de l'enroulement primaire est la création du champ alternatif. La tension à laquelle il est soumis est élevée et l'intensité de courant qui le parcourt est faible, ce qui impose une section faible et un nombre de spires important.

> **Enroulement secondaire:**

Le rôle de l'enroulement secondaire est la production du courant induit, celui-ci se caractérise par une forte intensité. Cette caractéristique impose une section des conducteurs relativement importante et un nombre de spires limité.



**Figure I-4 : Coupe d'une colonne avec les deux enroulements**



### **I-4-2-Partie constructive : [3]**

En plus de la partie active, le transformateur comprend une série d'éléments mécaniques appelés pièces constructives, destinée à la fixation et au refroidissement de la partie active et au branchement des enroulements sur le réseau électrique, elles se résument ainsi:

#### **I-4-2-a-La cuve : [3]**

En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Elle épouse naturellement le contour de la partie active et minimise ainsi le volume d'huile donc également les coûts et la masse du transformateur.

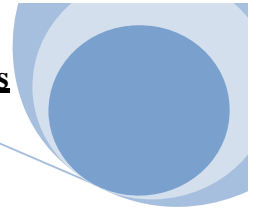


**Figure I-5 : la cuve [20]**

Enfin, à la base de celle-ci des shunts magnétiques permettent de canaliser partiellement les flux de fuites.

La cuve est équipée de divers dispositifs dont les crochets, les galets, les vannes. Par ailleurs, elle doit répondre aux exigences suivantes:

- Résistance mécanique et rigidité nécessaire pour éviter toute déformation sous l'effet du poids de la partie active, de l'huile et des charges.
- Bonne étanchéité.
- Grande surface de contact avec l'air pour faciliter le refroidissement. Le type de cuves



qui nous parait la mieux adaptée est la cuve à ailettes.

### **I-4-2-b-Le couvercle : [2]**

Le rôle du couvercle est d'assurer la fermeture de la cuve, par ailleurs, il sert de support aux accessoires tels que les traversées. Il est réalisé en acier muni de cavités, de trous et d'autres accessoires pour la fixation des appareils de protection et des isolateurs de traversée qui sont de 3(trois) d'un côté du couvercle (primaire) et de 3(trois) de l'autre côté (secondaire).

### **I-4-2-c- Les traversées : [3]**

Les enroulements sont reliés aux circuits extérieurs à travers les traversées qui permettent le passage des conducteurs à travers le couvercle. Ce sont des tubes isolants en porcelaines fixés sur le couvercle, Leurs formes et leurs dimensions sont très variées, elles sont fonction de la tension, la puissance et l'utilisation du transformateur.

### **I-5-Couplage des enroulements : [1]**

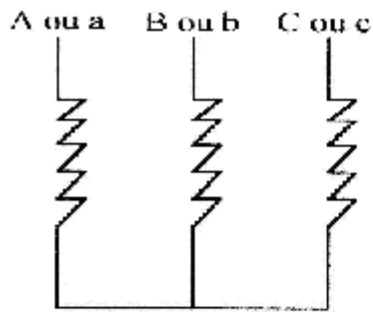
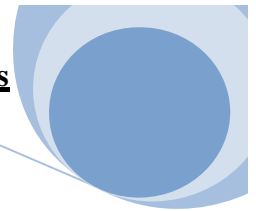
Les bobines qui se trouvent sur les différentes colonnes et appartenant au même enroulement, sont connectées entre elles de telle sorte à constituer un groupe de connexion. Le choix du couplage dépend de l'utilisation du transformateur, dans le cas où il est utilisé pour la distribution, le choix repose sur les remarques suivantes:

-Présence de fil neutre coté BT.

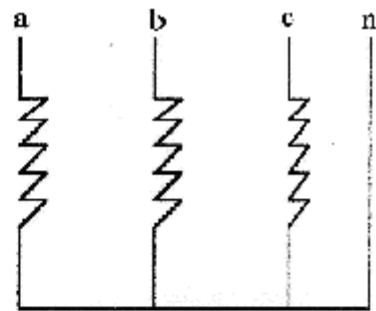
-Présence de fil neutre coté HT.

Adoption de couplages différents pour les deux enroulements (BT et HT).

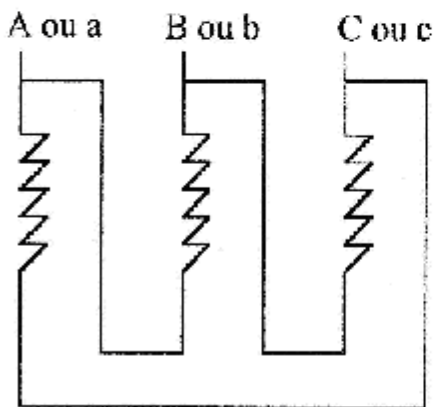
Le triangle (D), l'étoile (Y), ou le zigzag (Z), sont les connexions couramment utilisées dans les réseaux électriques. Plusieurs combinaisons distinctes de ces couplages sont disponibles pour les enroulements primaires et secondaires. Les plus courantes pour le continent européen sont les couplages  $Yy0$ ,  $Dy11$ ,  $Yz11$ ,  $Yd11$  où le nombre traduit l'indice horaire, image du déphasage entre les tensions primaires et secondaires.



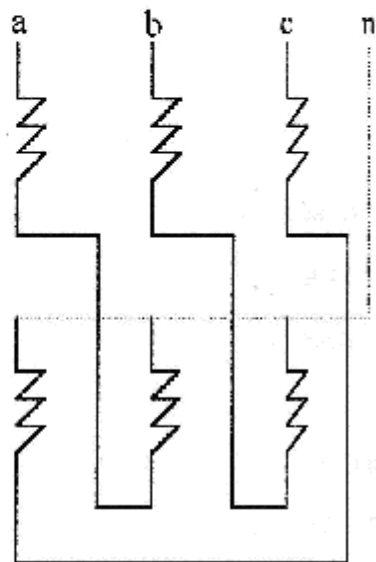
Etoile.



Etoile avec neutre.

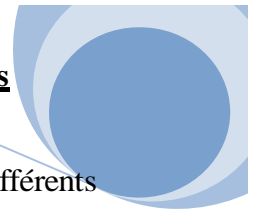


Triangle.

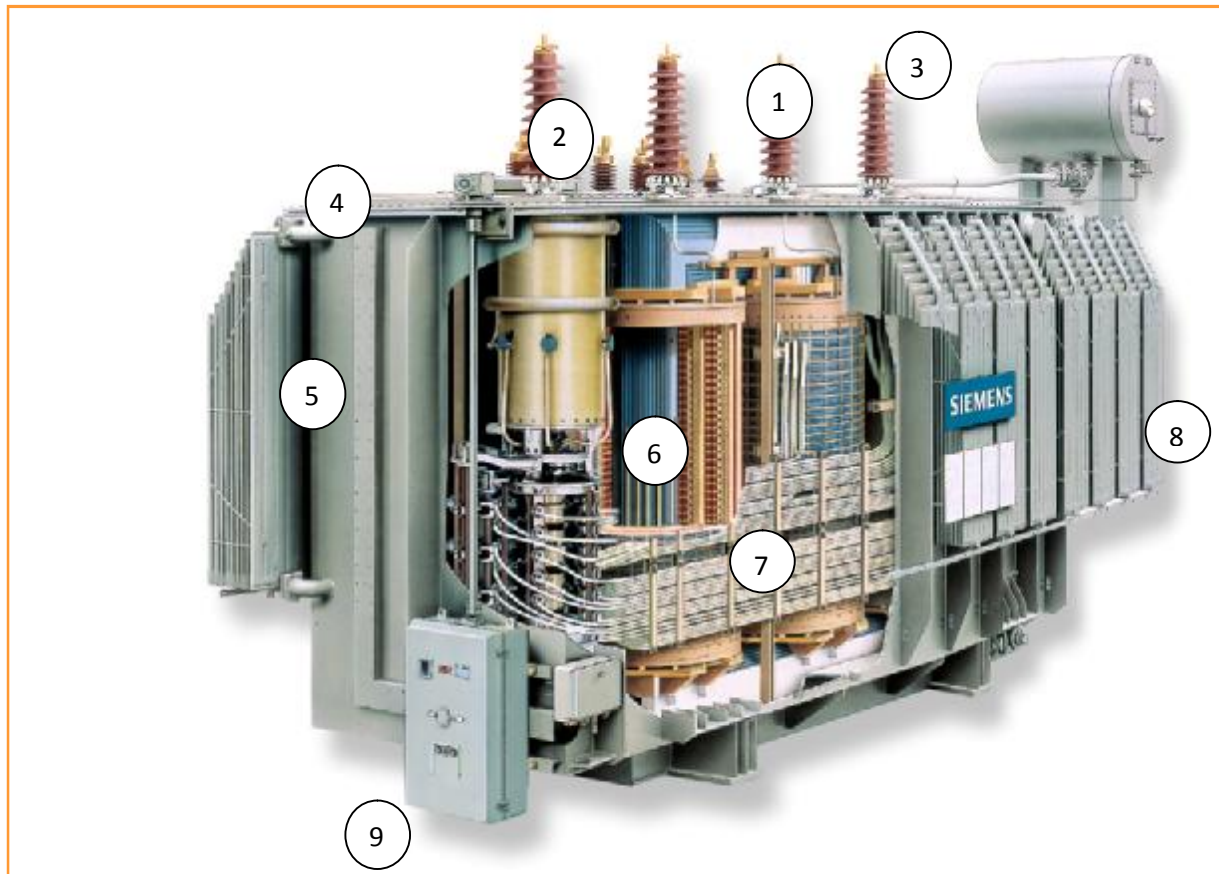


Zigzag.

Figure I-6 : couplage des enroulements du transformateur



La **figure I-7** représente l'extérieur d'un transformateur qui permet de voir les différents éléments constituant le transformateur :



**Figure I-7 : l'extérieur d'un transformateur [6].**

1-Traversé HT.

8-Ailettes pour le refroidissement.

2-Traversé MT.

9-Indicateur.

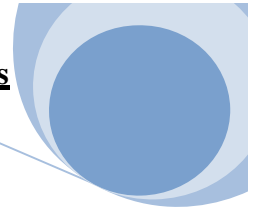
3-Réservoir d'huile.

4-Le couvercle.

5-La cuve.

6-Les enroulements.

7-L'isolant.



### **I-6-Les différents types des transformateurs: [3]**

#### **I-6-a-Principaux types de transformateurs :**

Les types de transformateurs les plus importants sont :

- 1) **Les transformateurs de puissance** pour le transport et la distribution de l'énergie électrique ;
- 2) **Les autotransformateurs** servant à transformer la tension dans des limites relativement restreintes pour le couplage des réseaux interconnectés de différentes tensions, pour la mise en marche des moteurs à courant alternatif ;
- 3) **Les transformateurs destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques** (redresseurs à vapeur de mercure, ignitrons, soupapes à semi-conducteurs, etc.) pour la transformation du courant continu en courant alternatif ;
- 4) **Les transformateurs d'essai** destinés aux essais sous haute et très haute tension ;
- 5) **Les transformateurs de puissances spéciaux** : pour alimentation des fours électriques;
- 6) **Les transformateurs de mesure de courant et de la tension** pour le branchement dans les schémas des appareils de mesure ;
- 7) **transformateurs à noyau bobiné** Ces transformateurs permettent une économie en matériaux de 15 à 20% grâce à l'absence ou à la diminution notable des entrefers
- 8) **Les transformateurs utilisés en radiotechnique**, etc.

On voit que le domaine d'utilisation de transformateurs est très vaste. Mais les phénomènes à la base du fonctionnement d'un transformateur ainsi que les méthodes d'étude de ces phénomènes sont pratiquement les mêmes.

Dans notre cas, l'étude est basée sur les autotransformateurs.

#### **I-6-b-Définition d'un autotransformateur : [5]**

Un autotransformateur est un transformateur dans lequel l'un des enroulements est une fraction de l'autre, et toujours bobiné sur la même carcasse. Les enroulements primaire et secondaire ont plus d'un couplage magnétique ; une liaison électrique. Ces enroulements sont montés en série afin que leurs tensions s'ajoutent.

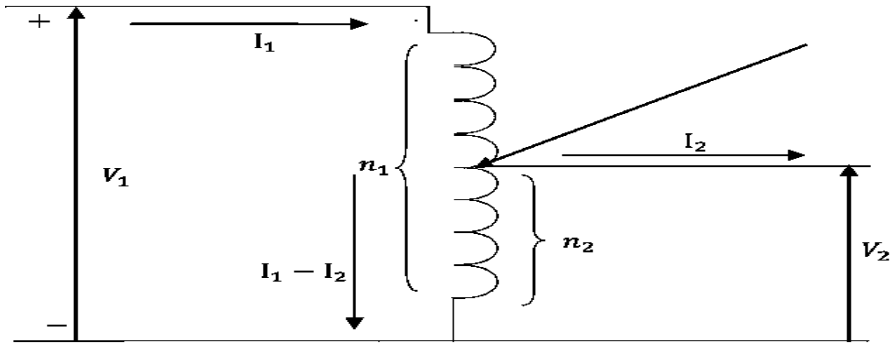
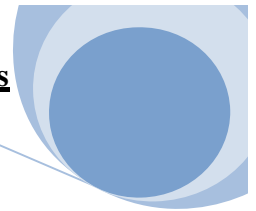


Figure I-8 : schéma équivalent d'un Autotransformateur

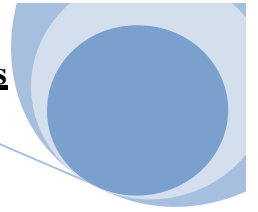


Figure I-9- autotransformateur (6)

**I-7-Avantages et inconvénient de l'autotransformateur:[5]**

**I-7-a-Les avantages :**

- l'autotransformateur présente moins de perte joule, donc il a un bon rendement.
- Il est moins couteux.



-Il est léger, moins encombrant, facile a transporter et installer.

**I-7-b-Les inconvénients :**

L'autotransformateur constitue une liaison directe entre les réseaux reliés au primaire et au secondaire, d'où risque de surtension dangereuse pour le réseau à moyen tension si celle-ci est nettement inférieure à la haute tension.

- Le passage direct à la basse tension des surtensions d'origines diverses (par exemple atmosphériques) affectent la haute tension.
- Compte tenu du fait que l'impédance de court circuit de l'autotransformateur est faible, on aura des courants de court circuit élevés, donnant naissance à des efforts électrodynamiques très importants.

**1-8-Domains d'utilisation de l'autotransformateur : [5]**

L'autotransformateur est utilisé dans :

- Les réseaux électriques pour ajuster deux tensions voisines de deux secours voisins.
- Comme variateur de tension dans les essais de laboratoire.
- Pour le démarrage sous tension réduite des moteurs synchrone et asynchrone.

**I-9-Processus d'échauffement des transformateurs :[5]**

La conversion de l'énergie dans un transformateur s'accompagne de certaines pertes. La presque totalité des pertes est libérée par effet joule dans les parties actives du transformateur c'est à dire dans son circuit magnétique et dans ces enroulements, une certaine partie des pertes de puissance se rapporte aussi aux éléments mécaniques du transformateur.

Les pertes dégagées dans le transformateur lors de son fonctionnement sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement de la partie constitutive.



Depuis l'endroit où il est produit, le flux thermique est dirigé sous l'action des gradients thermiques vers les endroits où il peut être transféré à l'agent réfrigérant, c'est-à-dire, à l'air ou à l'eau selon le mode de refroidissement.

La quantité de chaleur dégagée dans un transformateur correspond à une perte d'énergie. L'échauffement de transformateur est donc en fonction de ces pertes.

#### **I-10-Mode de refroidissement des transformateurs :[5]**

Si l'on veut empêcher qu'un échauffement exagère, détériore les isolants d'un transformateur, il faut en assurer un refroidissement convenable.

D'après le mode de refroidissement on distingue les transformateurs à :

- > Refroidissement naturel qu'indique la circulation naturelle de l'huile et de l'air.
- > Refroidissement à l'air par circulation forcée.
- > Circulation forcée de l'huile et refroidissement de celle-ci par des réfrigérants à eau ou air.

#### **I-11-Les défauts entraînant les transformateurs et autotransformateurs :[5]**

Les défauts entraînant les transformateurs et autotransformateurs peuvent être de nature très divers :

##### **I-11-a-diélectrique :**

Telle que les décharges partielles et amorçage entre enroulement, entre pièces sous tension et la masse ou entre les spires.

##### **I-11-b-électrique :**

Due essentiellement au mauvais contacte dans les connexions et le changeur de prises.



Le régime de fonctionnement des transformateurs est le régime normal qui change au régime anormal. Nous nous basons dans ce chapitre sur le régime transitoire dans l'autotransformateur.

Les phénomènes transitoires dans le transformateur sont causés d'une part par l'augmentation des tensions (lors des commutations des transformateurs, du régime de ferra résonance et la création des surtensions atmosphériques), et d'autre part par les courts circuits qui augmentent les courants. La première engendre des surtensions, qui peuvent détériorer l'isolation. Les courts circuits créent des surintensités qui engendrent des échauffements et des efforts électrodynamiques importants au niveau des enroulements.

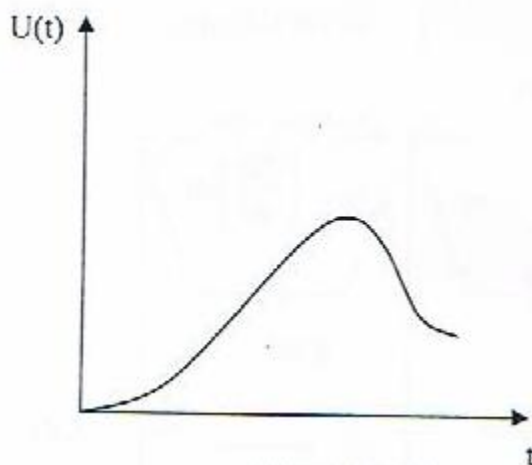
### **II-1-Phénomène transitoire dans les transformateurs :**

La nature des phénomènes qui se produisent dans un transformateur pendant l'action des surtensions dépend de la forme de l'onde électromagnétique, on distingue : [7]

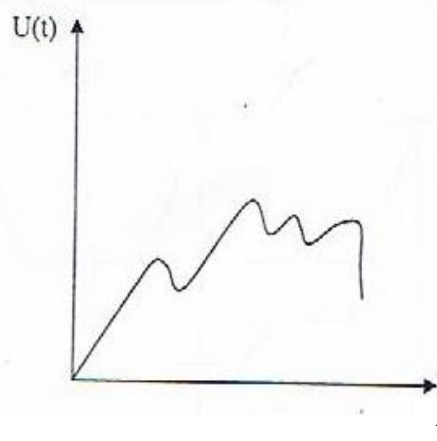
Ø Les ondes apériodiques simples, figure. (II. 1).

Ø Les ondes apériodiques complexes, figure. (II.2).

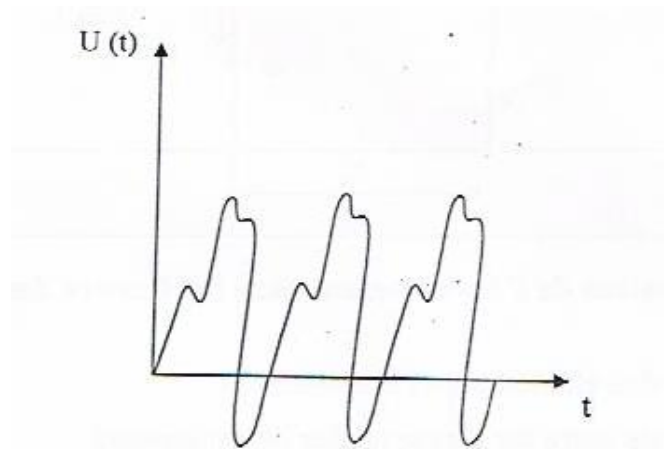
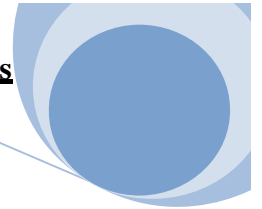
Ø Les ondes périodiques (apparaissant pendant le phénomène de Commutation et de la ferra-résonance), figure. (II.3).



**Figure. (II-1)**



**Figure. (II-2)**



**Figure. (II-3)**

**II-2-Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur soumis aux surtensions :**

Le transformateur peut être exposé à l'action des ondes de surtensions venant d'une, deux ou bien trois phases. Dans ces considérations On néglige l'influence du noyau pour l'étude des surtensions dans les transformateurs et les l'autotransformateur car d'abord les fréquences sont très grandes et encore on suppose que le transformateurs (autotransformateurs) a un troisième enroulement monté en triangle qui joue le rôle d'un écran magnétique.

Le schéma équivalent correspondant à cette étude est le suivant :

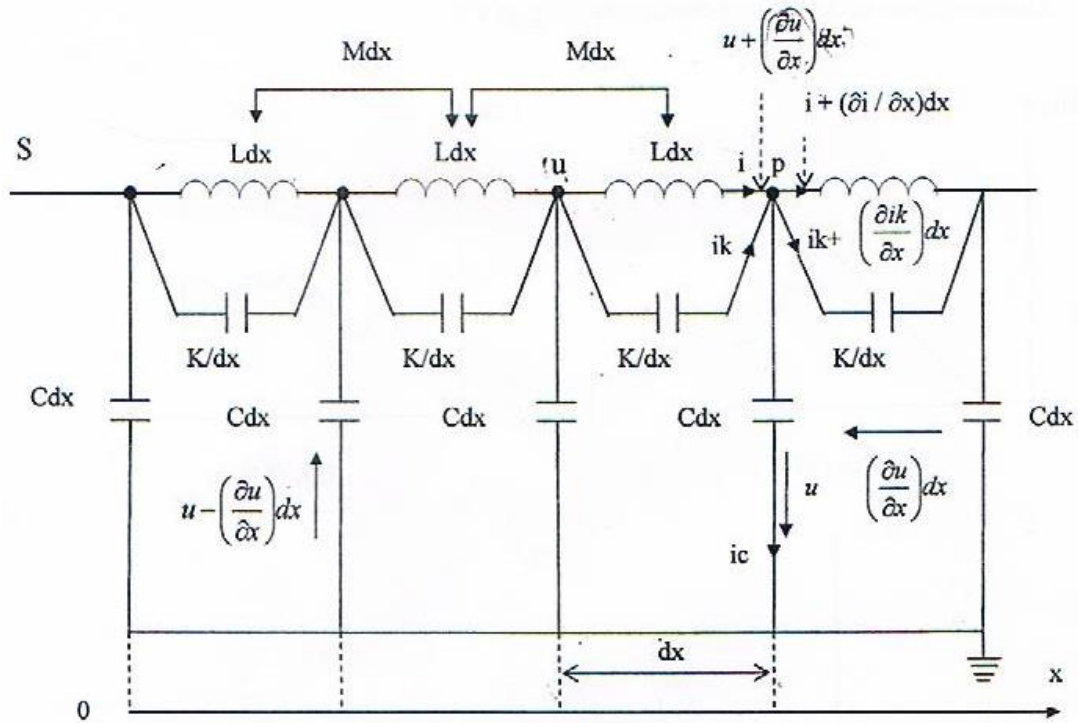
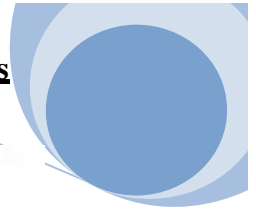


Figure. (II-4) Schéma équivalent de l'enroulement sans l'influence du noyau

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

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

K (F/m) : Capacité longitudinale entre éléments.

C (F/m) : Capacité transversale des éléments de l'enroulement.

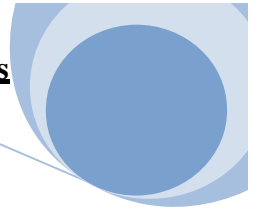
### II-2-1-Equation du circuit :

En négligeant les résistances, l'équation d'après la première loi de Kirchhoff au nœud P situé à l'abscisse x. s'écrit :

$$i + i_k - ic - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx\right) - \left(i_k + \frac{\partial i_k}{\partial x} dx\right) = 0 \quad (II-1)$$

D'où:

$$ic = -\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} dx \quad (II-2)$$



Comme :

$$ic = C . dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{II-3})$$

En égalant (II-2) et (II-3) on aura

$$-\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} dx = C . dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{II-4})$$

Donc :

$$\frac{\partial(i+i_k)}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{A/m}) \quad (\text{II-5})$$

Le courant dans k est :

$$i_k = K \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (\text{II-6})$$

En dérivant par rapport à x on a :

$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{II-7})$$

D'après la deuxième loi de Kirchhoff :

$$u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x}\right) = L dx \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{II-8})$$

D'où :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (\text{II-9})$$

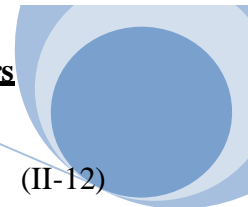
Et:

$$\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{II-10})$$

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

$$\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{1}{L} \frac{\partial u \cdot \partial t}{\partial x^2} \quad (\text{II-11})$$

En sommant (II-11) et (II-7) on obtient :



$$\frac{\partial (i+i_K)}{\partial x} = \frac{1}{L} \frac{\partial u \cdot \partial t}{\partial x^2} + K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (\text{II-12})$$

En identifiant les équations (II-4) et (II-12), puis en multipliant les deux membres par  $L \frac{\partial u}{\partial t}$  on aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (\text{II-13})$$

On obtient une équation de la même forme pour les courants. La solution de l'équation (II-13) est de la forme:

$$u = U \cos \omega t \cdot \sin \beta x$$

$\omega$ : La pulsation,  $\omega = 2\pi f$

$\beta$ : La constante de propagation,  $\beta = 2\pi/\lambda$

$\lambda$ : La longueur d'onde

Cette solution représente une onde stationnaire.

### II-3-Répartition de la surtension le long d'un enroulement dont le neutre est mis à la terre:[9]

Durant l'action de surtension sur l'enroulement d'un transformateur, cet enroulement comporte des capacités et des inductances. A l'instant initiale l'onde de surtension ne peut pas passer à travers les inductances (à cause de leurs grande résistance), elle passe à travers les capacités, c'est qu'en appelle la répartition initiale de tension. Après avoir chargé des capacités l'onde passe par les inductances (c.à.d. les capacités se déchargent aux inductances). Par la stabilisation de ce processus on trouve une répartition finale de tension. Le passage de la répartition initiale de la tension à la répartition finale est un phénomène transitoire oscillant, qui s'amorti progressivement suite à des pertes dans les résistances. Les phénomènes liés aux surtensions impulsionnelles se déroulent à des fréquences très élevés, de sorte que pour ces régimes les réactances inductives deviennent très grandes, par contre les réactances capacitatives diminuent beaucoup.

Pour cela le courant ne circule qu'à travers les capacités longitudinales et les capacités transversales.

Dans ces conditions, le schéma équivalent de l'enroulement sera donné par la Figure (II-5).

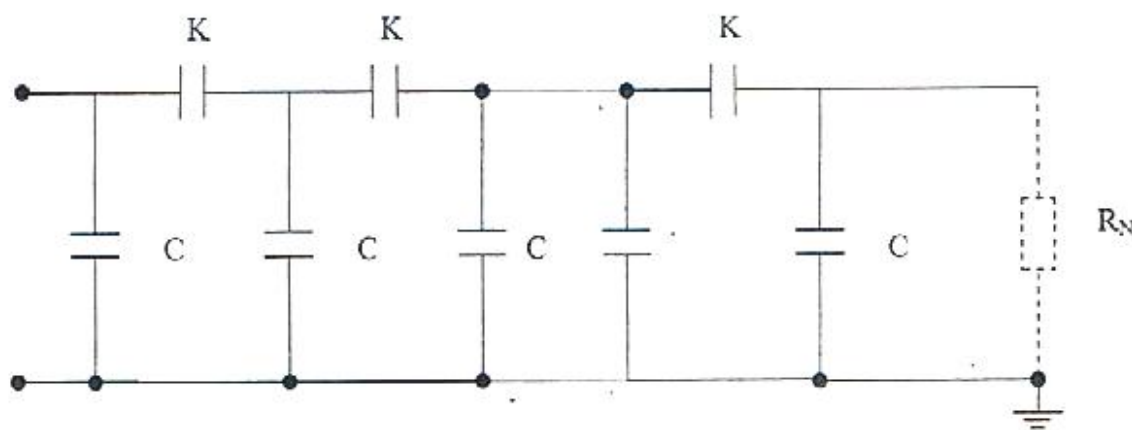


Figure-(II-5) : Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale.

### II-3-1-Répartition initiale de la tension : [9]

La répartition initiale réelle de la tension le long de l'enroulement se fait comme suit :

✓ Si  $C = 0$  ;

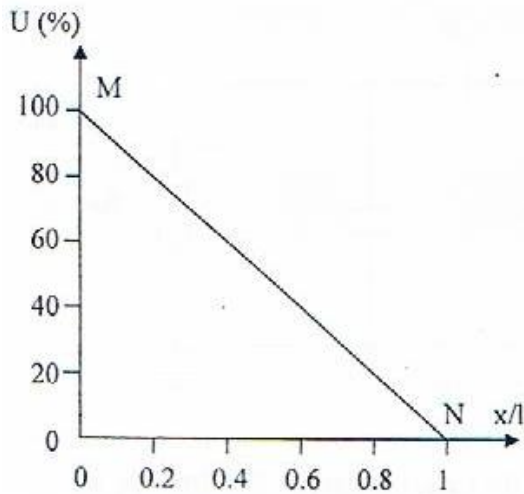
Toutes les capacités longitudinales K seraient en série et le circuit de la figure (II-5) serait parcouru par un courant de même valeur. Avec des capacités K identiques nous obtiendrions une répartition uniforme de la tension le long de l'enroulement.

- **Cas où le neutre est mis à la terre :**

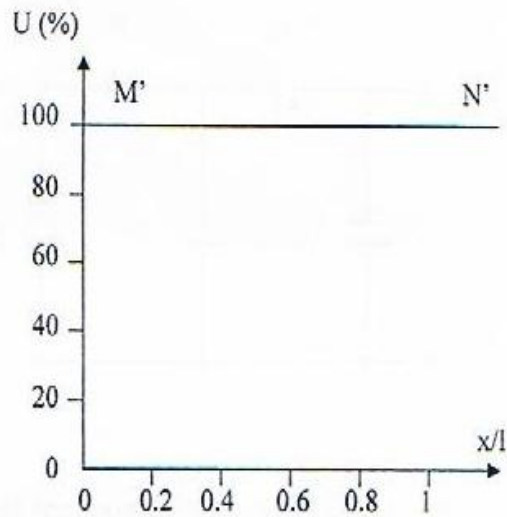
La répartition de la tension est représentée par une droite inclinée réunissant les points (M) et (N) qui correspondent respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement qui se trouve sous la tension  $U_1$  et à sa fin dont le potentiel est nul, figure. (II-6).

- **Cas où le neutre est isolé de la terre :**

Dans ce cas, nous aurons une répartition uniforme de la tension représentée par une droite horizontale (M'N'). Figure (II-7).



**Figure (II-6)**

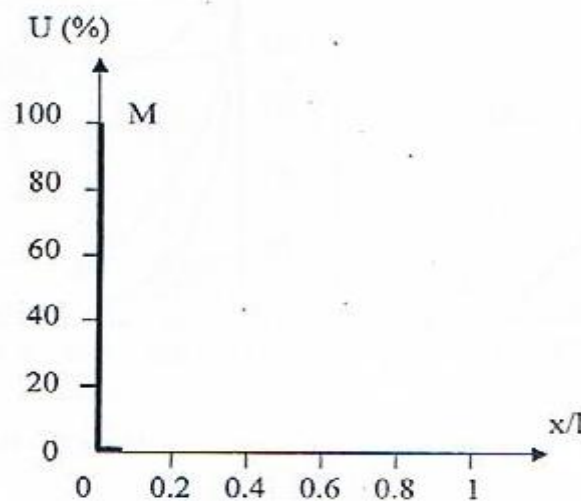


**Figure (II-7)**

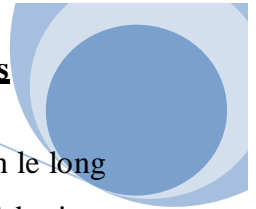
**ù Si  $K=0$  ;**

Le courant de la ligne se dirige vers la terre seulement à travers la première capacité C au début de l'enroulement. Cela signifie que toute la tension est concentrée dans la première spire qui est donc soumise à une très forte surtension.

La répartition de la tension est représentée par une droite verticale réunissant les points M et 0 (origine des axes), cela pour le cas où le neutre est mis ou isolé de la terre, figure. (II-8).



**Figure. (II-8)**



Une analyse mathématique très détaillée montre qu'à l'instant initial, la tension le long de l'enroulement est répartie suivant une loi hyperbolique. Sur un point d'abscisse «x » compté à partir de la borne d'entrée, la surtension initiale  $U_0(x)$  est donnée par les relations suivantes :

- Pour un transformateur dont le neutre est mis à la terre :

$$U_0(x) = U_{choc} \left[ \frac{sha(l-x)}{shal} \right] \tag{II-15}$$

Pour un transformateur dont le neutre est isolé de la terre

$$U_0(x) = U_{choc} \left[ \frac{cha(x-l)}{chal} \right] \tag{II-16}$$

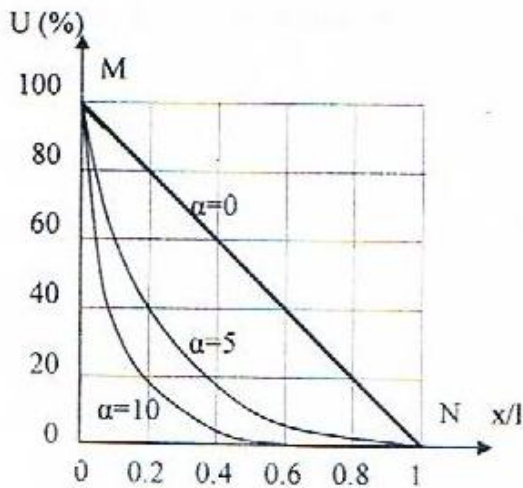
$U_{choc}$  : est La valeur maximale de la tension appliquée à la borne de l'enroulement.

$l$  : La longueur totale de l'enroulement.

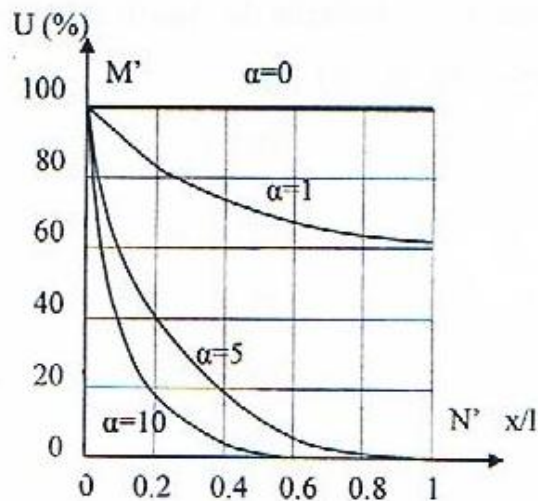
$\alpha = \sqrt{\frac{C_{total}}{K_{total}}}$  : est le coefficient de la répartition de tension (Pour les transformateurs

$\alpha = 5 \text{ à } 15$ )

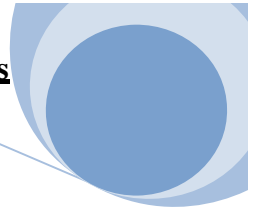
La répartition de la tension initiale dans le transformateur pour les différentes valeurs de  $\alpha$  est donnée par les figures (II - 9) et (II -10).



**Figure (II-9)**



**Figure. (II-10)**



### II-3-1-1-Démonstration :

Dans l'hypothèse où  $L\omega \rightarrow \infty$ , l'équation (II-13) devient :

$$C + K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0 \quad (\text{II-17})$$

Pour le calcul de la répartition initiale de la tension à  $t=0$ , on pose  $U(x, 0)=U_{x0}$ . L'équation (II-17) devient :

$$C \cdot U_{x0} + K \frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{II-18})$$

Or:

$$\frac{\partial^2 U_{x0}}{\partial x^2} + \frac{C}{K} U_{x0} = 0 \quad (\text{II-19})$$

La solution de l'équation différentielle (II-19) est de type :

$$U_{x0} = A \cdot e^{ax} + B e^{-ax} \quad (\text{II-20})$$

### Conditions aux limites :

i) Neutre mis à la terre:

- Pour :  $x = 0$  (injection de la tension).

$$U_{x0} = 1pu \quad (\text{II-21})$$

- Pour :  $x = l$ .

$$U_{xl} = 0pu \quad (\text{II-22})$$

En introduisant (II-21) et (II-22) dans l'équation (II-20) on aura :

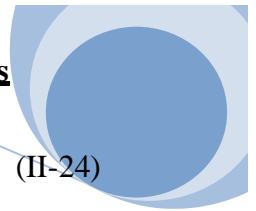
- Pour :  $x = 0$ .

$$1 = A+B$$

D'où :

$$B = 1-A \quad (\text{II-23})$$

- Pour :  $x = l$



$$A.e^{al} + B.e^{-al} = 0 \quad (\text{II-24})$$

En introduisant (II-23) dans (II-24) on aura :

$$A = \frac{-e^{-al}}{e^{al} - e^{-al}} \quad (\text{II-25})$$

En introduisant (II-25) et (II-23) dans l'équation (II-20) on aura :

$$U_{x0} = \frac{e^{[\alpha(l-x)]} - e^{[-\alpha(l-x)]}}{e^{(\alpha l)} - e^{-(\alpha l)}} = \frac{sh[\alpha(l-x)]}{sh(\alpha l)} \quad (\text{II-26})$$

Sachant que :

$$U_{x0} = \frac{U_0(x)}{U_{choc}}$$

Donc :

$$U_0(x) = U_{choc} \frac{sh[\alpha(l-x)]}{sh(\alpha l)} \quad (\text{II-27})$$

ii) Neutre isolé de la terre :

- Pour :  $x=0$  (injection de la tension)

$$U_{x0} = 1pu \quad (\text{II-28})$$

- Pour:  $x = l$ .

$$i + i_k = 0pu \quad (\text{II-29})$$

D'après (II-12) :

$$(i + i_k)_{x=l} = \frac{1}{L} \int \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=l} dt + K \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=l} = 0 \quad (\text{II-30})$$

D'où :

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=l} = 0pu \quad (\text{II-31})$$

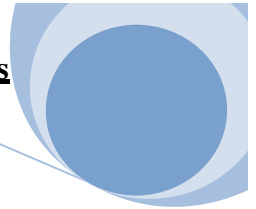
En introduisant (II-28) et (II-31) dans (II-20) on aura :

- Pour :  $x = 0$ .

$$1 = A+B$$

D'où :

$$B = 1-A \quad (\text{II-32})$$



- Pour :  $x = l$

$$\alpha \cdot A \cdot e^{\alpha l} + \alpha \cdot B \cdot e^{-\alpha l} = 0 \quad (\text{II-33})$$

En introduisant (II-32) dans (II-33) on aura :

$$A = \frac{-e^{-\alpha l}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} \quad (\text{II-34})$$

En introduisant (II-34) dans (II-20) on aura :

$$U_{x0} = \frac{e^{[\alpha(x-l)]} - e^{[-\alpha(x-l)]}}{e^{(\alpha l)} - e^{-(\alpha l)}} \quad (\text{II-35})$$

Qui peut s'écrire en fonction hyperbolique comme suit :

$$U_0(x) = U_{choc} \frac{\text{ch}[\alpha(x-l)]}{\text{ch}(\alpha l)} \quad (\text{II-36})$$

### II-3-1-2-Gradient de la tension : [9]

Pour calculer la rigidité diélectrique de l'isolement il faut aussi connaître le gradient de la tension des deux éléments adjacents (bobine, spire, galette) de l'enroulement. D'après les figures (II-9) ' et (II-10) on constate qu'aux premiers instants le plus grand gradient de tension à lieu au début de l'enroulement sur ses premières spires ( $x = 0$ ).

La valeur de ce gradient est déterminée par la dérivée première  $\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)$

Les valeurs de cette dérivée sont déterminées d'après les expressions de la répartition initiale, en tenant compte du fait que pour  $\alpha \geq 3$  nous avons :

$$\text{th}\alpha \approx \coth \alpha = 1 \quad (\text{II-37})$$

Nous aurons dans ce cas :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right) \Big|_{x=0} = -\alpha \cdot U_{choc} \quad (\text{II-38})$$

### II-3-2-Répartition finale de la tension : [9]

Lorsque le neutre est mis à la terre, la répartition finale de la tension est représentée par une droite inclinée MN de la figure (II-11-a), et lorsque le neutre est isolé de la terre, tout l'enroulement atteint finalement le même potentiel et la répartition finale correspond à une droite parallèle à l'axe d'abscisse de la figure (II-11-b).

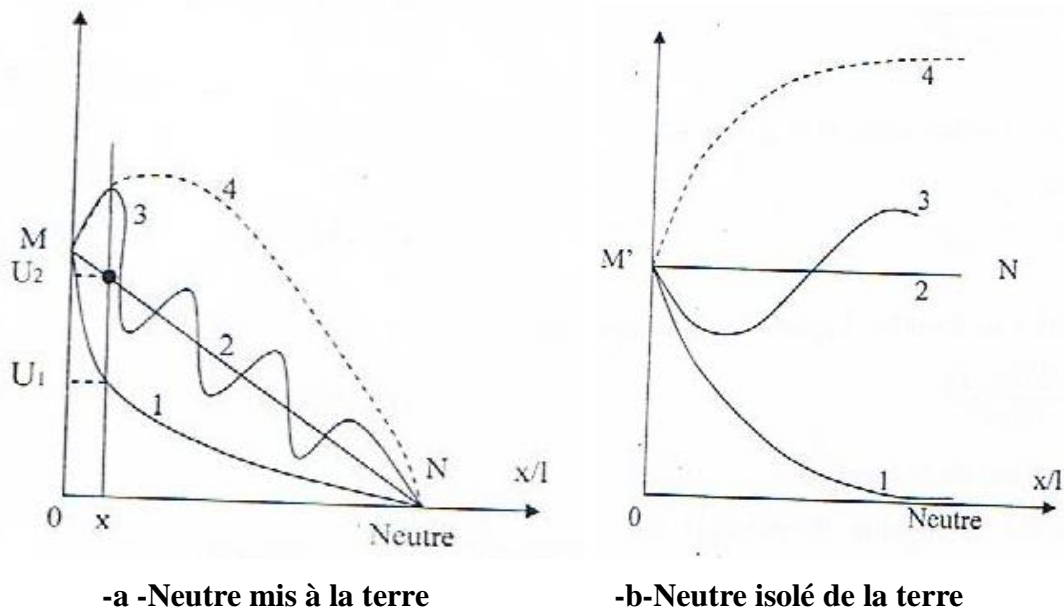
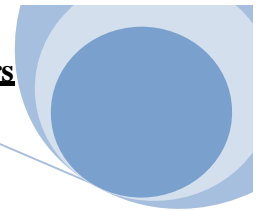


Figure. (II-11) : Répartition finale de la tension

1-Répartition initiale.

3- Répartition intermédiaire.

2-Répartition finale.

4- Répartition maximale

### II-3-3-Phénomène transitoire de la tension : [9]

Le passage de la répartition initiale de tension à la répartition finale le long de l'enroulement est un phénomène de nature oscillatoire amorti de fait de la résistance des enroulements et la conductibilité des isolants, la propagation et la réflexion de l'onde mobile se traduisent par des oscillations ayant lieu dans le temps et dans l'espace. Pour les hypothèses les plus simples, l'expression cherchée est obtenue comme intégrale d'une équation à dérivée partielle du quatrième ordre. Une analyse très détaillée donne les résultats suivants :

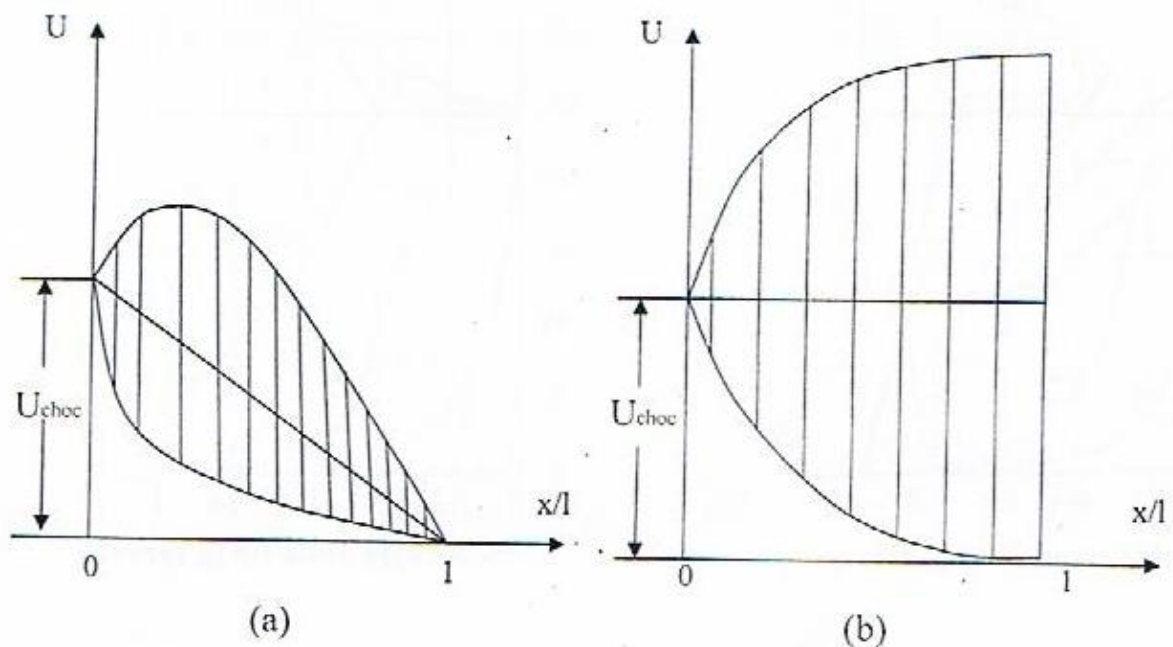
- ü Le phénomène ayant lieu dans l'enroulement est périodique et s'amortit suivant une fonction exponentielle.
- ü La répartition finale de la tension figure (II-11) constitue des axes autour desquels s'effectue le phénomène oscillatoire. Les limites des oscillations se trouvent dans les aires hachurées des figures (II-12-a-b).

On peut développer la différence entre la répartition initiale et la répartition finale de la tension en série d'harmoniques.

Pour les transformateurs à neutre mis à la terre, on obtient une série d'harmoniques comprenant des demi-ondes, figure (II-12-c). Pour les transformateurs à neutre isolé de la terre on obtient des quarts d'ondes, figure (II-12-d).

L'onde qui pénètre dans l'enroulement se déforme continuellement.

Les figures (II-13-a-b) représentent la répartition de la tension le long d'un enroulement aux différents instants pour les deux régimes du neutre.



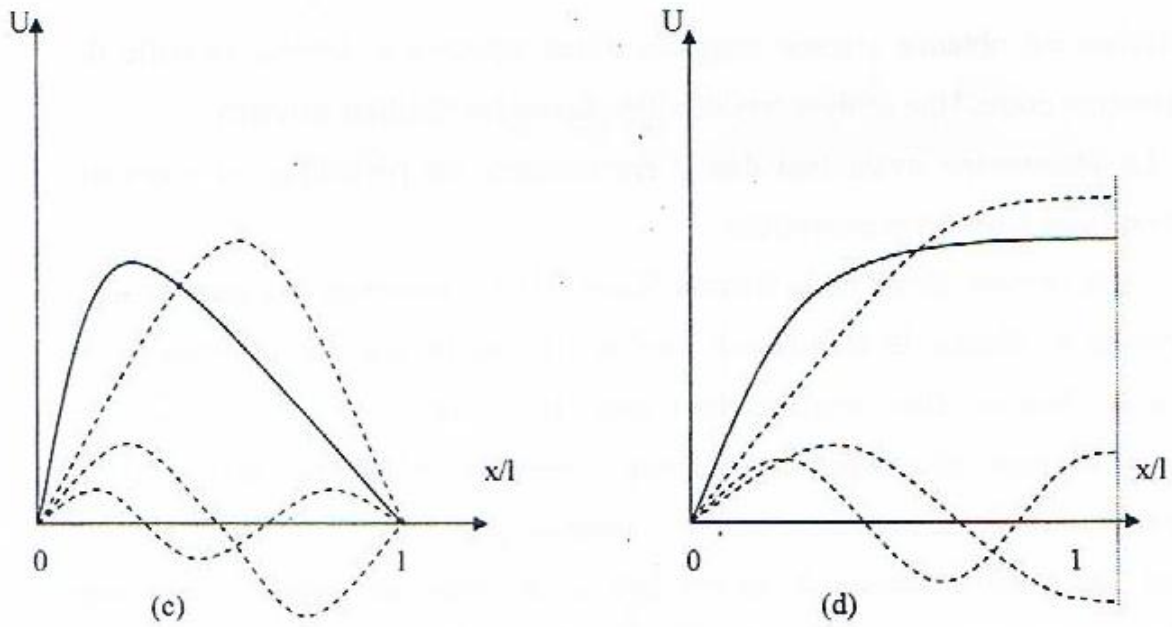


Figure.(II-12) : phénomène transitoire dans l'enroulement d'un transformateur

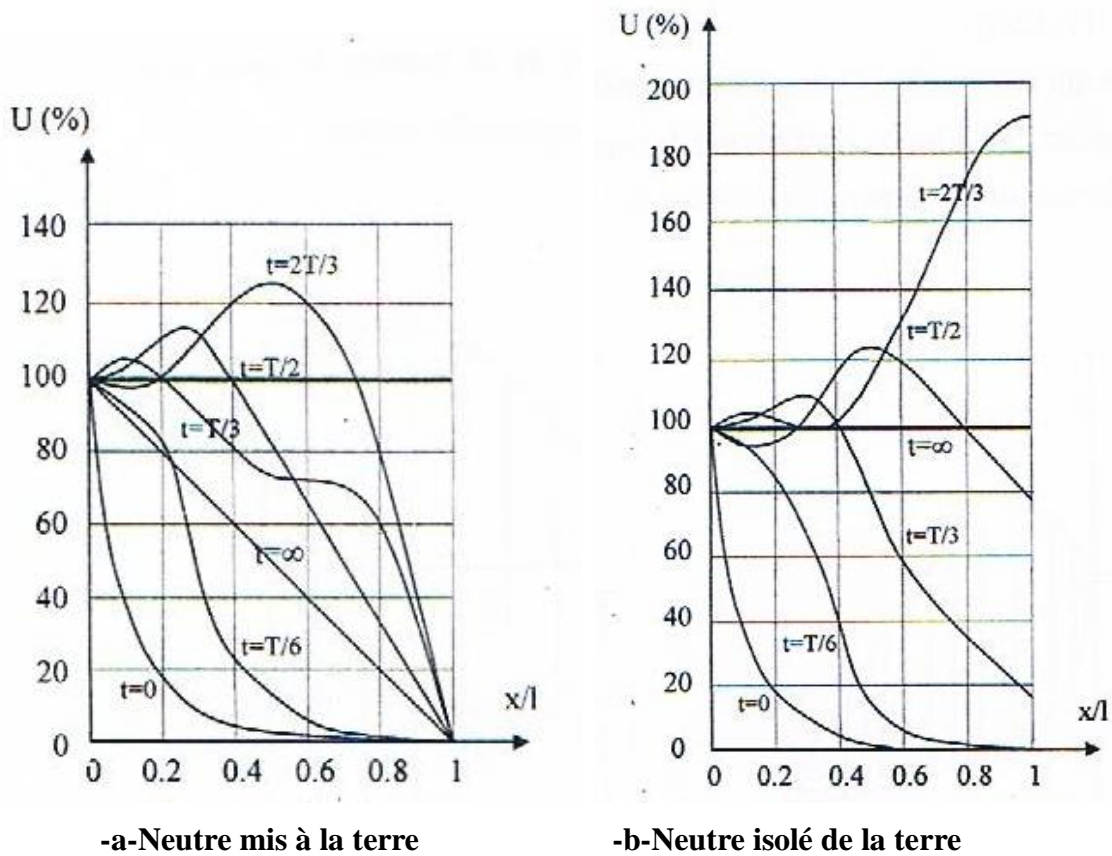
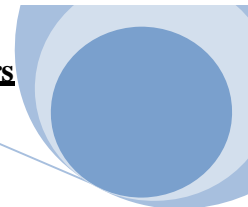


Figure. (II-13) : Répartition de la tension le long de l'enroulement à différents instants



### **II-4-Régime transitoire dans l'autotransformateur : [9]**

En appliquant une onde de surtension à l'entrée HT, figure (II-14-a), cette onde de surtension atteint l'enroulement MT dont l'extrémité est mise à la terre. En parcourant les deux enroulements HT et MT elle est évacuée vers la terre. L'onde de surtension voit donc les deux enroulements HT et MT comme étant un seul enroulement ( $2l$ ) alors la distance parcourue par l'onde sera la somme des deux enroulements HT et MT qui sont montés en série.

La courbe **1** de la figure (II-14-a) représente la répartition initiale de la tension le long des deux enroulements ( $2l$ ), cette dernière à une allure exponentielle décroissante de  $U$  à  $0$  (l'extrémité de l'enroulement MT qui est mise à la terre). La courbe **2** de la figure (II-14-a) représente les amplitudes totales des oscillations, Les valeurs des surtensions qui en résultent augmentent avec l'augmentation de la différence entre la répartition initiale et finale de la tension. A l'équilibre, c'est-à-dire la répartition finale de la tension le long de l'enroulement est une droite inclinée dont la valeur à l'entrée de l'enroulement est  $U$  et à la sortie est nulle. Cette répartition linéaire est obtenue après une série d'oscillations entre les courbes **1** et **2**.

Dans le cas où l'onde vient du côté MT, figure (II-14-b), la répartition initiale de la tension le long des deux enroulements est représentée par deux courbes, l'une du côté MT mise à la terre est identique à celle obtenue dans le cas où l'onde vient du côté HT, figure (II-14-a), et la deuxième courbe correspondante à l'évolution initiale de la tension le long de l'autre partie de l'enroulement HT ( $l$ ), est également décroissante mais sans s'annuler cela est dû au fait que l'extrémité HT n'est pas mis la terre.

A l'équilibre de cette configuration, la répartition de la tension est une droite inclinée (AB) dont la valeur à l'extrémité de l'enroulement HT isolée de la terre est  $2U$  induite par le courant de l'enroulement MT, est sa valeur à l'autre extrémité mise à la terre est nulle. Ce régime permanent est atteint après une suite d'oscillations autour de la droite (AB), la valeur maximale de ses oscillations à l'entrée de l'enroulement HT est [ $4U$ ]

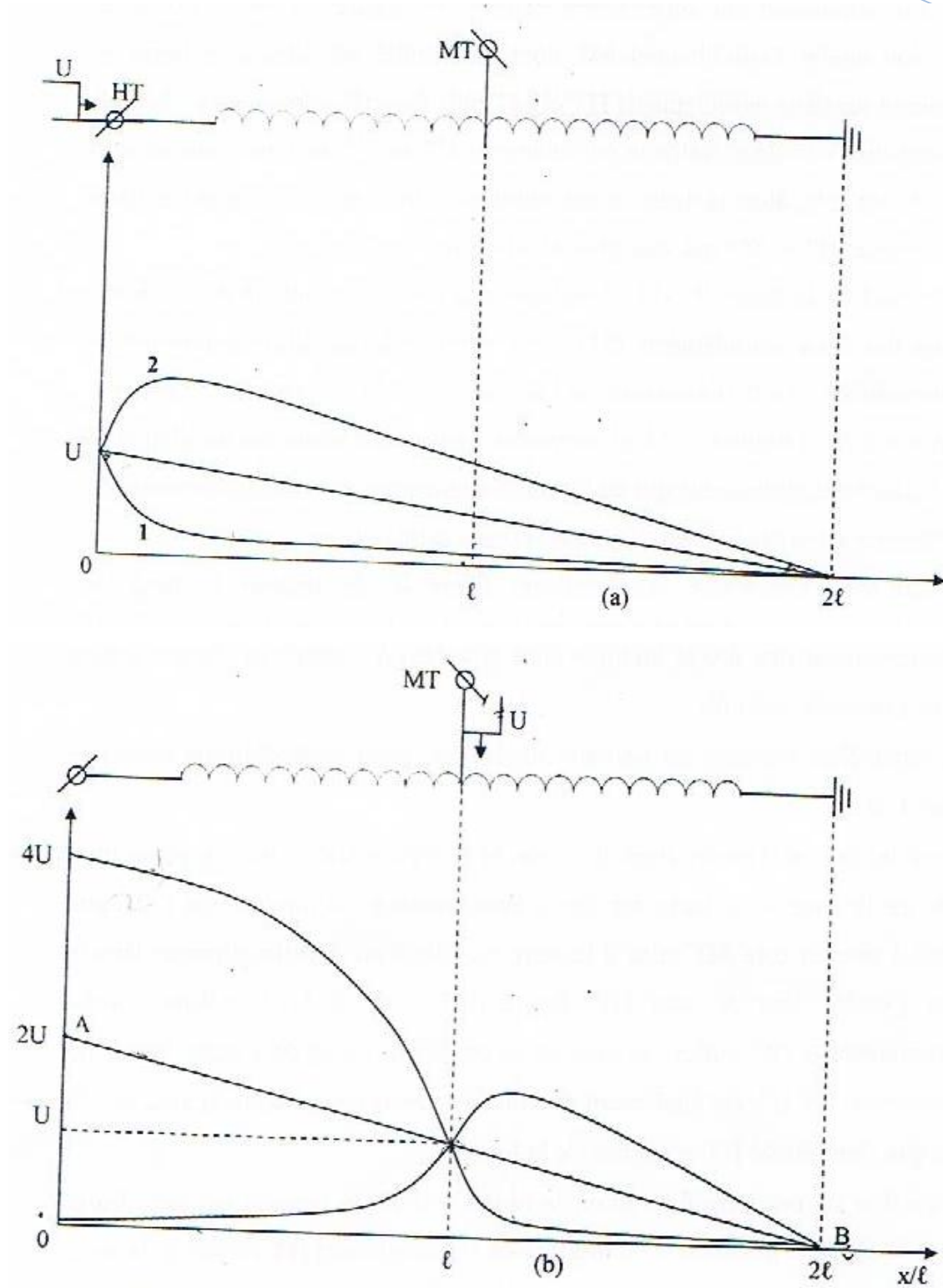


Figure (II-14) : phénomène transitoire dans l'autotransformateur



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 tel que :

L'apparition de très grandes contraintes mécaniques entre les enroulements ou entre les parties de ce dernier, l'augmentation très inégale de la tension entre différentes parties des enroulements ou même entre différentes spires, les surchauffes brusques,.....etc. Ces effets jouent un rôle très important dans les puissants transformateurs à haute tension. Pour cette raison, plusieurs mesures ont été prises afin d'augmenter la tenue mécanique, électrique et thermique des transformateurs.

En fonction du facteur principal qui détermine le régime transitoire (courant ou tension), on distingue deux principaux groupes de phénomènes.

- Les surintensités.
- Les surtensions.

L'étude de ces phénomènes a une très grande importance pour l'exploitation de transformateur. Pour la notre, elle portera essentiellement sur les surtensions.

### **III-1-Les surtensions : [8]**

Les éléments constituant un réseau électrique, en particulier les autotransformateurs (qui fait l'objet de notre étude) subissent des contraintes de tension, elles peuvent être d'une part permanentes du fait de la tension de service et d'autre part pendant de brèves durées du fait de surtensions de diverses origines.

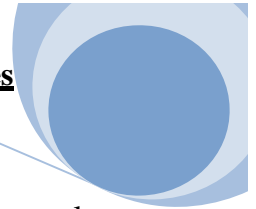
On peut appeler les surtensions dans un transformateur, toute élévation de tension au dessus de la tension de service maximale, mais en général, on entend par surtension des phénomènes de courte durée sous forme de courtes impulsions séparées périodiques ou apériodiques.

### **III-2-Origine des surtensions : [8]**

Les surtensions peuvent être dues à des phénomènes internes ou externes.

#### **III-2-1-Les surtensions d'origines internes : [8]**

Ces surtensions résultent d'un changement de régime en un point ou une partie du réseau. Elles sont plus importantes quand le changement est plus rapide, elles sont produites par des phénomènes différents.



**III-2-1-a-Phénomène de commutation :**

Tels que l'enclenchement, déclenchement des sources, des éléments importants et les variations rapides des charges.....etc, accompagnés d'une variation brusque de l'énergie électromagnétique du système.

**III-2-1-b-Phénomène à caractère d'avaries :**

Tels que les courts-circuits monophasés et les coupures asymétriques, les arcs répétés du système.

**III-2-1-c-Phénomène de Ferro-résonance :**

Ce phénomène est de nature oscillatoire. Il peut prendre naissance par interaction de capacité du réseau avec une inductance non linéaire particulièrement, celle présentée par un transformateur à vide. Il en résulte des surtensions entretenues ou non sur des réseaux à forte capacitance qui peuvent entraîné des avaries aux transformateurs ou aux câbles eux mêmes.

La Ferro-résonance présente certaines analogies avec la résonance classique et se distingue toute fois par le fait que l'inductance mise en jeu n'est définie que de façon univoque, mais varie avec la saturation. Ces sortes de surtensions sont rares, on les élimine en modifiant les constantes des circuits à l'aide des moyens de protection.

**III-2-2-Les surtensions d'origines externes : [8]**

Ces surtensions sont indépendantes de la tension de service du réseau, elles sont produites par :

**III-2-2-a-Phénomènes atmosphériques : [8]**

Tel que le coup de foudre direct frappant la ligne de transport, les phénomènes d'induction électromagnétique lors de décharge des nuages et induction électrostatique due aux nuages chargés.



Figure III-1 : coup de foudre. [9]

### III-2-2-b-Les manifestations de la foudre : éclair et tonnerre :[9]

La foudre est une manifestation de l'électricité d'origine atmosphérique, comportant une décharge accompagnée d'une vive lumière (éclair) et d'une violente détonation (tonnerre).

Le terme d'éclair représente l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges électriques d'origine atmosphérique (entre deux nuages ou entre la base d'un nuage et le sol, ou à l'intérieur d'un même nuage). Le tonnerre est le bruit induit par ces décharges électriques.

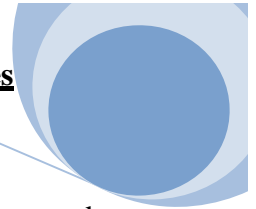
La vitesse de la lumière étant de 300 000 km/s, l'éclair est perçu au moment où il se produit. En revanche, le son se propage à 340 m/s seulement, le tonnerre est donc perçu sensiblement après l'éclair.

Le nombre  $n$  de secondes qui s'écoulent entre ces deux phénomènes permet d'estimer la distance  $d$  en mètres qui sépare l'observateur de la décharge orageuse grâce à la formule suivante :

$$d = 340 \times n \quad \text{(III-1)}$$

### III-2-2-c-Conditions d'apparition de la foudre :[9]

La foudre est une des manifestations des orages, perturbations atmosphériques violentes accompagnées d'éclairs, de tonnerre, de rafales de vent, d'averses de pluie ou de



grêle.

La naissance de ces phénomènes orageux est généralement subordonnée à une grande instabilité atmosphérique, due à des différences importantes de température entre l'air au niveau du sol et l'air en altitude. Ceci explique pourquoi les orages « électriques » sont plus généralement observés en été qu'en hiver où cette différence de température peut ne pas être suffisante pour générer une grande instabilité.

Il existe deux types de nuages orageux :

- Les **cumulo-nimbus**, qui donnent lieu aux orages de chaleur, très localisés et de durée limitée,
- les **orages frontaux ou lignes de grains** ;

Dans ces deux cas, les nuages sont le siège de charges électriques et peuvent ainsi être à l'origine du phénomène de foudre. Dans le cadre du présent document, les cas correspondant à la formation de cumulo-nimbus seront étudiés plus particulièrement.

Le cumulo-nimbus est une masse puissante de nuages sombres, en forme de double enclume à grand développement vertical (300 à 15 000 m d'altitude) qui s'étend sur une surface de plusieurs km<sup>2</sup>. Le volume d'eau du nuage orageux peut atteindre 50 km<sup>3</sup>.

#### III-2-2-d-Formation d'un nuage orageux : [9]

Un nuage orageux, le cumulo-nimbus, s'étend sur plusieurs kilomètres carrés et se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de 15 kilomètres. Les mouvements convectifs et les trajectoires des précipitations au sein du nuage provoquent la génération d'hydrométéores chargés électriquement puis entraînent leur séparation. Les particules chargées positivement sont repoussées vers le haut. Celles chargées négativement, plus lourdes, tombent vers la base du nuage.

La structure électrostatique de la cellule orageuse est proche de celle d'un dipôle d'axe vertical, formé de deux poches de charges de signe opposé et évaluées à plusieurs dizaines de coulombs. Des petites poches chargées positivement peuvent éventuellement être présentes à la base du nuage. Le champ électrique au sol correspondant à cette configuration est vertical et son amplitude varie avec la distance au centre du nuage

Par beau temps, le champ électrique au sol est de l'ordre de la centaine de volts par mètre. A l'approche d'un nuage chargé, il s'inverse et son amplitude évolue jusqu'à atteindre 250 fois sa valeur initiale.

### III-2-2-e- Mécanisme du coup de foudre : [9]

Les chercheurs ont montrés que **85 à 90%** des foudres sont négatives et que seul **10 à 15%** des foudres sont positives. Le déroulement d'un coup de foudre négatif fait intervenir une série d'impulsions dont la représentation schématique est donnée sur la figure (II-2). La première impulsion débute par une série de pré décharges, qui trace un chemin préférentiel (précurseur par pas), du nuage vers le sol pour un coup de foudre descendant, sous la forme d'un canal de plasma. Dès que ce chemin est continu entre le nuage et le sol, la décharge principale va s'effectuer du sol vers le nuage (arc en retour).

Après le premier éclair ainsi généré, d'autres coups de foudre peuvent se produire, qui utilisent le même canal conducteur jusqu'à la décharge complète du nuage. Signalons qu'une phase de courant persistant fait suite au premier arc de retour. Ce courant est souvent à l'origine des effets thermiques les plus importants.

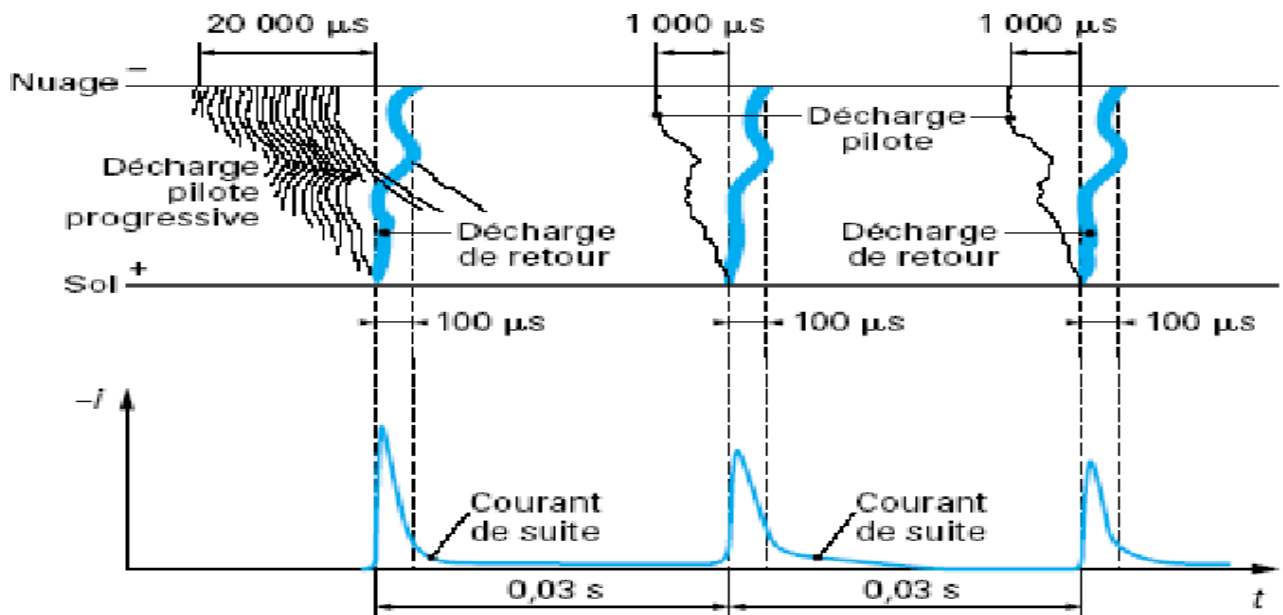


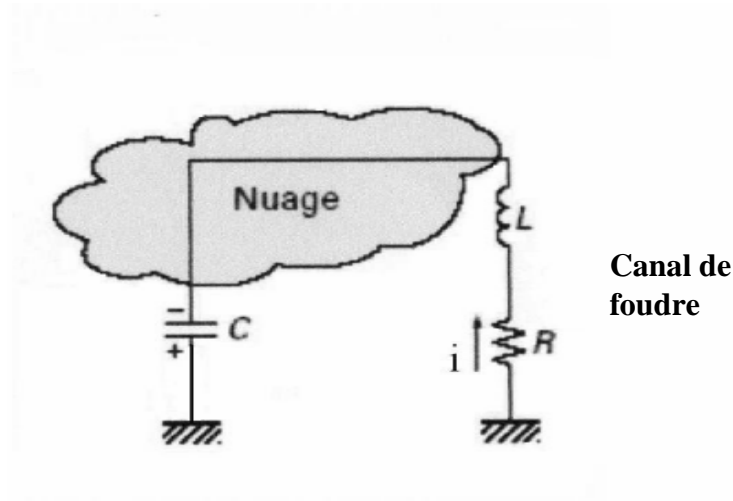
Figure III-2: Mécanisme du coup de foudre.

### III-2-2-f- Schéma électrique équivalent: [9]

Le schéma équivalent pour les décharges est donné sur la Figure (III-4). Les valeurs de la résistance  $R$  et de l'inductance  $L$  dépendent du chemin pris par le courant de décharge  $\hat{i}$ . La différence de potentiel correspondante:

$$u = R.i + L$$

qui n'est donc pas une donnée intrinsèque du coup de foudre, qui ne peut être défini que par son courant, c'est-à-dire par une surintensité.



**Figure III-3: Décharges: schéma électrique équivalent.**

Dans tous les circuits électriques au voisinage du canal de la foudre, une tension proportionnelle au courant de foudre et à l'inductance mutuelle entre circuit et canal de foudre sera induite.

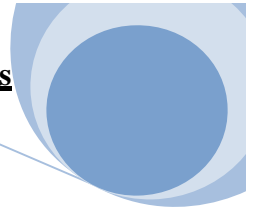
### III-2-3-Types de coups de foudre : [9]

Les aspérités du sol ou des structures créent un « effet de pointe » qui amplifie de façon très importante le champ électrique local. Cette augmentation du champ électrique au sol se traduit par une ionisation locale de l'air (effet « Corona »).

Ce phénomène est observé depuis longtemps, et il est ainsi connu sous l'appellation « feu de Saint-Elme ». Un canal d'air ionisé reliant le nuage au sol est alors susceptible de se créer et de permettre l'écoulement d'un courant de foudre de forte intensité.

On distingue deux types caractéristiques de coups de foudre, selon qu'ils sont négatifs ou positifs.

90 % des coups de foudre sont de type négatif. L'amplitude du courant peut être très forte, variant de 2 000 à 200 000 Ampères.



- **Le coup négatif :**

Le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées : à une première décharge partielle de durée de front de 10 à 15  $\mu\text{s}$  succèdent des décharges d'attaque plus raides et de descentes plus douces.

- **Le coup positif :**

Le bas du nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant de 0,1 s à 0,2 s. La durée d'attaque varie entre 20  $\mu\text{s}$  et 50  $\mu\text{s}$  et l'amplitude du courant des «coups positifs» est généralement supérieure à celle des «coups négatifs».

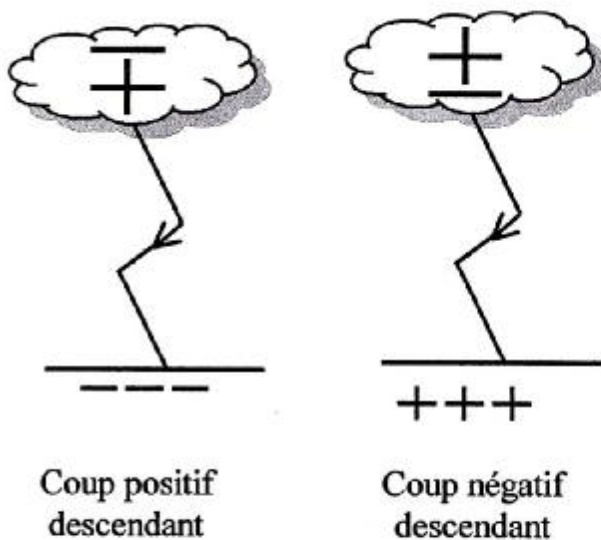


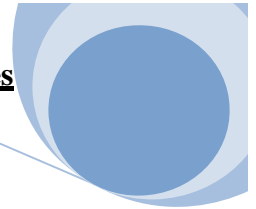
Figure III-4 : Classification des coups de foudre

### III-2-4- Caractéristiques électriques des coups de foudre : [9]

- **Intensité des différents coups de foudre :**

La distribution des intensités des courants de foudre est reportée sur un abaque qui regroupe toutes les données mondiales. Est porté en abscisse le logarithme de l'intensité du coup de foudre (en kA), et en ordonnée la probabilité qu'a un coup de foudre de dépasser une intensité donnée. Les courbes ainsi obtenues représentent un faisceau de droites.

La lecture de la courbe (3) (moyenne) indique que l'intensité d'un coup de foudre négatif atteindra des valeurs supérieures à 2 kA dans 99,7 % des cas. La valeur moyenne de l'intensité se situe vers 25 kA.



Probabilité

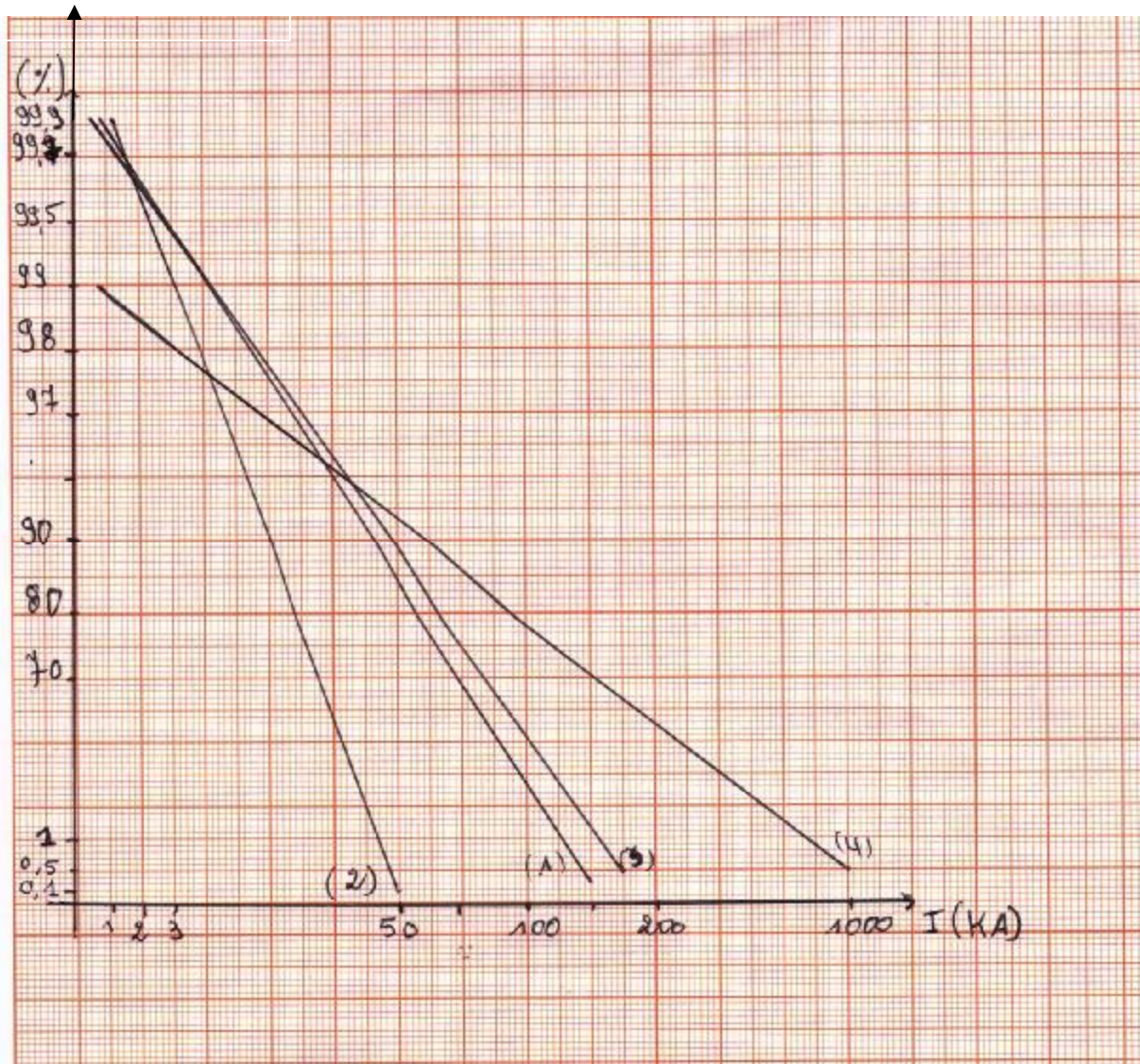
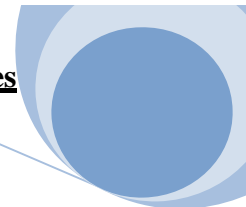


Figure (III-5) : la distribution statistique des coups de foudres.[9]

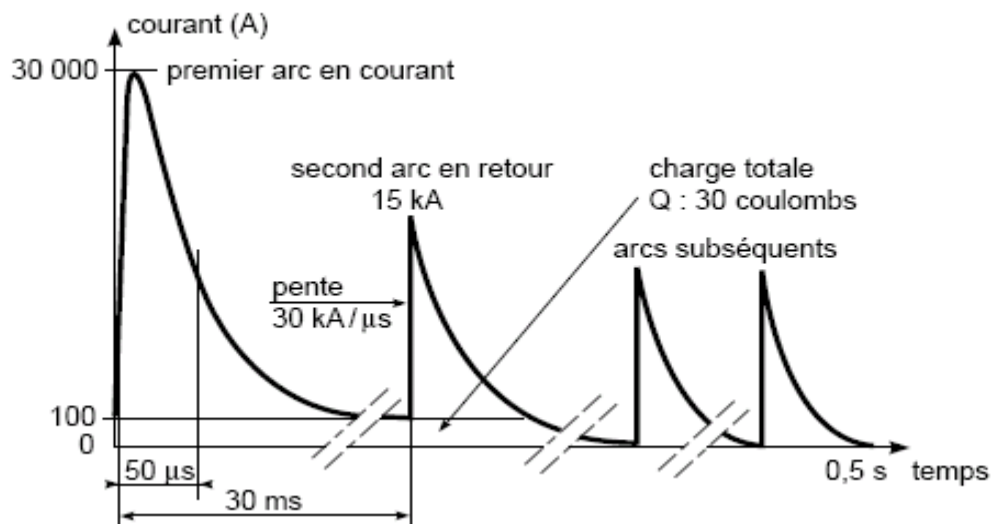
- (1)-Coup de foudre négatif : première décharge.
- (2) coup de foudre négatif : décharge secondaire.
- (3) La moyenne.
- (4) coup de foudre positif



Paramètres	Unité	Probabilité		
Amplitude	kA	95%	50%	5%
Premier coup		7	33	85
Coup subséquent		4.6	12	30
Coup positif		4.6	35	250
Raideur maximum	kA/μs	95%	50%	5%
Premier coup		9.1	24	65
Coup subséquent		10	40	162
Coup positif		0.2	2.4	32
Énergie spécifique	A <sup>2</sup> s	95%	50%	5%
Premier coup		6.0 10 <sup>3</sup>	5.5 10 <sup>4</sup>	5.5 10 <sup>5</sup>
Coup subséquent		5.5 10 <sup>2</sup>	6.0 10 <sup>3</sup>	5.2 10 <sup>4</sup>
Coup positif		2.5 10 <sup>4</sup>	6.5 10 <sup>5</sup>	1.5 10 <sup>7</sup>
Charge totale	C	95%	50%	5%
Décharge négative		1.3	7.5	40
Décharge positive		20	80	350
Durée totale		ms	95%	50%
Décharge négative	0.15		13	1100
Décharge positive	14	85	500	

Figure (III-6): paramètres d'un coup de foudre.

La caractéristique de la foudre est déterminée par les quatre paramètres donnés dans la figure (III-7), la valeur de crête  $\hat{i}$  est responsable des surtensions directes et le gradient maximum des surtensions indirects ou induites. La charge  $q = \int i \, dt$  détermine l'énergie libérée au point d'impact de la foudre lorsque le courant poursuit son chemin sous forme d'arc en traversant un isolateur. L'intégrale du carré  $\int i^2 \, dt$  détermine la contrainte thermique des conducteurs et la force entre les conducteurs parcourus par le courant de foudre.



**Figure III-7: Allure du courant de foudre et les paramètres de la foudre.**

- **Montée en potentiel de la prise de terre :**

Une élévation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de la foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche l'installation lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leur prise de terre. Le courant dans la terre peut être provoqué la montée en potentiel des équipements par les prises de terre.

- **Tension de pas :**

La distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée **Tension de pas**. Les charpentes métalliques des bâtiments et les prise de terre doivent être toutes reliée entre elles afin d'éviter des tensions dangereuses pour l'homme. Ainsi que les risques d'incendie et d'explosions dus aux amorçages d'arc.

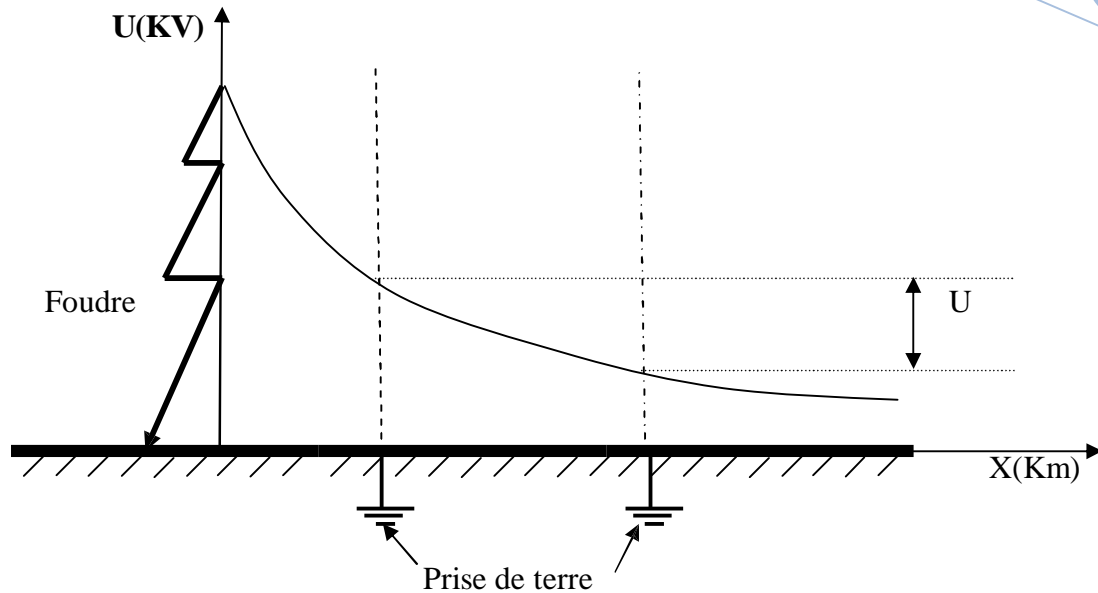


Figure 8: Apparition de tension de pas  $U$  aux bornes des prises de terre.

### III-2-5-Effets de la foudre sur des installations électriques:[9]

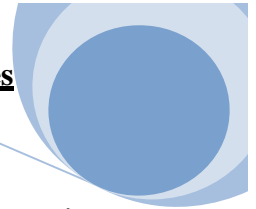
La foudre est un courant électrique haute fréquence qui entraîne les mêmes effets que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique notamment :

- effets thermiques (effet Joule),
- effets dus aux amorçages (montées en potentiel des prises de terre et tensions dangereuses dues à l'impédance élevée des conducteurs en haute fréquence),
- effets électromagnétiques,
- effets électrodynamiques,
- effets électrochimiques,
- effets acoustiques (tonnerre),
- effets lumineux.

#### ▼ Effets thermiques :

Les effets thermiques associés au phénomène de foudre peuvent être de plusieurs sortes :

- De manière générale, un courant électrique s'écoulant dans un corps conducteur entraîne son échauffement. Ce phénomène, qualifié d'effet Joule, peut être à l'origine, dans le cas de la foudre, de la fusion des conducteurs dont le volume n'est pas suffisant pour évacuer la quantité de chaleur générée par les courants de foudre,



- Lors de coups de foudre, un contact de mauvaise qualité entre deux conducteurs peut être le siège d'un échauffement important conduisant à la fusion des pièces en contact. Cette fusion peut s'accompagner également de la formation d'un arc et de projection de métal porté à haute température, et peut donc constituer un facteur incendiaire important.
- Dans les cas particuliers où les courants de foudre s'écoulent dans un mauvais conducteur contenant de l'eau (bois, béton), l'échauffement généré est plus important, et est susceptible d'entraîner une vaporisation de l'eau contenue dans le matériau et en conséquence, l'éclatement de ce dernier.
- Aux points de jonction entre un conducteur (surface métallique) et un arc de retour, une grande quantité de charges électriques doit être écoulee dans un temps très bref.

Ce phénomène entraîne un échauffement local important du métal, qui, s'il s'avère généralement sans conséquences graves, peut conduire à la perforation de tôle d'acier de 2 à 3 mm d'épaisseur.

- Enfin, lorsque l'arc traverse des substances inflammables, il est capable de déclencher un incendie, directement par conduction de la chaleur ou par simple rayonnement thermique.

### ✓ Montées en potentiel et amorçages :

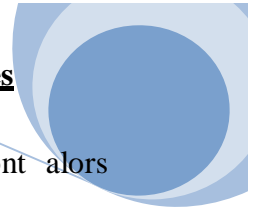
L'amorçage (l'étincelage) se produit lorsque la tension électrique entre deux points dépasse un seuil qui dépend de leur éloignement et des caractéristiques du milieu isolant qui les sépare. Ce phénomène transitoire se produit dans l'air lorsque le champ électrique est de l'ordre de 30 kV/cm.

Ces différences de potentiel peuvent ainsi occasionner :

- des destructions d'équipements électriques ou électroniques,
- des claquages (étincelles) entre les descentes de paratonnerre et des objets métalliques proches reliés au sol, créant ainsi un risque important d'inflammation.

### ✓ Effets électromagnétiques :

Le canal de foudre ainsi que les éléments écoulant le courant de foudre à la terre



gènèrent un champ électromagnétique. Des courants et tensions induits vont alors apparaître dans les conducteurs proches. A titre d'illustration, signalons qu'à 100 m du point d'impact, un éclair peut induire une tension de 80 V dans une boucle d'un mètre carré formée par un conducteur.

Les différences de potentiels qui en résultent peuvent à leur tour entraîner des claquages dans les éléments électriques ou électroniques reliés à ces conducteurs. Ces claquages peuvent être également de forte intensité et créer un risque d'inflammation ou de destruction du même type que celui créé par le coup direct.

Par ailleurs, certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétiques peuvent être perturbés ou détruits par le champ créé par un éclair proche.

Les surtensions induites par un champ électromagnétique sont généralement de courte durée. Leur amplitude dépend notamment de la vitesse de variation du courant induit dans le composant considéré. Cette vitesse de variation est à relier à la raideur du coup de foudre et donc au profil de l'onde magnétique générée.

Ainsi, les temps de montée, de valeur de crête et le temps de descente ont chacun des effets destructeurs ou perturbateurs :

- **le temps de montée :**

Certains composants discrets (triacs, thyristors par exemple) sont déclenchés ou détruits par des impulsions de bas niveau, mais à front très raide ( $dU/dt$  et  $dI/dt$  importants) ;

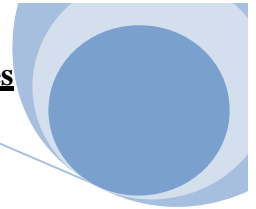
- **la valeur de crête :**

Les surtensions de crête supérieures à la valeur admissible de certains éléments entraînent leur destruction par claquage ; c'est le cas pour les condensateurs, les diodes et en général les couches d'arrêt des semi-conducteurs ;

- **le temps de descente :**

Les impulsions de longue durée endommagent la plupart des composants du fait de l'énergie qu'elles véhiculent.

Sans aller jusqu'à la destruction d'un composant ou d'un circuit, les perturbations du réseau peuvent aussi entraîner des erreurs de fonctionnement d'équipements électroniques par suite de l'action d'une impulsion, même faible, sur un microprocesseur, une mémoire ou une logique câblée (bascule,...).



Les effets seront par exemple :

- l'arrêt ou le démarrage incontrôlé d'une machine automatique,
- le fonctionnement erratique d'équipements,
- la perturbation de programmes informatiques
- le déclenchement intempestif d'une centrale d'alarme,
- des erreurs d'affichage ou de calcul (mesures,...).

Il est clair que la perturbation d'organes électriques jouant un rôle particulièrement important pour la sécurité de l'installation peut être une cause d'accidents majeurs. Enfin, l'action cumulée et répétée de surtensions ou de surintensités successives, non destructives individuellement, peut conduire à un vieillissement prématuré de certains composants électriques.

Relativement aux effets électromagnétiques de la foudre, il convient notamment de retenir que :

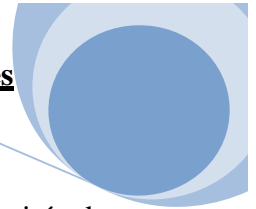
- la foudre peut avoir des conséquences destructrices ou perturbatrices sur des installations électriques ou électroniques situées dans un rayon de plusieurs kilomètres à partir du point d'impact ;
- une alimentation électrique d'un bâtiment réalisée par câbles souterrains n'est pas pour autant protégée des effets de la foudre et les équipements électriques ou électroniques branchés dans ce bâtiment ne sont pas à l'abri des conséquences de ce phénomène électrique.

### ▼ Effets électrodynamiques :

Des effets électrodynamiques peuvent être générés dès lors qu'un courant fort circule dans un conducteur se trouvant par ailleurs dans un champ magnétique généré par des courants voisins.

Par analogie, on peut se référer aux phénomènes apparaissant sur des jeux de barres de poste de puissance en cas de court-circuit.

Ces effets peuvent être soit attractifs, soit répulsifs suivant la disposition des conducteurs les uns par rapport aux autres. Ces efforts peuvent atteindre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de newtons pour des coups de foudre violents et conduisent à des déformations mécaniques pouvant entraîner des ruptures ou des arrachages de support.



**v Effets électrochimiques :**

Ces effets sont généralement négligeables sur les installations au sol, les quantités de matière pouvant se décomposer par électrolyse restant faibles, même pour des quantités de charge transférées importantes. Une surveillance des prises de terre reste cependant nécessaire (risque de corrosion,...).

**v Effets acoustiques :**

Les forces électrodynamiques liées au courant s'écoulant dans l'éclair créent une dilatation de l'air du canal de foudre, accompagnée d'une élévation de pression dans le canal.

Cette surpression et sa disparition brutale, créent une onde de choc qui se propage ensuite dans l'atmosphère. Cette onde de choc peut générer de fortes surpressions sur des structures avoisinantes et conduire au renversement de panneaux, murs,...

**v Effets lumineux :**

Les effets sur les installations sont limités aux équipements optiques (cellules, caméra,...). En ce qui concerne l'homme, des lésions oculaires peuvent toute- fois apparaître.

**III-2-6-Points d'impact de la foudre :**

La foudre peut tomber directement sur le sol, les structures ou les lignes. Les conséquences peuvent être néfastes du fait de la propagation des perturbations par conduction ou par rayonnement.

Le point d'impact du coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie inférieure de la trajectoire (aux environs de 300 m d'altitude). De nombreux facteurs locaux peuvent avoir une action sur la localisation de l'impact (arbres, bâtiments, cheminées, nature du sol, cours d'eau, etc.).

**III-2-6-A-Impact direct : [10]**

**• Impact direct dans le conducteur d'une ligne aérienne : [10]**

Le courant de foudre se divise en quatre et se propage comme onde de courant dans la ligne avec une vitesse proche de celle de la lumière soit 300000Km/s. Selon la théorie des lignes l'onde de courant est accompagnée d'une onde de tension de même forme avec valeur de crête  $\hat{u}$  qui est égale au produit d'un quart de courant de foudre  $1/4 \hat{i}$  fois l'impédance caractéristique de la ligne  $Z_c$ .

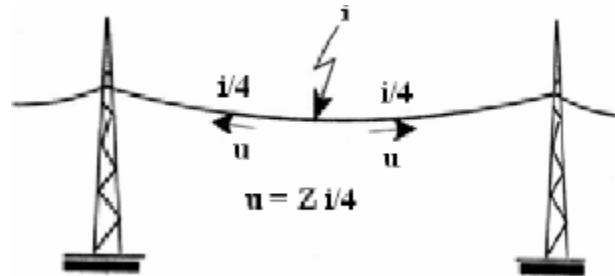


Figure III-9: Coup de foudre dans les conducteurs d'une ligne.

- **Impact direct dans le fil de garde : [10]**

Si la foudre tombe sur le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique (pylônes) par rapport à la terre. La surtension  $U$  correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV.

$$U = R \cdot i/4 + 1/4 L \, di$$

Avec :

$R$  est résistance en onde raide de la prise de terre et  $L$ , l'inductance du pylône.

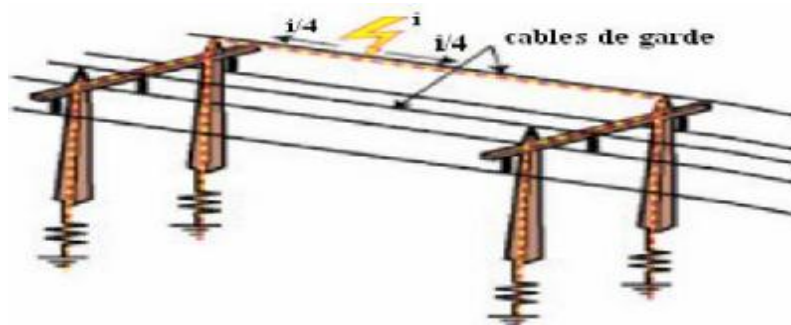


Figure III-10: Coup de foudre dans le fil de garde.

- **Impact dans un pylône mis à la terre : [10]**

Dans ce cas, le courant de foudre s'écoule dans la terre et produit une surtension  $U = R \cdot i + L \, di$  avec  $R$ , résistance en onde raide de la prise de terre et  $L$  est l'inductance du pylône.

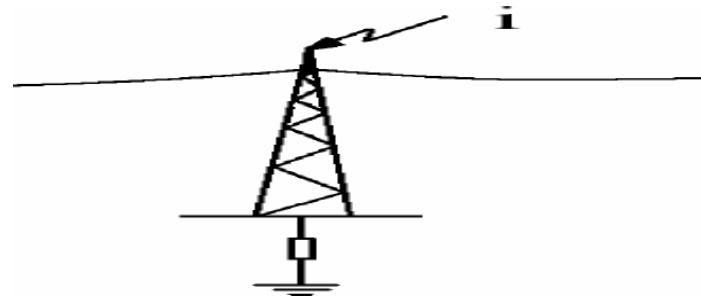


Figure III-11: Coup de foudre dans le pylône d'une ligne aérienne.

### III-2-6-B-Impact induit (indirect) : [10]

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.

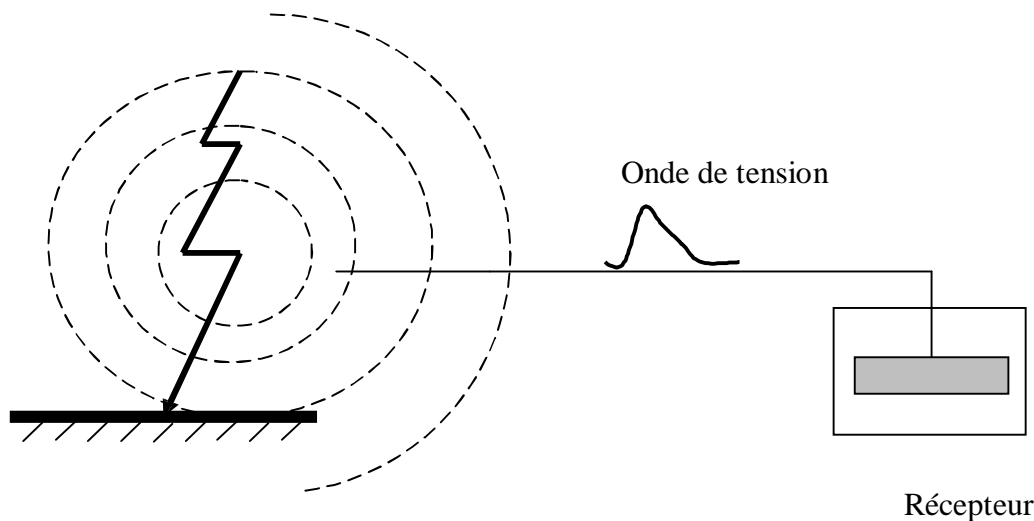
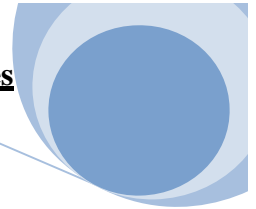


Figure 12 : Coup de foudre tombant à proximité d'une ligne

Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitudes à celle obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montées raide (20 à 100 kA/ $\mu$ s). Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur peut être estimé par la formule suivant :



$$U_{\text{ind}} = Z_0 I \cdot h / d$$

Avec :

$$Z_0 = (0.25/\pi) (\sqrt{\mu_0}) \approx 30\Omega$$

h : hauteur du conducteur

d : distance entre la ligne et le point d'impacte la foudre.

I : courant de la foudre.

### III-3-Transmission des surtensions du primaire au secondaire des transformateurs:

[11]

Il arrive fréquemment que des surtensions appliquées à l'un des enroulements d'un transformateur soient transmises à l'autre enroulement ; suivant le cas, cette transmission peut avoir des effets plus ou moins néfastes sur l'enroulement intéressé ou sur les appareils qui lui sont raccordés.

#### III-3-1-Transmission inductive des surtensions :[11]

Le principe même de fonctionnement d'un transformateur repose sur l'exploitation des phénomènes liés à la mutuelle induction entre deux enroulements.

On sait qu'un couplage "serré" assure une homothétie quasi parfaite des phénomènes au primaire et au secondaire. Vis-à-vis des fréquences industrielles, le circuit magnétique a justement pour rôle d'augmenter ce couplage en limitant le flux de dispersion.

Par conséquent, tous les phénomènes de nature impulsionnelle ou oscillatoire appliqués à un enroulement se reproduisent plus ou moins fidèlement sur l'autre enroulement dans le rapport de leurs nombres de spires (rapport de transformation).

Toutefois, le seul rapport de transformation ne suffit pas à prendre en compte tous les phénomènes d'oscillations internes fonction de la raideur de front ou d'amortissement dû à la présence du circuit magnétique dont la constitution en tôles feuilletées n'est favorable qu'aux fréquences relativement basses ; nous devons donc introduire un coefficient de correction.

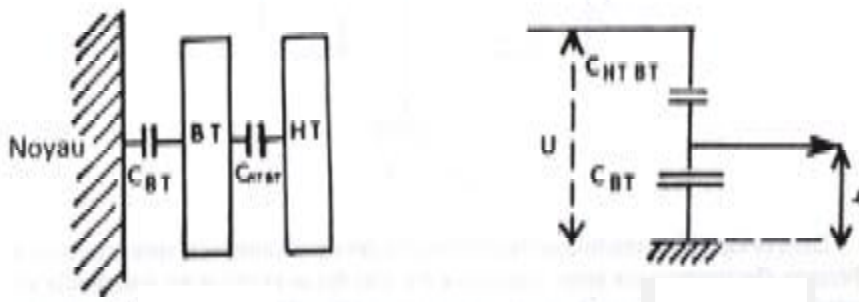
En règle générale, les réseaux HT et BT sont coordonnés de façon que ces surtensions transmises n'aient pas de conséquences néfastes pour le matériel. En ce qui concerne les transformateurs nous pouvons affirmer que leur construction leur apporte en général un coefficient de sécurité considérable vis-à-vis des surtensions transmises

inductivement, car la configuration des enroulements BT imposée par des considérations mécaniques ou thermiques leur assure des distances d'isolement supérieures à ce qui serait strictement nécessaire du point de vue électrique.

### III-3-2-Transmission capacitive des surtensions : [11]

Ce second effet de transmission n'est plus lié au principe de fonctionnement du transformateur mais à la disposition des enroulements, donc à sa construction. Dans un transformateur à enroulements concentriques, chacun des enroulements présente par rapport aux enroulements voisins et/ou par rapport au circuit magnétique une certaine capacité répartie que nous représenterons par des capacités concentrées  $C_{BT}$  (entre BT et noyau) et  $C_{HTBT}$  (entre HT et BT). A première vue, toute tension appliquée à l'enroulement HT pourrait être transmise capacitivement à l'enroulement BT et le réseau des capacités se comporterait comme un diviseur capacitif tel que les tensions  $U$  appliquées à la HT seraient transmises à la BT dans le rapport :

$$- \frac{C_{HTBT}}{C_{HTBT} + C_{BT}} U \quad (III-3)$$



**Figure III-13 : transmission capacitive des surtensions.**

Pour tenir compte d'une éventuelle superposition de l'onde de choc à une crête de la tension réseau à 50 Hz, nous devrions en toute rigueur appliquer également une majoration d'environ 1,15, ce qui porte les fractions précédentes à  $1/10$  et  $1/24$ .

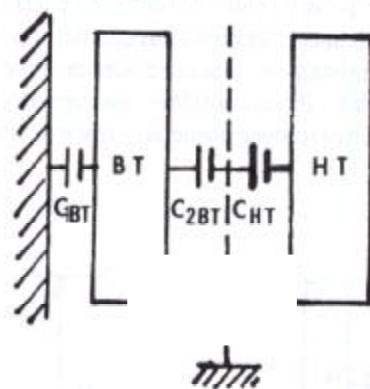
Cependant, lorsque l'enroulement HT est subit par une onde de choc foudre de grande raideur, la répartition de cette onde le long de l'enroulement HT n'est jamais linéaire et tend à la formation d'oscillation et, dans ce cas, toutes les évaluations précédentes sont compromises.

Le facteur de transmission reste lié à l'importance relative des capacités des enroulements mais peut varier selon les cas dans de très grandes limites.

On pourra remarquer que ces transmissions sont considérablement atténuées et même éliminées si un point au moins de la BT se trouve relié à un potentiel voisin de celui de la terre ; c'est pourquoi la présence de parasurtenseurs, sur les phases, sur le point neutre, ou la mise à la terre directe du point neutre, est instamment recommandée.

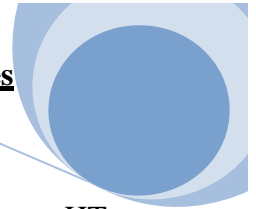
Il faut noter également que, dans bon nombre de cas, la présence de lignes connectées du côté BT apporte des capacités complémentaires, en parallèle avec  $C_{BT}$ , qui augmentent la valeur apparente de celles-ci et jouent un rôle très favorable à la réduction des surtensions transmises.

Néanmoins, dans certaines installations il arrive que des surtensions transmises puissent avoir un effet néfaste sur l'enroulement BT du transformateur et surtout sur les appareils qui lui sont raccordés, sans qu'il soit possible d'imposer au point neutre, par exemple, le potentiel de la terre.



**Figure 14 : Transmission capacitive des surtensions**

Dans ce cas, il sera recommandé de recourir à des transformateurs spéciaux, munis d'écrans électrostatiques entre enroulements. Cet écran consiste en une feuille de métal (ou une grille de conducteurs) placée entre HT et BT, isolée de chacun de ces enroulements et reliée directement à la masse, qui dérive vers la terre (potentiel 0) toutes charges électriques transmises par CHT. Cela revient à court-circuiter le bras inférieur du diviseur de tension et par conséquent annule toute transmission capacitive (bien entendu, ces écrans électrostatiques doivent être étudiés pour ne pas constituer entre les deux enroulements une



spire en court-circuit).

On retiendra de ce qui précède que les surtensions transmises d'un enroulement HT vers la BT restent en général dans un domaine raisonnable, peuvent être maîtrisées Par des para-sur-tenseurs, que l'emploi d'écrans électrostatiques n'est efficace que contre des transmissions capacitives et ne se justifie réellement que dans des cas particuliers.

### **III-4-La tenue des transformateurs aux ondes de choc, de foudre : [12]**

#### **▼ La brièveté de la contrainte : [13]**

L'impulsion de foudre ayant une durée à mi-amplitude très courte a des effets destructeurs limités par rapport à ceux d'une contrainte à 50 Hz de même valeur de crête.

Le facteur d'impulsion =  $\frac{\text{Tenue au choc}}{\text{Tenue à 50 Hz. } \sqrt{2}}$  , se situe aux environs de 1,8.

De plus, lorsque le champ n'est pas parfaitement uniforme, des décharges partielles (analogues à l'effet couronne dans l'air) ont pour effet d'uniformiser le champ électrique et de retarder le claquage.

Cependant, dans des transformateurs, on s'astreint à réaliser des configurations de champs uniformes pour lesquels la tension de claquage ne dépend pas (ou peu) de la raideur de l'onde incidente, mais seulement de son amplitude.

#### **▼ Propagation de l'onde de surtension : [12]**

L'onde se propage le long de la ligne à une vitesse  $V = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  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 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. L'onde subit des modifications, si elle rencontre des obstacles au cours de sa propagation, par exemple :

- A l'extrémité d'une ligne ouverte, le courant s'annule et la surtension double.
- Sur une ligne en court-circuit, la tension s'annule et le courant double.
- A une bifurcation, il se produit une onde réfléchie sur la ligne d'arrivée et une onde

incidente affaiblie sur les départs.

-Lorsque l'onde passe d'une ligne aérienne à une ligne isolée, la tension de l'onde diminue et l'intensité augmente.

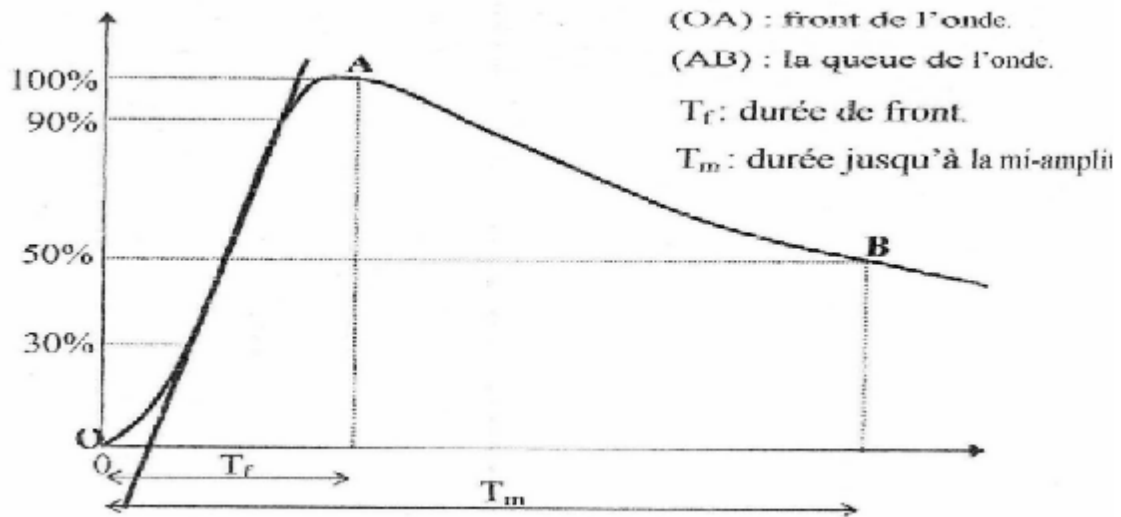


Figure III-15: onde de choc de foudre

#### ▼ Durée des surtensions : [12]

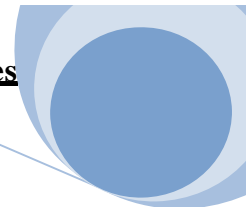
La tension de claquage dépend de l'amplitude et de la durée de l'application de la contrainte diélectrique, et c'est donc aussi sur la durée que se base la classification de celle-ci.

-Les études ont montré que les surtensions d'enclenchement dépassent la tension simple nominale de 2 à 5 fois, celle de déclenchement la dépassent de 7 à 8 fois, et les surtensions dues aux causes atmosphériques la dépassent de 7 à 12 fois. Les surtensions qui dépassent la tension de ligne de service de 2.5 fois sont considérées sans danger mais lorsqu'elle dépasse la tension de service 3.5 fois, elle présente un danger.

▼ Les surtensions qui arrivent aux bornes des transformateurs peuvent être limitées de différentes manières, beaucoup plus dangereuses sont des tensions qui naissent à l'intérieur des transformateurs. Lorsque l'onde électromagnétique se répartit le long de l'enroulement, les tensions entre les différentes bobines, de même entre les différentes spires de l'enroulement peuvent dépasser plusieurs fois la tension nominale en régime permanent de fonctionnement de transformateur. L'expérience montre que ce sont le plus souvent les spires qui se trouvent plus près des sorties du transformateur qui sont endommagées. Mais en général, les surtensions et les claquages de l'isolation peuvent avoir lieu en un point quelconque de

l'enroulement en fonction des caractéristiques de ce dernier. Le claquage de l'isolation entraîne la mise hors service de transformateur et la perturbation des conditions normales. Il faut bien voir en vue que les phénomènes qui accompagnent la propagation d'une onde de surtension dans un transformateur sont très complexes et ne peuvent être entièrement analysée mathématiquement. On est obligés d'adopté plusieurs hypothèses, les résultats obtenus ont toute fois permis de tirer plusieurs conclusions importantes et ont servi au développement d'un transformateur dit résistant.





### **III-5-La protection des autotransformateurs contre les surtensions atmosphériques :**

#### **III-5-1-Coordination de l'isolement : [13]**

La coordination de l'isolement a pour rôle de déterminer les caractéristiques de l'isolement des divers constituants des réseaux en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normale, ainsi qu'aux surtensions de diverse origine. Son but final est de permettre une distribution sûre et optimisée de l'énergie électrique.

#### **III-5-2-Principe de la coordination de l'isolement : [13]**

Etudier la coordination de l'isolement d'une installation électrique, c'est donc définir, à partir de niveau de surtension susceptible d'être présent sur cette installation un ou des niveaux contre les surtensions.

Le niveau de protection est déduit à partir des conditions d'installation, d'environnement et d'utilisation du matériel.  
L'étude de ces conditions permet le niveau de surtension qui pourra solliciter le matériel durant son utilisation.

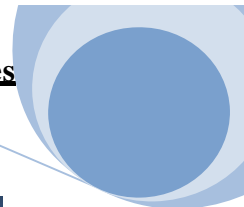
#### **III-5-3-But de la protection : [13]**

La protection sert à :

- Protéger le transformateur contre les perturbations extérieures.
- Préserver les réseaux connectés et l'environnement des effets de défauts se produisant dans le transformateur.

### **III-6-Les dispositif de protection contre les surtensions externes :**

Pour limiter les inconvénients dus aux surtensions atmosphériques, on utilise essentiellement la coordination des isolements en faisant appel à des éclateurs, des parafoudres et des fils de garde. La coordination des isolements consiste à ajouter la tension de tenue des équipements (ligne, transformateurs, autotransformateurs,.....) aux niveaux de surtensions susceptibles d'apparaître dans ces équipements de service, et afin de réduire le niveau de la surtension avant que l'onde de choc n'atteint l'appareillage critique, de cette manière la qualité de service va être améliorée.



**Figure III-15 : dispositifs de protection des transformateurs contre la foudre. [6]**

### III-6-1-Eclateurs : [14]

Les éclateurs sont constitués essentiellement par deux électrodes dans l'air, l'une reliées au conducteur à protéger et l'autre reliée à la terre, l'intervalle étant réglé pour amorcer si les surtensions du réseau dépassent le niveau de protection.

La forme des électrodes peut être très variable suivant le cas,

-Il peut s'agir simplement de deux tiges placées l'une en face de l'autre. C'est le cas particulier des éclateurs de protection montée sur les traversées des transformateurs à hautes tensions. Ces éclateurs simplifiés ne sont prévus qu'en ultime secours, pour le cas où des protections plus élaborées n'auraient pas joué leur rôle.

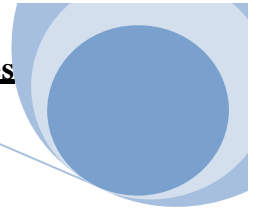


Figure III-16 : éclateur à deux tiges simple [15]

-Il peut s'agir d'éclateurs à cornes tels ceux utilisés sur les réseaux 20KV. Les éclateurs dits anti-oiseaux sont constitués de deux cornes destinées à provoquer un allongement de l'arc, entre lesquelles est placée une tige verticale empêchant un oiseau de court-circuiter les deux cornes.

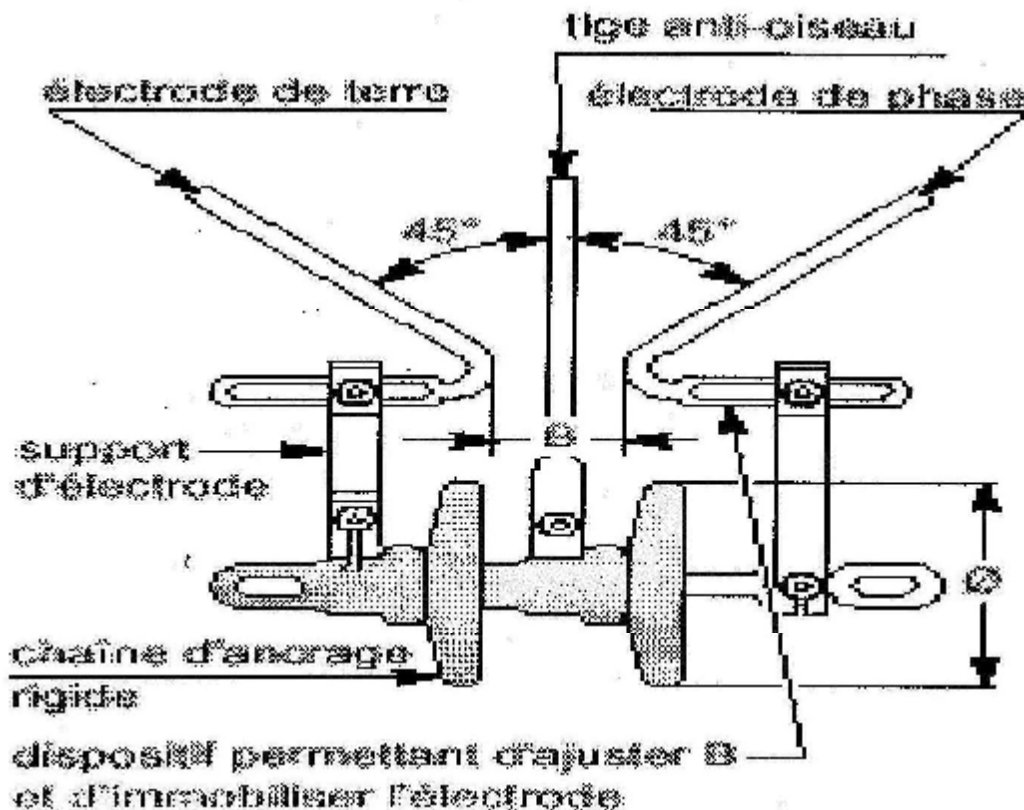


Figure III-17 : **Eclateur MT avec tige anti-oiseau** [22]

-Il peut s'agir, pour les lignes de transports à haute tension de dispositifs plus élaborés, les électrodes d'amorçage étant complétées par des anneaux destinées à éliminer les effluves d'effet couronne.

#### III-6-1-a-Tension d'amorçage d'un éclateur : [15]

La tension d'amorçage d'un éclateur dépend essentiellement :

- De la distance d'amorçage  $d$  (distance la plus courte dans l'air entre les extrémités des électrodes) ;
- Des contraintes atmosphériques (essentiellement de la densité de l'air) ;
- De la forme des électrodes et de leur effet de polarité (on cherche une forme telle que la dépendance de la polarité du choc soit aussi faible que possible) ;
- De leur situation par rapport à leur support et aux surfaces voisines conductrices et isolantes ;
- Se l'assure des électrodes (dépendant du nombre de fonctionnement antérieurs, des courants écoulés par l'arc et de leur durée.

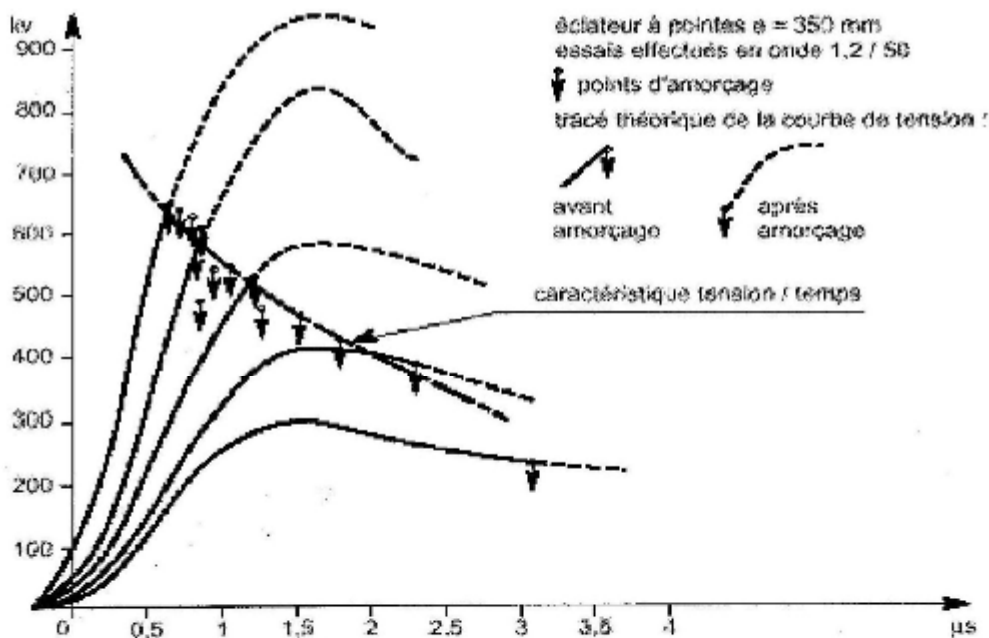


Figure III-18 : Comportement d'un éclateur à pointe, en choc de foudre normalisé, en fonction de la valeur de crête. [22]

- La tension d'amorçage caractérise le comportement de l'éclateur à fréquence industrielle.
- Le comportement de l'éclateur au choc de foudre es défini en onde normalisée,  $1,2\mu\text{s} / 50\mu\text{s}$  (figure III-18), pour la polarité qui donne la tension d'amorçage la plus élevée (an général c'est la polarité à point négative).

### III-6-1-b-Les avantages et inconvénients des éclateurs : [15]

- **Les avantages :**

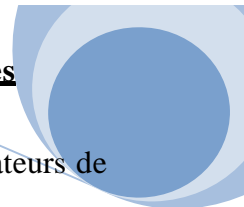
-le principe avantage de l'éclateur est son faible prix.

-il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ces caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction qu'ils ont à assumer : éclateurs de coordination d'un poste, ou éclateur d'ultime protection d'un transformateur.

- **Les inconvénients :**

**a**-En générale, les éclateurs ne se désamorcent pas d'eux-mêmes : ils provoquent donc une mise hors tension du réseau après chaque fonctionnement. De ce fait, ils ne peuvent pas être prévus pour protéger contre les surtensions de manœuvre.

**b**-Le fonctionnement d'un éclateur provoque une onde coupée à front raide. Il peut en découler :



- Des avaries du matériel bobiné placé au voisinage (en France, les transformateurs de distribution protégés par éclateurs sont prévus pour tenir aux ondes coupées) ;
- Des surtensions dues à des réflexions dans le cas de réseau aéro--souterrains.

**c-**Le temps entre le moment où la tension atteint le niveau de protection et le moment où l'éclateur amorce n'est en général pas négligeable.

Il s'ensuit qu'en front raide la tension réellement atteinte sur le réseau peut dépasser notablement le niveau de protection de l'éclateur. Ceci n'est pas une gêne dans la mesure où le retard à l'amorçage du matériel à protéger est au moins égal à celui de l'éclateur. Par contre, on peut craindre des contraintes d excessives dans les isolants solides.

**d-**Le niveau d'amorçage des éclateurs dépend fortement des conditions atmosphériques ; on a pu constater exceptionnellement des variations de niveau de plus de 40%. Ceci n'est pas une gêne dans la mesure où le niveau de tenue du matériel à protéger suit des variations analogues (cas des isolateurs dans l'air), mais ce phénomène peut provoquer des amorçages internes du matériel (disjoncteurs, transformateurs). Cependant, il est possible de stabiliser le niveau d'amorçage des éclateurs, soit par adjonction de matière radioactive (uranium naturel par exemple), soit en étudiant spécialement la forme des électrodes de façon à provoquer une ionisation de l'air dans l'intervalle d'amorçage.

**e-**Le givre peut s'accumuler sur les électrodes de l'éclateur, diminuant la distance d'amorçage, et provoquer des fonctionnements intempestifs. Etant donné que les surtensions atmosphériques n'apparaissent pas pendant les périodes de givre, il est possible d'éloigner les électrodes. Cependant, outre les sujétions que ces réglages saisonnières imposent à l'exploitant, on peut toujours craindre que le réglage n'ait pas la précision désirable, d'où une protection défectueuse

### **Remarque :**

L'éclateur demeure le dispositif de protection privilégié sur les réseaux de distribution et de transport d'électricité (jusqu'à 225 KV) malgré ses défauts et surtout à cause de son faible prix. Il reste un excellent moyen de protection des isolations dans l'air, les niveaux d'isolement du matériel à protéger subissant les mêmes fluctuations que les niveaux de protection des éclateurs. En revanche, il est moins bien adapté à la protection des transformateurs, on est alors amené à le remplacer par les parafoudres.

### **III-6-2-Parafoudre :[16]**

#### **III-6-2-a-Définition :**

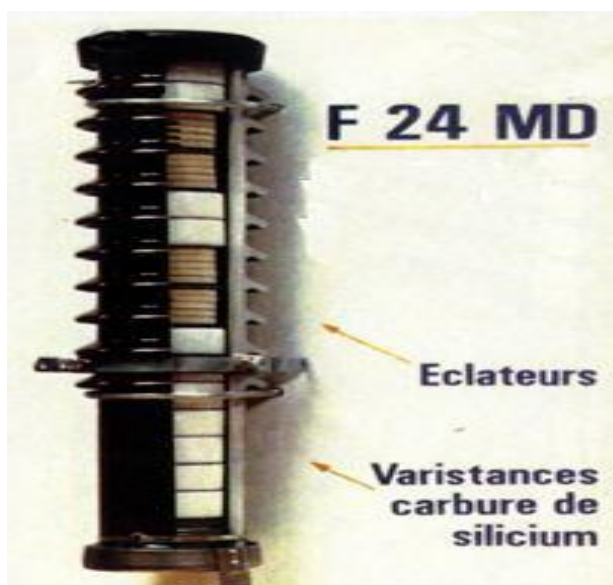
Les parafoudres sont des appareils conçus pour écouler une onde de courant lorsque la

surtension arrive à leurs bornes, maintenant ainsi la surtension dans certaines limites. Ils limitent eux-mêmes l'amplitude du courant, que le réseau continu de débiter à travers eux après le passage de l'onde de surtension, sans que, généralement, les disjoncteurs de ce réseau aient à fonctionner.

### **III-6-2-b-Les principaux types des parafoudres :[16]**

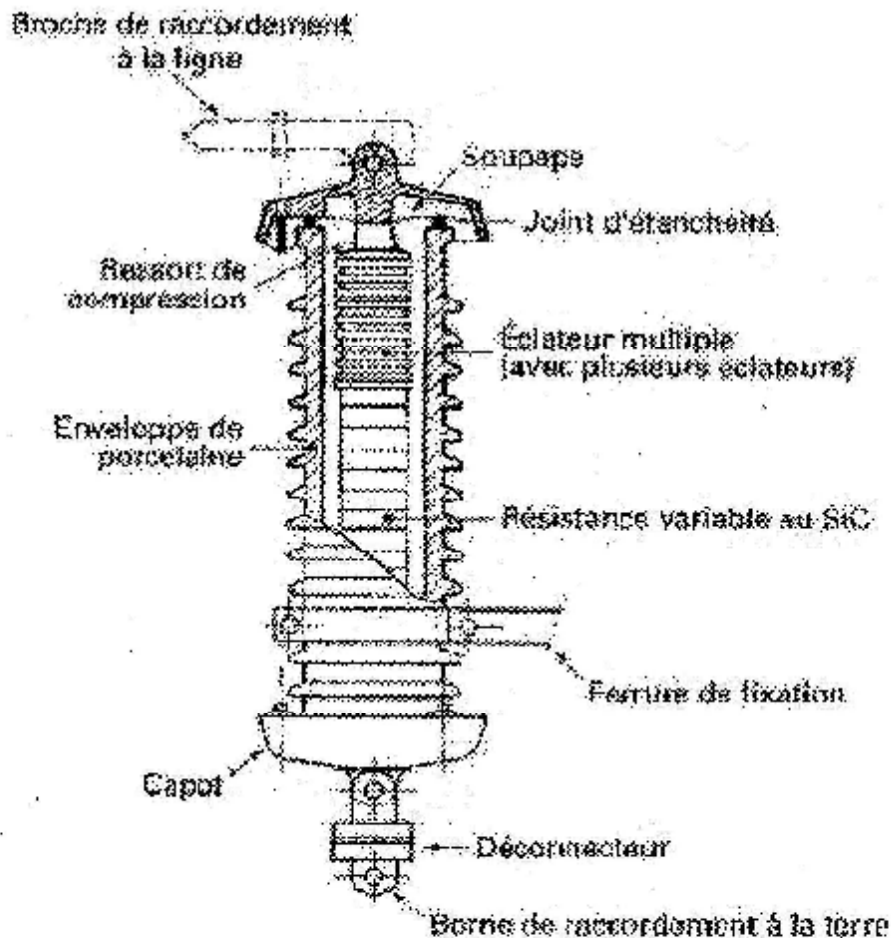
Il existe plusieurs types de parafoudres. Actuellement, les types les plus répandus sont les parafoudres à résistances variables et éclateurs, et les parafoudres à oxyde de zinc.

#### **III-6-2-b-1-Parafoudres à carbure de silicium et éclateurs :**



**Figure III-19 : Parafoudres à carbure de silicium et éclateurs [21]**

Ils sont constitués d'une ou plusieurs varistances, au carbure de silicium, associées avec un ou plusieurs éclateurs. En haute tension, des diviseurs résistifs ou capacitifs sont incorporés au parafoudre afin d'assurer une répartition correcte de la tension appliquée entre les divers éléments de l'appareil. L'ensemble étant placé à l'intérieur d'une enveloppe étanche.



**Figure III-20 : Parafoudre HT au carbure de silicium et éclateurs : constitution.**

Lorsque la surtension atteint le niveau d'amorçage des éclateurs, ils s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les varistances vers la terre. Les valeurs de ces résistances diminuent rapidement lorsque la tension augmente. L'intensité du courant croît donc plus vite que la tension et celle-ci ne peut atteindre les valeurs qu'elle aurait en absence du parafoudre.

Après le passage de l'onde du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre décroît, mais le non linéarité des résistances entraîne une décroissance plus rapide du courant. Une fois la tension revenue à la normal de réseau, le courant se trouve donc limité à une intensité assez faible dit courant de suite de fréquence industrielle qui peut être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro, et même avant. [18]

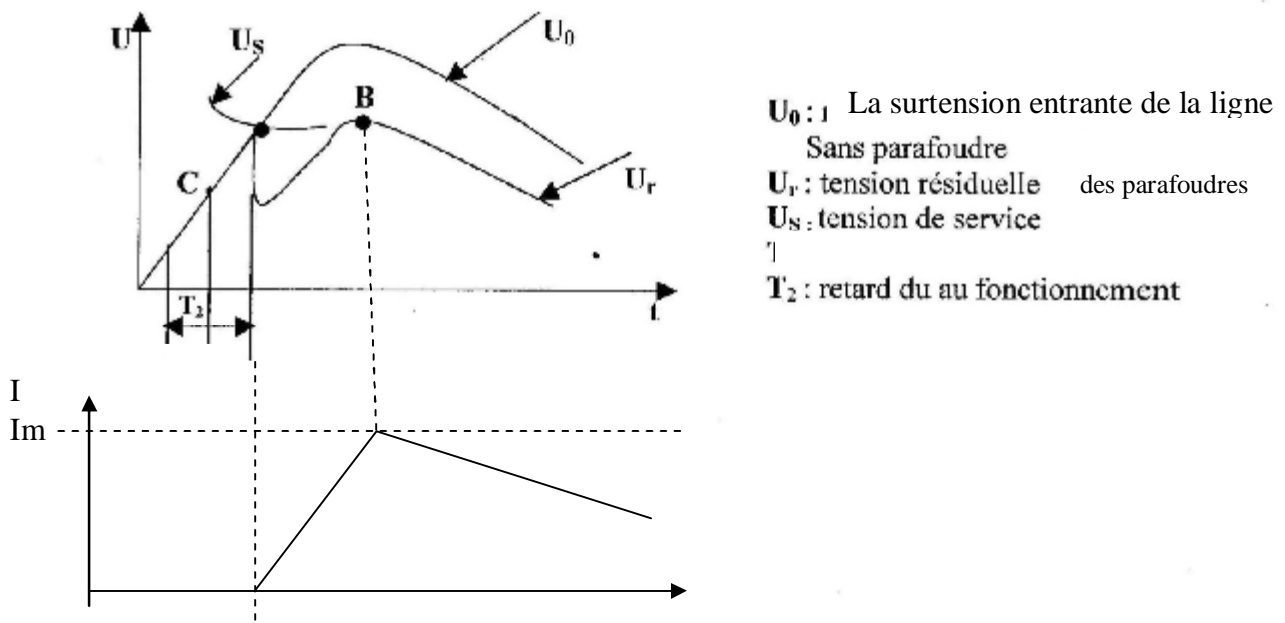


Figure III-21: Principe de fonctionnement d'un parafoudre Sic

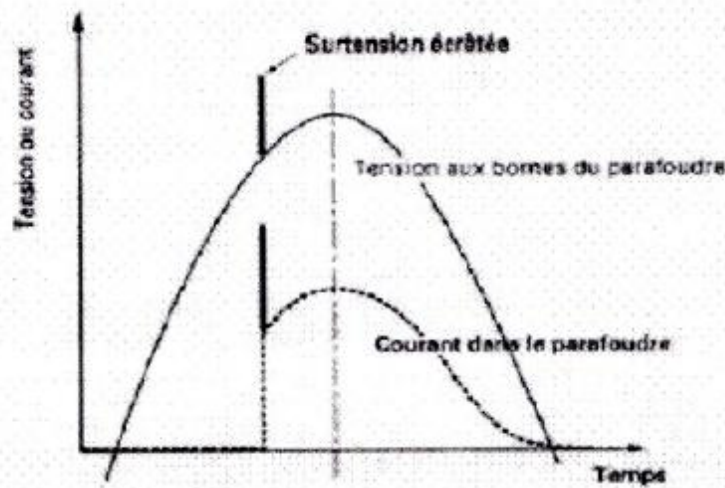
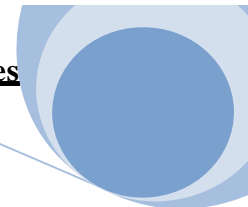


Figure III-22 : principe de fonctionnement du parafoudre au carbure de silicium



III-6-2-b-2-Parafoudre à oxyde de zinc :[16]



Figure III-23 : Parafoudre à oxyde de zinc [21]

✓ **Constitution :**

Ils sont constitués de varistances à oxyde de zinc. Par fois, en haute tension, ils comportent quelques capacités additionnelles en parallèle sur les varistances, destinées à améliorer la répartition de la tension le long de la colonne de varistances. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou en matière synthétiques.

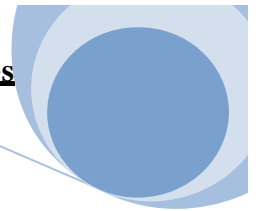
✓ **Principe de fonctionnement :**

L'absence d'éclateurs fait que le parafoudre à ZnO est continuellement conducteur mais, sous la tension nominale du réseau à protéger, avec un courant de fuite vers la terre très faible (inférieur à 10mA).

Leur principe de fonctionnement repose sur la caractéristique fortement non linéaire de la céramique à ZnO. Ce non linéarité est tel que la résistance passe de 1.5MΩ à 15Ω entre la tension de service et la tension au courant maximal de décharge [18].

Lorsqu'une surtension apparait, la résistance diminue rapidement créant ainsi un chemin préférentiel pour écouler le courant correspondant vers la terre.

Le non linéarité est tel que le courant traversant la varistance passe de 0.11mA à 10÷ 15KA



(pour les différentes tensions nominale).

Crête KV

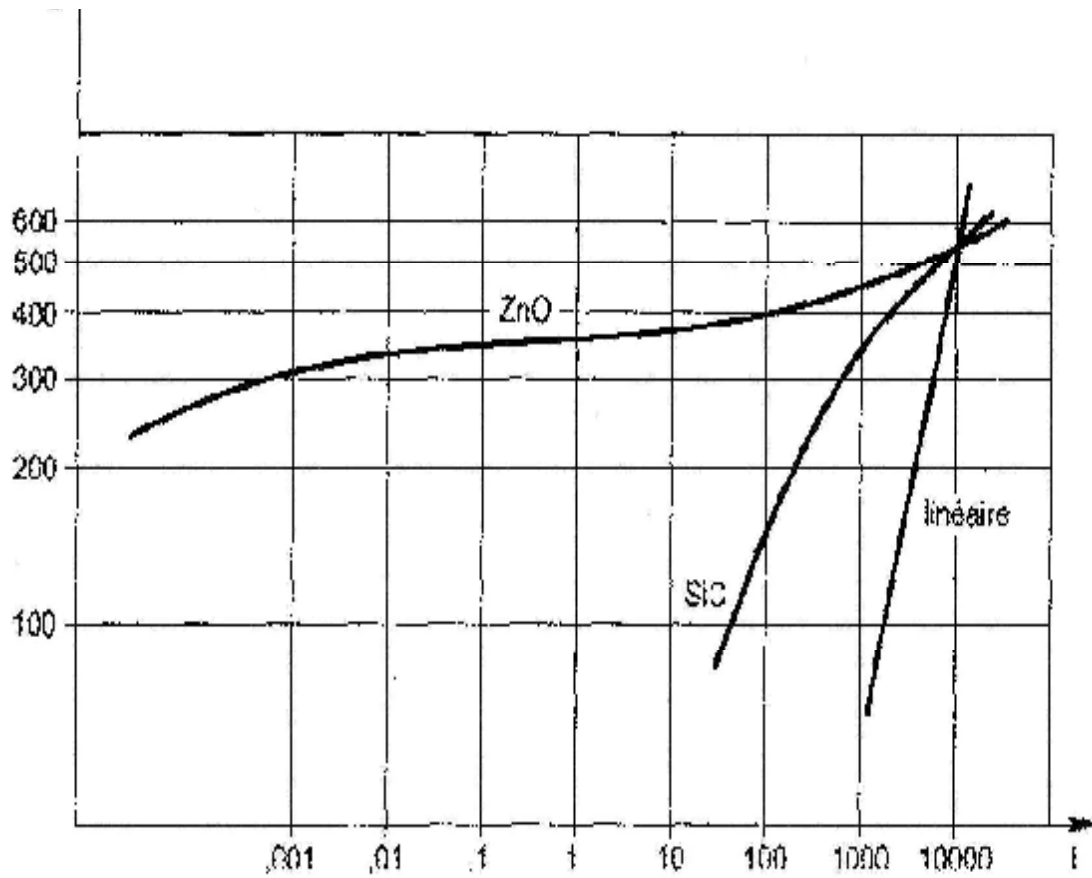


Figure III-24 : Caractéristique de deux parafoudres de tension nominale de 110 KV ayant le même niveau le même niveau de protection. [22]

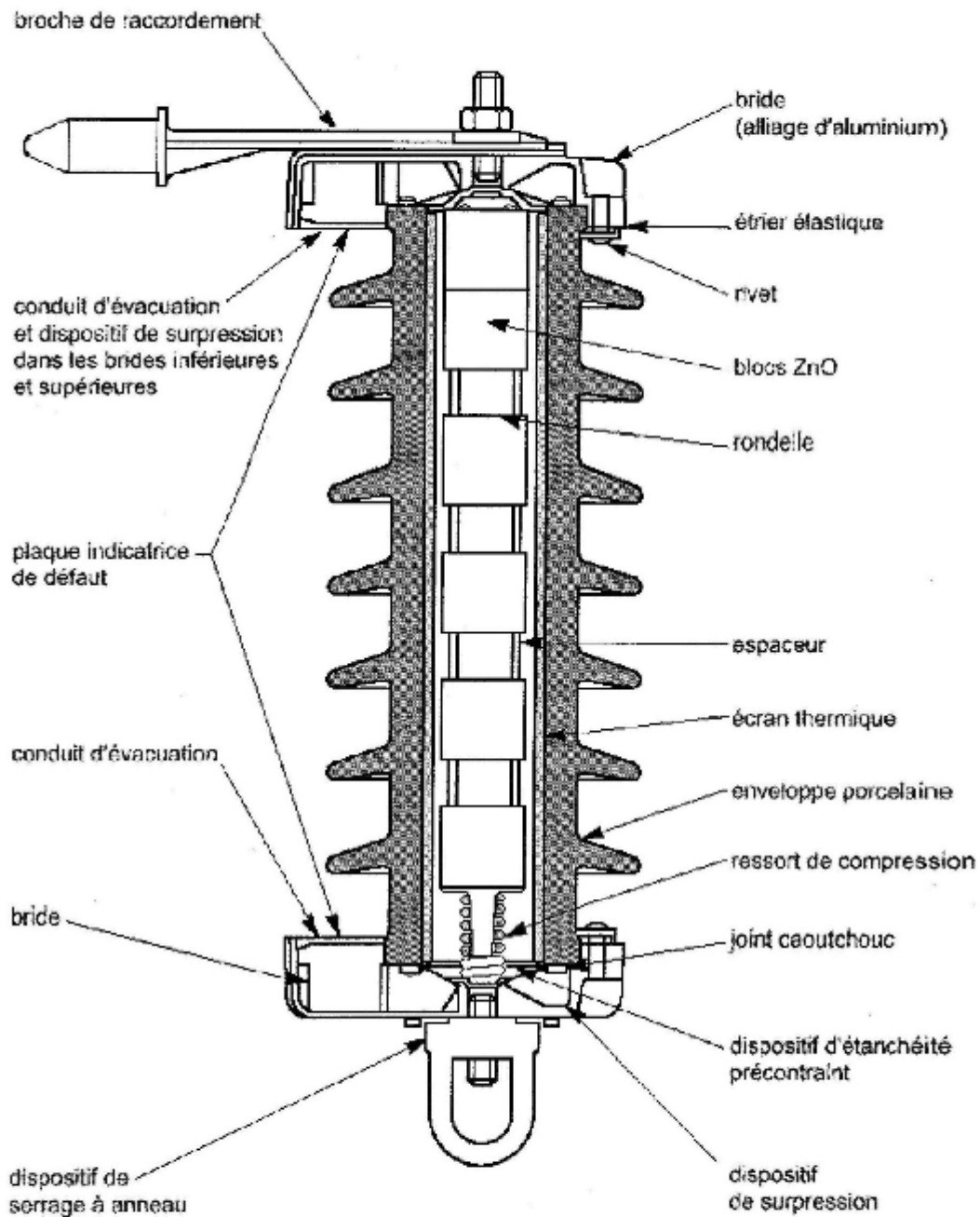


Figure III-25 : Exemple de structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine

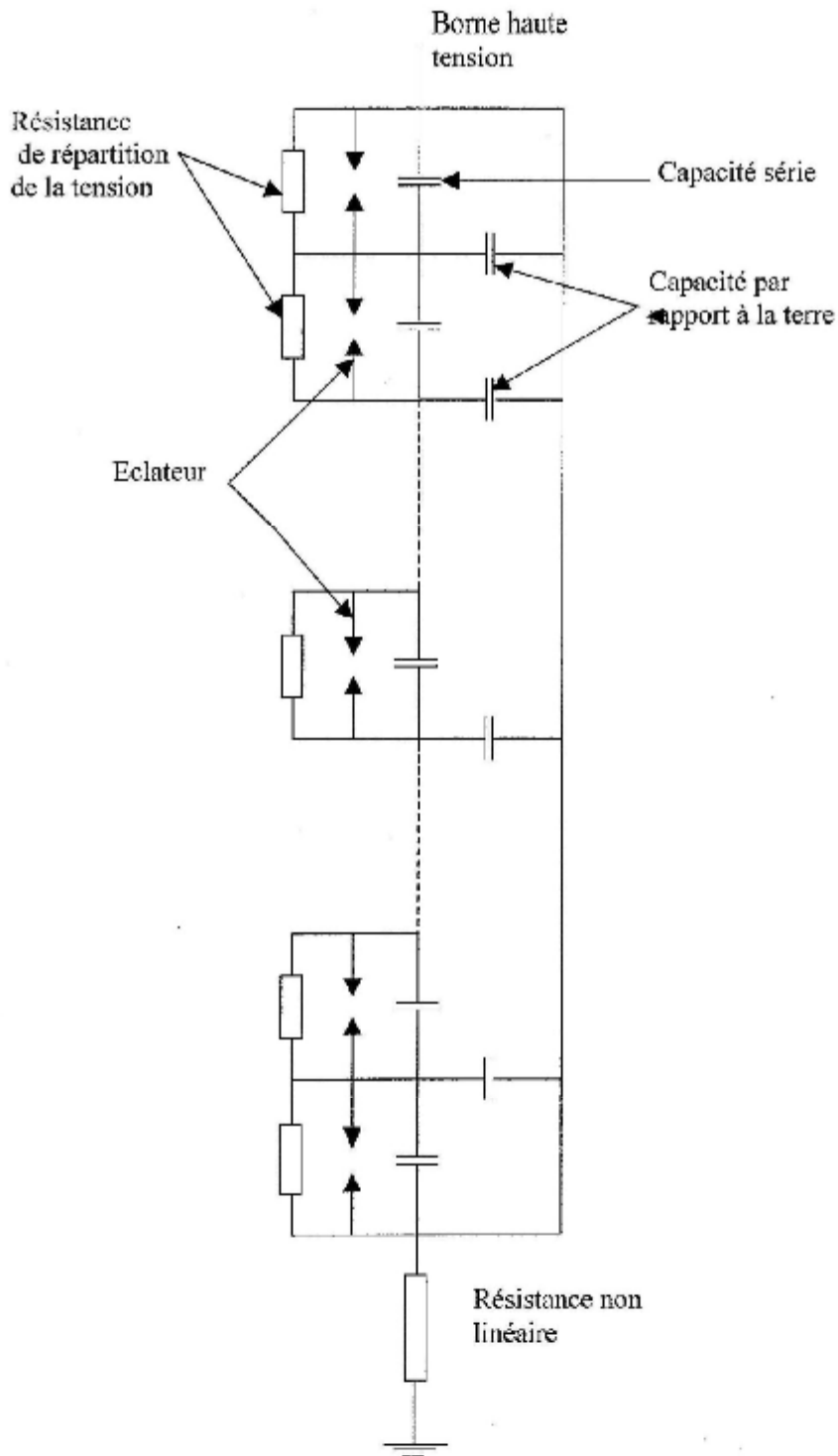
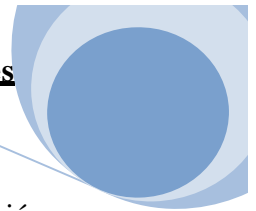


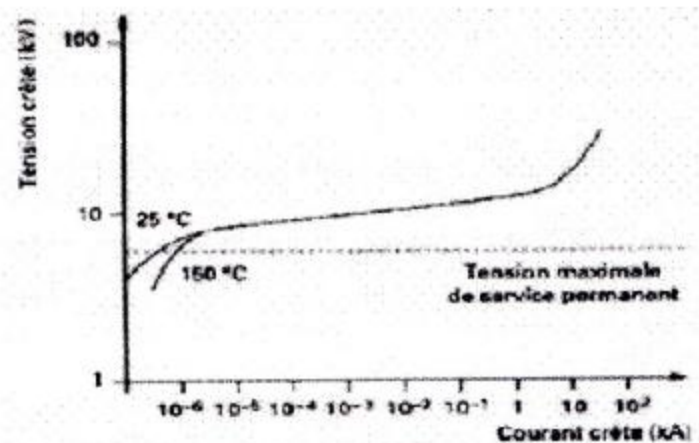
Figure III-26 : Schéma équivalent d'un parafoudre avec répartition imposée de la tension



**III-6-2-b-3-Parafoudre à oxyde de zinc et à enveloppe synthétique :**

Les progrès technologiques dans le domaine des isolations externes associés aux nouvelles perspectives de mise en œuvre des varistances ( ZnO) ont permis, le développement d’une nouvelle génération de parafoudre, visant à mieux exploiter les avantages de la technologie (ZnO) tout en remplaçant l’enveloppe de porcelaine par une enveloppe synthétique, soit directement moulée sur la colonne de varistance, soit management une couche d’air entre l’enveloppe et la colonne de varistance. La tenue mécanique du parafoudre assurée par un enrobage de fibre de verre autour des varistances.

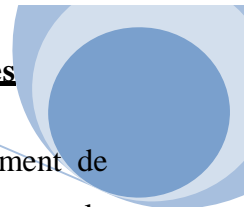
Les avantages principaux du parafoudre à enveloppe synthétique par rapport au parafoudre à enveloppe de porcelaine sont : une conception, une plus grande légèreté, une meilleure étanchéité et un comportement plus favorable en cas de défaillance interne (court-circuit).



**Figure III-27 : caractéristique typique courant - tension d’une varistance à oxyde de zinc**

**✓ Principe de fabrication des céramiques (pastilles à ZnO) : [17]**

Les céramiques sont constituées principalement d’oxyde de zinc (90% en masse) et d’un mélange d’autres oxydes (oxyde de : bismuth, cobalt, manganèse, de chrome et d’étain). Ces différents oxydes, de pureté et de granulométrie soigneusement contrôlés sont mélangés en phase aqueuse. Le mélange obtenu est en suite séché, traité thermiquement (vers 700°C), puis broyé après y avoir introduit des liants organiques, la poudre est compactée sous forme de disques. Les pièces ainsi obtenues sont traitées thermiquement à une température de l’ordre de 600°C à fin d’éliminer les liants organiques, puis elles sont frittées à très haute température (1200°C) de façon à densifier l’ensemble et à obtenir l’effet de non linéarité recherché.



Les pastilles sont ensuite revêtues, sur leurs pourtour, d'une couche généralement de nature vitreuse, qui favorise la tenue à long terme, puis d'une couche de résine, assurant la tenue diélectrique des varistances.

Elles sont également métallisées, sur chaque une des faces parallèles par projection d'aluminium en fusion [16].

### **III-6-2-c-Dimensionnement des parafoudres :[17]**

Le dimensionnement de ces parafoudres nécessite la connaissance des conditions de vieillissement et de variation des caractéristiques, sous contraintes thermiques et électriques permanentes, des céramiques.

D'une part, à toute onde de courant correspond une tension résiduelle directement proportionnelle aux nombres de céramique mises en série. La recherche d'un bas niveau de protection limite donc le nombre de varistances à associer en série ; d'autre part le phénomène de vieillissement est d'autant plus sensible que la tension appliquée à chaque élément est important ; à tension de service donnée, cela impose un nombre minimal de varistances à placer en série. Par ailleurs, le parafoudre doit être capable, en toutes circonstances de dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie qui apparaît entre ses bornes.

Si l'on représente sur une même courbe (figure III-28) en fonction de la température d'une part, la puissance  $P_v$  dissipée par les varistances (donc à dissiper par le parafoudre) et d'autre part, la puissance  $P_p$  que peut dissiper ce parafoudre, on en déduit qu'à l'équilibre le pont de fonctionnement se situe en A. lors de l'écrêtage d'une surtension l'échauffement des varistances est adiabatique. Le point de fonctionnement se déplace sur la courbe  $P_v=f(T)$ .

Si le nouveau point de fonctionnement se situe en A' la puissance dissipée est inférieure à la puissance dissipée par le parafoudre, le parafoudre peut donc se refroidir et le point de fonctionnement revient en A.

En revanche, si l'échauffement des varistances est tel que le point de fonctionnement soit en A'', la puissance à dissiper est supérieure à la puissance dissipée par le parafoudre et c'est l'emballement thermique.

L'échauffement des varistances doit donc être limité à  $\Delta T_{MAX}$ . Cette limite se fait respecter en agissant de deux façons :

- Soit réduire la puissance dissipée par les varistances, en augmentant le nombre de pastilles en série, c'est-à-dire en augmentant le niveau de protection.
- Soit augmenter la puissance dissipée par le parafoudre donc la capacité thermique (c'est-à-dire diminuer, à puissance constante, l'augmentation de température), en choisissant des varistances de diamètre plus important ou, ce qui revient de même, en multipliant le nombre

de varistances mise en parallèle.

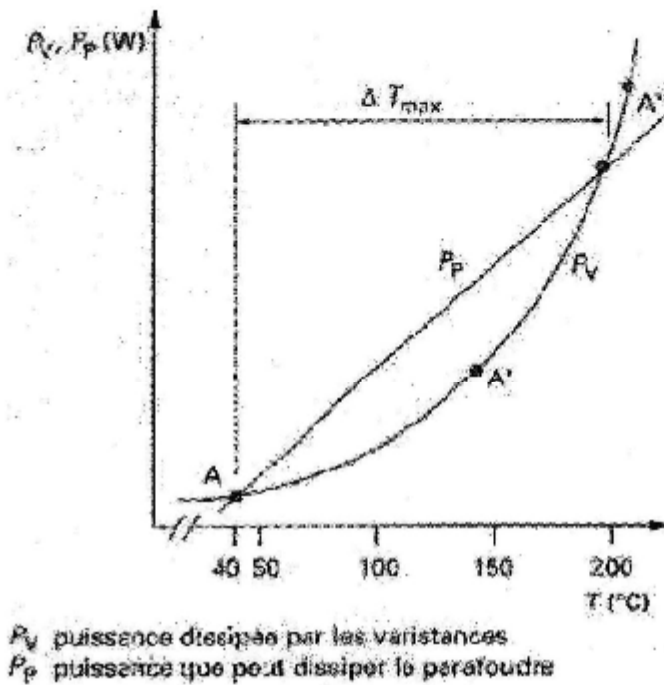


Figure III-28 : Fonctionnement et équilibre thermique d'un parafoudre à ZnO.

III-6-2-d-Le câblage et la distance de protection des parafoudres :

Les parafoudres sont généralement placés sur les jeux de barres des postes et sur les bornes de traversées des transformateurs.

La zone protégée par le parafoudre est limitée, il doit être installé à une distance prédéterminée (quelques dizaines de mètres) de l'élément protégé. La distance maximale entre le parafoudre et le poste de transformation ou le transformateur à protégé est directement liées au rapport entre le niveau de protection du parafoudre et le niveau d'isolement du transformateur [16].

Pratiquement le câblage est réalisé comme l'indique les figures (III-29) et (III-30).

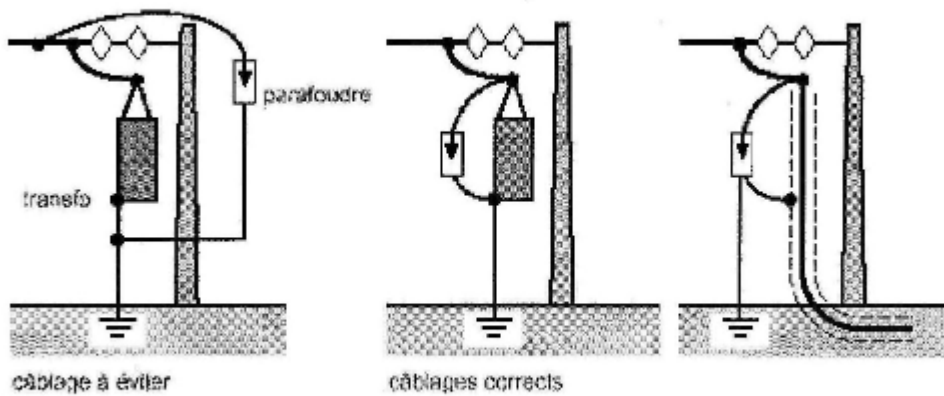
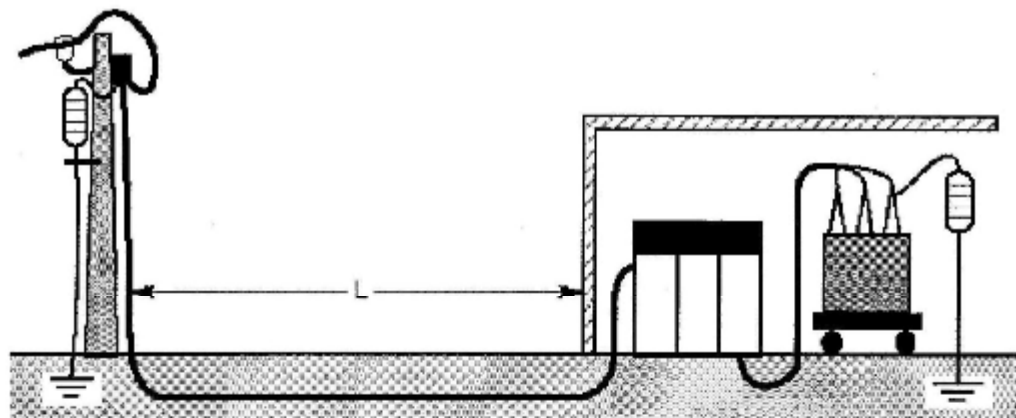


Figure III-29 : Principe de câblage des parafoudres : les connexions charges - parafoudres doivent être les plus courtes possible.



si  $L < 25 \text{ m}$  : un limiteur de surtension placé sur le poteau est suffisant  
 si  $L \geq 25 \text{ m}$  : un deuxième limiteur aux bornes du transformateur est nécessaire

Figure III-30 : Protection d'un poste alimenté par un réseau aérosouterrain.



**Figure III-31 : protection d'un poste alimenté par un réseau aéro-souterrain [21]**

### **III-6-2-e-Les grandeurs caractéristiques des parafoudres : [17]**

#### **✓ Les tensions d'amorçages :**

On considère généralement la tension 0% d'amorçage et 100% d'amorçage, en choc de foudre et en choc de manœuvre ainsi que la tension d'amorçage à fréquence industrielle.

#### **✓ La tension d'extinction :**

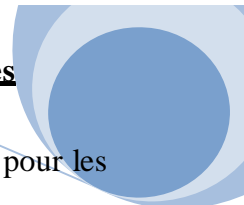
C'est la tension alternative maximale, pour lequel le parafoudre est capable de couper spontanément le courant à fréquence industrielle, après amortissement de surtension. Ce courant est dit « courant de suite ».

La tension d'extinction sert à la définition de la tension nominale du parafoudre, avec lequel elle se confond généralement.

Le rapport caractéristique de la performance d'un parafoudre est le rapport :

-tension 100% d'amorçage à la foudre (valeur crête).

-tension d'extinction spontanée (valeur efficace).



Ce rapport est avec, les appareils actuels, de l'ordre de 3 et peut descendre à 2, 3 pour les appareils les plus performants à soufflage magnétique.

### **✓ la tension résiduelle:**

Est la tension maximale qui apparaît aux bornes du parafoudre lorsque celui-ci écoule le courant nominal de décharge.

### **✓ le courant nominal de décharge :**

Est le courant de choc, de forme  $8/20\mu s$ , que l'on utilise pour vérifier les performances d'un parafoudre. Ce courant d'amplitude 2.5 KA, 5KA ou 10KA sert aussi à définir la tension résiduelle du parafoudre.

On utilise aussi quelque fois des ondes de courant de forme  $4/10\mu s$ , et de valeur de crête 100KA, 65KA ou 25KA.

Enfin pour éviter la capacité d'un parafoudre à supporter la décharge d'une ligne longue, on utilise l'onde de longue durée. C'est une onde rectangulaire de courant dont l'amplitude peut varier entre 50 te 150A, et la durée entre 500 et 2000 $\mu s$  [8].

### **III-6-2-f-Le niveau de protection d'un parafoudre :**

Est par définition, le plus élevé des quatre niveaux de tension suivants :

- tension 100% d'amorçage au choc de foudre (onde  $1.2/50\mu s$ ).
- tension d'amorçage au choc sur front d'onde, divisée par 1.2
- tension résiduelle au courant nominal de décharge
- valeur de crête la plus élevée de la tension d'amorçage à fréquence industrielle, parfois divisée par 0.9

On préfère maintenant caractériser par des courbes la protection apportée par le parafoudre :

- courbe tension-temps d'amorçage en onde de tension (volt-seconde)
- courbe de la tension résiduelle en fonction du courant de décharge (volt-ampere)
- et pour les parafoudres de tension nominale élevée (100KV et plus), courbe tension-temps d'amorçage en choc de manœuvre.

### **III-6-3-Les fils de garde : [18]**

Dans les centrales hydrauliques les élévateurs sont placées d'habitude sur les barrages, dans ce cas la distance entre le transformateur et le jeu de barre atteint quelque centaines de mètres (1÷ 3) mètre, la ligne de connexion du transformateur avec le jeu de barre est protégé par le fil de garde, ou par les parafoudres installés séparément.

Plusieurs fois, cette connexion est faite par les câbles. Un bout de câble est connecte

directement aux bornes de transformateur, c'est pour cette raison qu'il est impossible de connecter le parafoudre sur ce point, il est donc connecté à l'autre bout de câble.[14]



Figure III-32 : fil de garde [21]

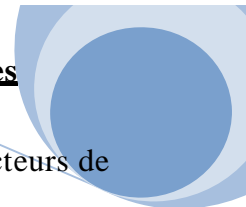
### III-6-3-1-Rôles du câble de garde : [12]

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 :**

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.

- **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.

### **III-7-Choix des moyens de protection : [19]**

Nous avons vu que, en ce qui concerne les lignes aériennes, il n'avait pas de protection possible contre la foudre, sauf par la mise en place de câbles de garde. Par contre, les lignes constituent une sorte de pré-protection pour les postes, en ce sens qu'elles limitent l'énergie des contraintes atmosphériques pénétrant dans ceux-ci. Toutefois, dans de nombreux cas (postes en antennes et petites postes, matériel placé du côté de la ligne lorsque celle-ci est ouverte), cette protection n'est plus suffisante. On la complète par des éclateurs ou par des parafoudres à expulsion.

#### **III-7-1-Utilisation des éclateurs :[8]**

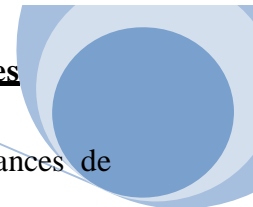
La protection par éclateurs contre les surtensions atmosphériques sera évidemment d'autant plus efficace que la tension d'amorçage sera limitée. La limite inférieure est imposée par la nécessité absolue de n'amorcer en aucun cas à la tension de service, surtension temporaire ou au moment d'une surtension de manœuvre doit resté extrêmement faible.

Entre la tension de protection  $U_P$  assurée par l'éclateur et la tension de tenue  $U_t$  du matériel à protéger doit exister une certaine marge de sécurité, qui tient compte de plusieurs facteurs : courbe tension-temps et dispersion de fonctionnement de l'éclateur, son emplacement par rapport au matériel à protéger, type de matériel à protéger.

Le rapport  $U_T/U_P$  varie, selon les cas, entre 1.2 et 1.5.

Le tableau A récapitule les distances de réglage, les tensions de protection et les tensions de tenue pour les réseaux de tension  $\leq 420KV$ .

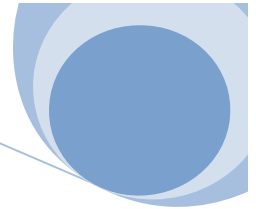
Aux tensions supérieures, l'utilisation des éclateurs n'est plus guère possible, principalement en raison du rapport : tenue au choc/tenue aux surtensions de manœuvre, qui devient trop élevé.



La condition de tenue aux surtensions de manœuvre entraîne alors des distances de réglages telles que la protection au choc n'est souvent plus efficace.

Matériel à protéger		Eclateur			
Tension nominale d'isolement (valeur efficace) KV	Tension de tenue au choc KV	Distance Cm	Tension d'amorçage (valeur de crête) KV		Type
12	75	2×1.5	45	60	à cornes anti-oiseau
17.5	95	2×2	60	80	
24	125	2×3.5	75	95	
36	170	2×6	95	135	
52	250	20	130	200	à cornes simples
72.5	325	28	160	250	à tiges
100	450	40	210	330	
170	750	65	350	500	
245	1050	90	460	660	
	1425	180	780	1150	
420	11550	200	850	1280	

**Tableau A: Caractéristiques de réglage des éclateurs de protection placés à l'entrée des postes [8].**



### III-7-2-Utilisation des parafoudres : [19]

Le paragraphe consacré aux parafoudres a montré les avantages attachés à leur emploi. Signalons ici qu'en outre, grâce à leur réponse en fréquence généralement meilleures que celle des éclateurs (courbe tension-temps plus plate), l'absence de la raideur forte autorisent un rapport : tension de tenue au choc du matériel/tension de protection, plus faible ; ce rapport ne dépasse qu'exceptionnellement 1.25.

D'autre part, l'amélioration du rapport caractéristique du parafoudre : tension de protection/tension nominale, permet d'abaisser le niveau de protection lui-même. Enfin, les parafoudres de l'avenir seront capables d'absorber l'énergie des surtensions de manœuvre, ce qui permettra un nouveau gain dans l'écrêtages des surtensions d'un réseau.

En France, on utilise les parafoudres pour la protection du réseau à 420KV. Pour les réseaux à 245KV et à tension inférieures, on préfère, pour des raisons d'économie, l'emploi des éclateurs, réservant les parafoudres à certaines parties de réseaux situées en zones très foudroyées.

### III-8-Zone de protection d'un dispositif de protection : [19]

Du fait des phénomènes de propagation, deux points d'un même conducteur, séparés par une distance  $l$ , peuvent ne pas être, à un instant donné, au même potentiel ; la différence entre les deux potentiels est d'autant plus importante que la variation de tension  $dU/dt$ , la raideur de l'onde mobile est grande. Il s'ensuit que la surtension réellement appliquée à un objet protégé par un éclateur ou un parafoudre peut, dans certains cas, dépasser la valeur de la protection d'un dispositif de protection.

La distance entre l'objet à protéger et le dispositif de protection doit être réduite que possible, notamment vis-à-vis des fronts raides des surtensions atmosphériques.

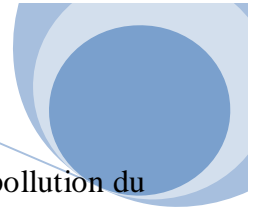
$$U_p = U_{\text{resid}} + \Delta U \quad (\text{III-1})$$

### III-9-Relation entre mode d'exploitation d'un réseau et choix des isolements : [19]

Une fois la tension nominale d'un réseau fixée, on examine, en fonction de la structure de ce réseau, des règles de mise à la terre adoptées pour les neutres, des caractéristiques des machines tournantes, des impératifs d'exploitation, les tensions maximales permanentes possibles et les surélévations temporaires que l'on peut attendre.

Cette étude du réseau conduit à fixer certaines valeurs, selon des considérations communes à toutes les classes de tensions. Ce sont les suivants :

-la longueur des lignes de fuite à prendre en compte pour les traversées de transformateurs, les supports des jeux de barres, les supports de l'appareillage de poste (sectionneurs, disjoncteurs)



et les chaînes d'isolateurs des lignes. Elle sera choisie en fonction de la sévérité de la pollution du site considéré. La tension de référence est ici la tension maximale permanente, entre phase et terre. Notons que, jusqu'à présent on testait les lignes de fuite par un essai sous pluie artificielle :

L'élément essayé était réputé satisfaisant s'il subissait avec succès l'épreuve d'une minute au niveau de tenue à fréquence industrielle retenu pour le réseau considéré. Notons encore que les distances d'isolement dans l'air ne sont pas, en général, conditionnées par les contraintes à fréquence industrielle ;

-la tension nominale des parafoudres lorsqu'on a décidé d'en utiliser. Cette tension nominale est définie par les surélévations temporaires de tension les plus élevées, qui risquent d'apparaître au point d'installation des parafoudres. Il est en effet indispensable que la tension nominale de ceux-ci soit supérieure à ces surtensions temporaires, car l'amorçage d'un parafoudre dans ces conditions entraîne sa destruction certaine. On voit donc que, le cas d'un réseau protégé par parafoudre, la coordination rationnelle de ses isolements s'échafaude, en fait, à partir des surtensions temporaire ;

-le niveau de tenue à fréquence industrielle. En dehors des points communs précédents, et en ce qui concerne le choix du niveau de tenue proprement dit (c'est-à-dire la tension à fréquence industrielle, appliquée pendant une minute, que le matériel doit tenir avec succès), les doctrines divergent assez fortement, selon les classes de tensions considérées. Ces doctrines sont liées à l'importance que l'on donne à d'autre essai, tels que les essais aux chocs de manœuvre ou aux décharges partielles.



Plusieurs expériences ont été faites sur les transformateurs soumis à différentes formes d'ondes impulsionnelle, ce qui permet d'établir des relations empiriques pour un calcul des paramètres du schéma équivalent du transformateur. Ce dernier qui a la particularité de posséder en plus du schéma de la ligne, des inductances mutuelles  $M$  et des capacités longitudinales  $K$  et cela à cause de la concentration des spires de l'enroulement malgré sa grande longueur.

#### **IV-1- Caractéristique de l'autotransformateur :**

Notre étude sera portée sur un autotransformateur du type AT- 63000 /220/110, dont les indications sont les suivantes :

##### **IV-1-1- Caractéristiques électriques :**

$$S_n = 63 \text{MVA} ;$$

$$U_{nHT} = 230 \text{KV} ;$$

$$U_{nMT} = 121 \text{KV} ;$$

$$U_{CCH-M} = 11\% ;$$

$$U_{CCH-B} = 35\% ;$$

$$U_{CCM-B} = 22\% ;$$

$$\Delta P_{CC} = 200 \text{KW} ;$$

$$\Delta P_0 = 37 \text{KW} ;$$

$$I_0 = 0.4\% .$$

##### **IV-1-2- Caractéristiques géométriques:**

$$d_{HText} = 1692 \text{mm} \text{ (diamètre extérieure de l'enroulement haute tension) ;}$$

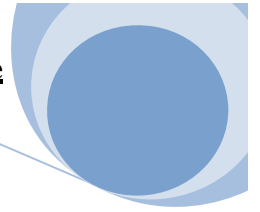
$$d_{HTint} = 1410 \text{mm} \text{ (diamètre intérieure de l'enroulement haute tension) ;}$$

$$d_{MText} = 1292 \text{mm} \text{ (diamètre extérieure de l'enrouement moyenne tension) ;}$$

$$d_{MTint} = 990 \text{mm} \text{ (diamètre intérieure de l'enrouement moyenne tension) ;}$$

$$d_{noy} = 930 \text{mm} \text{ (diamètre de noyau) ;}$$

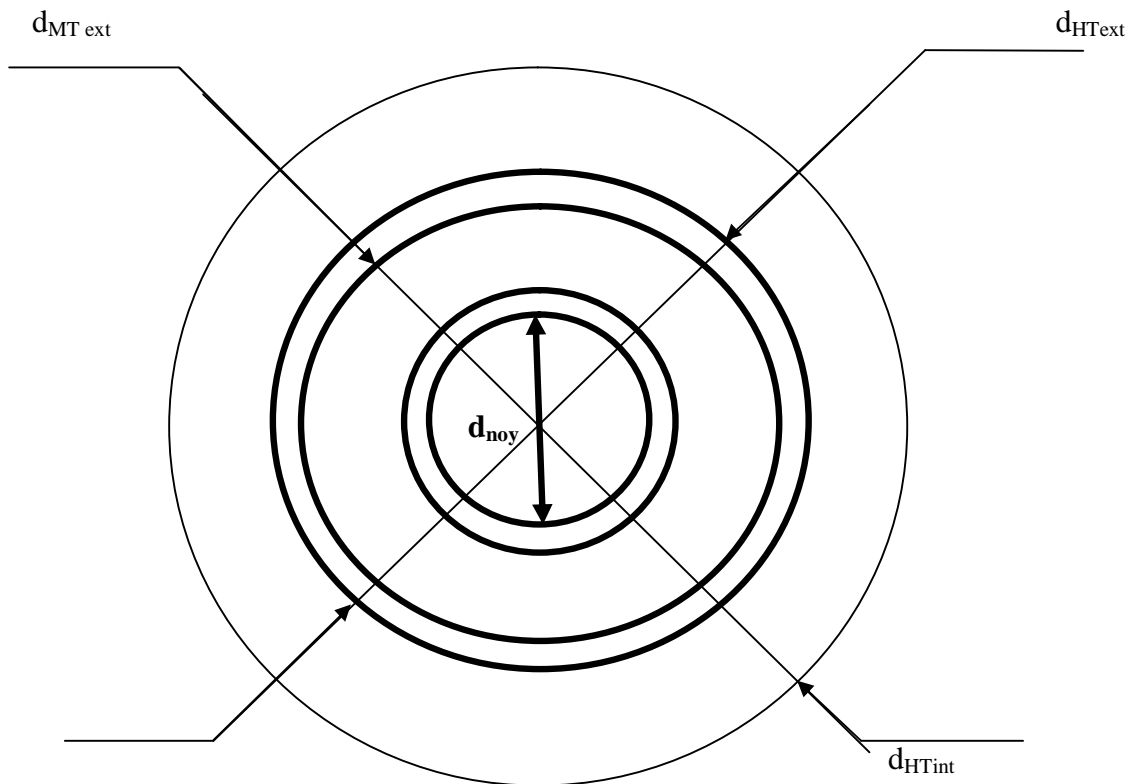
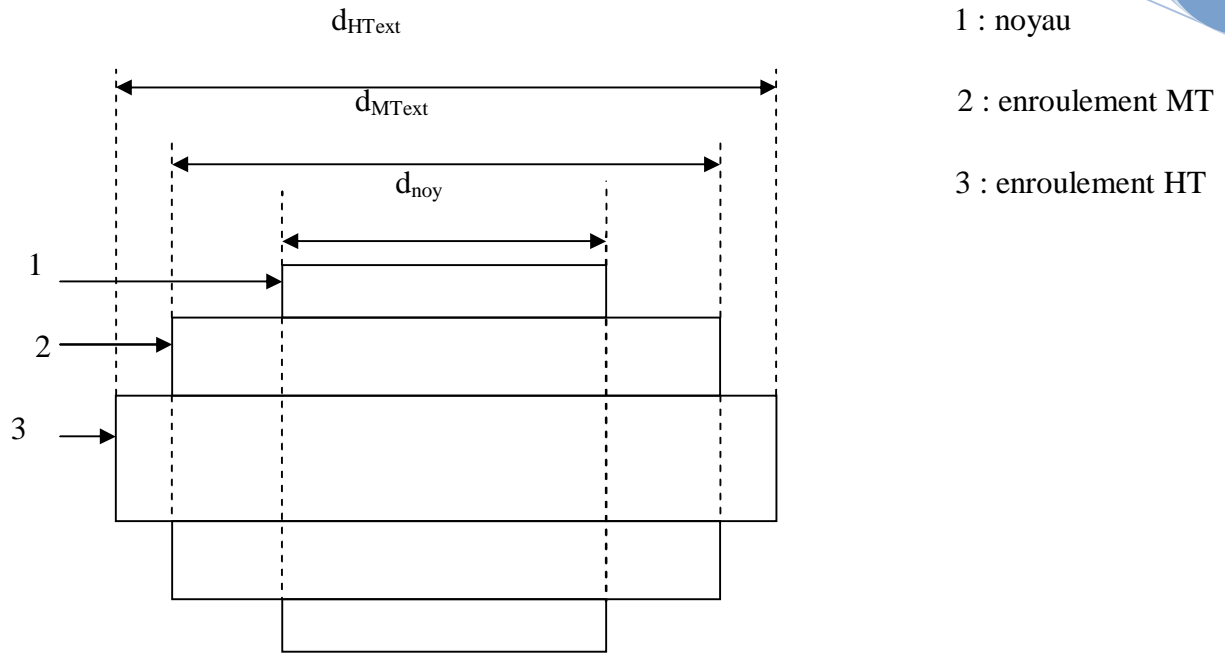
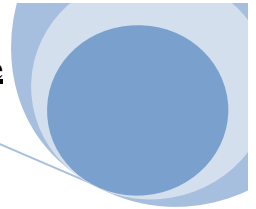
## **Chapitre IV      Modélisation et calcul des paramètres de l'enroulement de l'autotransformateur**



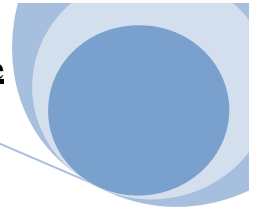
$d_{cuve} = 2000\text{mm}$  (distance minimale entre la cuve et l'enroulement HT) ;

$L_{enr} = 2160\text{mm}$  (longueur de l'enroulement).

Le dispositif géométrique de l'enroulement de l'autotransformateur est représenté sur la figure (IV-1).



**Figure (IV-1) : dispositif géométrique des enroulements du transformateur.**



**IV-2- Calcul des paramètres :**

**IV-2-1- Calcul des résistances:**

La résistance de l'enroulement dépend de la forme de l'onde appliquée, elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{\Delta} = \frac{1.0575 \times R_0}{\sqrt{\omega \cdot t_h}} \quad (\text{IV-1})$$

$R_{\Delta}$ : la résistance correspondante au cas de l'application d'une onde de tension impulsionnelle.

$R_0$  : La résistance de l'enroulement HT correspondante à la fréquence de 50HZ, elle est calculée par l'expression suivante :

$$R_0 = \frac{\Delta P_{CC} \cdot U_{nHT}^2}{S_n^2} \quad (\text{IV-2})$$

$$R_0 = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot (230 \cdot 10^3)^2}{(63 \cdot 10^6)^2}$$

$$R_0 = 2.66568 \Omega$$

$\omega$ : étant la pulsation correspondante à la fréquence de 50HZ tel que:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$f$  : la fréquence de service de l'autotransformateur.  $F=50$  Hz

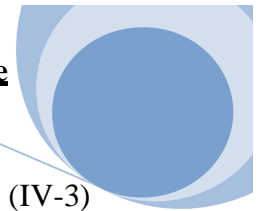
$t_h = 2 \cdot T$  tel que  $T$  est la longueur de l'onde.

$$t_h = 2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}$$

$$R_{H\Delta} = \frac{1.0575 \times 2.66568}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-6}}}$$

$$R_{H\Delta} = 12 \Omega$$

La résistance d'un élément de l'enroulement haute tension :



$$R_H = \frac{RH\Delta}{n} \quad (IV-3)$$

n : étant le nombre d'élément, d'habitude on le prend égal à 10.

$$R_H = 1.2\Omega$$

On détermine la résistance de l'enroulement MT d'après le facteur de transformation.

$$R_{MT} = \frac{R_H}{(K_{tHM})^2} \quad (IV-4)$$

$K_{tHM} = 2$  : est le facteur de la transformation haute tension/moyenne tension.

$$R_{MT} = 0.3 \Omega.$$

#### **IV-2-2-Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :**

L'inductance totale d'un enroulement en tenant compte de l'influence des autres inductances est donnée par la formule suivante :

$$L_{TOT} = K_2 L_{CC} \quad (IV-5)$$

Avec :

$K_2$  : est le facteur qui tient compte de la forme d'onde appliquée à l'enroulement,

$$K_2 = 0.65.$$

$L_{CC}$  : l'inductance propre de l'enroulement HT correspondante à la fréquence de 50HZ, déterminée d'après le régime de court-circuit, elle est donnée par :

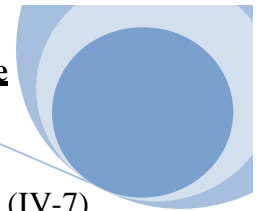
$$L_{CCH} = \frac{1}{2.\pi.f} \times \frac{U_{CCH}}{100} \times \frac{U_{nHT}^2}{S_n} \quad (IV-6)$$

$$L_{CCH} = \frac{1}{2.\pi.50} \times \frac{12.(230.10^3)^2}{100.63.10^6}$$

$$L_{CCH} = 0.65 \times 0.30735$$

$$L_{TOT} = 0.212777 \text{ H.}$$

L'inductance propre pour un seul élément est:



$$\mathfrak{L}_{iH} = \frac{L_{TOT-H}}{\text{Nombre d'element}} \quad (IV-7)$$

$$\mathfrak{L}_{iH} = \frac{0.212777}{10}$$

$$\mathfrak{L}_{iH} = 21280 \mu\text{H}.$$

L'inductance propre de l'enroulement MT est :

$$L_{TOT-MT} = \frac{L_{TOT-H}}{Kt_{HM}^2} \quad (IV-8)$$

$$L_{TOT-MT} = 0.05320 \text{ H}.$$

Pour l'élément de cet enroulement:

$$\mathfrak{L}_{i-MT} = \frac{0.05320}{10}$$

$$\mathfrak{L}_{i-MT} = 5320 \mu\text{H}.$$

L'inductance propre  $L_i$  d'un élément de l'enroulement est calculée en tenant compte de l'influence des autres éléments.

On a:

$$\mathfrak{L}_i = L_i + \sum M_{ij}$$

$$\mathfrak{L}_i = L_i + \frac{\sum M_{ij}}{L_i} \times L_i$$

$$\mathfrak{L}_i = L_i \left( 1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_i} \right)$$

$$L_i = \frac{\mathfrak{L}_i}{\left( 1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_i} \right)} \quad (IV-9)$$

Cela revient à calculer les valeurs des coefficients de mutualités  $\frac{M_{ij}}{L_i}$  qui sont données par l'impédance.

$$\frac{M_{ij}}{L_I} = f\left(\frac{a}{b}\right)$$

Cette fonction est représentée sur la figure (IV-2).

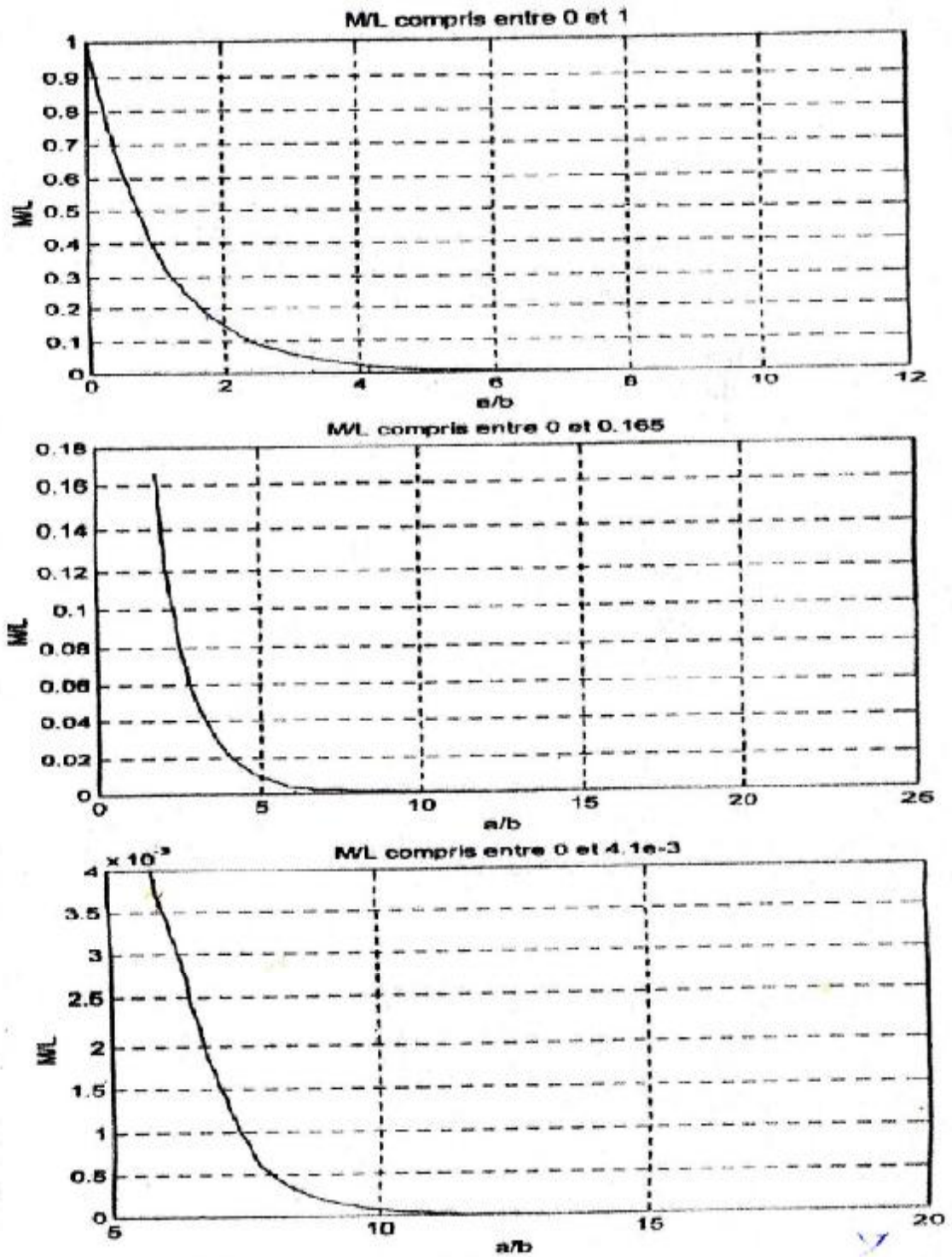
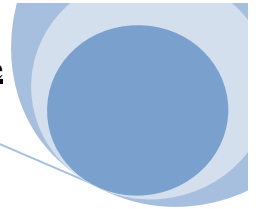


Figure (IV-2) : Représentation de la fonction  $f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{M}{L}$  [11]



a : est la longueur d'un éléments de enroulement :

$$a = \frac{\text{la longuer de l'enroulement}}{\text{le nombre d'element}} \quad (\text{IV-10})$$

$$a = \frac{2160}{10}$$

$$a = 216 \text{ mm}$$

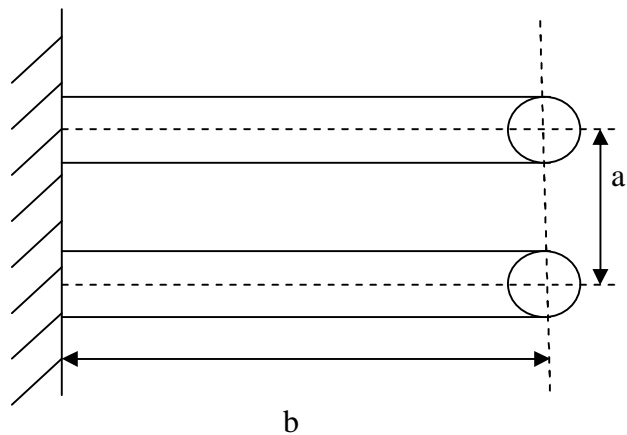
b : est la distance entre l'élément et le noyau qui est donné par :

$$b_{\text{HT}} = \frac{\frac{d_{\text{ext-HT}} + d_{\text{int-HT}}}{2} - d_{\text{noy}}}{2} \quad (\text{IV-11})$$

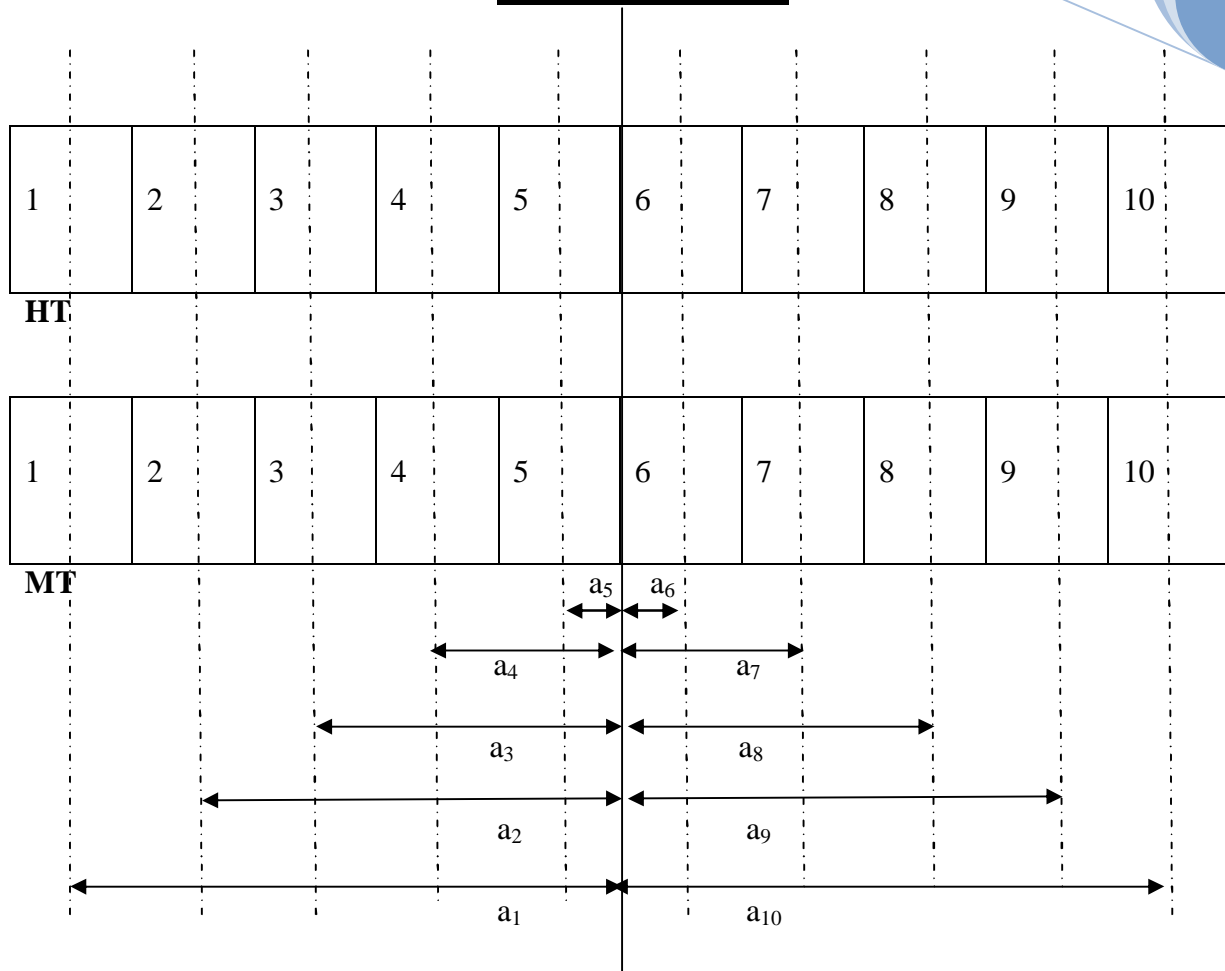
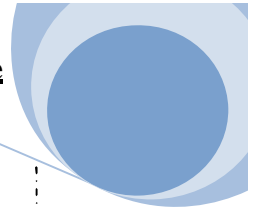
$$b_{\text{HT}} = 310.5 \text{ mm}$$

$$b_{\text{MT}} = \frac{\frac{d_{\text{ext-MT}} + d_{\text{int-MT}}}{2} - d_{\text{noy}}}{2} \quad (\text{IV-12})$$

$$b_{\text{MT}} = 106 \text{ mm.}$$



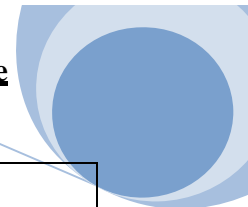
**Figure (IV-3): disposition schématique des spires**



**Figure IV-4 : Subdivision des enroulements de l'autotransformateur**

**IV-2-2-1-Calcul des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement haut tension :**

D'après les figures (IV-2), on calcule  $M_{ij}$  et  $\sigma$ . les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 1 qui suit.



N°	a(mm)	b <sub>HT</sub>	$\frac{a}{b_{HT}}$	$\sigma = \frac{M_{ij}}{L_I}$	M <sub>ij</sub>
1	210	310.5	0.69	0.5	2980
2	432		1.39	0.3	1788
3	648		2.087	0.15	894
4	864		2.78	0.064	318.4
5	1080		3.48	0.028	166.88
6	1296		4.17	0.02	119.2
7	1512		4.87	0.01	59.6
8	1728		5.56	0.0042	25.032
9	1944		6.26	0.00087	5.185

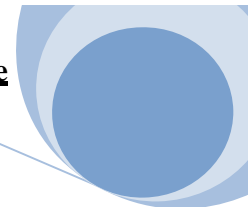
**Tableau 1 : Calcul des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement HT**

**IV-2-2-2-Calcul des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement moyen tension :**

D'après les figures (IV-3), on calcule M<sub>ij</sub> et  $\sigma$ . les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 2 qui suit

N°	a(mm)	b <sub>MT</sub>	$\frac{a}{b_{MT}}$	$\sigma = \frac{M_{ij}}{L_I}$	M <sub>ij</sub>
1	210	106	2.03	0.157	311.6
2	432		4.075	0.0277	54.98
3	648		6.11	0.00082	1.628
4	864		8.15	0.00028	0.5558
5	1080		10.18	0.000015	0.0297
6	1296		12.22	0.00001	0.01985
7	1512		14.26	0.000008	0.01588
8	1728		16.3	0.0000035	0.0069
9	1944		18.34	0.000001	0.001985

**Tableau 2 : Calcul des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement MT**



**IV-2-2-3-Calcul des coefficients de mutualités entre l'enroulement haut tension et moyen tension :**

D'après les figures (IV-4), on calcule  $M_{ij}$  et  $\sigma$ . les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 3 qui suit.

N°	a (mm)	$b_{HT}$	$b_{MT}$	$\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \times b_{MT}}}$	$\sigma = \frac{M_{ij}}{M_0}$	$M_{ij}$	$K = \frac{M_{ij}}{(\epsilon_{i-H} \times \epsilon_{i-M})^{1/2}}$
1	0	310.5	106	0	1	60	0.0037993
2	210			1.188	0.328	13.12	0.001233
3	432			2.376	0.114	4.56	0.00042857
4	648			3.564	0.049	1.96	0.0001842
5	864			4.752	0.00118	0.0472	0.000004436
6	1080			5.94	0.001	0.04	0.000003759
7	1296			7.128	0.0006	0.024	0.000002255
8	1512			8.316	0.00032	0.0128	0.000001203
9	1728			9.504	0.000192	0.00768	0.000000721
10	1944			10.692	0.000015	0.0006	0.000000056

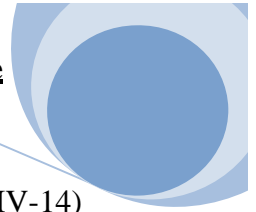
**Tableau 3 : Calcul des coefficients de mutualités entre l'enroulement HT et MT**

Le calcul de coefficient de mutualité entre les éléments de l'enroulement haut et moyen tension se fait par la relation suivante :

$$M_0 = 4\pi \sqrt{r_{HT-moy} \times r_{MT-moy}} \times \ln \frac{b_{HT} + b_{MT}}{b_{HT} - b_{MT}} \times 10^{-6} \quad (IV-13)$$

$$M_0 = 0.0006 \text{ H} = 600 \mu\text{H}$$

Après le calcul de tous les coefficients de mutualités, on précise les valeurs des inductances propres des éléments des enroulements HT et MT.



$$L_{HT} = \frac{\xi_{iH}}{1 + \sum \sigma_{HT} + \sum \sigma_{HM}} \quad (IV-14)$$

$$L_{MT} = \frac{\xi_{iH}}{1 + \sum \sigma_{MT} + \sum \sigma_{HM}} \quad (IV-15)$$

$$L_{HT} = \frac{21280}{1 + 1.077 + 1.4949}$$

$$L_{MT} = \frac{5320}{1 + 0.1858 + 1.4949}$$

$$L_{HT} = 5958 \mu H.$$

$$L_{MT} = 1985 \mu H.$$

#### IV-2-3-Calcul des capacités transversales :

- La capacité entre l'enroulement moyen tension et le noyau est donné par la formule suivante :

$$C_{\square Mo} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{int-MT} - d_{noy}}{d_{int-MT} - d_{noy}} \quad (IV-16)$$

Avec :

$\epsilon_0$ : Permittivité absolue de l'air ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/M).

$\epsilon_r$ : Permittivité relative de l'huile d'isolation ( $\epsilon_r = 3.9$ ).

$$C_{\square M} = 8.85 \times 3.9 \times 3.14 \times 2.16 \times \frac{990 + 930}{990 - 930}$$

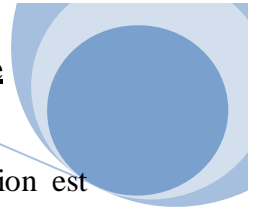
$$C_{\square M} = 7500 PF.$$

La capacité d'un seul élément :

$$C_{Mo} = \frac{C_M}{n+1} \quad (IV-17)$$

$$C_{M o} = 0.0007 \mu H.$$

## Chapitre IV      Modélisation et calcul des paramètres de l'enroulement de l'autotransformateur



- La capacité entre l'enroulement haut tension et l'enroulement moyen tension est donné par :

$$C_{\square HM} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{int-HT} - d_{ext-MT}}{d_{int-HT} - d_{ext-MT}} \quad (IV-18)$$

La capacité d'un seul élément est:

$$C_{HM} = \frac{C_{HM}}{n+1} \quad (IV-19)$$

$$C_{HM} = 0.0005 \mu F.$$

- La capacité entre la cuve et l'enroulement haut tension est donnée par la relation suivante:

$$C_{\square H} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{cuve} - d_{ext-HT}}{d_{cuve} - d_{ext-HT}} \quad (IV-20)$$

$$C_{\square H} = 1225 PF.$$

La capacité d'un seul élément:

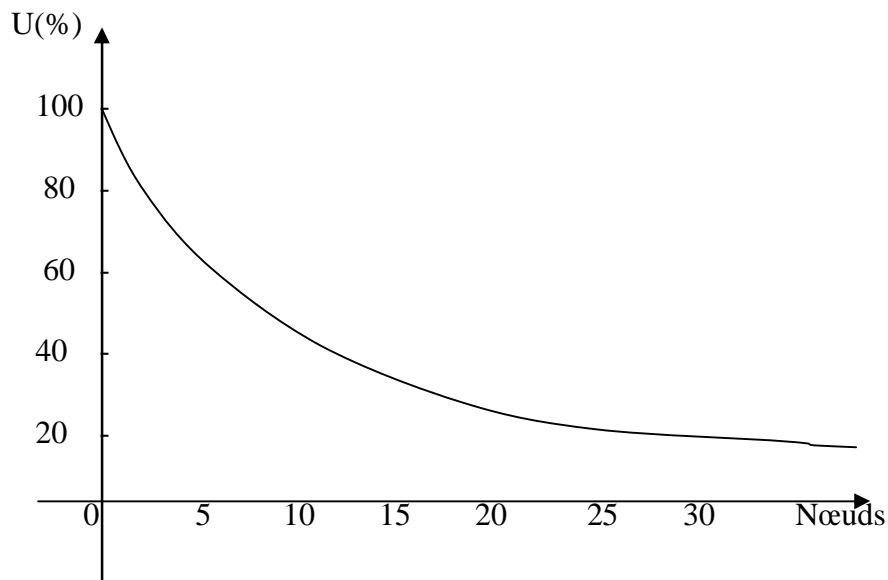
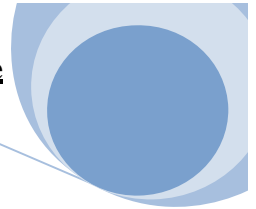
$$C_{Ho} = \frac{C_H}{n+1} \quad (IV-21)$$

$$C_{Ho} = 0.0001 \mu F.$$

### IV-2-4-Calcul des capacités longitudinales:

Pour calculer les capacités longitudinales, il faut d'abord avoir la valeur de  $\alpha$  à partir de la répartition initiale de la tension fournie par le constructeur qui est résumée dans le tableau qui suit

N°du nœud	A-0	2-0	4-0	6-0	8-0	10-0	12-0	14-0	16-0	18-0	20-0	22-0	24-0	26-0	28-0	30-0
U(%)	100	82.8	71.6	60.3	50.2	41.6	35.0	29.4	24.1	19.8	15.4	14.8	14.8	14.4	14.0	11.5



**Figure (IV-5) : Représentation initiale de la tension fournie par le constructeur.**

$$U(x) = U_0 \times e^{-\alpha \cdot x} \quad (IV-22)$$

- Pour :  $x = 0.2m$  ;  $U(x) = 60\%$  ;  $U_0 = 100\%$

D'où  $\alpha = 2.554$ .

- La capacité longitudinale totale de l'enroulement haut tension est donnée par la formule qui suit :

$$K_H = \frac{C_{H\Sigma}}{\alpha^2} \quad (IV-23)$$

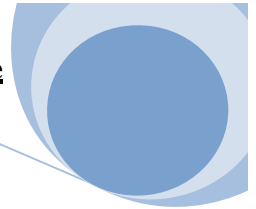
$$C_{H\Sigma} = C_H + \frac{C_{HM} \times C_{MT}}{C_{HM} + C_{MT}} \quad (IV-24)$$

$$C_{H\Sigma} = 1225 + \frac{5457.7500}{5475 + 7500}$$

$$C_{H\Sigma} = 0.00438 \mu F.$$

$$K_H = 0.000627 \mu F.$$

## Chapitre IV      Modélisation et calcul des paramètres de l'enroulement de l'autotransformateur



- La capacité d'un seul élément de l'enroulement haut tension est donnée par :

$$K_1 = K_H \cdot 10$$

$$K_1 = 0.00627 \mu\text{F}.$$

- La capacité totale longitudinale de l'enroulement moyen tension est donnée par :

$$K_{M-TOT} = \frac{C_{M\Sigma}}{\alpha^2} \quad (\text{IV-26})$$

$$C_{M\Sigma} = C_M + \frac{C_{HM} \times C_H}{C_{HM} + C_H} \quad (\text{IV-27})$$

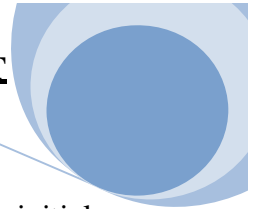
$$C_{M\Sigma} = 0.0085 \mu\text{F}.$$

$$K_{M-TOT} = 0.0013 \mu\text{F}.$$

- La capacité d'un seul élément de enroulement moyen tension est donnée par :

$$K_2 = K_{M-TOT} \cdot 10$$

$$K_2 = 0.013 \mu\text{F}.$$



Pour analyser les oscillations qui se produisent lors du passage de la répartition initiale à la répartition finale de surtensions, qui ont lieu dans le temps et dans l'espace. Il faut prendre en considération l'influence du couplage existant entre les parties des enroulements, l'influence des paramètres des enroulements.

Comme l'investigation de ce phénomène est très délicate, on réservera le présent chapitre pour la modélisation et l'analyse des surtensions dans les enroulements haute et moyen tension de l'autotransformateur, buché lors de différents schémas de sa protection et il est porter sur le calcul des équations de courant et de tension dans les enroulements.

On a effectué une simulation des résultats en utilisant le logiciel P-SPICE (ORCAD 16.3) et on a interpréter les résultats obtenues.

#### **V-1-Equation de l'enroulement :**

On considère dans le schéma de la figure (V-1) que :

A, B : les points ou se produit l'onde de la surtension atmosphérique (coté HT et MT).

$U_1$ ,  $U_1'$  : sont respectivement les tensions appliquées à l'entrée de l'enroulement HT et à l'entrée de l'enroulement MT.

$Z_H$ ,  $Z_M$  : les impédances caractéristiques des lignes considérées à constantes localisées.

$Z_P$  : l'impédance du parafoudre.

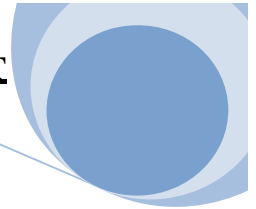
$C_P$ ,  $L_P$  : sont respectivement, la capacité et l'inductance du conducteur liant le parafoudre et l'autotransformateur.

$C_{\text{poste}}$  : la capacité totale des éléments du poste.

$R_H$ ,  $L_H$ ,  $C_H$  et  $K_H$  : sont respectivement la résistance, l'inductance, la capacité transversale et la capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement haute tension.

$R_M$ ,  $L_M$ ,  $C_M$  et  $K_M$  : sont respectivement la résistance, l'inductance, la capacité transversale et la capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement moyen tension.

L'impédance caractéristique de la ligne sans pertes est donnée par :



$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (V-1)$$

**Démonstration :**

Soit :

$U_i$  : l'onde de tension incidente.

$U_r$  : l'onde de tension réfléchie.

$U_t$  : l'onde de tension transmise.

$i_i, i_r, i_t$  : leurs courants respectifs.

On a :

$$U_t = U_i + U_r \quad (V-2)$$

$$i_t = i_i - i_r = \frac{1}{Z_l} (U_i - U_r) \quad (V-3)$$

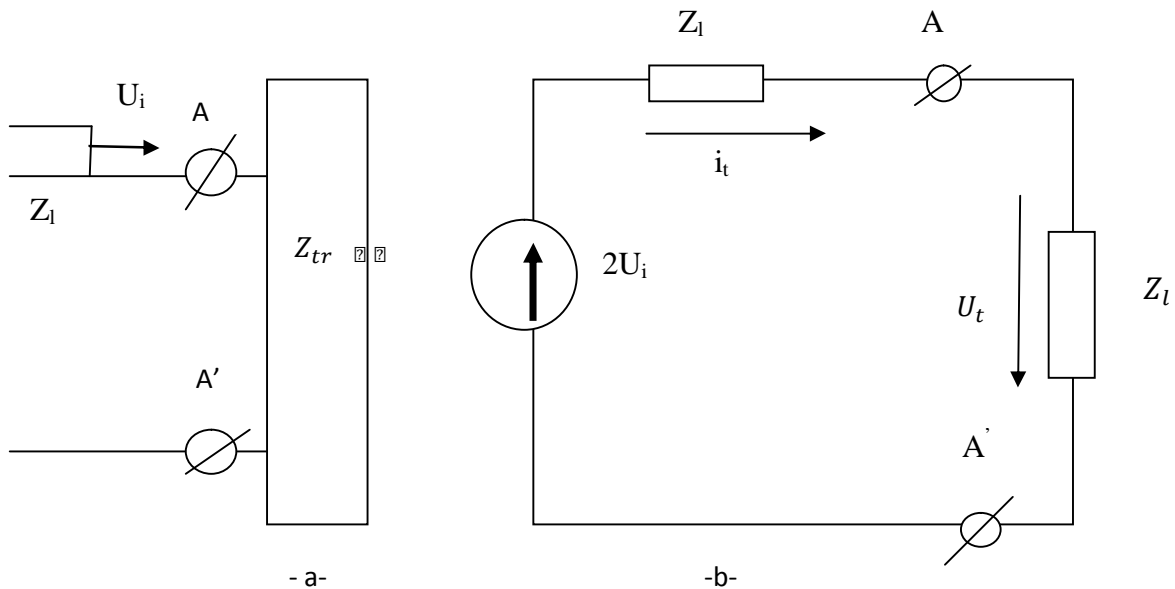
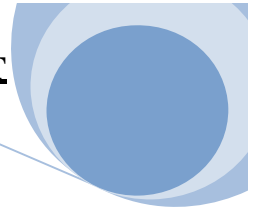
$$i_t = \frac{U_t}{Z_{Ch}} \quad (V-4)$$

$$i_i = \frac{U_i}{Z_l} \quad (V-5)$$

$$i_r = \frac{U_r}{Z_l} \quad (V-6)$$

En faisant la somme de (V-2) et (V-4) on aura :

$$U_t + Z_l i_t = 2U_i \quad (V-7)$$



**Figure (V-2) : schéma équivalent de la ligne à élément localisés lors d'une surtension selon la méthode de PETERSEN.**

**V-1-1-Mise en équation du schéma équivalent :**

**V-1-1-1- Equations différentielles du poste :**

En appliquant les deux lois de Kirchhoff au circuit du schéma équivalent des deux enroulements figure (V-1), on aboutira à deux systèmes d'équations (1) et (2) suivant :

**a-Système (1) : Equation des tensions :**

Le parafoudre est caractérisé par :

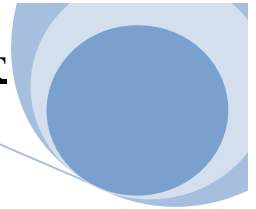
$$U_p = A(I_p)^\alpha \tag{V-9}$$

D'où :

$$I_p = e^{\left(\frac{\ln(U_p) - \ln(A)}{\alpha}\right)} \tag{V-10}$$

Avec :

A : est une valeur constante pour le parafoudre à ZnO de tension 220kv (A=180),



$I_p$  : est le courant traversant le parafoudre,

$U_p$  : est la tension résiduelle du parafoudre,

$\alpha$ : est le facteur de non linéarité du parafoudre ,

$$I_p = e^{\left(\frac{[\ln(U_p) - 6.10]}{\alpha}\right)} \quad (V-11)$$

$U_0, i_0$  : sont respectivement la tension et le courant des ondes.

$$u_0 = U_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (V-12)$$

$U_{H1} = U_p$  d'après la figure (V-1).

$$U_0 - U_{H1} = Z_l i_0$$

$$i_0 = \frac{U_0 - U_{H1}}{Z_l} \quad (V-13)$$

$$U_{H1} - U_{H2} = L_p \frac{d}{dt} (i_0 - i_p) \quad (V-14)$$

En injectant (V-13) et (V-6) dans (V-14), on aura :

$$U_{H1} - U_{H2} = L_p \frac{d}{dt} \left( \frac{U_0}{Z_l} - \frac{U_{H1}}{Z_l} - i_p \right) \quad (V-15)$$

$$U_{H1} = U_p = Z_p i_p$$

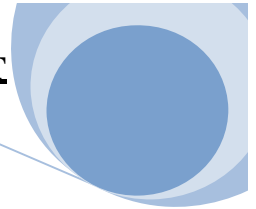
$$\frac{dU_p}{dt} = Z_p \frac{di_p}{dt} \quad (V-16)$$

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{d \ln(U_p)}{dt} \frac{1}{\alpha} e^{\left(\frac{[\ln(U_p) - 6.10]}{\alpha}\right)} \quad (V-17)$$

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{\frac{dU_p}{dt}}{\alpha U_p} i_p \quad (V-18)$$

En injectant (V-18) et (V-10) dans (V-17), on aura :

$$U_{H1} - U_{H2} = \frac{L_p}{Z_c} U_0 [\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t}] - L_p \left( 1 + \frac{Z_p}{\alpha Z_c} \right) \frac{di_p}{dt} \quad (V-19)$$



$$U_{H2} - U_{H3} - R_H i_{H1} = L_H \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H1H2} \frac{di_{H2}}{dt} + M_{H1H3} \frac{di_{H3}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H1H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H1M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H1M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H1M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H3} - U_{H4} - R_H i_{H2} = L_H \frac{di_{H2}}{dt} + M_{H2H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H2H3} \frac{di_{H3}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H2H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H2M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H2M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H2M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H4} - U_{H5} - R_H i_{H3} = L_H \frac{di_{H3}}{dt} + M_{H3H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H3H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H3H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H3M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H3M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H3M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H5} - U_{H6} - R_H i_{H4} = L_H \frac{di_{H4}}{dt} + M_{H4H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H4H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H4H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H4M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H4M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H4M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H6} - U_{H7} - R_H i_{H5} = L_H \frac{di_{H5}}{dt} + M_{H5H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H5H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H5H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H5M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H5M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H5M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H7} - U_{H8} - R_H i_{H6} = L_H \frac{di_{H6}}{dt} + M_{H6H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H6H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H6H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H6M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H6M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H6M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H8} - U_{H9} - R_H i_{H7} = L_H \frac{di_{H7}}{dt} + M_{H7H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H7H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H7H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H7M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H7M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H7M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H9} - U_{H10} - R_H i_{H8} = L_H \frac{di_{H8}}{dt} + M_{H8H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H8H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H8H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H8M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H8M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H8M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

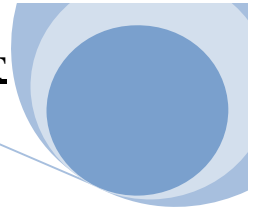
$$U_{H10} - U_{H11} - R_H i_{H9} = L_H \frac{di_{H9}}{dt} + M_{H9H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H9H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H9H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H9M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{H9M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H9M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$

$$U_{H11} - U_{H12} - R_H i_{H10} = L_H \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H10H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{H10H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{H10H10} \frac{di_{H10}}{dt} + M_{H10M1} \frac{di_{M1}}{dt} +$$

$$M_{H10M2} \frac{di_{M2}}{dt} + \dots + M_{H10M10} \frac{di_{M10}}{dt}$$



$$U_{M2} - U_{M3} - R_M i_{M1} = L_M \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M1M2} \frac{di_{M2}}{dt} + M_{M1M3} \frac{di_{HM3}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M1M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M1H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M1H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M1H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M3} - U_{M4} - R_M i_{M2} = L_M \frac{di_{M2}}{dt} + M_{M2M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M2M3} \frac{di_{HM3}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M2M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M2H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M2H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M2H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M4} - U_{M5} - R_M i_{M3} = L_M \frac{di_{M3}}{dt} + M_{M3M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M3M2} \frac{di_{HM3}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M3M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M3H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M3H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M3H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M5} - U_{M6} - R_M i_{M4} = L_M \frac{di_{M4}}{dt} + M_{M4M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M4M2} \frac{di_{HM4}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M4M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M4H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M4H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M4H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M6} - U_{M7} - R_M i_{M5} = L_M \frac{di_{M5}}{dt} + M_{M5M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M5M2} \frac{di_{HM5}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M5M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M5H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M5H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M5H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M7} - U_{M8} - R_M i_{M6} = L_M \frac{di_{M6}}{dt} + M_{M6M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M6M2} \frac{di_{HM6}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M6M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M6H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M6H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M6H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M8} - U_{M9} - R_M i_{M7} = L_M \frac{di_{M7}}{dt} + M_{M7M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M7M2} \frac{di_{HM7}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M7M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M7H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M7H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M7H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M9} - U_{M10} - R_M i_{M8} = L_M \frac{di_{M8}}{dt} + M_{M8M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M8M2} \frac{di_{HM8}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M8M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M8H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M8H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M8H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

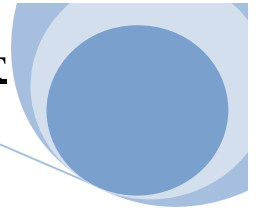
$$U_{M10} - U_{M11} - R_M i_{M9} = L_M \frac{di_{M9}}{dt} + M_{M9M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M9M2} \frac{di_{HM9}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M9M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M9H1} \frac{di_{H1}}{dt} + M_{M9H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M9H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$

$$U_{M11} - U_{M12} - R_M i_{M10} = L_M \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M10M1} \frac{di_{M1}}{dt} + M_{M10M2} \frac{di_{HM10}}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{M10M10} \frac{di_{M10}}{dt} + M_{M10H1} \frac{di_{H1}}{dt} +$$

$$M_{M10H2} \frac{di_{H2}}{dt} + \dots + M_{M10H10} \frac{di_{H10}}{dt}.$$



**b-système 2 : Equations des courants :**

Au nœud (2) à l'entrée du transformateur :

$$i_0 - i_p = i_{H1} + i_{KH1} + i_{CHM}$$

$$\frac{U_0}{Z_C} [e^{(-\alpha t)} - e^{(-\beta t)}] - \frac{U_{H1}}{Z_C} - \frac{U_{H1}}{Z_P} - i_{H1} = (K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H2}}{dt} - K_H \frac{dU_{H3}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M2}}{dt}$$

On pose :

$$\frac{U_0}{Z_C} [e^{(-\alpha t)} - e^{(-\beta t)}] - U_{H1} \left( \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_P} \right) = I$$

$$I - i_{H1} = (K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H1}}{dt} - K_H \frac{dU_{H2}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M1}}{dt}$$

$$i_{H1} - i_{H2} = -K_H \frac{dU_{H1}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H2}}{dt} - K_H \frac{dU_{H3}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M2}}{dt}$$

$$i_{H2} - i_{H3} = -K_H \frac{dU_{H2}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H3}}{dt} - K_H \frac{dU_{H4}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M3}}{dt}$$

$$i_{H3} - i_{H4} = -K_H \frac{dU_{H3}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H4}}{dt} - K_H \frac{dU_{H5}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M4}}{dt}$$

$$i_{H4} - i_{H5} = -K_H \frac{dU_{H4}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H5}}{dt} - K_H \frac{dU_{H6}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M5}}{dt}$$

$$i_{H5} - i_{H6} = -K_H \frac{dU_{H5}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H6}}{dt} - K_H \frac{dU_{H7}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M6}}{dt}$$

$$i_{H6} - i_{H7} = -K_H \frac{dU_{H6}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H7}}{dt} - K_H \frac{dU_{H8}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M7}}{dt}$$

$$i_{H6} - i_{H7} = -K_H \frac{dU_{H7}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H8}}{dt} - K_H \frac{dU_{H8}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M8}}{dt}$$

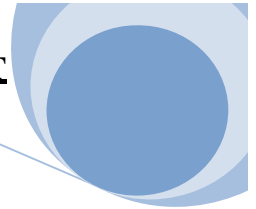
$$i_{H8} - i_{H9} = -K_H \frac{dU_{H8}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H9}}{dt} - K_H \frac{dU_{H8}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M9}}{dt}$$

$$i_{H9} - i_{H10} = -K_H \frac{dU_{H9}}{dt} + (2K_H + C_{HM}) \frac{dU_{H10}}{dt} - K_H \frac{dU_{H9}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M10}}{dt}$$

$$i_{CM} - i_{M1} = (K_M + C_M + C_{HM}) \frac{dU_{M2}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M2}}{dt} - K_M \frac{dU_{M3}}{dt}$$

$$i_{M1} - i_{M2} = -K_M \frac{dU_{H2}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M3}}{dt} - K_M \frac{dU_{M3}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M4}}{dt}$$

$$i_{M2} - i_{M3} = -K_M \frac{dU_{H3}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M4}}{dt} - K_M \frac{dU_{M4}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M5}}{dt}$$



$$i_{M3} - i_{M4} = -K_M \frac{dU_{H4}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M5}}{dt} - K_M \frac{dU_{M4}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M6}}{dt}$$

$$i_{M4} - i_{M5} = -K_M \frac{dU_{H5}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M6}}{dt} - K_M \frac{dU_{M5}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M7}}{dt}$$

$$i_{M5} - i_{M6} = -K_M \frac{dU_{H6}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M7}}{dt} - K_M \frac{dU_{M6}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M8}}{dt}$$

$$i_{M6} - i_{M7} = -K_M \frac{dU_{H7}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M8}}{dt} - K_M \frac{dU_{M7}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M9}}{dt}$$

$$i_{M7} - i_{M8} = -K_M \frac{dU_{H8}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M9}}{dt} - K_M \frac{dU_{M8}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M10}}{dt}$$

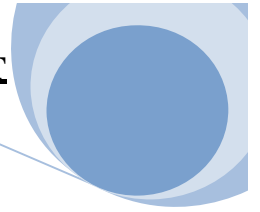
$$i_{M8} - i_{M9} = -K_M \frac{dU_{H9}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M10}}{dt} - K_M \frac{dU_{M9}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M11}}{dt}$$

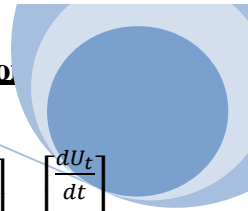
$$i_{M9} - i_{M10} = -K_M \frac{dU_{H10}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{M11}}{dt} - K_M \frac{dU_{M10}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M12}}{dt}$$

$$i_{M10} = -K_M \frac{dU_{H11}}{dt} + (2K_M + C_{HM} + C_M) \frac{dU_{H12}}{dt} - K_M \frac{dU_{M11}}{dt} - C_{HM} \frac{dU_{M12}}{dt}$$

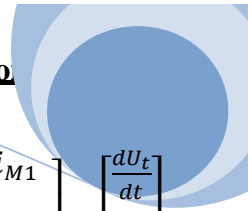
#### **V-1-1-2-Ecriture matricielle des équations du circuit électrique :**

Les équations des tensions et des courants sont sous les formes matricielles suivantes :

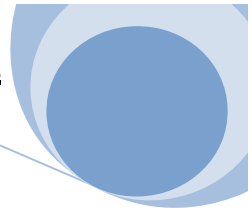




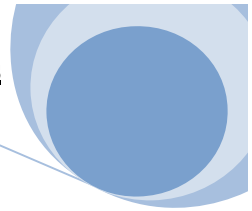
$$\begin{bmatrix} A \\ U_{H2}-U_{H3} - R_H i_{H1} \\ U_{H3}-U_{H4} - R_H i_{H2} \\ U_{H4}-U_{H5} - R_H i_{H3} \\ U_{H5}-U_{H6} - R_H i_{H4} \\ U_{H6}-U_{H7} - R_H i_{H5} \\ U_{H7}-U_{H8} - R_H i_{H6} \\ U_{H8}-U_{H9} - R_H i_{H7} \\ U_{H9}-U_{H10} - R_H i_{H8} \\ U_{H10}-U_{H11} - R_H i_{H9} \\ U_{H11}-U_{H12} - R_H i_{H11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_H & M_{H1H2} & M_{H1H3} & M_{H1H4} & \dots & M_{H1H10} & M_{H1M1} & M_{H1M2} & \dots & M_{H1M10} \\ M_{H2H1} & L_H & M_{H2H3} & M_{H2H4} & \dots & M_{H2H10} & M_{H2M1} & M_{H2M2} & \dots & M_{H2M10} \\ M_{H3H1} & M_{H3H2} & L_H & M_{H3H4} & \dots & M_{H3H10} & M_{H3M1} & M_{H3M2} & \dots & M_{H3M10} \\ M_{H4H1} & M_{H4H2} & M_{H4H3} & L_H & \dots & M_{H4H10} & M_{H4M1} & M_{H4M2} & \dots & M_{H4M10} \\ M_{H5H1} & M_{H5H2} & M_{H5H3} & M_{H5H4} & \dots & M_{H5H10} & M_{H5M1} & M_{H5M2} & \dots & M_{H5M10} \\ M_{H6H1} & M_{H6H2} & M_{H6H3} & M_{H6H4} & \dots & M_{H6H10} & M_{H6M1} & M_{H6M2} & \dots & M_{H6M10} \\ M_{H7H1} & M_{H7H2} & M_{H7H3} & M_{H7H4} & \dots & M_{H7H10} & M_{H7M1} & M_{H7M2} & \dots & M_{H7M10} \\ M_{H8H1} & M_{H8H2} & M_{H8H3} & M_{H8H4} & \dots & M_{H8H10} & M_{H8M1} & M_{H8M2} & \dots & M_{H8M10} \\ M_{H9H1} & M_{H9H2} & M_{H9H3} & M_{H9H4} & \dots & M_{H9H10} & M_{H9M1} & M_{H9M2} & \dots & M_{H9M10} \\ M_{H10H1} & M_{H10H2} & M_{H10H3} & M_{H10H4} & \dots & L_{HH} & M_{H10M1} & M_{H10M2} & \dots & M_{H2M1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{H1} \\ i_{H2} \\ i_{H3} \\ i_{H4} \\ i_{H15} \\ i_{H6} \\ i_{H7} \\ i_{H8} \\ i_{H9} \\ i_{H10} \\ i_{H111} \end{bmatrix} + \frac{dU_t}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



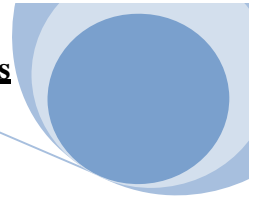
$$\begin{bmatrix} A \\ U_{M2}-U_{M3} - R_M i_{M1} \\ U_{M3}-U_{M4} - R_M i_{M2} \\ U_{M4}-U_{M5} - R_M i_{M3} \\ U_{M5}-U_{M6} - R_M i_{M4} \\ U_{M6}-U_{M7} - R_M i_{M5} \\ U_{M7}-U_{M8} - R_M i_{M6} \\ U_{M8}-U_{M9} - R_M i_{M7} \\ U_{M9}-U_{M10} - R_M i_{M8} \\ U_{M10}-U_{M11} - R_M i_{M9} \\ U_{M11}-U_{M12} - R_M i_{M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_M & M_{M1M2} & M_{H1H3} & M_{M1M4} & \dots & M_{M1M10} & M_{M1H1} & M_{M1H2} & \dots & M_{M1H10} \\ M_{M2M1} & L_M & M_{M2M3} & M_{M2M4} & \dots & M_{M2M10} & M_{M2H1} & M_{M2H2} & \dots & M_{M2H10} \\ M_{M3M1} & M_{M3M2} & L_M & M_{M3M4} & \dots & M_{M3M10} & M_{M3H1} & M_{M3H2} & \dots & M_{M3H10} \\ M_{M4M1} & M_{M4M2} & M_{M4M3} & L_M & \dots & M_{M4M10} & M_{M4H1} & M_{M4H2} & \dots & M_{M4H10} \\ M_{M5M1} & M_{M5M2} & M_{M5M3} & M_{M5M4} & \dots & M_{M5M10} & M_{M5H1} & M_{M5H2} & \dots & M_{M5H10} \\ M_{M6M1} & M_{M6M2} & M_{M6M3} & M_{M6M4} & \dots & M_{M6M10} & M_{M6H1} & M_{M6H2} & \dots & M_{M6H10} \\ M_{M7M1} & M_{M7M2} & M_{M7M3} & M_{M7M4} & \dots & M_{M7M10} & M_{M7H1} & M_{M7H2} & \dots & M_{M7H10} \\ M_{M8M1} & M_{M8M2} & M_{M8M3} & M_{M8M4} & \dots & M_{M8M10} & M_{M8H1} & M_{M8H2} & \dots & M_{M8H10} \\ M_{M9M1} & M_{M9M2} & M_{M9M3} & M_{M9M4} & \dots & M_{M9M10} & M_{M9H1} & M_{M9H2} & \dots & M_{M9H10} \\ M_{M10M1} & M_{M10M2} & M_{M10M3} & M_{M10M4} & \dots & L_{MM} & M_{M10H1} & M_{M10H2} & \dots & M_{M10H10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{M1} \\ i_{M2} \\ i_{M3} \\ i_{M4} \\ i_{M5} \\ \frac{d}{dt} i_{M6} \\ i_{M7} \\ i_{M8} \\ i_{M9} \\ i_{M10} \\ i_{M11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{dU_t}{dt} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} I \\ i_{H1} - i_{H2} \\ i_{H2} - i_{H3} \\ i_{H3} - i_{H4} \\ i_{H4} - i_{H5} \\ i_{H5} - i_{H6} \\ i_{H6} - i_{H7} \\ i_{H7} - i_{H8} \\ i_{H8} - i_{H9} \\ i_{H9} - i_{H10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_H & (2K_H + C_{HM}) & -K_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_{H2} \\ U_{H3} \\ U_{H4} \\ U_{H5} \\ U_{H6} \\ U_{H7} \\ U_{H8} \\ U_{H9} \\ U_{H10} \\ U_{H11} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} I \\ i_{M1} - i_{M2} \\ i_{M2} - i_{M3} \\ i_{M3} - i_{M4} \\ i_{M4} - i_{M5} \\ i_{M5} - i_{M6} \\ i_{M6} - i_{M7} \\ i_{M7} - i_{M8} \\ i_{M8} - i_{M9} \\ i_{M9} - i_{M10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{HM} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_M & (2K_M + C_{HM} + C_M) & -K_M & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_{M2} \\ U_{M3} \\ U_{M4} \\ U_{M5} \\ U_{M6} \\ U_{M7} \\ U_{M8} \\ U_{M9} \\ U_{M10} \\ U_{M11} \end{bmatrix}$$



### **V-3-Le principe de la simulation :**

Le principe de la simulation des l'enroulement de l'autotransformateur consiste à trois cas, pour chacun on a:

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

### **V-3-Interprétation et analyse des résultats :**

Les résultats sont obtenus à l'aide d'un logiciel P-SPICE, conçus spécialement pour les phénomènes transitoires dans les circuits électriques, ce programme de simulation exige la numérotation de chaque élément de circuit équivalent et insérer les paramètres (R, L, C, K).

Pour avoir des résultats correspondants aux cas les plus sévères, nous avons appliqués l'onde complète d'essais de même forme (bi-exponentielle) et d'amplitudes relative aux tensions nominales de 220KV et 110KV

$$U=U_0[e^{(-\alpha t)} - e^{(-\beta t)}]$$

$U_0 = 2200$  kV, pour l'onde applique à coté HT.

$U_0 = 1380KV$  , pour l'onde applique à coté MT.

$$\alpha = 0,08882$$

$$\beta = 1,8998565$$

Les résultats des simulations sont donnés dans les tableaux (1, 2 et 3) et sur les figures (V-1), (V-2), (V-3), (V-4), (V-5).

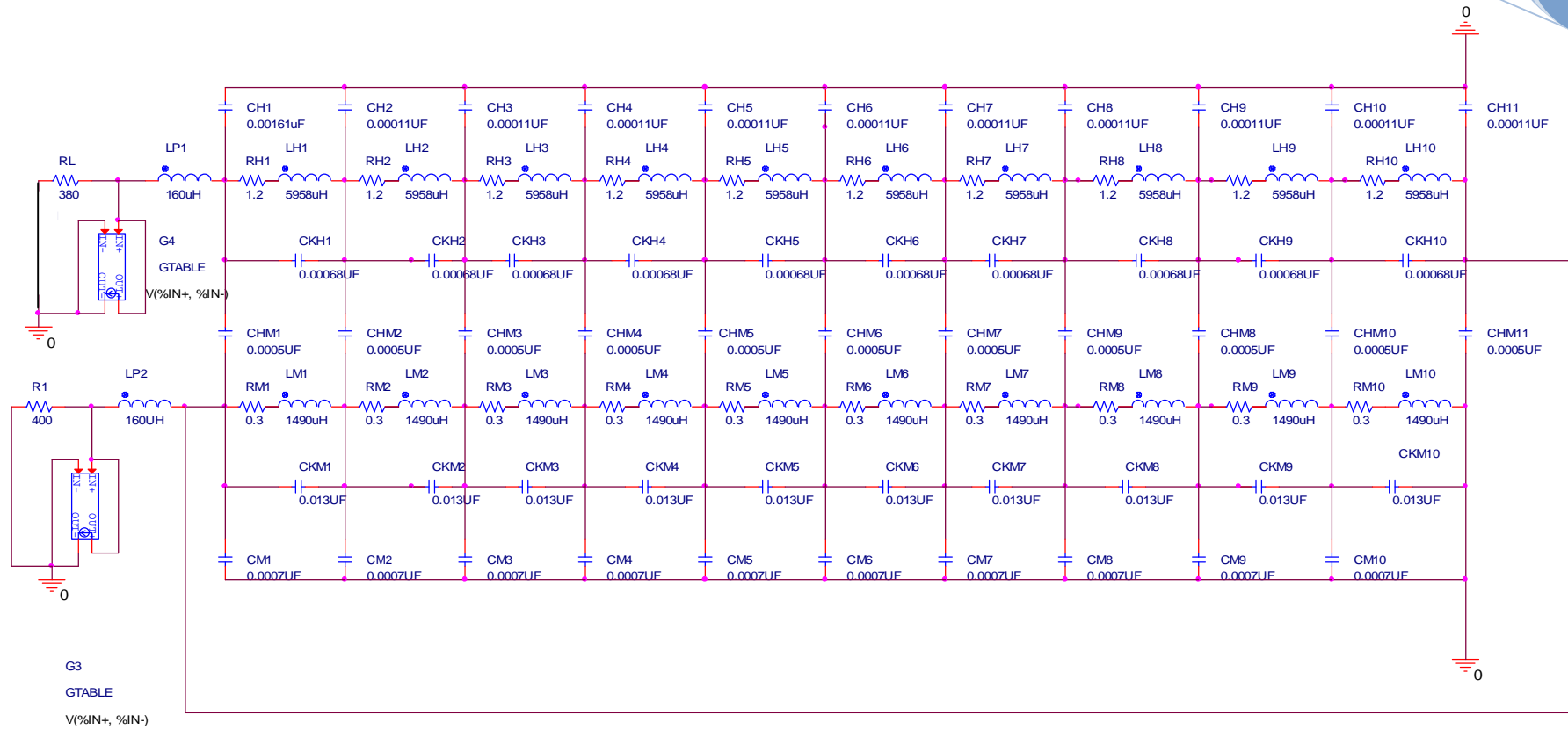
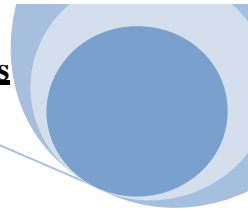


Figure V-1 : schéma équivalent d'un enroulement d'un AT soumis à une surtension à coté de la HT connecté à un parafoudre (220Kv coté HT/110Kv coté MT).

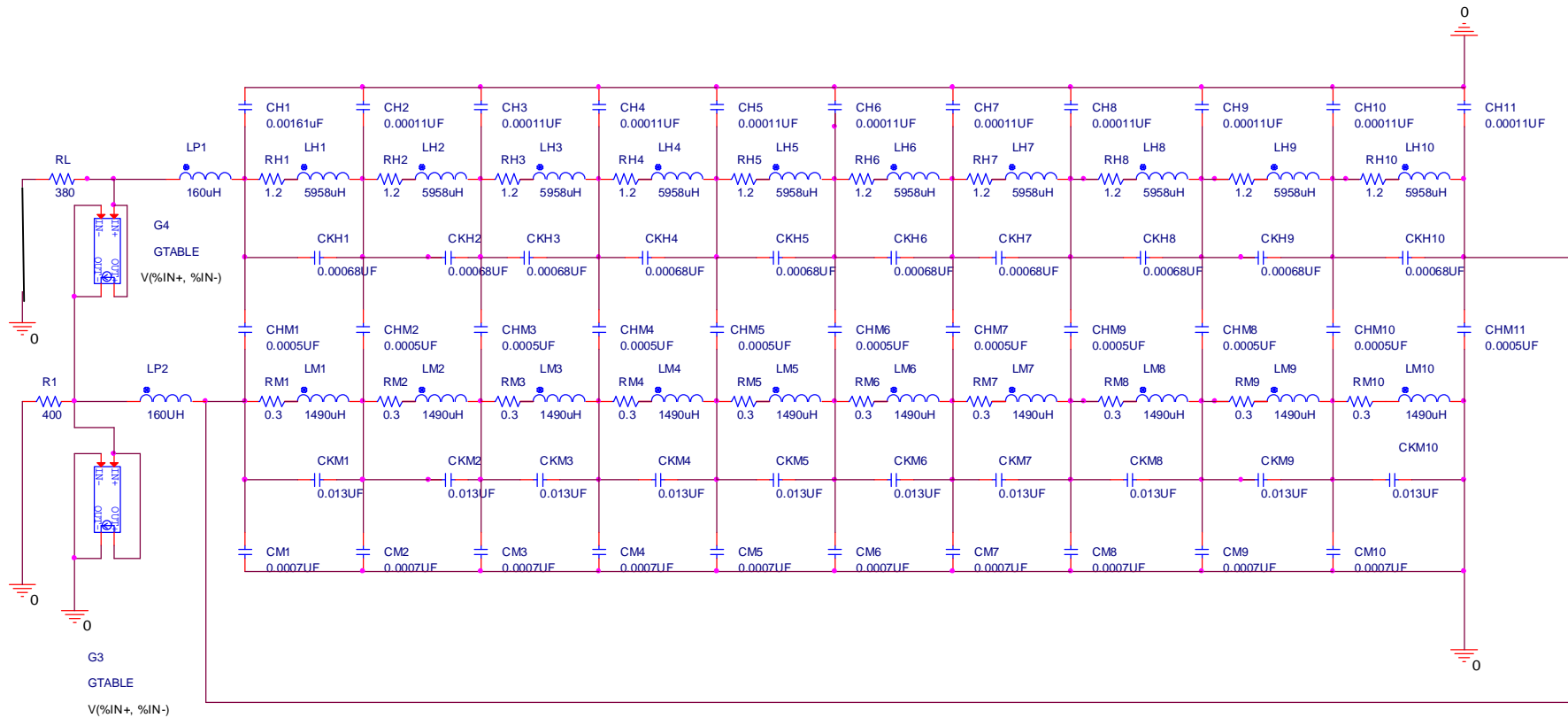
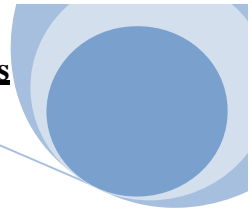


Figure V-2 : schéma équivalent d'un enroulement d'un AT soumis à une surtension à côté de la HT connecté à un parafoudre (110Kv côté HT/110Kv côté MT).

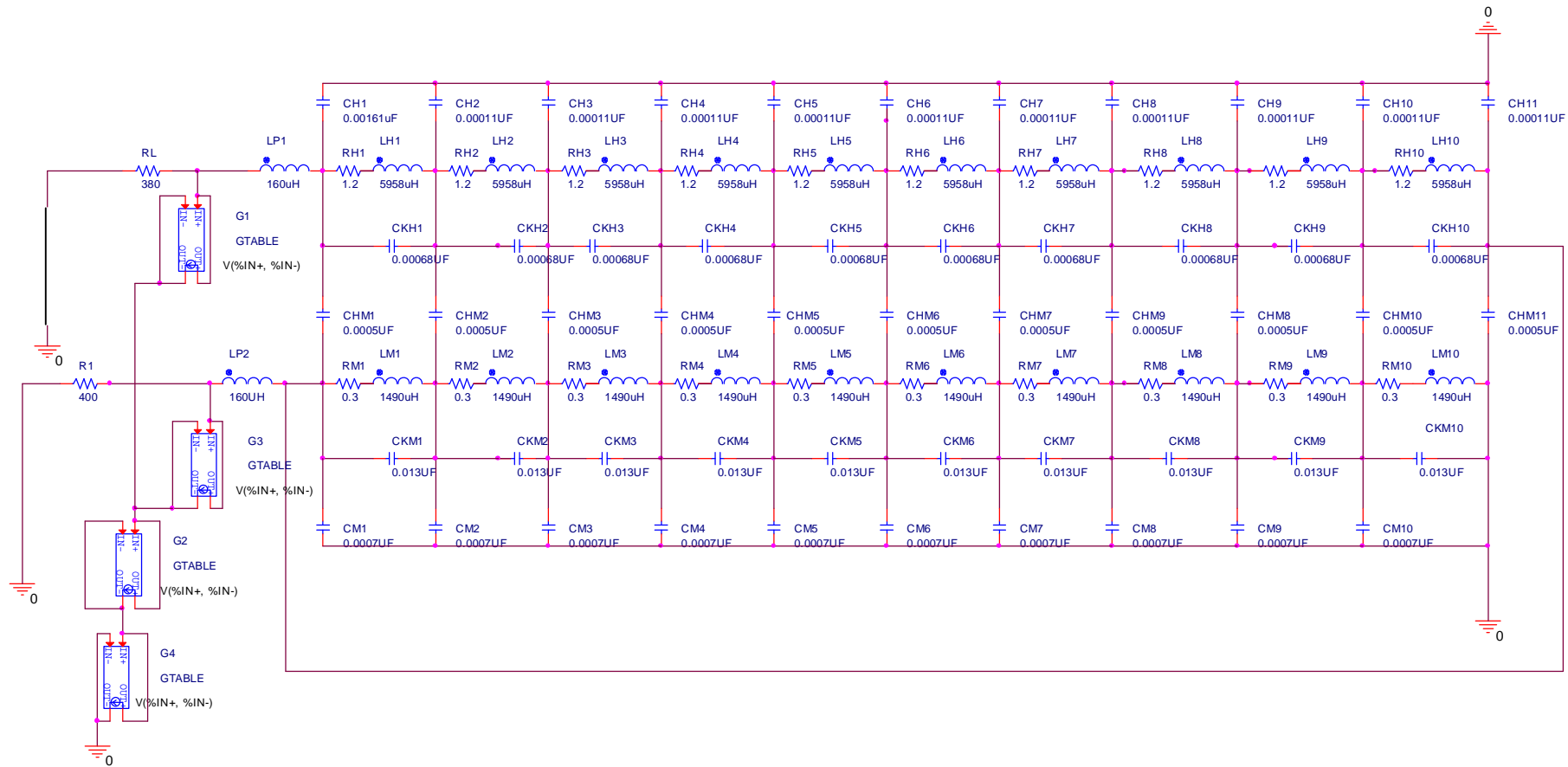
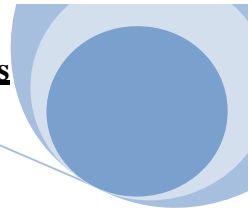


Figure V-3 : schéma équivalent d'un enroulement d'un AT soumis à une surtension à coté de la HT connecté à un parafoudre (150Kv coté HT/35Kv, 35Kv, 35Kv coté MT).

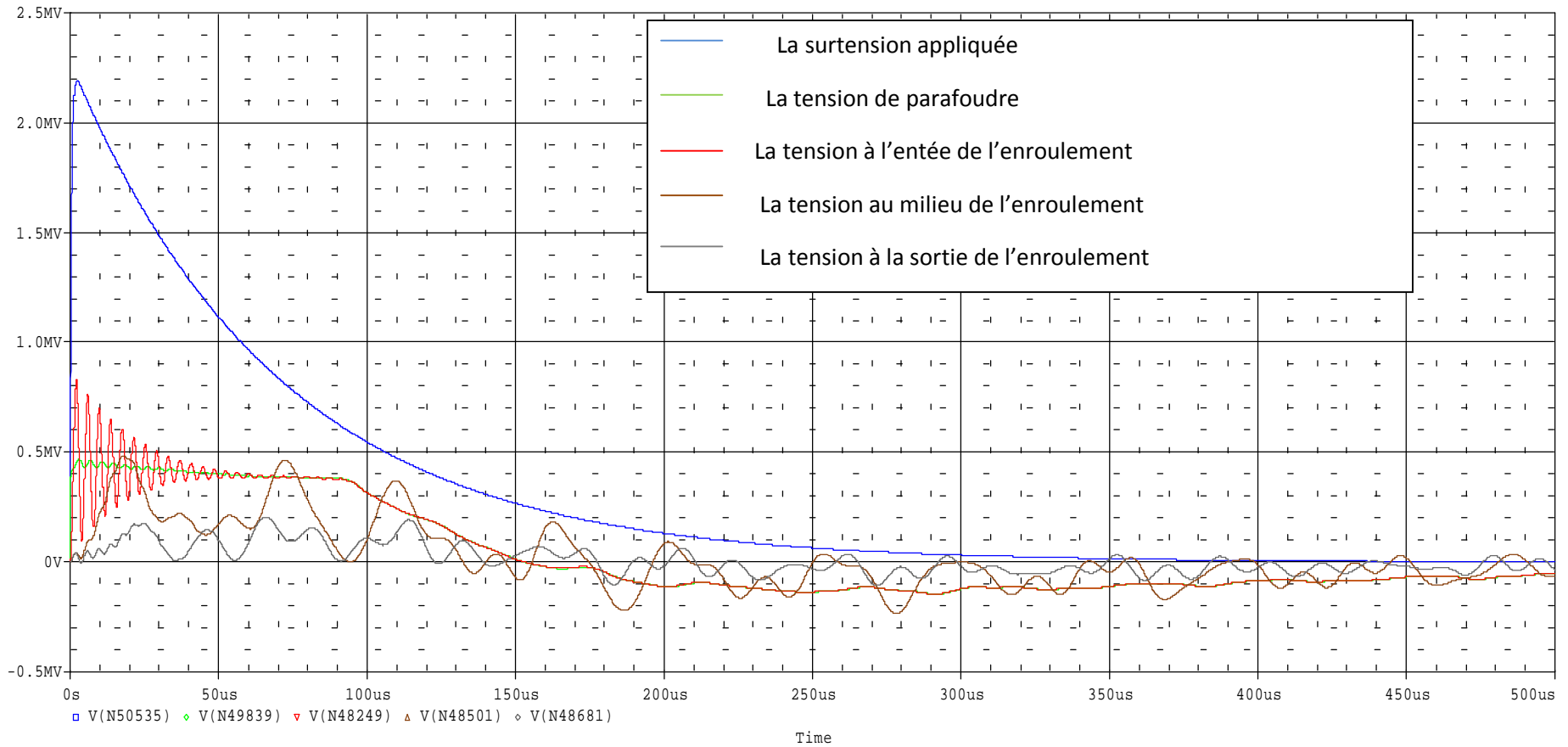
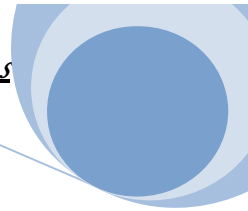


Figure (V-4) : Courbe des tensions à coté HT

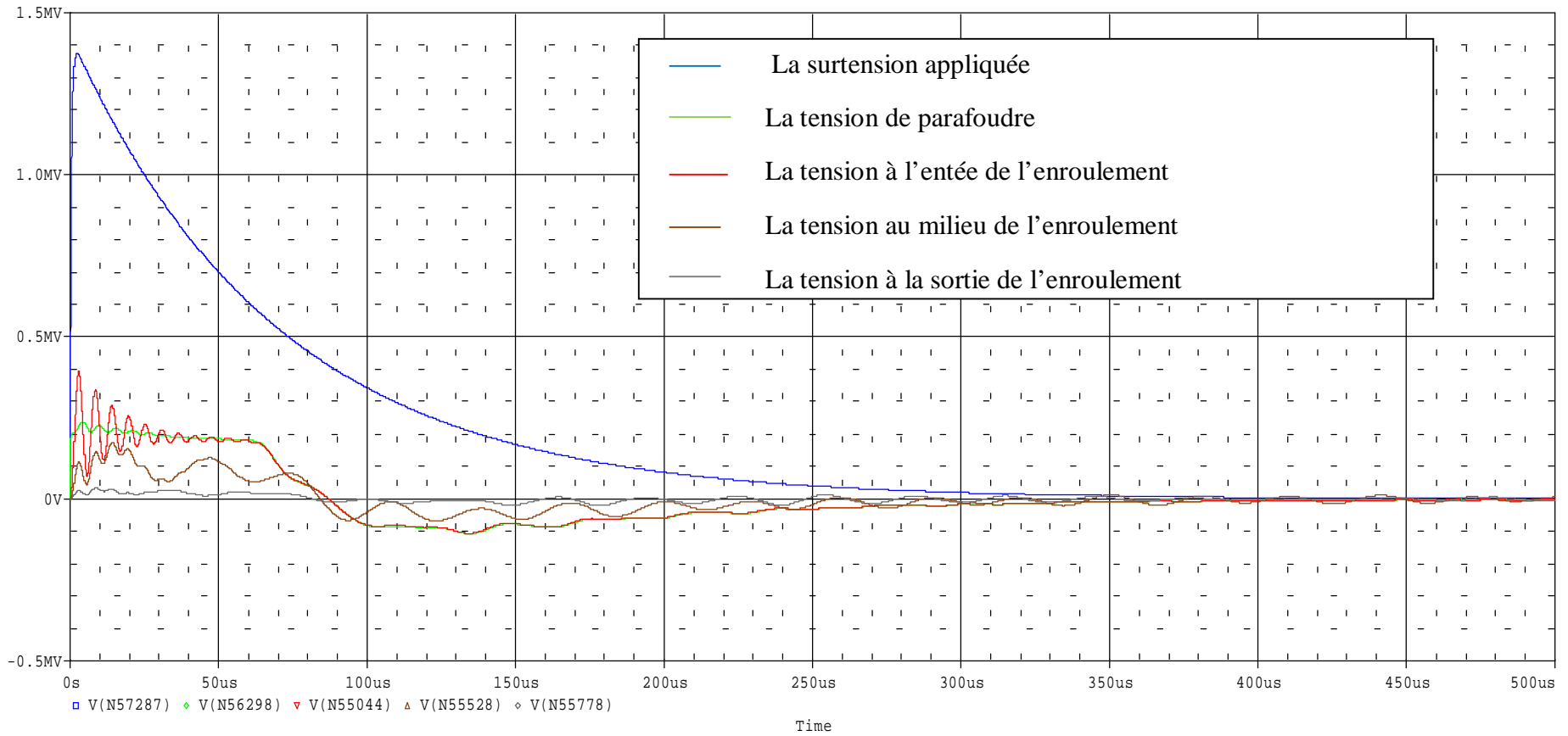
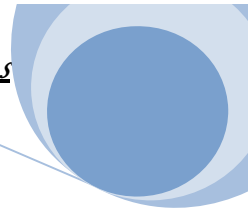
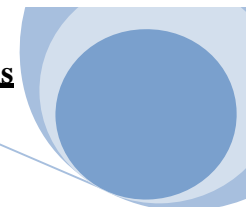
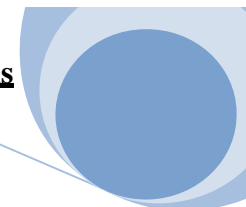


Figure (V-5) : Courbe des tensions à coté MT



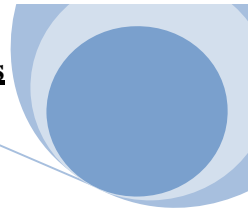
		parafoudre <b>220KV</b> coté du <b>HT</b> et <b>110KV</b> cote <b>MT</b>												$U_0$ $U_p$
Cas A	L'onde est ap à coté du <b>HT</b>	$U_{H1}$ jusqu' à $U_{H11}$	826,71	635,59	546,21	540,18	521,95	484,18	430,77	363,30	278,50	204,00	91,58	2,194MV  466,5KV
		$U_{M1}$ jusqu' à $U_{M11}$	91,58	93,85	99,77	119,58	139,00	151,90	154,67	141,60	109,70	60,50	0	
Cas B	L'onde est ap à coté du <b>MT</b>	$U_{H1}$ jusqu' à $U_{H11}$	67,83	139,50	177,37	206,30	219,90	208,53	263,80	296,74	294,90	317,34	392	1,370MV  392KV
		$U_{M1}$ jusqu' à $U_{M11}$	392,00	303,60	259,08	232,90	203,55	171,85	138,00	120,50	65,55	34,00	0	

Tableau 1 : Les tensions maximum lors de la simulation appliquée au 1<sup>er</sup> cas



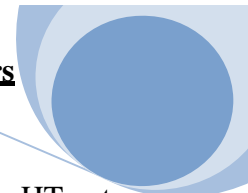
		parafoudre <b>110KV</b> coté du <b>HT</b> et <b>110KV</b> cote <b>MT</b>												$U_0$ $U_p$
Cas C	L'onde est ap à coté du <b>HT</b>	$U_{H1}$ jusqu' à $U_{H11}$	847,69	645,19	607,37	629,70	652,88	657,20	611,37	518,67	418,43	357,20	367,32	2,182MV
		$U_{M1}$ jusqu' à $U_{M11}$	367,32	323,69	295,00	275,25	275,00	260,40	131,88	189,60	133,80	76,78	0	814,84KV
Cas D	L'onde est ap à coté du <b>MT</b>	$U_{H1}$ jusqu' à $U_{H11}$	67,43	139,45	177,40	206,94	219,93	208,53	263,80	296,70	294,90	317,30	392,00	1,353MV
		$U_{M1}$ jusqu' à $U_{M11}$	392,00	303,64	259,08	232,97	203,55	191,84	138,00	102,50	65,55	34,00	0	303,50KV

Tableau 2 : Les tensions maximum lors de la simulation appliquée au 2<sup>eme</sup> cas



		parafoudre <b>150KV</b> coté du <b>HT</b> et 3 parafoudre de <b>35KV</b> cote <b>MT</b>												$U_0$
														$U_P$
Cas E	L'onde est ap à coté du <b>HT</b>	$U_{H1}$ jusqu' à $U_{H11}$	870,70	661,7	590,68	568,28	549,62	510,74	454,37	383,10	296,40	216,87	97,19	2,193MV
		$U_{M1}$ jusqu' à $U_{M11}$	97,19	99,45	105,21	126,60	147,35	161,09	164,14	150,34	116,43	64,19	0	498,55KV
Cas F	L'onde est ap à coté du <b>MT</b>	$U_{H1}$ jusqu' à $U_{H11}$	69,08	141,74	178,21	206,56	221,75	231,00	267,32	299,12	297,85	323,81	398,98	1,37359MV
		$U_{M1}$ jusqu' à $U_{M11}$	398,98	309,00	276,40	245,48	212,76	178,93	133,62	106,48	68,30	35,15	0	p2=151,8K P3=175,9K P3=227,9K

Tableau 3 : Les tensions maximum lors de la simulation appliquée au 3<sup>eme</sup> cas



D'après ces tableaux et ces figures, on voit que la tension sur le parafoudre HT est égale à 814,84KV, 466,50 KV et 498,55KV, ces valeurs correspondent au courant du parafoudre 10KA, d'après la caractéristique de (Volt-Ampère).

Les surtensions aux bornes de l'enroulement HT sont égales à 826,59KV, 849,69KV et 870,70KV. Ces valeurs ne dépassent pas la valeur admissible 920KV de surtension aux bornes des transformateurs et autotransformateurs de tension nominale 220KV.

Les surtensions diminuent progressivement le long de l'enroulement HT de l'autotransformateur.

Les surtensions aux bornes de MT de l'autotransformateur sont égales à 91,58KV, 367,32KV et 97,19KV. Les surtensions ne sont pas grandes parce que les bornes sont connectées à la ligne de tension 110KV.

Dans la partie de milieu de cet enroulement, on observe une augmentation des surtensions. Puis les surtensions diminuent jusqu'à Zéro. Le neutre de l'enroulement est mis à la terre.

Dans le cas d'application de l'onde de surtension du côté de MT, ces surtensions dans cet enroulement diminuent au fur et à mesure jusqu'au neutre qui est mis à la terre.

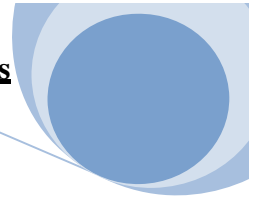
A l'entrée de l'enroulement MT les surtensions sont 392,00KV, 392,00KV et 398,98KV qui ne dépassent pas la valeur admissible.

Dans l'enroulement HT les surtensions sont beaucoup plus petites que la valeur admissible.

Dans les cas de deux parafoudres de 110KV et des parafoudres 150KV, 2\*35KV les surtensions sont un peu plus grandes que celle dans le cas de protection par les parafoudres 220KV et 110KV. C'est d'après la somme des caractéristiques (Volt-Ampère) des parafoudres.

Les figures (V-4) et (V-5) montrent que l'oscillation créée sur la distance entre parafoudre et l'autotransformateur s'amortie pendant 50-60 us.

Les périodes des surtensions dans les enroulements HT et MT son respectivement égale à 150us et 90us.



Tension de parafoudre (KV)	Caractéristique (VOLT-AMPERE)
220	(0 0) (350kv 1) (370kv 10) (380kv 100) (390kv 1kA) (440kv 3kA) (460kv 5KA) (500kv 10kA)
110	(0 0) (160kv 1) (170kv 10) (180kv 100) (190kv 1kA) (230kv 3kA) (250kv 5KA) (280kv 10kA)
150	(0 0) (255kv 1) (260kv 10) (270kv 100) (285kv 1kA) (305kv 3kA) (330kv 5KA) (365kv 10kA)
35	(0 0) (50kv 1) (55kv 10) (60kv 100) (67kv 1kA) (74kv 3kA) (80kv 5KA) (90kv 10kA)

**Tableau (V-4) : Caractéristique (VOLT-AMPERE) des parafoudres.**

Comme on voit de ce tableau, lors du courant de parafoudre égale à 3KA les tensions résiduelle sur les parafoudres sont : P 220KV → 440KV

P 150KV → 305KV

P 110KV → 230KV

P 35KV → 74KV.

Alors :  $2 \times 230KV > 440KV$ ,

$$305KV + 2 \times 74KV = 435KV$$

Et  $435KV > 440KV$ .

**-De point de vue économique : [6]**

Le tableau suivant désigne les prix des parafoudres qu'on a utilisés pour la réalisation de ce travail :



Parafoudre(ZnO)	Prix(\$)
220KV	3384
150KV	1760
110KV	1360
35KV	478

**Tableau (V-5)**

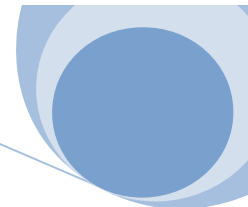
Pour savoir le meilleur schéma de protection entre les trois cas, on a effectué une comparaison entre la différence des tensions et la différence des couts. Le tableau suivant désigne cette comparaison :

Différence (%)	Les tensions à l'entrée de l'enroulement	Cout
Entre 1 <sup>er</sup> cas et le 2 <sup>ieme</sup> cas	2,47	42,66
Entre 1 <sup>er</sup> cas et le 3 <sup>ieme</sup> cas	5,05	33,05
Entre 3 <sup>ieme</sup> cas et le 2 <sup>ieme</sup> cas	2,64	14,35

**Tableau (V-7)**

D'après ces résultats, la différence des surtensions est très faible et le cout est important, par conséquent le 2<sup>eme</sup> cas est la meilleure réalisation des parafoudres pour atteindre le but de la protection de point de vue économique et de fiabilité.

## Conclusion générale



La diminution du niveau de l'isolation des transformateurs et des autotransformateurs peut être une résolution très importante. Parce-que, dans ce cas le gabarit, le poids diminuent, la dépense du métal diminue par conséquent le prix diminue aussi.

D'après les calculs des constructeurs, la diminution de niveau de l'isolation des transformateurs et autotransformateur à 1% diminue leurs prix à environ de 10%. Comme on voit ce problème d'actualité.

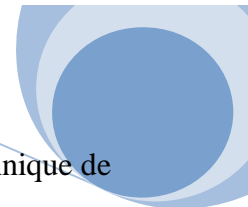
Dans le présent projet nous considérons deux tensions nominales de 220/110KV de puissance 63 MVA.

Nous avons considéré cet autotransformateur étant placé dans un poste ou il assure la liaison entre deux réseaux des tensions nominales de 220 et 110KV. L'autotransformateur est doté par un schéma de protection traditionnelle avec deux parafoudres à chaque cotés.

Nous proposons protéger cet autotransformateur par deux parafoudres de tensions nominales 110KV montée en série (voir les figures (V-2)), ou avec un parafoudre à 150KV et trois parafoudres 35KV (voir figure (V-3)).

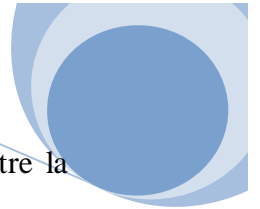
Les résultats de ces trois calculs ne diffèrent pas beaucoup entre eux (maximum 5%), mais en tenant compte des prix des parafoudres, nous conclurons que la protection des autotransformateurs d'après le deuxième schéma est plus économique.

## **Références bibliographique**



- [1] : P. BOUCHARD et G. OLIVER « Electrotechnique » Edition de l'école polytechnique de MONTEREAL.1996
- [2] : L.PASTOURIAUX ET A.VAROUQUAUX « Electricité industrielle ; machine électriques ». Paris Librairie, 1965.
- [3] : ANTHONY LEFEVRE «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs », thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 27 octobre 2006.
- [4] : M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKI « Machine à courant continue, transformateur » 3<sup>eme</sup> Edition MIR, MOSCOU 1979.
- [5] : F.AOUD, F.LARABI mémoire d'ingénieur « Calcul et dimensionnement d'un autotransformateur triphasé » UMMTO 2009.
- [6] : Document de la zone industrielle GRTE-OUED AISSI (SONELGAZ).
- [7] : M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKI « Machine Electrique » Tome I. Edition MIR MOSCOU 1996.
- [8] :C. BARD « Technique de la Haute Tension », Ecole supérieure d'électricité 1979.
- [9] : WWW. ENERIS. COM. « Protection contre la foudre des installation classés pour la protection d'environnement ». Décembre 2011.
- [10] : SCNIEDER ELECTRIQUE « La protection des installations électriques contre la foudre » NOVEMBRE 2000.
- [11] : L.DAHMANE, M.HELLAF « Protection des autotransformateur fonctionnant dans les postes multi-directions contre les surtension » mémoire d'ingénieur UMMTO 2006.
- [12] : M.R.CHOULI « Etude des surtensions dans les lignes et transformateur en tenant compte de l'effet couronne » mémoire d'ingénieur UMMTO 2001.
- [13] : N.AIT OURARAB, S.CHERKI « Etude des surtensions de foudre sur un transformateur de puissance en tenant compte du circuit magnétique » mémoire d'ingénieur UMMTO 2007.

## **Références bibliographique**



- [14] : SCNIEDER ELECTRIQUE « La protection des installations électriques contre la foudre » NOVEMBRE 2000.
- [15] : GARY CLAUDE La technique de la Haute Tension « Choix et coordination des isolements » Sieme Edition ELT 40.1979
- [16] : FREDIED MACIELA « Parafoudre » technique de l'Ingénieur. Traité génie électrique Doc-D4755.
- [17] : MICHEL AGUEL et MICHEL IANOZ <<Traité d'électricité, haute tension>>.volume XXII. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Publie sous la direction JACQUES NE IRYNCK.2004
- [18] : MUFIDZADA.N cours de « Protection des réseaux électrique » master II 2014.
- [19] : AFFOLTER Jean-François « Haute Tension » école d'ingénieur du CANTON VAUD. Octobre 2000.
- [20] : Société des groupes SONELGAZ HAMMA.2014
- [21] : MICHEL LAMBERT « La coordination des isolants » Mars 2013.
- [22] : D. FULCHIRON « Surtension et coordination de l'isolement » N° 151, Edition Décembre 1992.