

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou



Faculté de génie électrique et de l'informatique

Département d'électrotechnique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

En électrotechnique Option:

Réseaux électriques

Thème

**Etude de l'influence des paramètres des ondes
impulsionnelles venant par les lignes aériennes dans
les enroulements du transformateur dans les réseaux
de 110 et 330kV**

Proposé et dirigé par :

Mr.: MUFIDZADA N.A

Etudié par:

Mr.: IBOUKHOULEF hillal

Promotion : 2011/2012

Remerciement

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à mon promoteur Monsieur MUFIDZADA.N.A Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, de m'avoir proposé ce sujet et de m'avoir encadré, pour sa disponibilité permanente, pour son aide, ses orientations ainsi que pour les conseils précieux qu'il n'a cessés de me prodiguer qui ont contribué énormément à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Par la même occasion, mes remerciements vont également à tous les responsables du laboratoire de recherche (Laboratoire De Conception Et De Conduite Des Systèmes De Productions) en particulier Monsieur T. OTHMANE CHERIF, de m'avoir permis de suivre mon travail au sein de ce dernier. Sans oublier tous le personnel de la direction de la maintenance du groupement GTFT pour leur collaboration et aide en toute matière.

Je ne saurais terminer mes remerciements sans exprimer ma profonde gratitude à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de mon travail, ainsi que à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation. Enfin, j'adresse mes vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.

Dédicaces

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :
Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'éclairer la vie et à qui je dois tout;*

*Mon frère El Bader et sa femme Fatma Zahra sans oublier Zouhir et sa fiancé Kahina; et à la mémoire : de mon très chère et regretté grand frère Karim que dieu l'accueille dans son vaste paradis, sa famille.
Et à mes sœurs (Soraya, Asmahane, et Safia, ainsi Lamia) leur fils et leur mariées;*

Tous mes oncles et tentes et leurs familles;

Tout mes cousins et cousines, en particulier : Hocine, Hachimi, Samir, Si Cherif et sans oublier Said boutouche et sa famille;

*Mon très chers
Amis et frère que je respect bcp Mr : Laalam Nacer et sa famille pour tous ce qu'il a fait pour moi;*

Mon très cher ami Menad Tadrast que j'estime beaucoup et sa famille;

Touts mes amis : Idir, Seddik, Mohand Said et sa femme, Cherif, Amar, Mohammed, Anissa, Bila, Farid, Amine, Madjid, Samir,...;

Touts le personnel du groupement GTFT, à messieurs

les chefs de service maintenance Lazali el Hachemi et

Timguellette Rabah et aux contres maitres Kenzari

Abd el Hamid et Mouslmale Slimane aux ingénieurs

Salim, Kamel et techniciens Louanas, Hafid, Tarek,

Hacene, Abd el Kader;

Toute personne qui pense à moi de prêt ou de loin;

Tous les étudiants de département électrotechnique et C.D.E.T.H.

Hillal

Introduction générale :..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électrique

I. Généralités sur les réseaux électriques	3
I.1. Généralités sur les réseaux électriques	3
I.2. Différentes structures de réseaux	3
I.2.1. La structure maillée	3
I.2.2. La structure bouclée	4
I.2.3. La structure radiale	4
- Alimentation en antenne.....	5
- Alimentation en coupure d'artère	6
I.3. Construction du réseau	6
I.3.1. Les lignes	6
-a) Définition et composants.....	6
-b) Types des lignes :	10
I.3.2 Les transformateurs	10
-a) Définition :	10
-b) Types des transformateurs.....	11
-1) Indice de couplage	15
-2) Différentes couplage	15
-C) Classification des transformateurs :	16
-d) Les transformateurs de mesures.....	17
-e) Echauffement et refroidissement des transformateurs	18
I.3.3. Les dispositifs de protection contre les surtensions	19
-I.3.3.1. Les éclateurs	19
-I.3.3.2. Les parafoudres	21

Chapitre II : les modèles mathématiques des lignes et transformateurs

II.1 Introduction :	30
II.2 Schéma équivalent d'une ligne électrique :	30
II.3 Construction du schéma équivalent de lignes électriques triphasées (HT, HTH).....	32
II.4 calcul des paramètres de la ligne triphasée :	36
II.4.1 calcul de la résistance R	36

II.4.2 Calcul de la conductibilité.....	37
a- Conductibilité active(G) :.....	37
b- Conductibilité réactive (B):.....	38
II.4.3 Calcul de la réactance (X_L)	38
II.4.4 Calcul de la capacité (C)	38
II.5 calcul des paramètres de la ligne triphasée (conducteurs sectionnés) :.....	39
II.5.1 Calcul de la résistance (R) :	39
II.5.2 Calcul de la conductivité.....	39
a- conductibilité active (G) :.....	39
b- conductibilité réactive (B) :	40
II.5.3 Calcul de la réactance (X_L)	40
II.5.4 Calcul de la capacité (C)	40
II.6 : les transformateurs	41
II.6.1 : Les paramètres des transformateurs :	41
- Les caractéristiques électriques :.....	42
TD μ 63000/110.....	42
- les caractéristiques géométriques :.....	42
II.6-2 Calcul des paramètres du transformateur :	44
1 /Calcul de résistance du transformateur :	44
2/ Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :.....	45
3/ Calcul des capacités transversales :.....	46
4/ Calcul des capacités longitudinales :	47
II.7 : Conclusion :.....	47

Chapitre III : calcul des paramètres de la ligne et du transformateur de tension nominale 110 et 330kV

III- Calculs des paramètres de la ligne et de transformateur de tension nominale de 110kv et 330kv Erreur ! Signet non défini. III-I-calcul des paramètres de la ligne de tension nominale de 110kv	48
1/ Calcul de la résistance :.....	48
2/ Calcul de l'inductance:.....	48
3/ Calcul de la capacité :	48

III-II-I – Calculs des paramètres de transformateur de puissance nominale de 63MVA	49
1 /Calcul de la résistance du transformateur :	49
2/ Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :	49
3/ Calcul des capacités transversales :	52
4/ Calcul des capacités longitudinales :	52
III-II-II calcul des paramètres de la ligne de tension nominale de 330kv	53
1/ Calcul de la résistance :	53
2/ Calcul de l'inductance:	Erreur ! Signet non défini.
3/ Calcul de la capacité :	53
4/ Calcul de la conductivité	54
-a- Conductibilité active(G) :	54
III-II-III – Calculs des paramètres de transformateur de puissance nominale de 125MVA	54
1 /Calcul de la résistance du transformateur:	55
2/ Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :	56
3/ Calcul des capacités transversales :	57
4/ Calcul des capacités longitudinales :	58
 Chapitre IV : les différentes surtensions et leurs origines	
IV.1 Les surtensions dans les réseaux à moyennes tensions :	59
IV.1.2 Définition des surtensions :	59
IV.2 Origine des surtensions :	59
IV.2.1 Les surtensions externes:	59
IV.2.1.1 Définition de la foudre :	59
IV.2.2 Surtension d'origine interne:	62
VI.2.2.1 Surtensions de manœuvres :	62
VI.2.2.2 Surtensions par Ferro-résonance:	64
VI.2 .2.3 Surtension provoquée par un défaut d'isolement :	65
 Chapitre V : détermination de la déformation de l'onde et la distance dangereuse	
Introduction :	67

Principe de la simulation :	67
Conclusion générale	
Conclusion générale	74

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Les perturbations électriques représentent une menace importante pour les équipements électriques. On les nomme de différentes façons, quelque soit le nom qu'on leur donne leurs effets restent les mêmes : interruptions, dégradations et dégâts, entraînant inévitablement une indisponibilité de l'équipement.

Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets. En fait, les risques se situent essentiellement au niveau des dysfonctionnements, de la destruction de matériel et, en conséquence, de la non continuité de service.

Ces effets peuvent apparaître sur les installations des distributeurs d'énergie ou sur les installations des utilisateurs. Les perturbations peuvent conduire à des interruptions courtes (ré enclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes), des interruptions longues (élimination du défaut intervention pour changement d'isolants détruits). Des appareils de protection permettent de limiter ces risques. Leur mise en œuvre nécessite l'élaboration réfléchie de niveaux cohérents d'isolement et de protection, c.à.d. assuré la coordination des isolations avec ces risques pour cela, la compréhension préalable des différents effets de surtension est indispensable, et elle fera l'objet de cette étude.

Dans ce présent travail, nous étudions l'influence des paramètres des ondes impulsionnelles venant par les lignes aériennes sur les enroulements du transformateur dans des réseaux de 110 et 330kV, Et pour cela nous avons procédé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons articulé sur certaines composants d'un réseau de transmission de l'énergie électrique (les conducteurs, les pylônes, les isolants les transformateurs ...) ainsi que quelque éléments de protections comme les parafoudres et les éclateurs...etc.

Puis, dans le deuxième on a procédé à résumer les modèles mathématique de la ligne et du transformateur.

Dans le troisième chapitre, nous avons accentué sur le calcul des paramètres de la ligne et du transformateur de tension nominale 110 et 330kV.

Dans le quatrième chapitre, il est question de traiter les différentes surtensions et leurs origines ainsi leurs influences sur les isolations des éléments des réseaux électriques.

En fin le cinquième chapitre a été réservé pour l'étude des surtensions produite dans les réseaux considérés où nous avons calculé les distances critiques des ondes ainsi sa déformation le long des lignes et des transformateurs. L'étude des surtensions dans les réseaux considérés. Réalisée par le logiciel PSPICE. Et on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
Généralités sur les
réseaux électriques

I. Généralités sur les réseaux électriques

I.1. Généralités sur les réseaux électriques

Le réseau électrique est une unification des centrales électriques, des lignes, des postes assurant le transport de l'énergie électrique des points de production jusqu'aux points de consommations.

Pour assurer la continuité d'alimentation des usagers et augmenter la fiabilité de fonctionnement on fait les liaisons entre différents réseaux électriques. Les schémas des réseaux électriques sont différents, ceci dépend des régions et des caractères des charges.

Pour contrôler les régimes de fonctionnement des réseaux électriques il faut toujours avoir des informations sur les schémas fonctionnant selon les charges, les tensions, le régime de neutre et l'influence sur l'environnement.

La connaissance des exigences nécessaires des réseaux électriques assure la fiabilité de leurs fonctionnements la qualité d'énergie électrique, l'économie, et la sûreté.

I.2. Différentes structures de réseaux

I.2.1. La structure maillée

C'est La structure la plus appropriée pour les réseaux d'interconnexion et de transport, car elle permet d'assurer la continuité du transport d'énergie électrique même en cas d'éventuel défaut. Dans cette structure, les branches du réseau forment des mailles, (figure I.1).

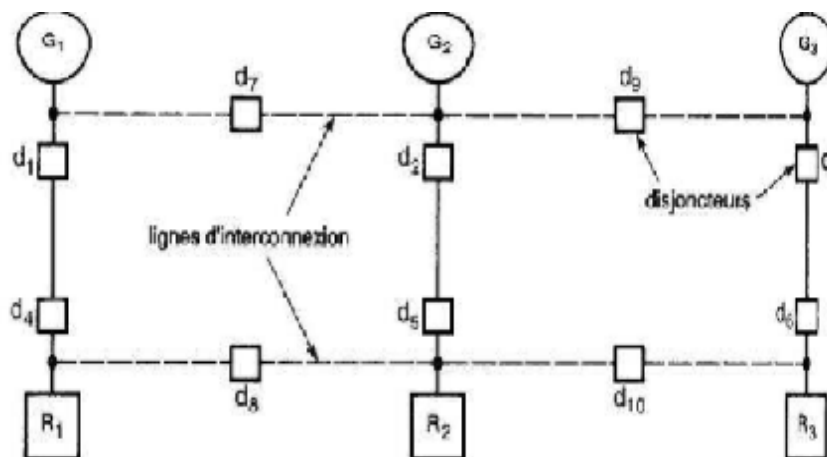


Figure I.1) Schéma d'un réseau maillé. [1]

I.2.2. La structure bouclée

C'est une structure comprenant des boucles fermées, chaque boucle comprend un certain nombre de source. L'avantage que présente cette structure c'est que l'énergie peut transiter de chemins différents, ce qui assure la continuité de l'alimentation en cas de défaut sur l'une des lignes (figure I-2).

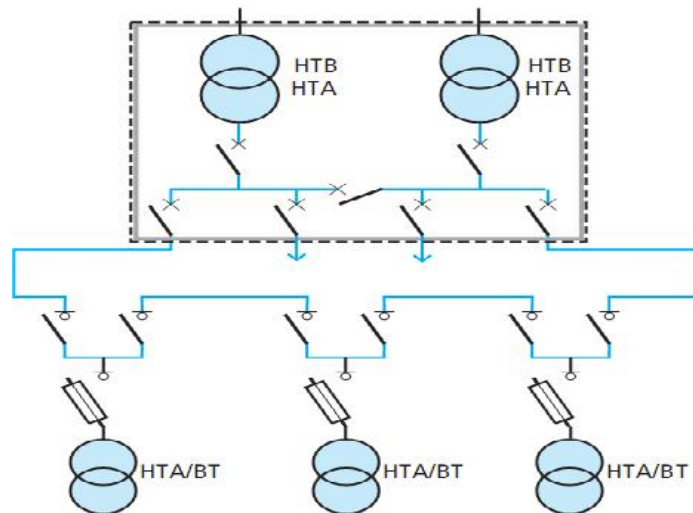


Figure I-2 : Schéma d'un réseau bouclé. [2]

I.2.3. La structure radiale

C'est une structure unifilaire arborescente, chaque départ se sépare en plusieurs ramifications à la manière des branches d'arbre, l'origine de cette structure est le poste de transformation (figure I-3).

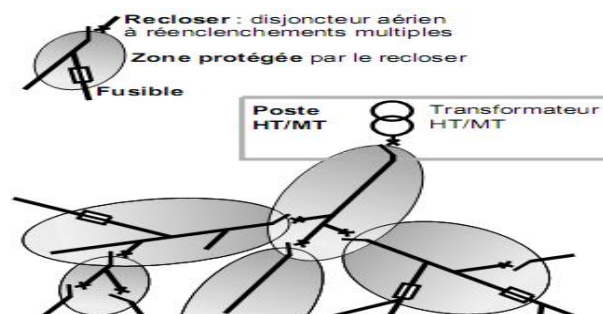


Figure I-3 : Schéma d'un réseau radial. [3]

Pour cette structure on distingue deux types d'alimentation :

- **Alimentation en antenne**

Ce type est adapté lorsque les exigences de la continuité d'alimentation sont faibles (figure I-4).

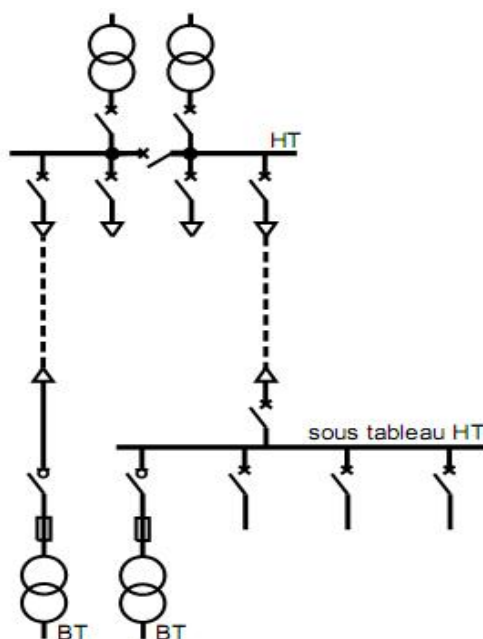


Figure I-4 : Schéma d'un réseau en antenne.

[4]

- **Alimentation en coupure d'artère**

C'est un cas particulier du réseau radial où il existe que la ligne principale sur laquelle sont raccordés les différents postes.

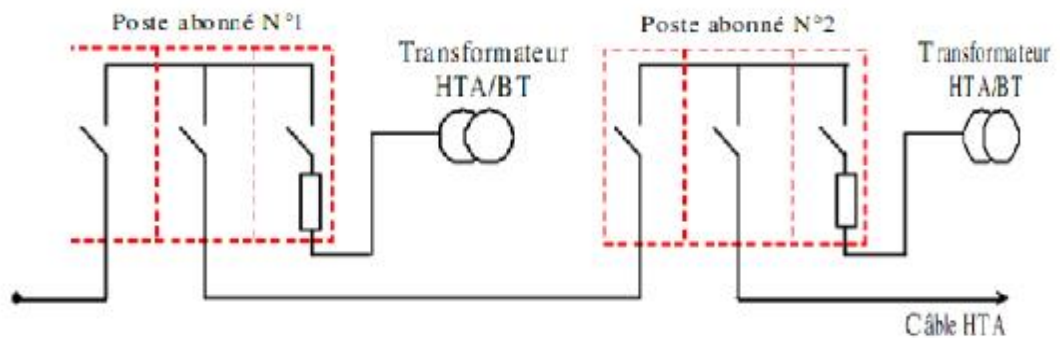


Figure I-5 : Schéma d'un réseau en coupure d'artère.

I.3. Construction du réseau

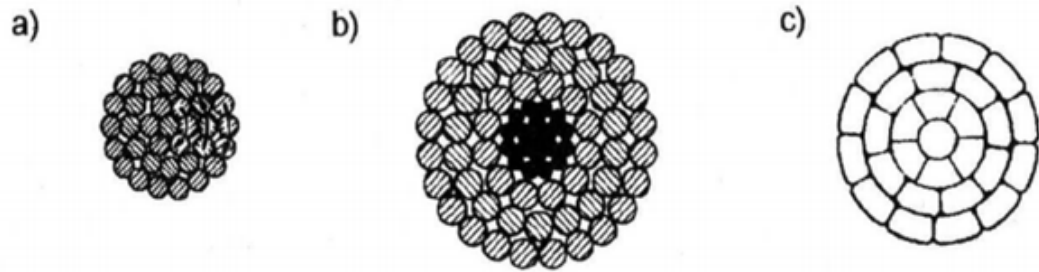
I.3.1. Les lignes

a) *Définition et composants*

Ce sont des lignes qui relient les différents postes de transformation principaux. Une ligne se compose de conducteurs supportés par des poteaux ou des pylônes à l'aide des chaînes d'isolateurs.

- **Les conducteurs : [1]**

Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des bruns toronnés pour but d'augmenter la surface du conducteur, encore se sont des fils en cuivre et en aluminium avec une âme en acier qui assure une résistance mécanique plus élevée et aussi plus économiques (L'aluminium est très léger, moins cher, sa résistivité est 1,62 fois plus que celle de cuivre, soit neuve). $36 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. le cuivre est très rare dans les lignes



a) conducteur simple b) conducteur Al-acier c) conducteur compact

Figure I-6 : les conducteurs des lignes aériennes

- **Le fil de garde : [1]**

Le fil de garde est un conducteur en acier disposé aux sommets des pylônes, il sert à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tensions, on le relie solidement à la terre à chaque pylône.

- **Les pylônes**

Pour les lignes de moins de 70kV, on peut employer comme supports de simples poteaux en béton ou en bois ; pour des tensions supérieures, le bois n'est utilisé que sous forme de portiques. Le bois est souvent injecté de créosote ou de certains sels métalliques pour le préserver contre la pourriture. Pour les lignes à très haute tension, on emploie toujours des pylônes métalliques. Ils sont constitués de fers cornière boulonnés. [1]

La figure suivante montre les différents types de pylônes :

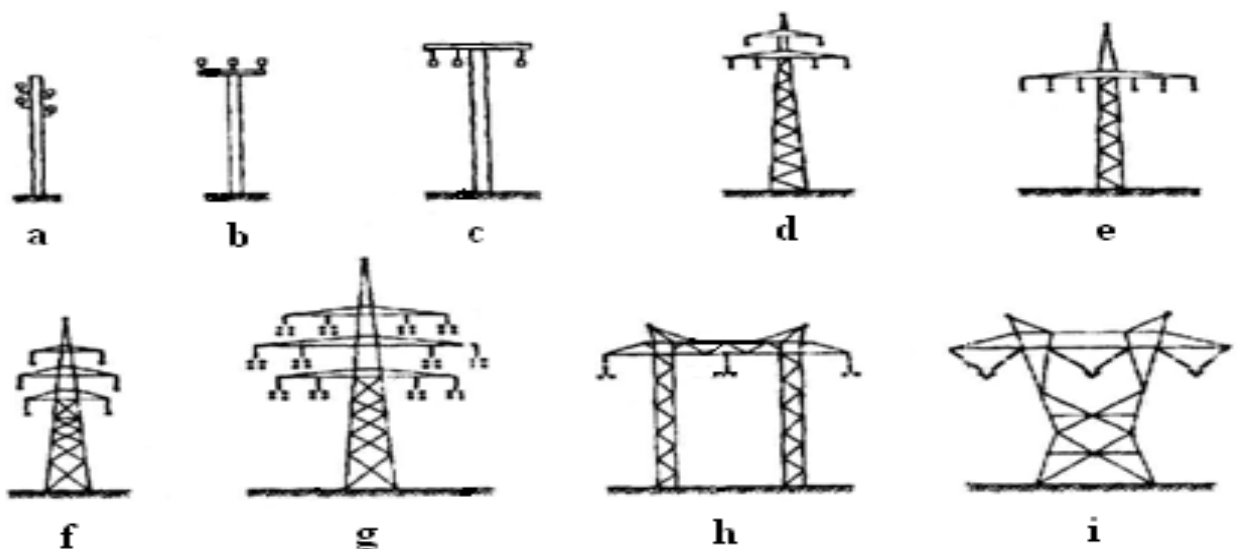


Figure I.7) les différents types de pylônes.

- Ø a) Poteau de bois.
- Ø b) poteau avec isolateurs rigides (moyennes tensions).
- Ø c) Poteau en béton (moyennes tensions).
- Ø d), e), f) Pylônes en treillis pour lignes à deux ternes (hautes tensions).
- Ø g) pylône à plusieurs ternes (hautes tensions).
- Ø h), i) pylônes simple à un terne (hautes tensions).

- **Les isolateurs : [1]**

Les chaînes d'isolateurs servent à supporter, à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et les pylônes. Ils sont presque toujours fabriqués en verre ou en porcelaine ayant respectivement une rigidité diélectrique de 12 à 28 kV/mm et de 120 kV/mm. [5]

Au point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. Afin d'augmenter leur distance de contournement, on leur donne une forme de jupe. Au point de vue mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les forces énormes dues au poids et à la tension mécanique des conducteurs. Les isolateurs sont de deux types principaux: rigides et à chaîne. La partie supérieure des isolateurs rigides sur laquelle est fixé le conducteur constituée d'une ou de plusieurs jupes en porcelaine. Une tige vissée à l'intérieur des isolateurs permet de les fixer à un support.

Il existe plusieurs types d'isolateurs parmi eux on trouve : les isolateurs rigides qui sont utilisés pour des tensions inférieurs à 50 kV, les isolateurs suspendus fabriqués en plusieurs éléments sont plus économiques car en cas de détérioration seul l'élément d'élément défectueux sera remplacé, les isolateurs de traversé qui sont utilisés pour faire traverser une paroi mise à la terre par un conducteur à haute tension, les isolateurs supports qui sont utilisés particulièrement dans les postes de transformation comme support de matériels et d'appareils se trouvant sous la tension de service.

Les figures suivantes représentent quelques types d'isolateurs :

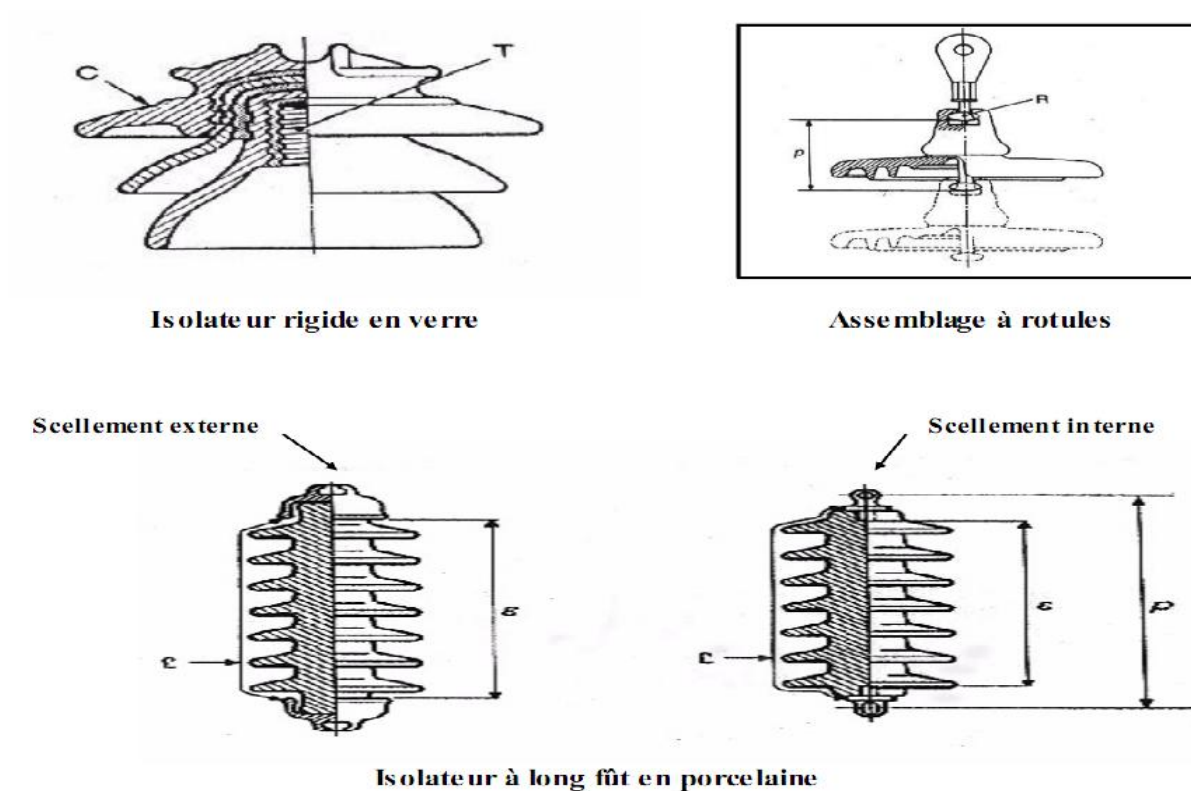


Figure I.8 : Différents types d'isolateurs.

- **Les jeux de barres**

C'est un conducteur en cuivre ou en aluminium utilisé pour la distribution de l'énergie électrique dans un poste électrique (pour la connexion des différents éléments du poste), Pour supporter un courant maximal il faut avoir une section maximale du conducteur de jeu de barre.

b) Types des lignes : [1]

On distingue quatre types de lignes selon la gamme de tension appliquée :

- **Lignes de distribution à basses tensions BT :**

Ce sont les lignes installées à l'intérieur des zones d'habitation et des usines, ces lignes fonctionnent à des tensions allant entre 120 et 600V.

- **Lignes de distribution à moyennes tensions MT:**

Ce sont les lignes ayant des tensions allant entre 3 et 60kV qui relient les clients aux postes de transformations principaux.

- **Les lignes de transport à hautes tensions HT :**

Ce sont les lignes reliant les postes de transformations principaux entre eux, aux centrales de génération, ces lignes fonctionnent avec des tensions 110 et 220 kV.

- **Les lignes de transport à très hautes tensions THT :**

Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisations, ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000Km et elles fonctionnent avec des tensions 330,400 et 500 kV.

- **Les lignes de transport à ultra hautes tensions UHT :**

Se sont les lignes fonctionnant avec des tensions allant de 765 à 1200kV.

I.3.2 Les transformateurs

a) Définition : [4]

Le transformateur appartient à la famille des composants passifs, il est l'appareil statique qui convertit un système de tensions et de courants en un autre, sans changer la fréquence, cette conversion se fait à travers un circuit magnétique. Il se compose d'une ou de plusieurs enroulements et d'un noyau.

Le transformateur est utilisé pour augmenter (diminuer) la tension afin de réduire les pertes de puissance. Les bobines primaires sont connectées à une source d'énergie et les bobines secondaires sont connectées à une charge. Le transformateur élévateur

de tension, ou survolteur, est un transformateur dans lequel la tension secondaire est supérieure à la tension primaire. Dans le cas contraire, il s'agit d'un transformateur abaisseur de tension, ou dévolteur.

Les transformateurs électriques doivent être efficaces et doivent également dissiper aussi peu d'énergie calorifique que possible pendant la transformation. Les rendements dépassent couramment 95 % du fait de l'utilisation d'alliages d'acier spéciaux permettant de coupler les champs magnétiques induits entre les bobines primaires et secondaires.

La perte d'énergie électrique n'est que de 0,5 % dans un transformateur d'une puissance importante. Cependant, un tel dispositif dégage une chaleur importante et requiert donc des systèmes de refroidissement spécifiques.

b) Types des transformateurs

On distingue deux types des transformateurs les plus utilisés qui sont :

b-1) Transformateurs monophasés

- **Réalisation :** [7]

Sont réalisés à deux variantes, avec enroulements simples ou doubles. Le parcours du flux magnétique est représenté dans la figure (I.9).

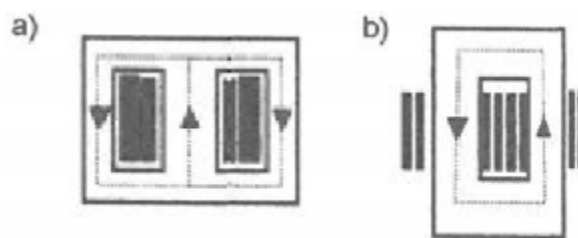


Figure I.9 : Transformateur monophasé :

a) *Enroulement simple*

b) *Enroulement double.*

- **Principe de fonctionnement du transformateur:[1]**

Une bobine à noyau d'air est alimentée par une source de tension E_g , le courant magnétisant I_m produit un flux total Φ qui disperse autour de l'enroulement figure (I.10), si l'on approche de ce montage une deuxième bobine, une partie de ce flux est captée par les spires de cette dernière et une f.e.m E_2 est induite à ses bornes. L'ensemble de ces deux bobines constitue un transformateur, la bobine accrochée à la source est appelée primaire, l'autre est appelée secondaire.

Le flux Φ créé par le primaire est subdivisé en deux parties : un flux mutuel Φ_m qui accroche les spires de secondaire et un flux de fuite Φ_f qui ne les accroche pas. Lorsque les bobines sont éloignées l'une de l'autre, le flux mutuel est faible par rapport au flux total, on dit alors que le couplage est faible.

Pour obtenir un meilleur couplage en rapprochant les deux enroulements.

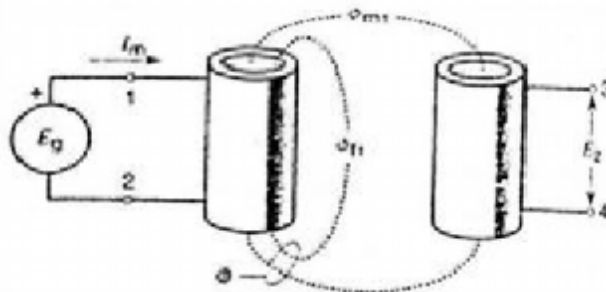


Figure I.10 : Transformateur élémentaire.

On peut l'améliorer de beaucoup en bobinant le secondaire par-dessus de primaire figure (I.11), avec cette construction la presque totalité de flux est accrochée par le secondaire.

- **Construction :**

Habituellement, la construction des transformateurs utilisés en pratique est telle que leurs propriétés se rapprochent de celle de transformateur idéal. Ainsi, afin d'obtenir une bonne perméabilité, le noyau est fait en acier électrotechnique de bonne qualité. De plus, pour minimiser les pertes fer, le noyau laminé en utilisant de l'acier en silicium [1].

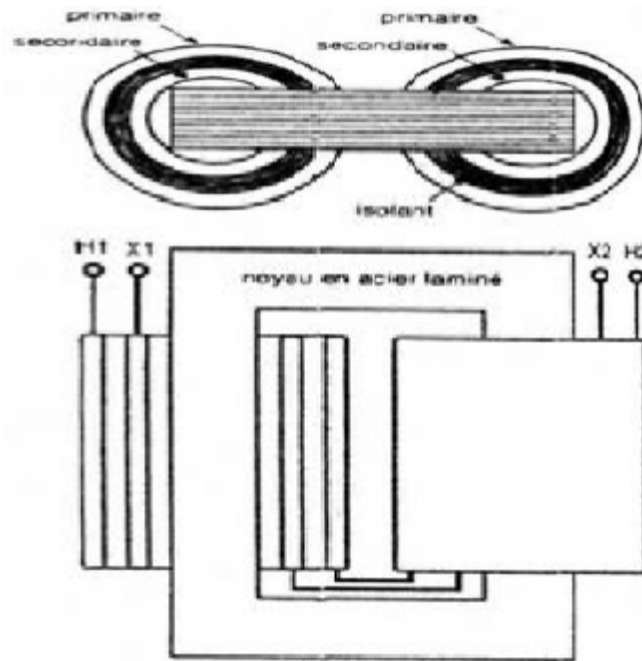


Figure I.11 : Construction d'un transformateur monophasé.

Il s'ensuit que le courant magnétisant I_m est 5000 fois plus petit que si le noyau est composé d'un matériau non magnétique, le courant I_f fournissant les pertes dans le noyau est de 2 à 10 fois plus faible que le courant I_m .

Simple solution précédente, en bobinant le primaire et le secondaire l'un par-dessus de l'autre, tout en réduisant la distance qui les sépare. Cependant, afin de conserver une isolation adéquate entre les enroulements, on ne peut diminuer cette distance en deçà d'une valeur critique. Autrement, l'isolation risque de claquer lors des surtensions dues aux chocs de foudre ou aux manœuvres sur le réseau.

b-2) Transformateurs triphasés

- **Description : [7]**

On peut obtenir simplement un transformateur triphasé par couplage triphasé de trois transformateurs monophasés, ce qui est onéreux à cause de gaspillage du matériel. La solution habituelle pour ce type est le transformateur à trois colonnes. La figure (I.12) illustre sa formation en partant de trois transformateurs monophasés figure (I.12.a), à la place de six colonnes on a besoin seulement de quatre colonnes

figure (I.12.b).

La somme des trois flux déphasés de 120° étant nulle en régime équilibré, on peut même renoncer à la colonne centrale dans la figure (I.12.b) en pointés avec épargne supplémentaire de matériels. Si en fin on ramène les trois colonnes restantes dans un plan figure (I.12.c), on obtient une solution très simple présentant une légère dissymétrie magnétique qui cependant ne perturbe pas les bons fonctionnements.

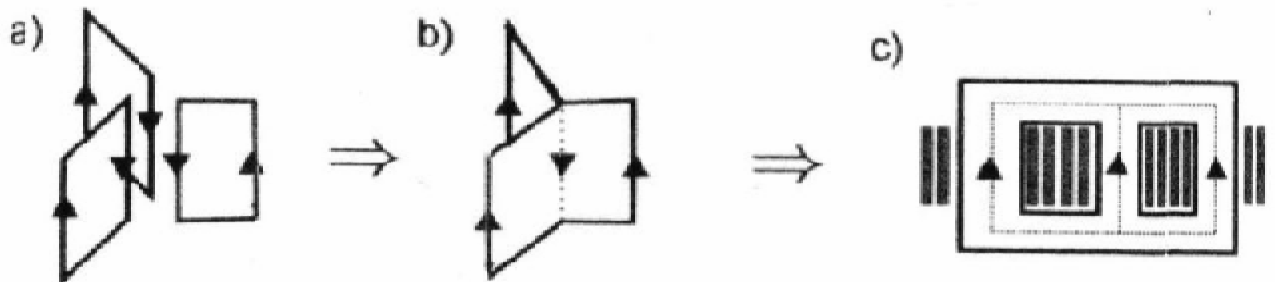


Figure I.12 : Formation de transformateur triphasé.

- **Couplage des enroulements**

Pour un transformateur triphasé, il existe différentes types de couplage d'enroulements

- Ø Le couplage étoile, définit par la lettre Y.
- Ø Le couplage triangle, définit par la lettre D ou Δ .
- Ø Le couplage zig-zig, définit par la lettre Z.

1) Indice de couplage :

Pour un transformateur triphasé, il existe différents types de couplage d'enroulement : C'est la caractéristique d'un transformateur triphasé indiquant le type de couplage réalisé au primaire et au secondaire ainsi que le déphasage entre le système de tensions primaires et le système de tensions secondaires. Les systèmes triphasés de tension sont : « triangle » (D ou d) et « étoile » (Y ou y). Dans le système « étoile », le « neutre » (point central de l'étoile) peut être sorti au borne du transformateur : ceci est indiqué par la présence de la lettre N (ou n) dans l'indice de couplage. Il existe également le couplage zig-zag (z), utilisé majoritairement au secondaire ; il possède un neutre. Ce couplage permet, lors de la perte d'une phase au primaire, d'avoir au secondaire une tension pratiquement identique sur les trois phases. Enfin, l'indice de couplage est complété par un « indice horaire » qui donne, par pas de 30° , le déphasage horaire en 12èmes de tour (comme sur une montre) entre le primaire et le secondaire du transformateur (ex.: 11 = $11 \times 30^\circ = 330^\circ$ en sens horaire ou 30° en sens antihoraire).

2) Différentes couplage

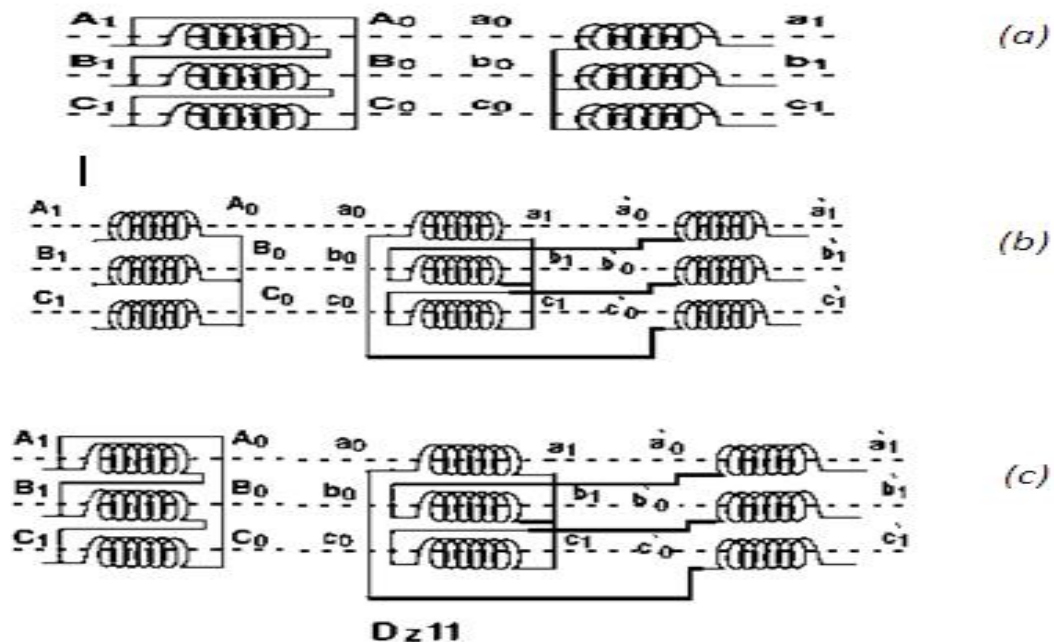


Figure I.13 : Modes de couplage de transformateur triphasé

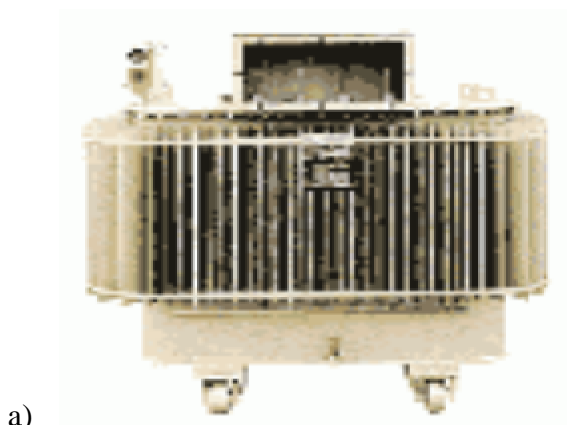
a) Couplage triangle étoile. b) Couplage étoile zig-zag. c) Couplage triangle zig zag

C) Classification des transformateurs : [8]

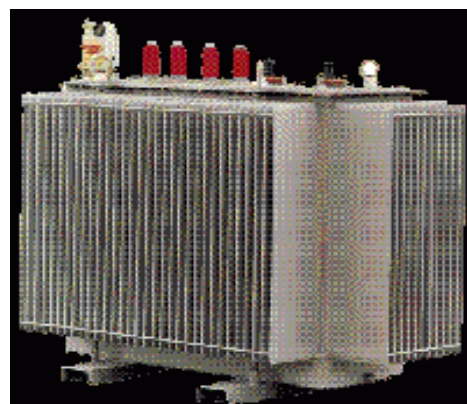
Les transformateurs se classifient selon leurs puissances fournissent, on distingue :

- Ø Petits transformateurs : $1 \text{ kVA} < S < 25 \text{ kVA}$.
- Ø Transformateurs de distribution : $25 \text{ KVA} < S < 2000 \text{ kVA}$.
- Ø Transformateurs de puissance pour le transport d'énergie : $S > 2000 \text{ kVA}$ jusqu'à 1000 MVA .

La Figure (I.14) représente quelques types des transformateurs de puissance.



a)



b)



c)



d)



Figure I.14 : Différents types des transformateurs de puissance.

La Figure (I.14.a) : Transformateur à l'huile avec niveau d'isolement primaire et secondaire jusqu'à 36 kV, ajustable par commutateur hors tension, avec enroulements en cuivre.

Figure (I.14.b) : Transformateur de puissance TTHI immergé dans l'huile ou sec enrobé époxy pour des puissances de 100 à 1250 kVA en complément d'une large gamme de transformateurs de distribution en HTA/HTI.

La Figure (I.14.c) : Transformateur de puissance SMIT (5 à 1000 MVA).

La Figure (I.14.d) : Transformateur SEC avec une autoextinguibilité en cas d'incendie, résistant aux variations de charge et aux surcharges, et insensibilité à la pollution et à la condensation

d) Les transformateurs de mesures

- **Les transformateurs de tensions**

Ce sont des transformateurs à haute précision dont le rapport de transformation presque invariable avec la charge. La tension secondaire et celle de primaire sont en phase. Ils sont utilisés sur les lignes à haute tension pour brancher les appareils de mesures et les protections (relais). Le primaire est branché en parallèle avec la ligne, son rapport de transformation est choisit de telle façon à avoir une tension secondaire peut être supporté par les appareils de mesures ($U_{2nom} = 100V$).

- **Les transformateurs de courant**

Ces transformateurs ont une très haute précision et un rapport de transformation demeure constant malgré la variation de la charge, ils sont utilisés pour ramener des courants intenses à des valeurs facilement mesurables ($I_{2nom}=5A$). Ils servent aussi à isoler les appareils de mesures et de protections, le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne.

e) **Echauffement et refroidissement des transformateurs**

1°) **L'échauffement**

- **Les pertes joule**

C'est la dissipation d'énergie sous forme de chaleur provoquée par le passage du courant dans l'enroulement primaire et secondaire

- **Les pertes fer**

La magnétisation des tôles s'accompagne des pertes d'énergie sous forme de chaleur, Elles sont de deux sortes.

- **Les pertes par hystérésis**

Sont dues au fait que la magnétisation du matériau n'est pas totalement réversible, elles dépendent à la fois du courant magnétisant et de la mémoire du matériau.

- **Les pertes par courant du Foucault**

Elles sont provoquées par des courants induits, ces derniers sont d'autant plus importants que la surface traversée par le champ magnétique soit grande. Les pertes par courant de Foucault dépendent du carré de l'épaisseur de la tôle.

2°) **Le refroidissement**

Vue les causes d'échauffement dans le transformateur et les solutions utilisées, le phénomène d'échauffement reste toujours important pour ne pas avoir une détérioration du transformateur, il faut utiliser un très bon moyen de repartitionnement.

- **Refroidissement à air**

Les tôles de la partie de la cuve forment des ondes qui augmentent sa surface, favorisent l'échange thermique avec l'extérieur.

- **Refroidissement à l'huile**

L'huile favorise les échanges thermiques et permet le refroidissement des canaux aménagés au cœur des enroulements pour permettre son passage et améliorer l'homogénéité de la température.

- **Refroidissement par radiateur d'huile**

Ce radiateur indépendant de la cuve est lié avec le transformateur par des tuyaux qui assurent la circulation d'huile du radiateur vers le transformateur à l'aide d'une pompe et vice versa, la circulation de l'huile froide dans le radiateur vers le transformateur fait refroidir la partie intérieure du transformateur.

I.3.3. Les dispositifs de protection contre les surtensions

Les éclateurs et les parafoudres sont les dispositifs utilisés pour limiter les surtensions de fortes amplitudes. Ils sont généralement dimensionnés pour intervenir sur les surtensions de foudre.

I.3.3.1. Les éclateurs

- **Fonctionnement**

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

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

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (voir fig. I-15). Par exemple, $B = 40$ mm sur les réseaux EDF 20 kV

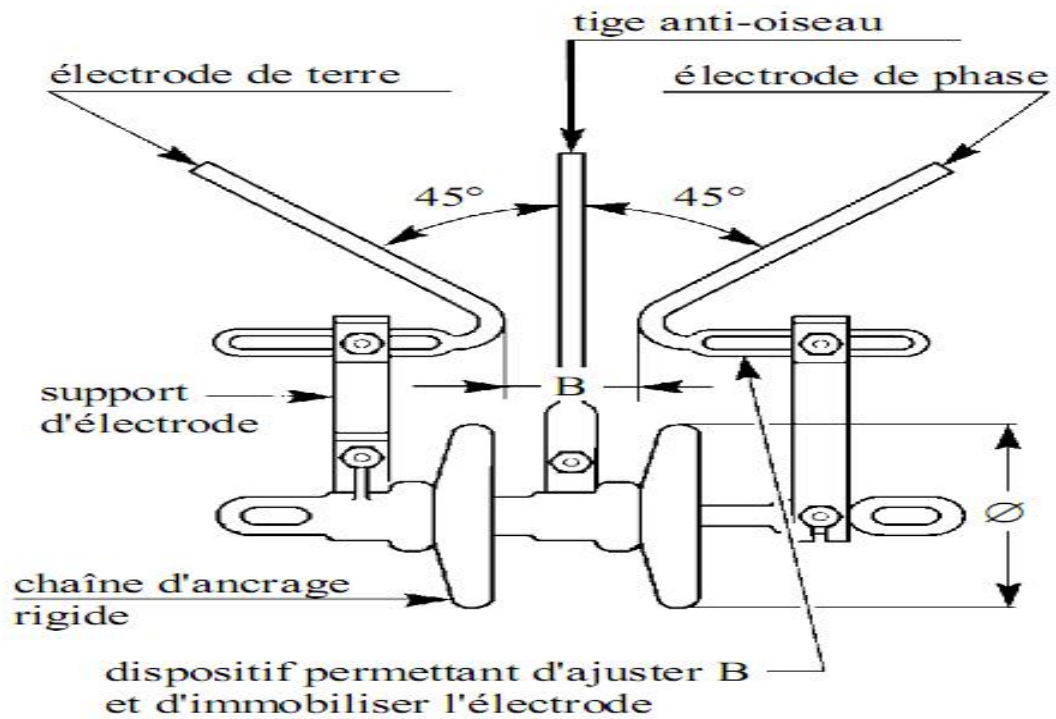


Figure I.15 : éclateur MT avec une tige anti-oiseaux

- **Avantages**

Les principaux avantages des éclateurs sont :

- leur faible prix
- leur simplicité
- la possibilité de réglage de la tension d'amorçage.

- **Inconvénients**

- les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables (jusqu'à 40 %) en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression) qui modifient l'ionisation du milieu diélectrique (l'air) entre les électrodes.
- l'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase-terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, celui-ci dure jusqu'à son

élimination par les appareils de coupure (ce court-circuit s'appelle courant de suite). Cela rend nécessaire l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de ré-enclenchement rapide sur les disjoncteurs situés en amont. De ce fait, les éclateurs sont inadaptés à la protection d'une installation contre les surtensions de manœuvre.

- l'amorçage provoqué par une surtension à front raide n'est pas instantané. En raison de ce retard à l'amorçage, la tension réellement atteinte dans le réseau est supérieure au niveau de protection choisi. Pour tenir compte de ce phénomène, il est nécessaire d'étudier les courbes tension-temps de l'éclateur.
- l'amorçage provoque l'apparition d'une onde coupée à front raide susceptible d'endommager les enroulements des transformateurs ou des moteurs situés à proximité. Encore en place sur certains réseaux de distribution publique, les éclateurs sont actuellement remplacés par des parafoudres

I.3.3.2. Les parafoudres

Pour palier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service.

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

- **Définitions**

- Courant de décharge d'un parafoudre :

C'est l'Onde de courant écoulee par le parafoudre après amorçage des éclateurs série.

- Courant de suite d'un parafoudre :

C'est le courant à fréquence industrielle débité par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge.

- Tension résiduelle d'un parafoudre :

C'est la tension qui apparaît entre les bornes d'un parafoudre pendant le passage du courant de décharge

- **Type des parafoudres**

1°) Parafoudre à résistance variable avec éclateur

- **principe de fonctionnement**

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

Après écoulement de l'onde de choc à la terre, le parafoudre n'est soumis qu'à la tension du réseau, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

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

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

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistance et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC).

Certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflage de l'arc (aimants ou bobines de soufflage magnétique), pour égaliser la répartition de l'intensité du champ électrique(E) le long du parafoudre.

- **Caractéristiques :**

Les parafoudres à résistance variable sont caractérisés par :

- la tension assignée, qui est la valeur spécifiée maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement.

Cette tension peut être appliquée de façon continue au parafoudre sans que cela modifie ses caractéristiques de fonctionnement.

- les tensions d'amorçage pour les différentes formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre, ...).
- le pouvoir d'écoulement du courant de choc.

2°) Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO)

- **Principe de fonctionnement :**

La figure (I.16) montre que, contrairement au parafoudre à résistance variable avec éclateur, le parafoudre à oxyde de zinc est constitué uniquement d'une résistance variable fortement non linéaire.

La résistance passe de $1,5 \text{ M}\Omega$ à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à 10 mA) à 15Ω pendant la décharge.

Après le passage du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre devient égale à la tension du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre est très faible et se stabilise autour de la valeur du courant de fuite à la terre. La forte non linéarité du parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension.

Par exemple, lorsque le courant est multiplié par 107, la tension n'est multipliée que par 1,8.

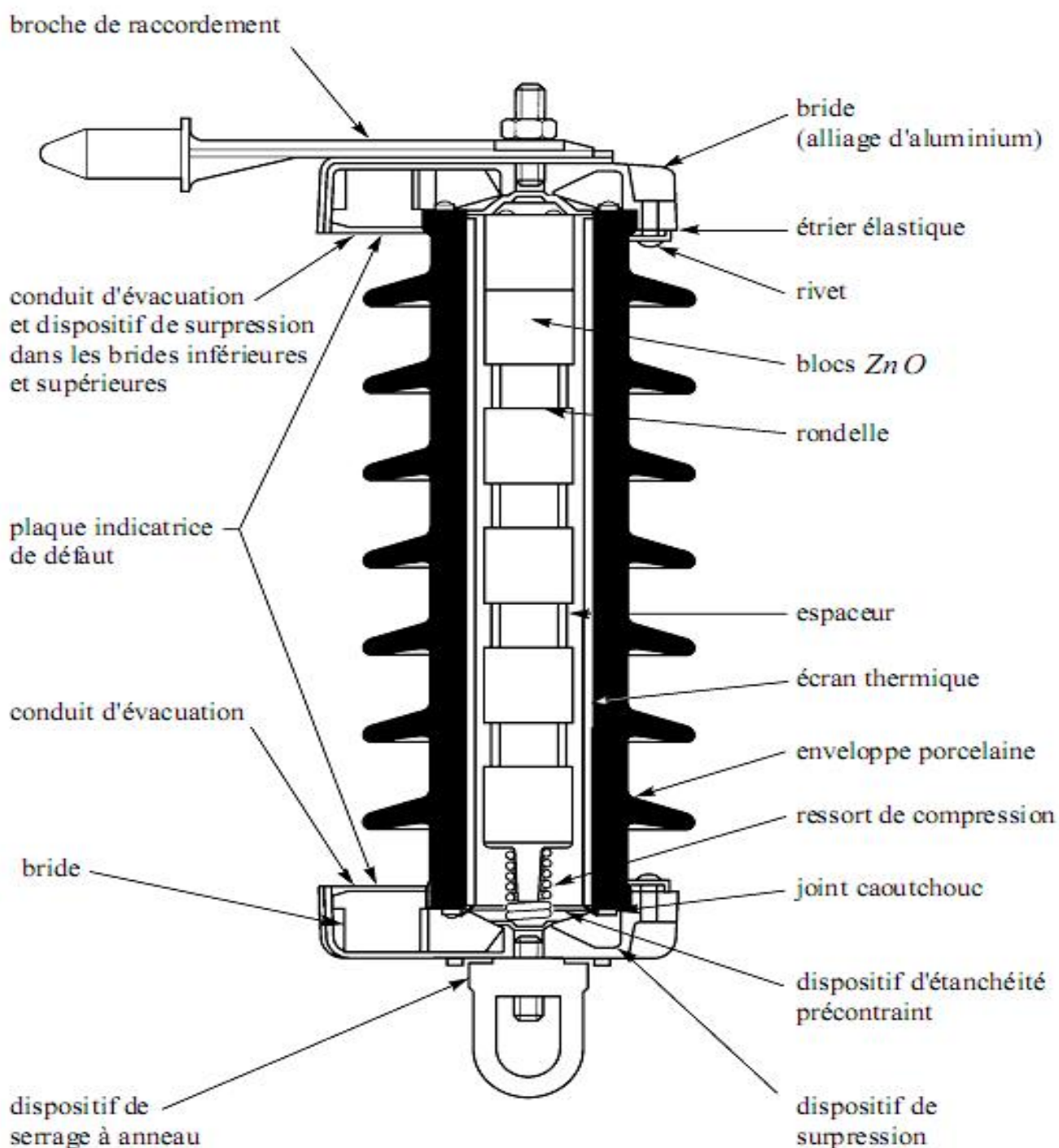


Figure I.16 : exemple de structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine pour les réseaux 20 KV.

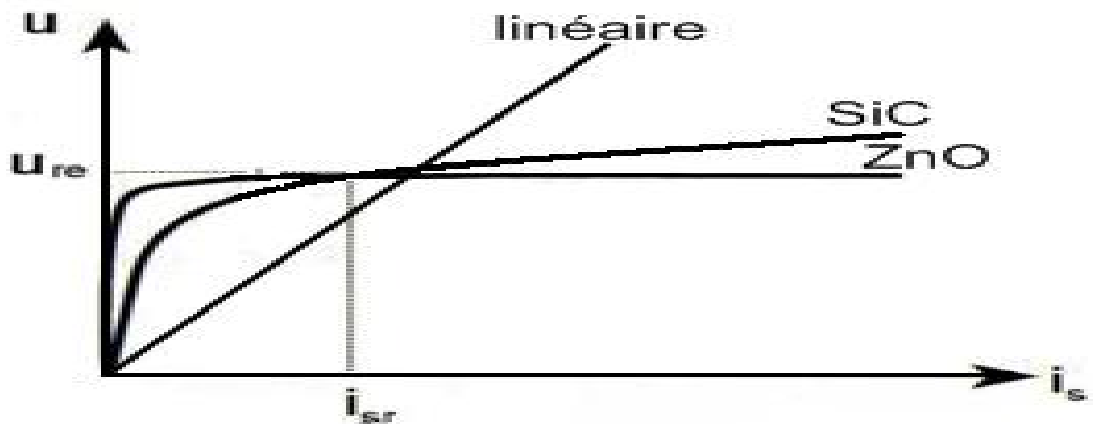


Figure I-17 : caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection 550kV/10kA.

SiC : parafoudre a distance variable avec éclateur constitué d'une résistance carbure de silicium

ZnO : parafoudre a oxyde de zinc

Linéaire : courbe U proportionnelle a I

- **Caractéristiques**

Les parafoudres ZnO sont caractérisés par :

- La tension de régime permanent qui est la valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliquée de façon continue entre les bornes du parafoudre.
- La tension assignée qui est la valeur maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement dans les conditions de surtension temporaires définies dans les essais de fonctionnement (une surtension à fréquence industrielle de 10 secondes est appliquée au parafoudre (CEI 99-4)
- Le niveau de protection défini arbitrairement comme étant la tension résiduelle du parafoudre lorsqu'il est soumis à un choc de courant donné (5,10 ou 20 kA selon la classe), de forme d'onde 8/20 μ s

- la tenue aux chocs de courant à front raide ($1\mu\text{s}$), de foudre ($8/20\ \mu\text{s}$), de longue durée, de manœuvre
- le courant nominal de décharge.

Le tableau ci-dessous donne un exemple de caractéristique d'un parafoudre ZnO phase-terre pour un réseau de distribution publique 20 kV (avec déclenchement au premier défaut).

Tension maximale permanente (phase-terre)	12,7 kV
Tension assignée	24 kV
Tension résiduelle au courant nominal de décharge	< 75 kV
Courant nominal de décharge (onde de 8/20 μs)	5 kA
Tenue au courant de choc (onde de 4/10 μs)	65 kA

Tableau 1 : Exemple de caractéristique d'un parafoudre ZnO pour un réseau 20kV.

- **choix des parafoudres à oxyde de zinc**

La méthode générale de choix d'un parafoudre à oxyde de zinc en HT consiste à déterminer ses paramètres caractéristiques à partir des données du réseau, à l'endroit où il sera installé.

Les paramètres caractérisant le parafoudre sont :

- UC, tension de régime permanent
- Ur, tension assignée
- Ind, courant nominal de décharge
- classe de décharge et capacité énergétique
- caractéristiques mécaniques.

Les données relatives au réseau sont :

- U_m , tension la plus élevée pour le matériel
- TOV (Temporary Over Voltage), surtensions temporaires (apparaissant lors d'un défaut à la terre ou un délestage sur le réseau de distribution publique).

Le choix du parafoudre consiste en un compromis entre les niveaux de protection des équipements et la capacité énergétique du parafoudre.

Le niveau de protection doit être le plus bas possible pour la tenue des équipements. Cela implique un dimensionnement en tension le plus faible possible, donc une plus grande difficulté à tenir les surtensions temporaires.

CHAPITRE II :
Modélisation et
méthodes de calcul des
paramètres

II.1 Introduction :

Le transport de l'énergie électrique se fait sur des conducteurs tels que les lignes aériennes les câbles souterrains ou le simple fils de raccordement sortant d'un téléviseur. Malgré leur simplicité apparente, ces conducteurs qui influent grandement sur le transport de l'énergie électrique. Dans ce chapitre nous allons rappeler ces diverses propriétés pour les lignes aériennes (HT, THT).

II.2 Schéma équivalent d'une ligne électrique :

Malgré leur diversité, les lignes possèdent des propriétés électriques communes. En effet, toute ligne possède une résistance, une conductibilité, une réactance inductive et une réactance capacitive. Ces impédances sont réparties uniformément sur toute la longueur de la ligne si bien qu'on peut représenter la ligne par une série de section R,L,C identiques (fig.II.1). Chaque section représente un tronçon de ligne de longueur donnée. Les éléments r_0 , l_0 , c_0 , g_0 représentent les impédances pour une longueur 1km.

Dans les lignes électriques de tension nominale jusqu'à 200kV, les valeurs de ces paramètres sont invariables pour chaque ligne, mais pour les lignes de tension nominale dépassant 200Kv g et c deviennent variables à cause de l'effet couronne.

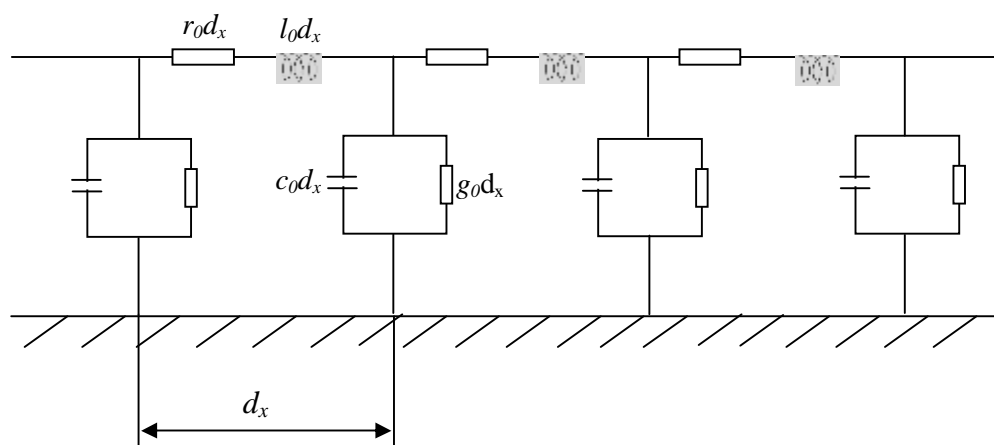


Figure II.1 : Schéma de la ligne triphasée en cascade.

On met sur le schéma équivalent relatif à chaque petite partie de la ligne les paramètres suivants : r , l , c , et g . Dans ce cas on a un schéma équivalent à plusieurs éléments montés en cascade.

Avec :

r_0 , L_0 , c_0 , et g_0 sont respectivement : la résistance, l'inductance, la capacité et la conductibilité kilométrique. (Ω/km ; H/km ; F/km ; $1/\Omega km$).

dx est la longueur d'un élément. $r_0 dx$, $l_0 dx$, $c_0 dx$, et $g_0 dx$ sont respectivement : la résistance, l'inductance, la capacité et la conductibilité d'un élément de la ligne.

En réalité ces paramètres sont repartis tout le long de la ligne, dans ce cas on fait les calculs des lignes à l'aide de la théorie des champs électromagnétiques, mais dans le cas des calculs pratiques on utilise le schéma équivalent de la figure(II.2), et on applique la théorie des circuits électriques (loi de Kirchhoff).

Le schéma précédent est utilisé pour les lignes longues où le processus électromagnétique a un caractère ondulatoire. Pour les lignes ayant des longueurs inférieures à 300km (câbles inférieur à 50km), on fait une certaine simplification, en supposant que ces paramètres sont localisés soit au milieu de la ligne (schéma équivalent de forme "T"), soit aux bouts de la ligne (schéma équivalent de forme " π "). [5]

Pour le régime équilibré, on utilise les schémas équivalents monophasés, comme l'indique la figure suivante :

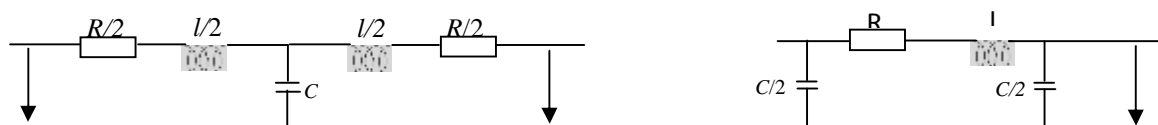


Figure II.2 : Schémas équivalents de forme T et π d'une ligne monophasés.

Pour les lignes à basse tension, les capacités sont très petites, on les néglige et le schéma équivalent sera comme suit :

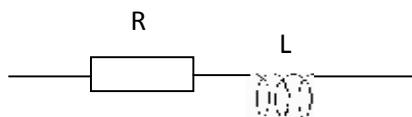


Figure II.3 : Schéma équivalent d'une ligne à basse tension

II.3 Construction du schéma équivalent de lignes électriques triphasées (HT, HTH)

Pour construire le schéma équivalent d'une ligne triphasée, on considère séparément deux phénomènes du processus électromagnétique qui a lieu dans la ligne. On considère premièrement le champ magnétique en négligeant le champ électrique et la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie thermique (calorifique). Ces parties de la ligne sont représentées dans le schéma équivalent par des résistances.

Sur la figure (II.4), on représente la coupe transversale d'une ligne triphasée où la terre joue le rôle d'un conducteur du neutre. D'habitude, on tient compte du courant qui passe dans la terre par la somme des courants des trois (03) conducteurs fictifs se trouvant dans la terre à une profondeur Dt , des conducteurs réels correspondants.

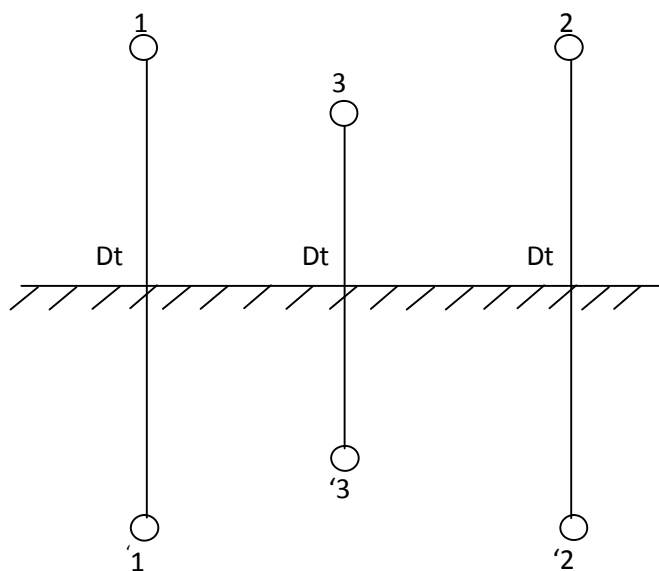


Figure II.4: Coupe transversale d'une ligne triphasée avec la terre

On appelle Dt la profondeur équivalente du passage du courant retour. Elle (Dt) dépend de la fréquence du courant passé et de la résistivité du sol. Sa valeur moyenne est $Dt_{moy} = 1000m$ pour une fréquence de 50hz.

Une telle représentation de courant dans la terre crée trois(03) boucles entre trois(03) conducteurs réels et trois (03) conducteurs fictifs. Les inductances de ces boucles sont égales à $L_1 = L_2 = L_3 = L$, mais les inductances mutuelles ne sont pas égales, c.-à-d. $M_{12} \neq M_{23} \neq M_{31}$.

Pour que la ligne triphasée soit un élément symétrique dans un système triphasé, on fait la transposition des conducteurs de phases, en divisant la longueur de la ligne en partie de multiple de trois(03), et on change les positions des conducteurs de façon que les conducteurs des trois phases soient également dans les trois positions comme le montre le schéma de la figure (II.5) suivante :

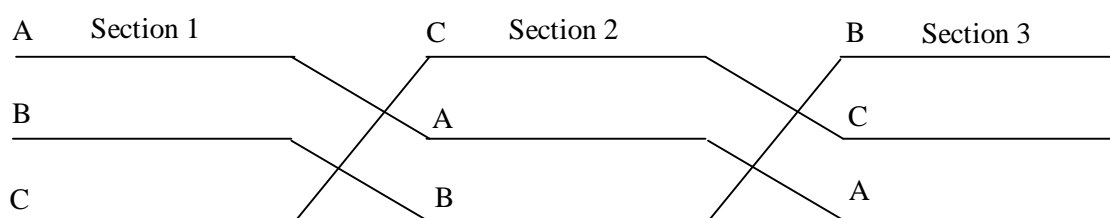


Figure II.5 : Transposition des lignes électriques et les sections en π

Dans ce cas, les inductances mutuelles sont égales ($M_{12} = M_{23} = M_{31}$). Puis on détermine comment il faut mettre les inductances linéiques et mutuelles (L, M) sur le schéma équivalent.

Pour cette raison, on suppose qu'un point de la ligne est mis à la terre et l'autre est connecté à une source de tension triphasée ($\dot{U}_A \dot{U}_B \dot{U}_C$), Et les équations d'après la deuxième loi de **Kirchhoff** pour le schéma considéré sont les suivantes.

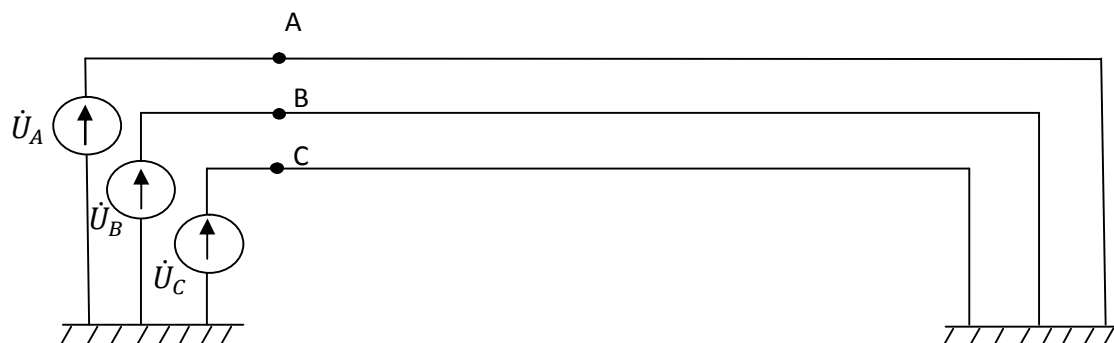


Figure II.6 : Ligne électrique connectée à une source (3~) et mise à la terre à sa fin

Pour la phase A, nous avons : $\dot{U}_A = j\omega L\dot{I}_A + j\omega M\dot{I}_B + j\omega M\dot{I}_C$

$$= j\omega L\dot{I}_A + j\omega M(\dot{I}_B + \dot{I}_C)$$

Le courant dans le conducteur du neutre est :

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

$$\text{d'où } \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N - \dot{I}_A$$

$$\text{Alors : } \dot{U}_A = j\omega L\dot{I}_A + j\omega M(\dot{I}_B + \dot{I}_C)$$

$$= j\omega L\dot{I}_A + j\omega M(\dot{I}_N - \dot{I}_A)$$

$$\dot{U}_A = j\omega(L - M)\dot{I}_A + j\omega M\dot{I}_N \quad \dots\dots\dots(1)$$

Par analogie on trouve pour les phases B et C :

$$\dot{U}_B = j\omega(L - M)\dot{I}_B + j\omega M\dot{I}_N \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{U}_C = j\omega(L - M)\dot{I}_C + j\omega M\dot{I}_N \quad \dots\dots\dots(3)$$

Les trois équations précédentes montrent que pour tenir compte du champ magnétique, on peut utiliser le schéma équivalent (schémas électrique) suivant :

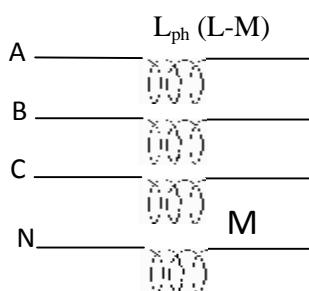


Figure II.7 : Schéma équivalent avec les inductances

Maintenant considérons le champ électrique en négligeant le champ magnétique et la résistance de la ligne. Les charges se trouvant sur la surface des conducteurs et de la terre sont liés entre elles à l'aide du champ électrique.

Pour tenir compte des influences de ces charges, il faut mettre en évidence les capacités correspondantes figurées par le schéma suivant :

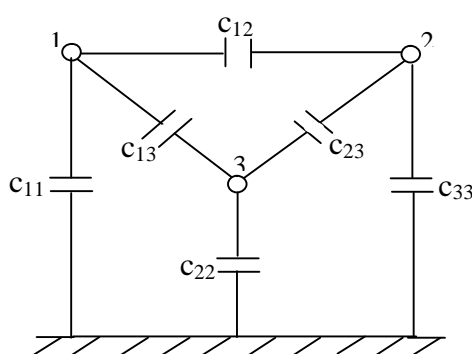


Figure II.8 : Schéma de capacités de lignes (influences de charges)

Les valeurs de ces capacités dépendent de diamètres des conducteurs des différentes phases, de la distance entre phases, et distance entre phase et terre. Pour une ligne triphasée ayant une transposition équilibrée des conducteurs de phases.

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_0$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{23} = C_m$$

Et pour tenir compte du champ électrique, on peut utiliser le schéma équivalent représenté sur la figure ci-après :

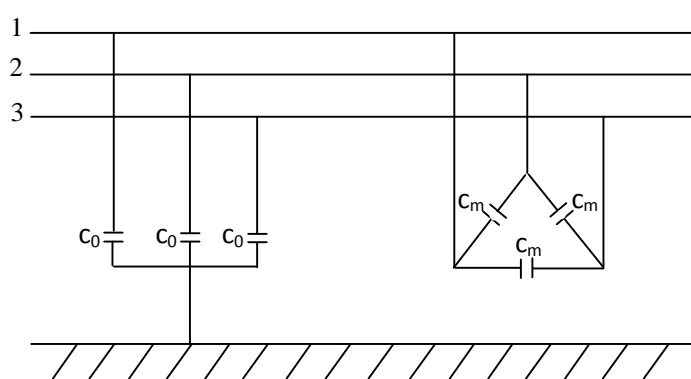


Figure II.9: Schéma équivalent d'une ligne en tenant compte du champ électrique

En utilisant les schémas équivalents correspondant aux phénomènes électrique et magnétique, et en ajoutant la résistance de la ligne, on revient au schéma équivalent de la ligne triphasée de la figure II.1

II.4 calcul des paramètres de la ligne triphasée :

Les lignes triphasées sont caractérisées par les paramètres : R, L, C et G qu'on détermine en régime normal comme suit :

II.4.1 calcul de la résistance R

La résistance est en fonction de la fréquence, de type de bobinage et de la température. On distingue deux types de résistances dans les lignes de transport d'énergie électrique, la résistance réelle quand le circuit est en courant alternatif et ohmique quand il est en courant continu. La résistance réelle est plus grande que la résistance ohmique à cause de l'effet superficiel. [9]

Cependant, pour la fréquence de 50Hz, l'effet superficiel est insignifiant, voilà pourquoi on calcule les résistances réelles des conducteurs de lignes comme des résistances ohmiques. Dans ces calculs on ne tient pas compte de la variation de la température. Les résistances des conducteurs standards sont données à une température de 20°C.

$$R = R_0 \cdot l \ (\Omega) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{avec : } R_0 = \rho \frac{1}{S} \ (\Omega/m)$$

Où : l est la longueur de la ligne.

S : section du conducteur

ρ : La résistivité du matériau de conducteur ($\Omega \cdot mm^2/km$)

La résistance des conducteurs d'acier dépend de l'effet superficiel et aussi d'effet de perte de puissance dans la matière (perte d'hystérésis, perte de courant de Foucault).

$$R = R_0 + \Delta R_0$$

$$\Delta R_0 = \Delta R_{0Es} + \Delta R_{0Hyst} + \Delta R_{0cF}$$

Aussi ΔR_0 dépend de flux magnétique et la perméabilité magnétique de l'acier.

$$\Phi = B \cdot S = \mu HS$$

H : l'intensité du champ magnétique proportionnelle au courant.

Φ : Est proportionnel au courant et à la saturation.

Dans le cas de faibles courants le flux magnétique Φ et par conséquent ΔR_0 ne peut proportionner qu'au courant, mais pour le cas de forts courants Φ et ΔR_0 sont proportionnelles au courant et à la saturation du conducteur.

II.4.2 Calcul de la conductibilité

a- Conductibilité active(G) :

La conductibilité active dépend des pertes de puissance par effet couronne et par les courants de fuite. Pour des tensions nominales inférieures à 220KV, elle est très petite d'où on néglige son influence.

b- Conductibilité réactive (B):

La conductibilité réactive dépend des capacités entre conducteurs de différentes phases et entre chaque conducteur et terre. Elle dépend aussi du diamètre du conducteur et des distances moyennes entre les conducteurs des différentes phases.

$$B = B_0 \cdot l \dots\dots\dots(3)$$

$$B_0 = 7.58 \cdot 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_c} \quad \text{avec} \quad D_m = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} \quad \text{où :}$$

r_c : rayon du conducteur.

D_m : distance moyenne entre les conducteurs de différentes phases.

- dans le cas de disposition des conducteurs au sommet d'un triangle (Figure II.11.b) :

$$D_{12} = D_{23} = D_{31} = D \rightarrow D_m = \sqrt[3]{DDD} = D$$

- dans le cas d'une disposition horizontale des conducteurs, (Fig II.11.a) :

$$D_{12} = D_{23} = D, \quad D_{31} = 2D \quad \text{donc,}$$

$$D_m = \sqrt[3]{DD2D} = D \sqrt[3]{2} = 1,26D$$

II.4.3 Calcul de la réactance (X_L)

La réactance de la ligne se calcule par la formule ci-après :

$$X_L = X_0 \cdot l(\Omega) \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Avec : } X_0 = \omega \left(4.6 \log \frac{D_m}{r_c} + 0.5\mu \right) * 10^{-4} \quad (\Omega/Km)$$

X_0 : Dépend de la fréquence, de la perméabilité magnétique, des paramètres géométriques du conducteur et dépend aussi de la saturation de la matière.

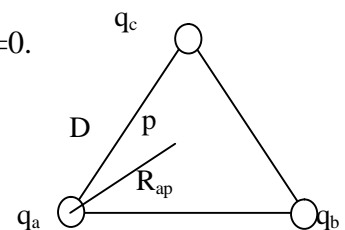
-pour une fréquence de 50Hz, $\omega = 315 \frac{1}{s}$ et $\mu = 1$ $X_0 = 0.144 * \log \frac{D_m}{r_c} + 0.016$

II.4.4 Calcul de la capacité (C)

Supposons un système équilibré (ligne transposée) avec $q_a + q_b + q_c = 0$.

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{ab}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right)$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{bc}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{bc}} + q_c \ln \frac{D_{ac}}{D_{ab}} \right)$$



$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (q_a \ln \frac{D_{ac}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{ac}} + q_c \ln \frac{D_{ab}}{D_{bc}})$$

La moyenne s'écrit : $V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (q_a \ln \frac{D_m}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_m})$

Similairement : $V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (q_a \ln \frac{D_m}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_m})$

Comme on a : $q_b + q_c = -q_a$

Alors : $V_{ac} + V_{ab} = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_m}{r}$

Et comme le système est équilibré, nous avons :

$$V_{ac} + V_{ab} = 3V_{an}$$

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_m}{r}} [F/m] \quad \longrightarrow \quad C = \frac{0.0556}{\ln \frac{D_m}{r}} [\mu F/m]$$

II.5 calcul des paramètres de la ligne triphasée (conducteurs sectionnés) :

Dans les lignes de très haute tension (à partir de 220 KV), en plus des pertes de puissance par échauffement, il existe encore des pertes de puissance par effet couronne. Et pour diminuer cette forte perte de puissance, on utilise les conducteurs sectionnés, c.à.d. dans chaque phase on met plusieurs conducteurs. [9]

II.5.1 Calcul de la résistance (R) :

Le calcul de résistances des lignes avec conducteurs sectionnés se fait comme suit :

$$R = \frac{R_0}{n} \cdot l \quad \text{Où :}$$

n : le nombre de conducteurs dans une phase.

II.5.2 Calcul de la conductivité

a- conductibilité active (G) :

On calcule G d'après les pertes de puissance par effet couronne.

$$G = G_0 \cdot l \dots\dots (2)$$

$$G_0 = \frac{\Delta P_{\text{couronne}}}{U_n^2} \quad \text{Avec :}$$

$\Delta P_{couronne}$: Pertes de puissance par effet couronne.

U_n : Tension nominale.

b- conductibilité réactive (B) :

- dans le cas de conducteurs sectionnés (figure II.11.c), on calcule le rayon équivalent comme suit :

$$B = B_0 \cdot l \dots\dots\dots(3)$$

$$B_0 = 7.58 \cdot 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_{eq}}$$

$$r_{eq} = \sqrt[n]{a_m^{n-1} \cdot r_c} \quad \text{Avec : } a_m = \sqrt[n]{a_1 a_2 a_3 \dots} \quad \text{où :}$$

r_c : rayon du conducteur

n : nombre de conducteurs dans une phase.

a_m : la distance moyenne entre les conducteurs sectionnés.

II.5.3 Calcul de la réactance (X_L)

Pour une ligne ayant des conducteurs sectionnés X_L se calcule comme suit :

$$X_L = X_{01} \cdot l \quad (\Omega)$$

$$X_0 = 0.144 \cdot \log \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.016}{n}$$

Les distances entre conducteurs et entre phases augmentent par l'augmentation de la tension nominale. Il est important de remarquer que la formule (4) de X_0 ne peut pas être appliquée pour calculer les réactances des câbles. Parce que les distances entre conducteurs de différentes phases dans les câbles sont très petites. X_0 des câbles est déterminée à l'usine de fabrication et ses valeurs sont données dans le dossier du câble.

II.5.4 : Calcul de la capacité (C)

Le calcul de la capacité C pour les conducteurs sectionnés devient comme suit :

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{D_m}{r_{eq}}} \quad [\mu F / m]$$

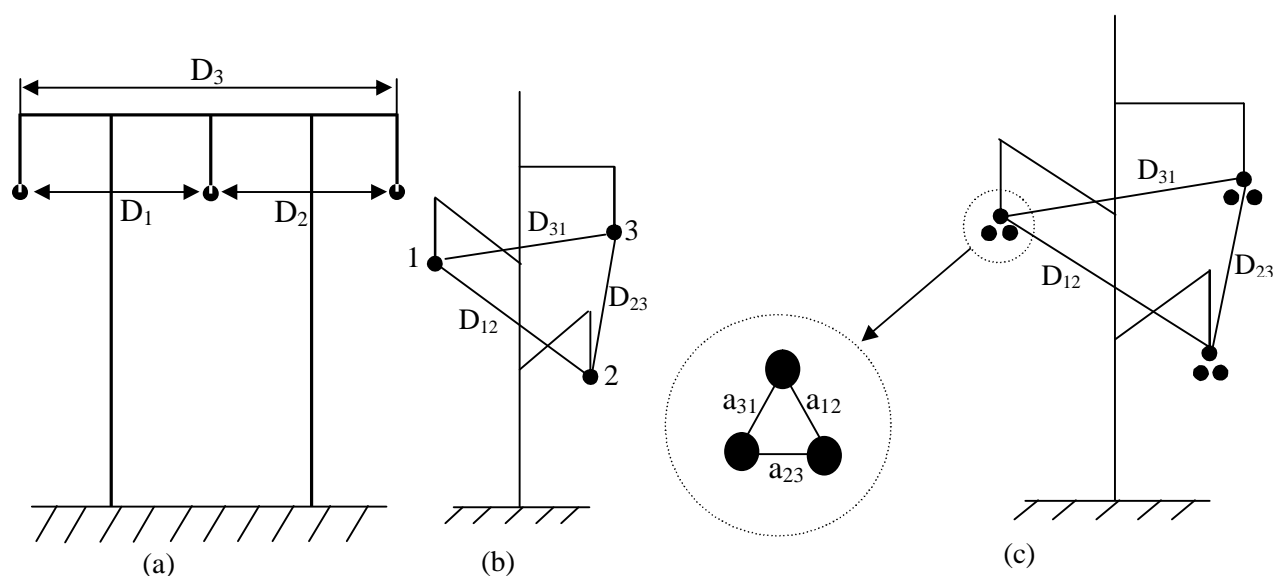


Figure II.11 : les différentes dispositions des conducteurs de lignes

II.6 : les transformateurs

Les centrales électriques sont souvent éloignées du consommateur, Le rôle du transformateur, l'élément essentiel du réseau électrique est d'acheminer l'énergie électrique de son point de production jusqu'à son point de consommation. Les anomalies sont de différentes catégories (interne, externe).

Pour obtenir une connaissance de l'état des équipements et adopter les solutions les plus adéquates qui garantissent le fonctionnement correct des transformateurs, il est nécessaire d'effectuer périodiquement des inspections et des réparations.

II.6.1 : Les paramètres des transformateurs :

Les transformateurs sont de type TD μ 63000/110 et TD μ 125000/330 leurs caractéristiques sont données comme suit :

▼ Les caractéristiques électriques :**TD μ 63000/110**

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

$$U_{1n} = 115 \text{ KV}$$

$$U_{2n} = 10,5 \text{ kv}$$

$$\Delta P_{cc} = 245 \text{ Kw}$$

$$\Delta P_0 = 50 \text{ KW}$$

$$U_{cc} = 10,5\%$$

$$I_n = 0,5\%$$

TD μ 125000/330

$$S_n = 125 \text{ MVA}$$

$$U_{1n} = 345 \text{ KV}$$

$$U_{2n} = 10,5 \text{ kv}$$

$$\Delta P_{cc} = 380 \text{ Kw}$$

$$\Delta P_0 = 50 \text{ KW}$$

$$U_{cc} = 11\%$$

$$I_n = 0,55\%$$

▼ les caractéristiques géométriques :

d_{extHT} = en mm (diamètre extérieure de l'enroulement haute tension) ;

d_{intHT} = en mm (diamètre intérieure de l'enroulement haute tension) ;

d_{extBT} = en mm (diamètre extérieure de l'enroulement basse tension) ;

d_{intBT} = en mm (diamètre intérieure de l'enroulement basse tension) ;

l_{enr} = en mm (longueur de l'enroulement) ;

Le dispositif géométrique de l'enroulement du transformateur est représenté sur la figure (II.12).

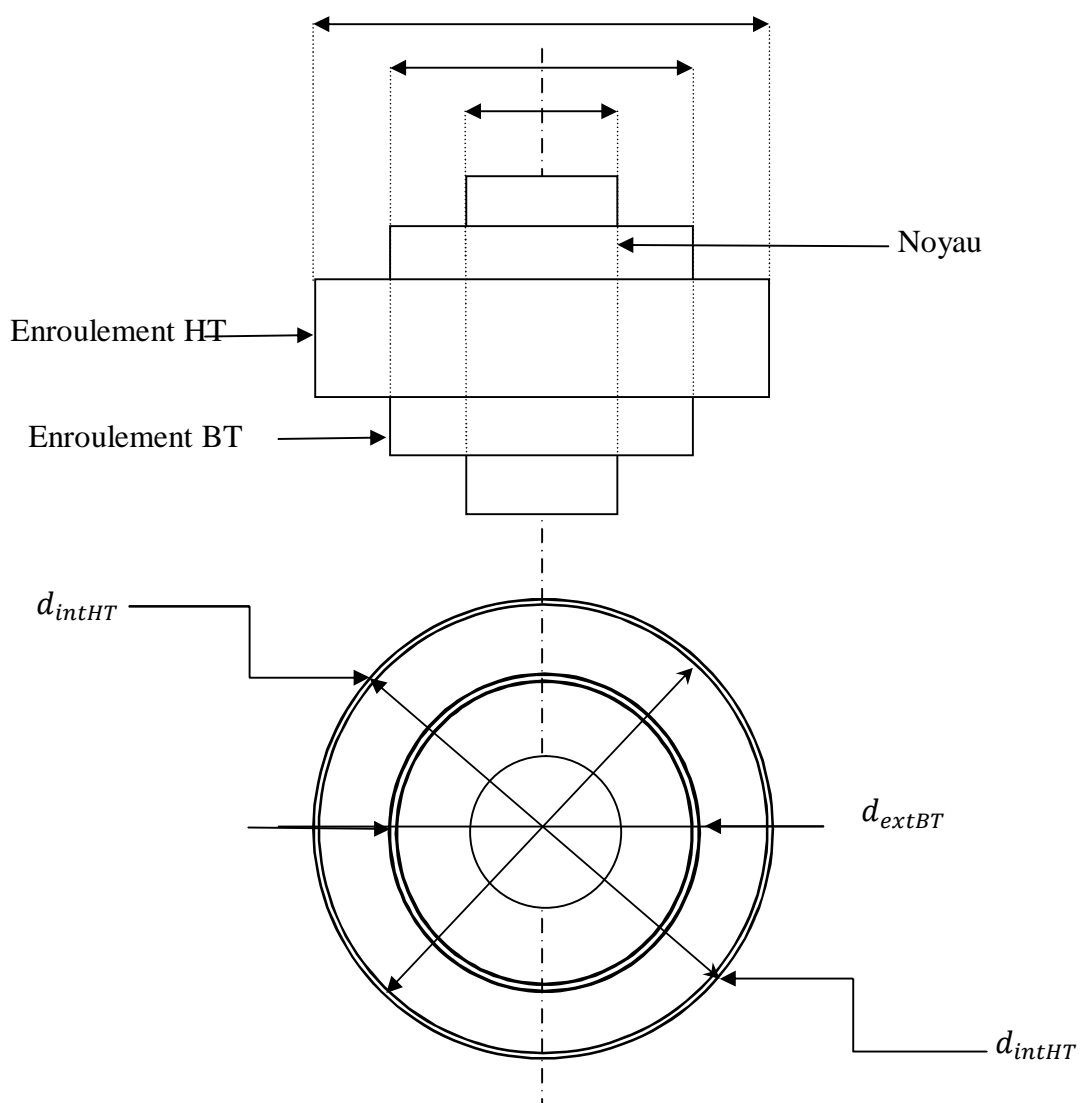


Figure II.12 : caractéristiques géométriques du transformateur.

II.6-2 Calcul des paramètres du transformateur :

Dans les calculs des réseaux électriques d'habitude les tensions, et les puissances sont données sur les jeux de barres des alternateurs, ou des postes électriques. Dans ce cas les transformateurs se trouvent dans les parties de calcul, c'est pour cette raison qu'il faut introduire le schéma équivalent de transformateur, dans le schéma de calcul.

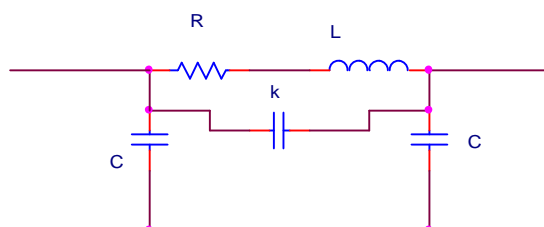


Figure II.13: Le schéma équivalent de transformateur.

1 /Calcul de résistance du transformateur :

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

$$R_{\Delta} = \frac{1,0575 R_{TR}}{\sqrt{\omega * t_h}}$$

ω : étant la pulsation correspondante à la fréquence de 50Hz tel que :

$$\omega = 2\pi f$$

f : La fréquence de service du transformateur ;

t_h : est la durée de la longueur de l'onde ;

$$t_h = 100 \times 10^{-6}$$

R_{TR} : La résistance de l'enroulement HT correspondante à la fréquence de 50Hz elle calculée par l'expression suivante :

$$\Delta P_{cc} = 3 R_{TR} I_n^2$$

Où

I_n : courant nominal

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{nHT}} \quad \text{D'où} \quad R_{TR} = \frac{\Delta P_{cc}}{3 \left(\frac{S_n}{\sqrt{3} U_{nHT}} \right)^2}$$

2/ Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :

L'inductance totale de l'enroulement HT est donnée par la relation suivante :

$$L_{Tot} = K_2 * L_{TR}$$

K_2 : Est le facteur de précision de l'inductance qui tient compte de la forme de l'onde appliquée à l'enroulement qui en générale égale à 0,65.

$$L_{TR} = \frac{X_{TR}}{2\pi f}$$

On calcul X_{TR} d'après l'expression de la chute de tension réactive

▼ L'inductance propre pour un seul élément est :

$$L'_l = \frac{L_{Tot}}{10}$$

L'inductance propre L d'un élément de l'enroulement est calculée en tenant compte de l'influence des autres éléments par la relation suivante :

$$L = \frac{L'_l}{1 + \sum \frac{M_{ij}}{L_i}}$$

Ce calcul revient à calculer les valeurs des coefficients de mutualité ($\frac{M_{ij}}{L_i}$) qui sont données par la dépendance $\frac{M_{ij}}{L_i} = f\left(\frac{a}{b}\right)$ avec :

a : est la distance entre les éléments d'un enroulement

$$a = \frac{\text{la longueur de l'enroulement}}{\text{le nombre d'éléments}}$$

b : est la distance entre les deux éléments

$$b = r_{mHT} - r_{mBT}$$

$$r_{mHT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{4}$$

$$r_{mBT} = \frac{d_{ext.BT} + d_{int.BT}}{4}$$

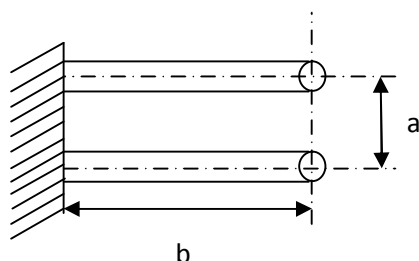


Figure II.14 : Disposition schématique des éléments de l'enroulement

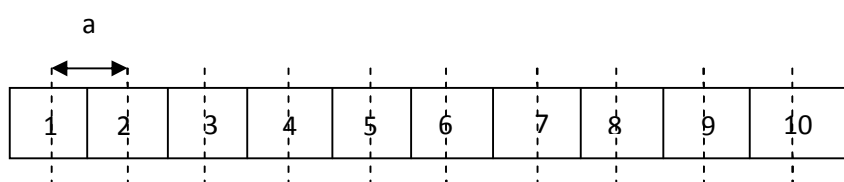


Figure II.15 : Subdivision des enroulements

✓ **Calcul des coefficients de mutualités entre l'enroulement haute tension et basse tension :**

Après avoir calculer tous les coefficients de mutualités, en passera au calcul des inductances propres des éléments de l'enroulement haute tension :

$$L = \frac{L'_l}{1 + \sum \sigma}$$

3/ Calcul des capacités transversales :

La capacité entre l'enroulement basse tension et haute tension est donnée par :

$$C'_l = \xi_0 \xi_r \pi l \frac{d_{HT} + d_{BT}}{d_{HT} - d_{BT}}$$

ξ_0 : Permetivité absolue de l'air ($\xi_0 = 8,85 \cdot 10^{12}$ F/M).

ξ_r : Permetivité relative de l'Huile d'isolation ($\xi_r = 3,9$).

l : La longueur totale de l'enroulement

d_{HT} : Est le diamètre moyen de l'enroulement HT, qui est calculé comme suit:

$$d_{HT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{2}$$

d_{BT} : Est le diamètre moyen de l'enroulement BT, qui est calculé comme suit:

$$d_{BT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{2}$$

Donc la valeur de C'_l est :

$$C_l = \frac{c'_l}{11}$$

4/ Calcul des capacités longitudinales :

Pour calculer les capacités longitudinales il faut d'abord avoir la valeur de α à partir de la répartition initiale de la tension fournie par le constructeur ; pour notre cas :

$$\alpha = 3,466$$

La capacité longitudinale totale de l'enroulement HT est donnée par la formule suivante :

$$K_{l.tot} = \frac{c'_l}{\alpha^2}$$

▼ La capacité d'un seul élément est :

$$k = k_{l.tot} \cdot 10$$

II.7 : Conclusion :

Nous avons rappelé dans ce chapitre les propriétés électriques des lignes de transport, et des transformateurs. Chaque phase d'une ligne peut être représentée par un circuit équivalent comprenant une résistance et une inductance série et par deux capacités shunt. Les réactances inductives et capacitatives sont assez constantes quelque soit le niveau de tension. Ainsi le calcul des paramètres inductifs et capacitifs des transformateurs à l'aide de méthodes numériques. Les valeurs de ces paramètres sont déterminées par les formules qu'on a vues précédemment. Elles dépendent de plusieurs phénomènes que nous avons cités.

CHAPITRE III :
calcul des paramètres
des lignes et
transformateurs

III- Calculs des paramètres de la ligne et de transformateur de tension nominale de 110kv et 330kv

III-I-calcul des paramètres de la ligne de tension nominale de 110kv

Les conducteurs de la ligne 1 est de type AA-120 et de $l_1=100\text{km}$

1/ Calcul de la résistance :

$$r_{01} = 0,249 \quad (\Omega / \text{km})$$

Pour la longueur donnée de la ligne $l=100\text{km}$:

$$R_{l1} = r_{01} * l_{01} = 0,249 * 100 = 24,9 \quad \Omega$$

2/ Calcul de l'inductance:

$$\text{On à } X_{01} = 0.144 * \log \frac{D_m}{r_c} + 0.016 \quad (\Omega / \text{km})$$

Pour la ligne AA-120 $d_c = 15,4\text{mm}$ alors $r_c = 7,7\text{mm}$ et $D_m = 1,26 * 4m$

$$D_m = 5,04m$$

$$\text{Donc } X_{01} = 0,427 \quad (\Omega / \text{km})$$

$$X = 0,427 * 100 = 42,7 \quad \Omega$$

$$\text{Et } l_{01} = \frac{X}{w} = \frac{X}{2\pi 50} = \frac{42,7}{314} = 135987 \quad (\mu H) \quad (\text{L'inductance de la ligne})$$

$$\text{Donc } L_{l1} = 135987 \quad \mu H$$

3/ Calcul de la capacité :

$$\text{On à } B_{01} = 7.58 * 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_c} \quad \text{toujours pour } r_c = 7,7\text{mm} \text{ et } D_m = 5,04m$$

$$C_0 = \frac{B}{w} \quad \text{tel que } B = B_{01} * l$$

$$B_{01} = 7.58 * 10^{-6} / \log \frac{5,04}{7,7}$$

$$B_{01} = 2,66 * 10^{-6} \quad [1/\Omega km]$$

$$B = 2,66 * 10^{-4} \quad 1/\Omega$$

$$C_0 = 0,8471 \quad [\mu F]$$

On divise la ligne en 10 éléments, donc pour un élément de la ligne qui équivaut à une longueur de $l=10\text{km}$, on aura :

$$R_{l1} = 2,49 [\Omega]$$

$$L_{l1} = 13598,7 [\mu H]$$

$$C_{l1} = 0,8471 [\mu F]$$

III-II-I – Calculs des paramètres de transformateur de puissance nominale de 63MVA

Le transformateur est de type TDμ 63000/110 Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

✓ les caractéristiques électriques :

S_n	U_{1n}	U_{2n}	ΔP_{cc}	ΔP_0	U_{cc}	I_n
63MVA	115kV	10,5kv	245kV	50kW	10,5%	0,5%

Tableau 1

1 /Calcul de la résistance du transformateur :

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

$$R_{\Delta} = \frac{1,0575 R_{TR}}{\sqrt{w * t_h}}$$

$$R_{TR} = \frac{245 \times 10^3 * 115^2 \times 10^6}{63^2 \times 10^{12}} = 0,8163 \dots\dots\dots (\Omega)$$

$$R_{\Delta} = \frac{1,0575 * 0,8163}{\sqrt{314 * 100 \times 10^{-6}}} = 4,872 \Omega$$

Le transformateur est constitué de 10 éléments ; alors la résistance d'un seul élément est donnée comme suit :

$$R_{HT} = \frac{R_{\Delta}}{10} \longrightarrow R_{HT} = 0,4872 \Omega$$

2/ Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :

L'inductance totale de l'enroulement HT est donnée par la relation suivante :

$$L_{Tot} = K_2 * L_{TR}$$

K_2 : Est le facteur de précision de l'inductance qui tient compte de la forme de l'onde appliquée à l'enroulement qui en générale égale à 0,65.

$$L_{TR} = \frac{X_{TR}}{2\pi f}$$

On calcul X_{TR} d'après l'expression de la chute de tension réactive

$$X_{TR} = \frac{10,5 * 115^2 * 10^6}{100 * 125 * 10^6} = 22,04 \dots \dots \dots (\Omega)$$

$$L_{TR} = \frac{22,04}{314} = 0,0702H$$

Alors : $L_{Tot} = 0,65 * 0,0702$

$$L_{Tot} = 45630 \mu H$$

▼ **L'inductance propre pour un seul élément est :**

$$L'_l = \frac{L_{Tot}}{10} \longrightarrow L'_l = 4563 \mu H$$

L'inductance propre L d'un élément de l'enroulement est calculée en tenant compte de l'influence des autres éléments par la relation suivante :

$$L = \frac{L'_l}{1 + \sum \frac{M_{ij}}{L_i}}$$

Ce calcul revient à calculer les valeurs des coefficients de mutualité $\left(\frac{M_{ij}}{L_i}\right)$ qui sont données par la dépendance $\frac{M_{ij}}{L_i} = f\left(\frac{a}{b}\right)$ avec :

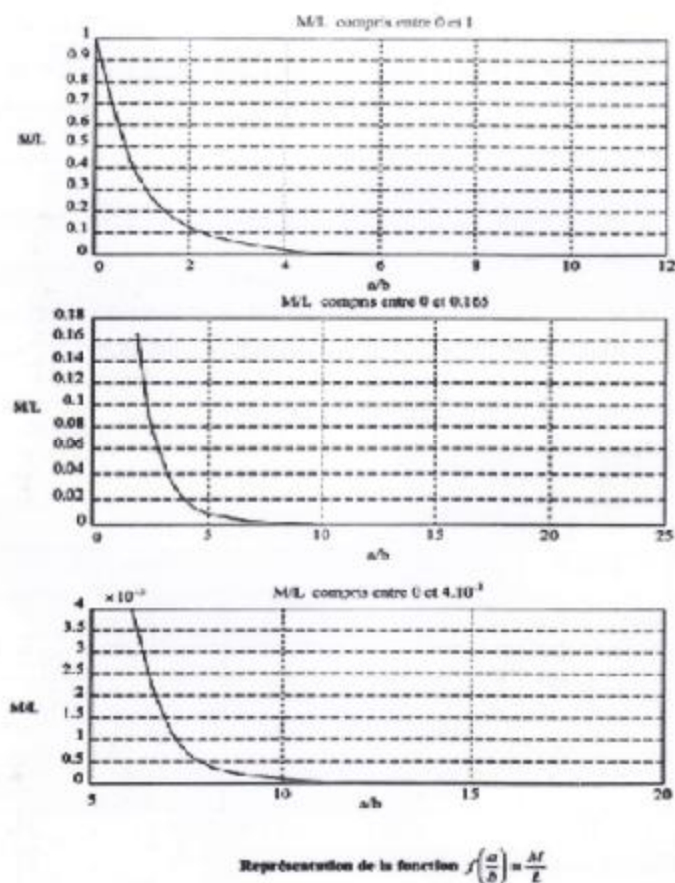


Figure III-1 : Représentation de fonction $f(a/b)=M/L$

a : est la distance entre les éléments d'un enroulement

$$a = \frac{\text{la longueur de l'enroulement}}{\text{le nombre d'éléments}}$$

$$a = \frac{2380}{10}$$

$$a = 238\text{mm}$$

b : est la distance entre les deux éléments

$$b = r_{mHT} - r_{mBT}$$

$$r_{mHT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{4} \longrightarrow r_{mHT} = 637,5\text{mm}$$

$$r_{mBT} = \frac{d_{ext.BT} + d_{int.BT}}{4} \longrightarrow r_{mBT} = 462,5\text{mm}$$

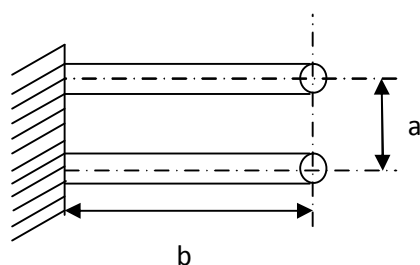


Figure III-2 : Disposition schématique des éléments de l'enroulement

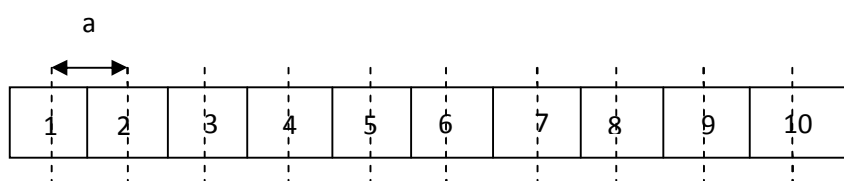


Figure III-3 : subdivision des enroulements

✓ Calcul des coefficients de mutualités entre l'enroulement haute tension et basse tension :

$N_{\text{°}}$	$a(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$\frac{a}{b}$	$\sigma = \frac{M_{ij}M}{L_i}$	M_{ks}
1	238	175	1,36	0,3133	996
2	476		2,72	0,0833	265
3	714		4,08	0,0257	82
4	952		5,44	0,00257	8
5	1190		6,8	0,00183	6
6	1428		8,16	0,00066	1
7	1666		9,52	0,0001	0,3
8	1904		10,88	0,00009	0,25
9	2142		12,24	0,0000188	0,06

Tableau 2

Après avoir calculer tous les coefficients de mutualités, en passera au calcul des inductances propres des éléments de l'enroulement haute tension :

$$L = \frac{L'_i}{1 + \sum \sigma}$$

$$L = 3180 \mu H$$

3/ Calcul des capacités transversales :

La capacité entre l'enroulement basse tension et haute tension est donnée par :

$$C'_l = \xi_0 \xi_r \pi l \frac{d_{HT} + d_{BT}}{d_{HT} - d_{BT}}$$

ξ_0 : Permetivité absolue de l'air ($\xi_0 = 8,85 \cdot 10^{12} \text{F/M}$).

ξ_r : Permetivité relative de l'Huile d'isolation ($\xi_r = 3,9$).

l : La longueur totale de l'enroulement ($l = 2380 \text{mm}$)

d_{HT} : Est le diamètre moyen de l'enroulement HT, qui est calculé comme suit:

$$d_{HT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{2} \longrightarrow d_{HT} = 1275 \text{mm}$$

d_{BT} : Est le diamètre moyen de l'enroulement BT, qui est calculé comme suit:

$$d_{BT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{2} \longrightarrow d_{BT} = 925 \text{mm}$$

Donc la valeur de C'_l est :

$$C'_l = 0,001622 \mu\text{F}$$

$$C_l = \frac{C'_l}{11}$$

$$\longrightarrow C_l = 0,0001474 \mu\text{F}$$

4/ Calcul des capacités longitudinales :

Pour calculer les capacités longitudinales il faut d'abord avoir la valeur de α à partir de la répartition initiale de la tension fournie par le constructeur ; pour notre cas :

$$\alpha = 3,466$$

La capacité longitudinale totale de l'enroulement HT est donnée par la formule suivante :

$$K_{l.tot} = \frac{C'_l}{\alpha^2} \longrightarrow K_{l.tot} = 0,000135 \mu\text{F}$$

- La capacité d'un seul élément est :

$$k = k_{l.tot} \cdot 10 \longrightarrow k = 0,00135 \mu\text{F}$$

III-II-II calcul des paramètres de la ligne de tension nominale de 330kv

Les conducteurs de la ligne 1 est de type AA-120 et de $l_1=200\text{km}$. Sur chaque phase on a deux (02) conducteurs

1/ Calcul de la résistance :

$r_{01} = 0,048$ (Ω / km) est la résistance kilométrique pour deux conducteurs en parallèle.

Pour la longueur donnée de la ligne $l=200\text{km}$:

$$R_{l1} = r_{01} * L_{01} = 0,048 * 200 = 9,6 \Omega$$

2/ Calcul de l'inductance:

$$\text{On à } X_{01} = 0.144 * \log \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.016}{n} \quad (\Omega / \text{km})$$

Pour la ligne AA-120 $d_c = 24,4\text{mm}$ alors $r_c = 12,2\text{mm}$ et $D_m = 1,26 * 4m$

$$D_m = 5,04m$$

$$\text{Donc } X_{01} = 0,328 \quad (\Omega / \text{km})$$

$$X=0,328 * 200 = 65,6 \Omega$$

$$\text{Et } l_{01} = \frac{X}{w} = \frac{X}{2\pi 50} = \frac{65,6}{314} = 208917 \quad (\mu H) \quad (\text{L'inductance de la ligne})$$

$$\text{Donc } L_{l1} = 208917 \quad \mu H$$

3/ Calcul de la capacité :

On à $B_{01} = 7.58 * 10^{-6} / \log \frac{D_m}{r_{eq}}$ toujours pour $r_c = 12,2\text{mm}$ et $D_m = 5,04m$

$$C_0 = \frac{B}{w} \quad \text{tel que } B = B_{01} * l$$

$$B_{01} = 7.58 * 10^{-6} / \log \frac{5,04}{12,2}$$

$$B_{01} = 3,41 * 10^{-6} \quad [1/\Omega \text{km}]$$

$$B = 6,82 * 10^{-4} \quad 1/\Omega$$

$$C_0 = 2,171 \quad [\mu F]$$

4/ Calcul de la conductivité**a- Conductibilité active(G) :**

On a $G_0 = \frac{\Delta P_{couronne}}{U_n^2}$ (MVar/ km) d'ou $R_{g0} = \frac{U_n^2}{\Delta P_{couronne}} = \frac{330^2 * 10^6}{(1,9 \div 4,6) * 10^3}$ alors

$$R_{g0} = (573 \div 236) 10^5 \Omega \text{ km}$$

$$R_{g0} = \frac{(573 \div 236) 10^5}{20} = (28,6 \div 11,8) 10^5 \Omega$$

On prend comme valeur moyenne $R_{g0} = 2 \text{ M}\Omega$

On divise la ligne en 10 éléments, donc pour un élément de la ligne qui équivalent à une longueur de $l=20\text{km}$, on aura :

$$R_{l1} = 0,96 [\Omega]$$

$$L_{l1} = 20891,7 [\mu F]$$

$$C_{l1} = 0,2171 [\mu F]$$

$$R_{g0} = 2 [\text{M}\Omega]$$

III-II-III – Calculs des paramètres de transformateur de puissance nominale de 125MVA

Le transformateur est de type TD μ 125000/330 Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

✓ les caractéristiques électriques :

S_n	U_{1n}	U_{2n}	ΔP_{cc}	ΔP_0	U_{cc}	I_n
125MVA	347kV	10,5kV	380kV	125kW	11%	0,55%

Tableau 3**✓ les caractéristiques géométriques :**

$d_{extHT} = 1950\text{mm}$ (diamètre extérieure de l'enroulement haute tension) ;

$d_{intHT} = 1210\text{mm}$ (diamètre intérieure de l'enroulement haute tension) ;

$d_{extBT} = 1080\text{mm}$ (diamètre extérieure de l'enroulement basse tension) ;

$d_{intBT} = 900\text{mm}$ (diamètre intérieure de l'enroulement basse tension) ;

$l_{enr} = 1,9\text{m}$ (longueur de l'enroulement du transformateur) ;

$\alpha = 2,35$

1 /Calcul de la résistance du transformateur:

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

$$R_{\Delta} = \frac{1,0575 R_{TR}}{\sqrt{w * t_h}}$$

w : étant la pulsation correspondante à la fréquence de 50Hz tel que :

$$w = 2\pi f$$

f : La fréquence de service du transformateur ;

t_h : est la durée de la longueur de l'onde ;

$$t_h = 100 \times 10^{-6}$$

R_{TR} : La résistance de l'enroulement HT correspondante à la fréquence de 50Hz elle calculée par l'expression suivante :

$$\Delta P_{cc} = 3 R_{TR} I_n^2$$

Où

I_n : courant nominal

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{nHT}} \quad \text{D'où} \quad R_{TR} = \frac{\Delta P_{cc}}{3 \left(\frac{S_n}{\sqrt{3} U_{nHT}} \right)^2}$$

$$R_{TR} = \frac{380 \times 10^3 * 347^2 \times 10^6}{125^2 \times 10^{12}} = 2,92 \quad \dots \dots \dots (\Omega)$$

$$R_{\Delta} = \frac{1,0575 * 2,92}{\sqrt{314 * 100 \times 10^{-6}}} = 17,42 \Omega$$

Le transformateur est constitué de 10 éléments ; alors la résistance d'un seul élément est donnée comme suit :

$$R_{HT} = \frac{R_{\Delta}}{10} \longrightarrow R_{HT} = 1,742\Omega$$

2/ Calcul des inductances propres et les coefficients de mutualités :

L'inductance totale de l'enroulement HT est donnée par la relation suivante :

$$L_{Tot} = K_2 * L_{TR}$$

K_2 : Est le facteur de précision de l'inductance qui tient compte de la forme de l'onde appliquée à l'enroulement qui en générale égale à 0,65.

$$L_{TR} = \frac{X_{TR}}{2\pi f}$$

On calcul X_{TR} d'après l'expression de la chute de tension réactive

$$X_{TR} = \frac{11*347^2 \times 10^6}{100*125 \times 10^6} = 105,959 \dots \dots \dots (\Omega)$$

$$L_{TR} = \frac{105,959}{314} = 0,3374H$$

Alors : $L_{Tot} = 0,22H$

$$L_{Tot} = 220000\mu H$$

✓ L'inductance propre pour un seul élément est :

$$L'_l = \frac{L_{Tot}}{10} \longrightarrow L'_l = 22000\mu H$$

L'inductance propre L d'un élément de l'enroulement est calculée en tenant compte de l'influence des autres éléments par la relation suivante :

$$L = \frac{L'_l}{1 + \sum \frac{M_{ij}}{L_i}}$$

Ce calcul revient à calculer les valeurs des coefficients de mutualité ($\frac{M_{ij}}{L_i}$) qui sont données par la dépendance $\frac{M_{ij}}{L_i} = f\left(\frac{a}{b}\right)$ avec :

$$a = 190\text{mm}$$

$$b = 295\text{mm}$$

Les valeurs de ces coefficients de mutualités sont données dans le tableau suivant :

$N_{=}^{\circ}$	$a(mm)$	$b(mm)$	$\frac{a}{b}$	$\sigma = \frac{M_{ij}M}{L_i}$	M_{KS}
1	190	295	0,644	0,5	5190
2	380		1,288	0,285	2960
3	570		1,92	0,145	1500
4	760		2,57	0,087	900
5	950		3,22	0,0483	500
6	1140		3,86	0,0242	250
7	1330		4,50	0,0171	170
8	1520		5,15	0,00828	85
9	1710		5,796	0,0015833	15

Tableau 4

Après avoir calculer tous les coefficients de mutualités, en passera au calcul des inductances propres des éléments de l'enroulement haute tension :

$$L = \frac{L'_l}{1 + \sum \sigma}$$

$$L = 10394,69 \mu H$$

3/ Calcul des capacités transversales :

La capacité entre l'enroulement basse tension et haute tension est donnée par :

$$C'_l = \xi_0 \xi_r \pi l \frac{d_{HT} + d_{BT}}{d_{HT} - d_{BT}}$$

ξ_0 : Permetivité absolue de l'air ($\xi_0 = 8,85 \cdot 10^{12} F/M$).

ξ_r : Permetivité relative de l'Huile d'isolation ($\xi_r = 3,9$).

l : La longueur totale de l'enroulement ($l = 2380mm$)

d_{HT} : Est le diamètre moyen de l'enroulement HT, qui est calculé comme suit:

$$d_{HT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{2} \longrightarrow d_{HT} = 1580mm$$

d_{BT} : Est le diamètre moyen de l'enroulement BT, qui est calculé comme suit:

$$d_{BT} = \frac{d_{ext.HT} + d_{int.HT}}{2} \longrightarrow d_{BT} = 990mm$$

Donc la valeur de C'_l est : $C'_l = 0,001122028\mu F$

$$C_l = \frac{C'_l}{11} \longrightarrow C_l = 0,00102002\mu F$$

4/ Calcul des capacités longitudinales :

Pour calculer les capacités longitudinales il faut d'abord avoir la valeur de α à partir de la répartition initiale de la tension fournie par le constructeur ; pour notre cas :

$$\alpha = 2,35$$

La capacité longitudinale totale de l'enroulement HT est donnée par la formule suivante :

$$K_{l.tot} = \frac{C_l}{\alpha^2} \longrightarrow K_{l.tot} = 0,0002031739\mu F$$

- La capacité d'un seul élément est :

$$k = k_{l.tot} \cdot 10 \longrightarrow k = 0,002031739\mu F$$

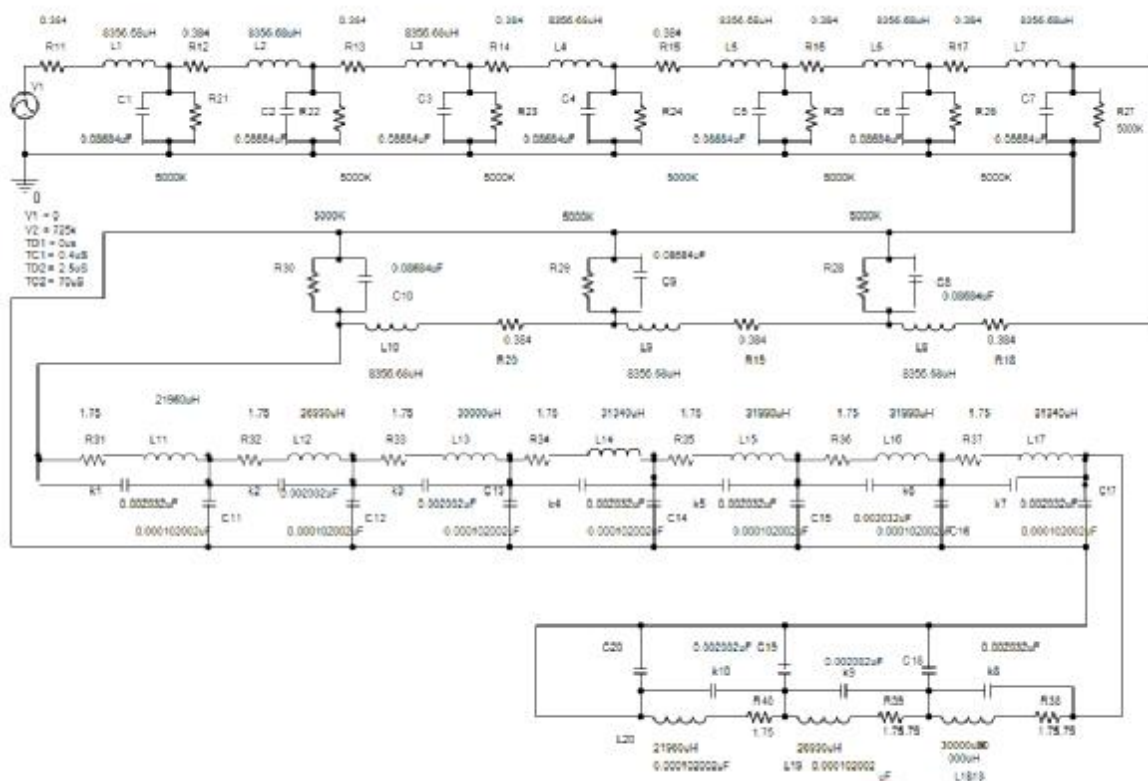


Figure III-1 : schéma équivalent ligne transformateur.

CHAPITRES IV :
Théories de la
création des
surtensions

IV.1 Les surtensions dans les réseaux à moyennes tensions :

IV.1.2 Définition des surtensions :

On peut appeler surtension toute élévation de la tension au dessus de la tension de service maximale ; Mais généralement on entend par surtensions les phénomènes de courte durée sous forme de courtes impulsions séparées, périodiques ou apériodiques.

- Des interruptions courtes (ré-enclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes).
- Des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel).

IV.2 Origine des surtensions :

Les surtensions peuvent avoir diverses origines:

- Surtension d'origine interne.
- Surtension d'origine externe.

IV.2.1 Les surtensions externes:

IV.2.1.1 Définition de la foudre :

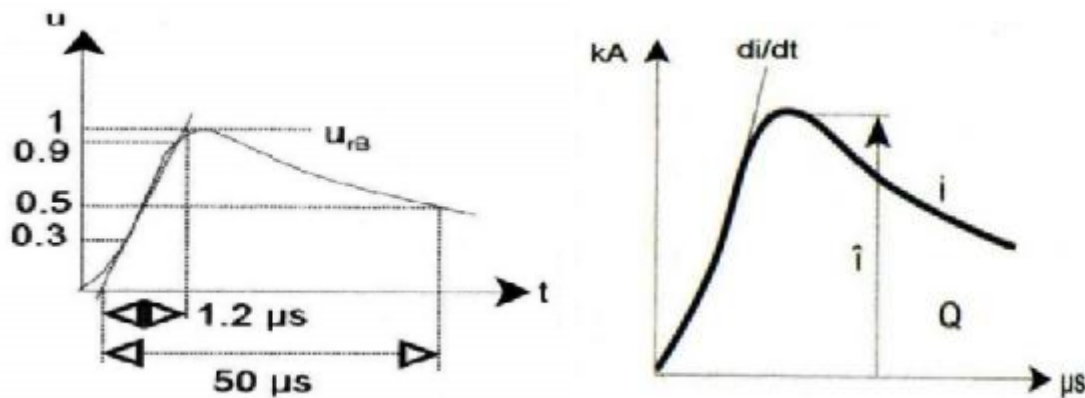
La foudre est une décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages. En générale, un coup de foudre complet dure 0,2 à 1 seconde comporte au moyen 04 décharges partielles, et séparées les unes les autres d'un temps variant entre quelques dizaines de microsecondes.

- **Classification des coups de foudres :**

- Les coups de foudres négatifs, lorsque la partie négative d'un nuage se décharge ;
- Les coups de foudres positifs.

Dans 90% des cas, les décharges entre le nuage et le sol sont négatives ; ainsi elles frappent les points de l'électrode opposés aux points où le champ électrique est plus fort.

Les formes des ondes normalisées des coups de foudre sont représentées sur les figures suivantes :



a) Onde 1,2/50 μs dite de tension.

b) Onde dite de courant.

Figure VI.1: formes des ondes des coups de foudres normalisées. [6]

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions d'origine atmosphérique, en particulier les coups de foudre.

Une distinction est souvent établie entre :

- Ø Le coup de foudre directe touchant une ligne.
- Ø Le coup de foudre indirecte tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône métallique, ou sur les câbles de gardes qui sont destinés à protéger les conducteurs actifs de la ligne contre les coups de foudre.

a) Les coups de foudre direct dans le conducteur d'une ligne aérienne : [7]

Le courant de foudre se divise et se propage comme onde de courant dans la ligne avec une vitesse voisine de celle de la lumière (près de 300000Km/s). Selon la théorie des lignes l'onde de courant est accompagnée d'une onde de tension de même forme en valeur 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 .

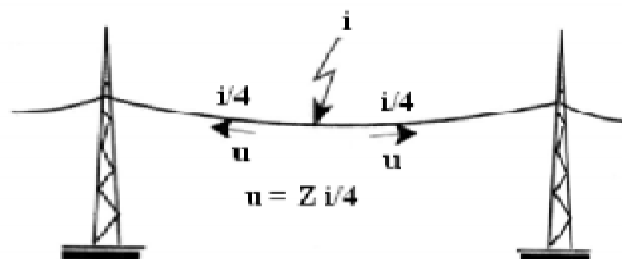


Figure VI.2: Coup de foudre sur les conducteurs d'une ligne.

b) Les coups de foudres indirects :

- Impact sur le fil de garde : [7]

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. $U = R \cdot \frac{i}{4} + \frac{1}{4} L \frac{di}{dt}$ avec R : résistance en onde raide de la prise de terre et L : l'inductance du pylône.

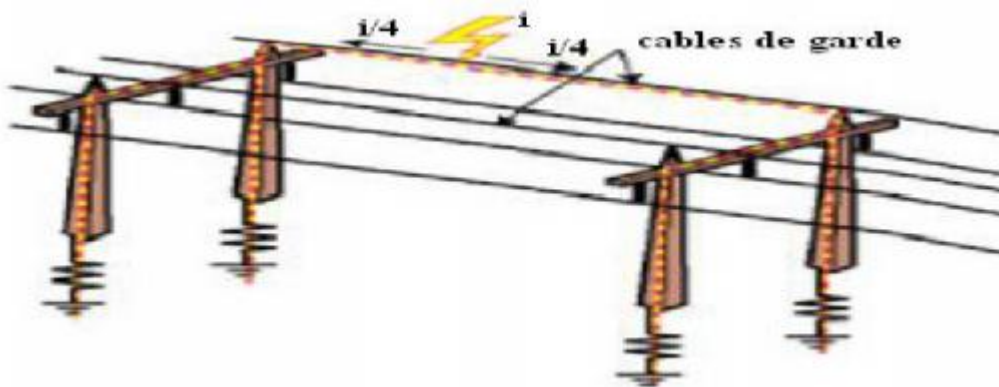


Figure VI.3: Coup de foudre sur le fil de garde.

- Impact sur un pylône mis à la terre : [7]

Le courant de foudre s'écoule à la terre et produit une surtension $U = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$ avec R : résistance en onde raide de la prise de terre et L : l'inductance du pylône.

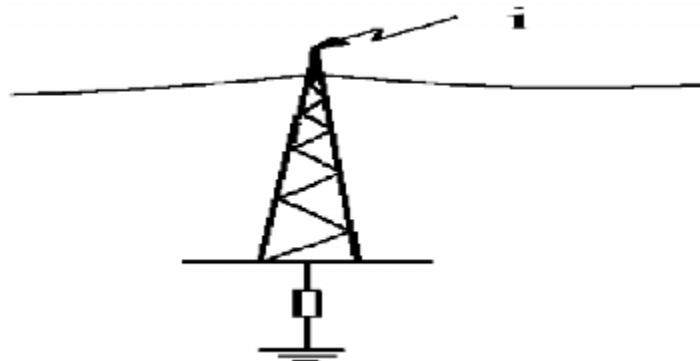


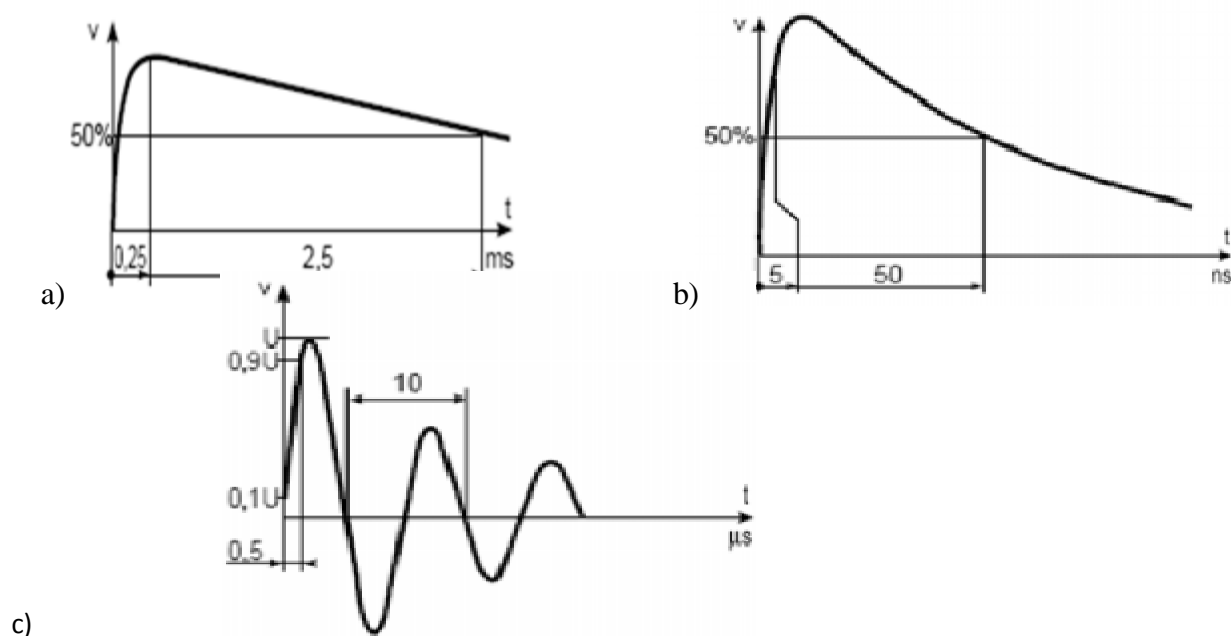
Figure VI.4: Coup de foudre sur un pylône d'une ligne aérienne.

VI.2.2 Surtension d'origine interne: [7,15]

Des surtensions dites internes peuvent apparaître à la suite de phénomènes transitoires dans le réseau. Les causes sont:

VI.2.2.1 Surtensions de manœuvres :

Ce type de surtensions apparaît sur les réseaux électriques subissant des modifications rapides de leurs structures, ces surtensions se propagent en général sous forme d'ondes haute fréquence à amortissement rapide. L'étude statique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des ondes représentées sur la figure (VI.5).



a) Onde 250/2500 μ s dite onde longue amortie.

b) Onde 5/50 ns dite onde impulsionnelle récurrente.

c) Onde 0,5 μ s/100 kHz dite onde sinusoïdale amortie.

Figure VI.5: Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre.

VI.2.2.1.a Surtension due à la coupure d'un courant inductif : [14]

Ces surtensions sont des impulsions de tension apparaissant lors de la commutation (ouverture et fermeture) de circuits comportant des éléments inductifs tels que inductances, enroulements de moteurs ou de transformateurs,...etc.

En effet, la coupure d'un circuit, tel que celui représenté sur la figure (VI.5.a), entraîne une brusque variation de l'intensité du courant électrique parcourant l'élément d'inductance L ; celui-ci engendre alors, dans le circuit, une surtension V_{st} , tel que :

$V_{st} = -L \frac{di}{dt}$, Cette surtension est particulièrement élevée lors de la coupure brusque ($\frac{di}{dt} \rightarrow \infty$). Toutefois, l'énergie de la surtension est limitée par l'énergie totale W stockée dans l'inductance : $W = \frac{1}{2} L i_0^2$ avec i_0 courant parcourant l'inductance avant la coupure. Du fait de sa forte valeur, la surtension est donc limitée dans le temps figure (VI.5.b).

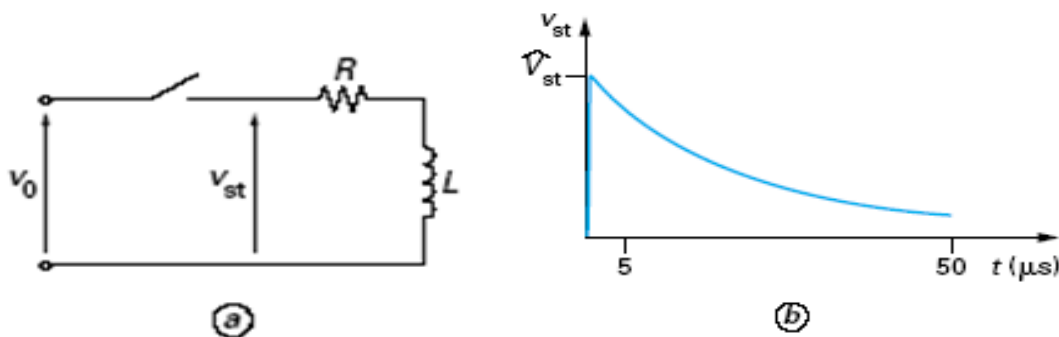


Figure VI.6: Forme de décharge inductive due à la coupure d'un circuit avec inductance L . (V_0 : tension aux bornes du circuit avant la coupure).

VI.2.2.1.b Surtension due à la coupure d'un courant capacitif : [16]

Les courants capacitifs ont principalement trois origines, les câbles à vide, les lignes aériennes longues et les batteries de condensateurs. La coupure des courants capacitifs se fait en principe sans difficulté. En effet, lorsque l'appareil interrompt le courant, des surtensions importantes à fréquence élevée dues à des réamorçages peuvent avoir lieu et remettre en cause la coupure et l'intégrité des installations. De plus, la fermeture de l'appareil sur circuit capacitif génère des phénomènes particuliers.

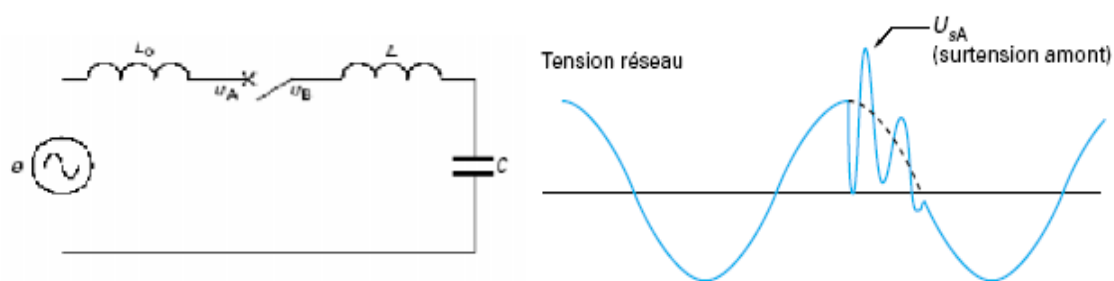


Figure VI.6 : Forme de la surtension lors du couplage au réseau d'une batterie de condensateurs.

VI.2.2.2 Surtensions par Ferro-résonance:[13]

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple). Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manœuvre (ouverture ou fermeture d'un circuit) est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané. Le circuit représenté par le schéma de la figure(VI.11), une inductance à noyau saturable L en série avec une capacité du réseau C.

La courbe de U_C est une droite de pente $1/C * \omega$,

La courbe de U_L présente un coude de saturation L et C est nulle et deux autres points de fonctionnement stables M et P ; N est un point d'équilibre instable. Les tensions aux bornes de L et de C (point P) sont élevées. Le passage de M vers P peut être dû qu'à une transitoire qui augmente momentanément la tension e à une valeur supérieure à E.

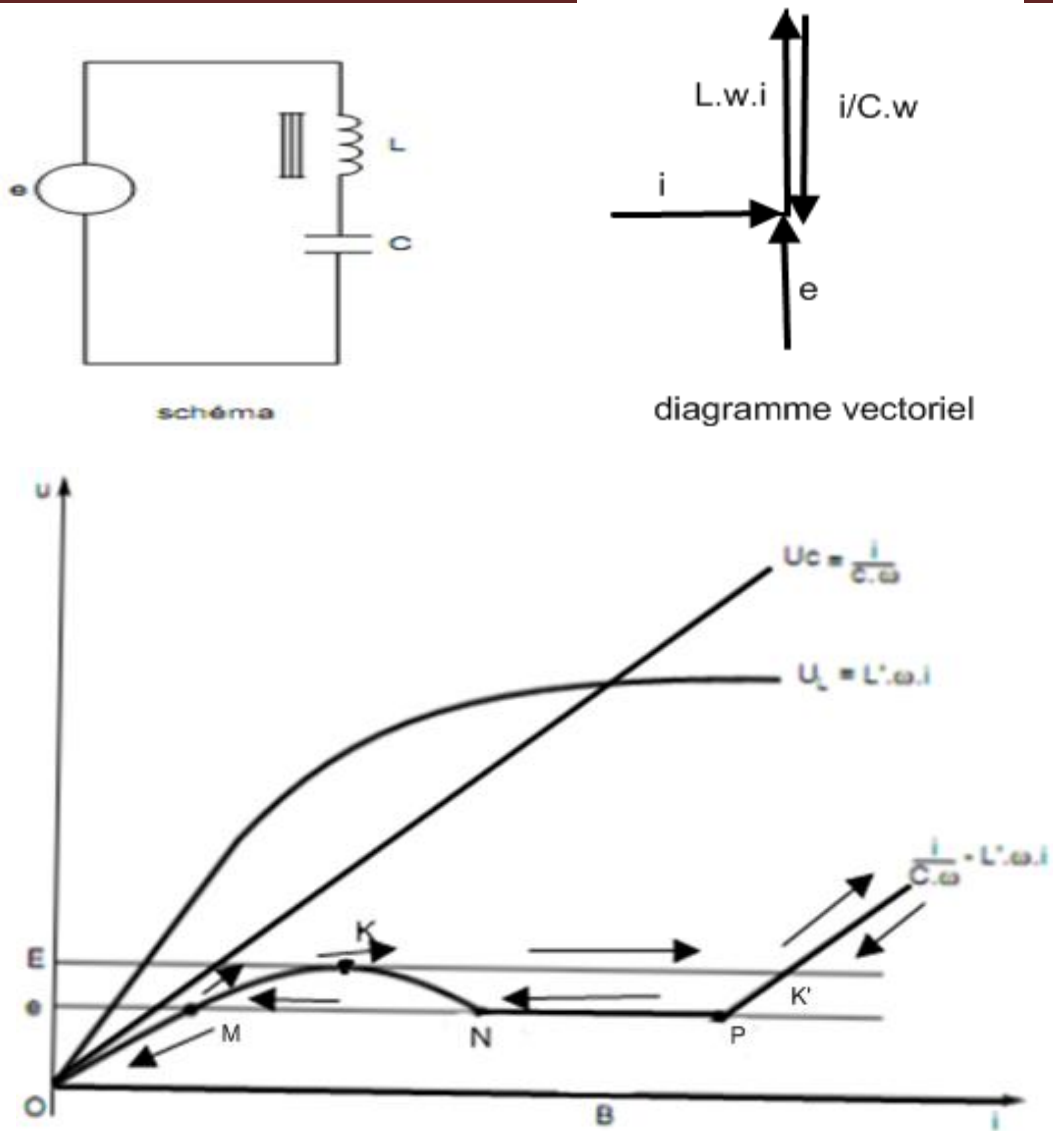


Figure VI.7 : Principe de la Ferro-résonance.

VI.2 .2.3 Surtension provoquée par un défaut d'isolement : [15]

Une surtension due à un défaut d'isolement apparaît sur un réseau triphasé, lorsque le neutre est isolé ou impédant.

En effet, lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la masse ou la terre (blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement...), la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport à la terre, à la tension composée

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

De façon plus précise, lors d'un défaut d'isolement sur la phase A, un facteur S_d de défaut à la terre est défini par le rapport de la tension des phases B et C par rapport à la terre, à la tension simple du réseau.

$$S_d = \frac{\sqrt{3} \cdot K^2 \cdot (K+1)}{K+2}$$

$$\text{Avec } K = \frac{X_0}{X_d}$$

X_d : La réactance directe du réseau vu du point de défaut.

X_0 : la réactance homopolaire.

- si le neutre est parfaitement isolé.
- $X_0 = \infty \Rightarrow S_d = 3^{0,5} = \sqrt{3}$.
- Si la mise à la terre du neutre est parfaite soit : $X_0 = X_d \Rightarrow S_d = 1$.
- Si comme dans le cas général, $X_0 \leq 3X_d : S_d \leq 1,25$.

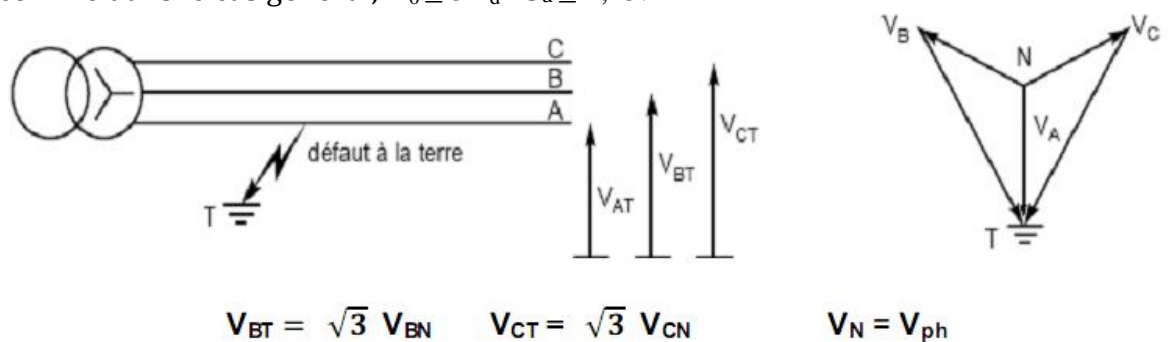


Figure VI.8: Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement

CHAPITRE V:
Détermination de la
déformation de l'onde
et la distance
dangereuse

Introduction :

Les surtensions sont toujours une cause de perturbations durant le transport d'énergie dans les réseaux électriques.

- Les ondes de surtensions ayant les différents paramètres (amplitude, raideur, longueur d'onde) se propagent le long des lignes.
- Lors de la propagation les ondes sont déformées et s'amortissent.
- Une étude des effets de la surtension est faite pour prévoir ce qui peut se passer sur une ligne et un transformateur donné.

Cette étude est faite à l'aide de la méthode mathématique en utilisons le logiciel spécialisé qui simule le comportement de la ligne et du transformateur (P-spice).

On a effectué la simulation de différents modèles dans le but de faire apparaître l'impacte du phénomène de surtension dans les lignes et transformateurs et la déformation de l'onde de cette dernière lors de sa propagation le long de la ligne et transformateur.

Principe de la simulation :

Le principe de la simulation de la ligne, et de l'enroulement HT du transformateur consiste à :

- Ø Introduire le schéma équivalent dans le programme de simulation figure (III-1).
- Ø Introduire les valeurs des paramètres de la ligne, du transformateur dans le programme de simulation.
- Ø Relever les tensions maximales pour les différentes formes de surtensions appliquées dans le schéma équivalent.

Les résultats sont représentés dans les tableaux et sur les figures suivantes.

- Ø La ligne est représentée par dix (10) éléments pour les tensions 110kV et 330kV chaque élément est respectivement équivalent à 10 et 20km.
- Ø Le transformateur est représenté aussi par dix (10) éléments.
- Ø Les surtensions appliquées ont les amplitudes égales à la tension de décharge des isolations des lignes correspondantes.

Ces valeurs sont les suivantes :

U_n (kV)	110	330
U_{surt} (kV)	345	725

Tableau(1)

Pour évaluer les surtensions aux bornes de l'enroulement HT des transformateurs, on compare ces valeurs par les valeurs admissibles correspondant qui sont les suivantes :

Ø Les tensions admissibles pour les transformateurs sont :

U_n (kV)	110	330
U_{adm} (kV)	470	975

Tableau(2)

Pour ce but on utilise le schéma équivalent de la ligne et transformateur. Comme surtensions nous choisissons la surtension impulsionnelle (1.2/50) avec l'amplitude 345kV et 725kV (c'est les surtensions maximales qu'on peut avoir respectivement sur les lignes 110kV et 330kV). On applique l'onde de surtension sur les différents points de la ligne pour trouver la distance à partir de laquelle l'onde surtension devienne dangereuse.

Les résultats des calculs sont représentés dans les tableaux suivants :

Ø **La ligne 110kV :**

U_n	U_0 (Tension appliquée)	100km	50km	45km	33km
110kV	345kV	392kV	457kV	471Kv	523Kv

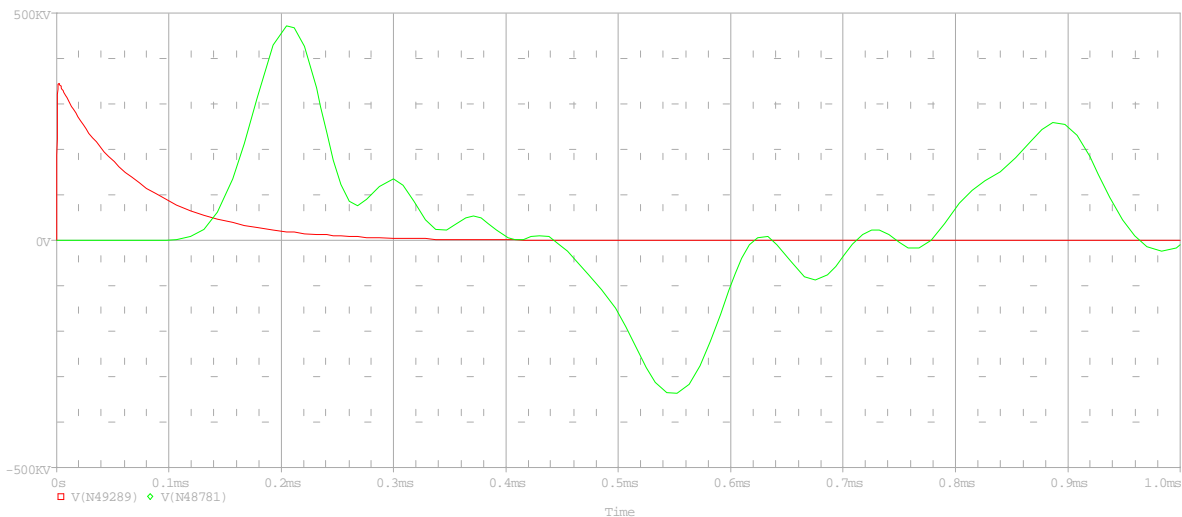


Figure V-1 : la surtension dans le transformateur (l=45Km, $U_n=110kV$).

V(N49289) : la forme de la surtension appliquée.

V(N48781) : la surtension au début du transformateur.

Ø **La ligne 330kV :**

U_n	U_0 (Tension appliquée)	200km	100km	80km	70km	60km	50km
330kV	725kV	493kV	772kV	857kV	918kV	975kV	1047kV

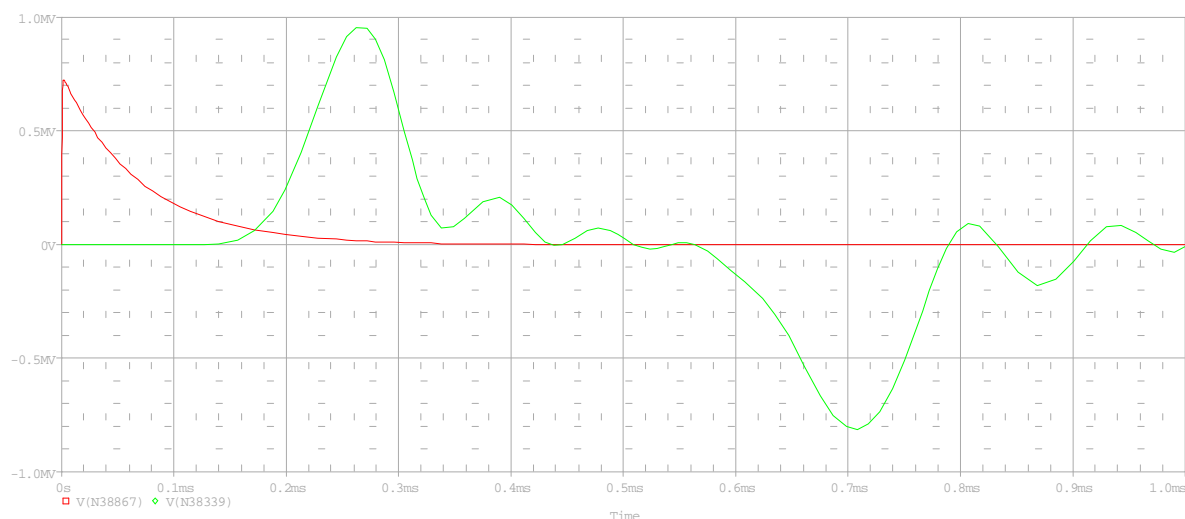


Figure V-2 : la surtension dans le transformateur ($l=60\text{Km}$, $U_n=330\text{kV}$).
V(N38867) : la forme de la surtension appliquée.
V(N38339) : la surtension au début du transformateur.

Comme en vois de ces tableaux pour les lignes de tension nominale 110kV et 330kV les longueurs dangereuses sont respectivement 45Km et 60Km.

Dans ces cas aux bornes des transformateurs correspondant on trouve les surtensions à 471kV et 975kV, qui sont égales aux valeurs admissibles (470kV et 975kV) des surtensions dans ces transformateurs.

Pour déterminer la déformation des ondes sur les lignes et les transformateurs on a choisit des valeurs des amplitudes arbitraires sous différentes formes (1.2/50, 5/50, 10/50, 10/70, 100/200) les résultats obtenues sont les suivantes :

Ø La ligne 110kV :

<i>U (kV) appliquée</i>		<i>U_{TR} (kV)</i>	
<i>Amp (kV)</i>	<i>Raideur /longueur (μs)</i>	<i>Amp (kV)</i>	<i>Raideur (μs)</i>
690	1.2/50	657	108
550		523	
500		474	
495		470	
690	5/50	676	108
550		540	
500		489	
490		481	
480		470	
690	10/50	600	108
550		480	
530		470	
690	10/70	719	108
550		574	
500		522	
490		508	
460		470	
690	100/200	760	108
550		605	
500		546	
480		527	
430		470	

Tableau (3)

Ø La ligne 330kV :

<i>U (kV)</i>		<i>U_{TR} (kV)</i>	
<i>Amp (kV)</i>	<i>Raideur /longueur (μs)</i>	<i>Amp (kV)</i>	<i>Raideur (μs)</i>
1450	1.2/50	966	200
1450	5/50	955	200
1450	10/50	922	200
1450	10/80	1356	200
1300		1218	200
1000		933	200
1450	100/200	1396	200
1000		960	200

Tableau (4)

D'après le calcul de la raideur des ondes à la fin de la ligne pour les deux modèles, on remarque que la raideur de l'onde diminue ce qui est illustré dans les figures suivantes comme en vois la raideur pour l'onde dépassé 10Km est égal à $K_1 = \frac{472}{63} = 7,49 \text{ kV}/\mu\text{s}$, et celui de 20Km égal à $K_2 = 5,48 \text{ kV}/\mu\text{s}$, et pour 30Km on trouve $K_3 = 4,15 \text{ kV}/\mu\text{s}$, et en fin pour 40Km $K_4 = 3,7 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

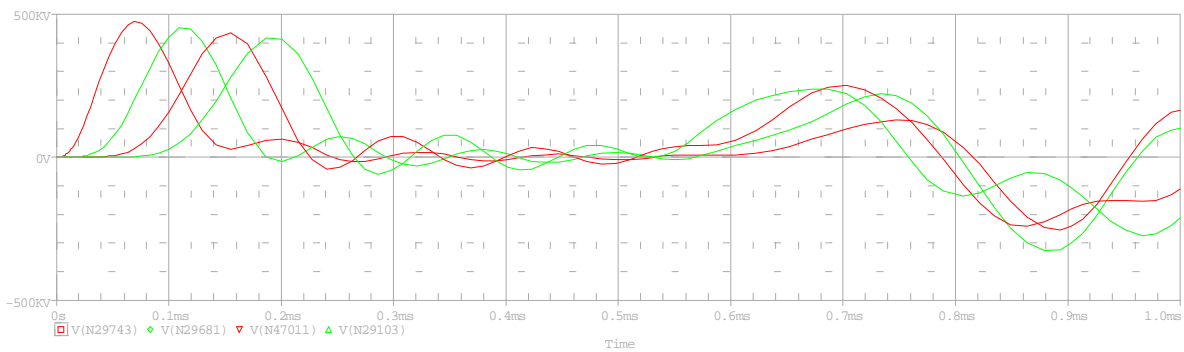


Figure V-3 : variation de la raideur en fonction des distances 10, 20, 30,40Km

On a aussi calculé la raideur pour les différents 10 km sur la ligne et en trouve les valeurs des raideurs. Puis en utilisons ces valeurs en trouve la valeur moyenne du changement des raideurs. Comme le montre les calculs et la figure suivante les trois valeurs des raideurs sur trois 10 km sont: $K_{12} = 6,44 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $K_{23} = 3,49 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $K_{34} = 2,87 \text{ kV}/\mu\text{s}$, et la valeur moyenne de la raideur $K_{\text{moy}} = 4,26 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

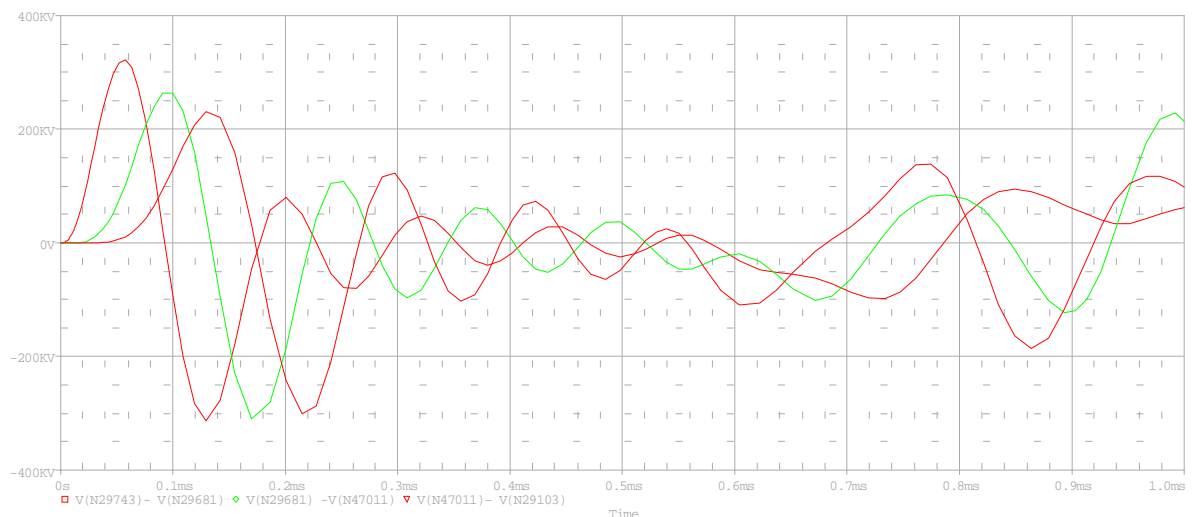


Figure V-4 : variation de la raideur pour la différence entre les distances 10 et 20, 20 et 30,30 et 40Km

Et pour 330kV on trouve $K_1 = 6,1 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $K_2 = 4,43 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $K_3 = 3,57 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $K_4 = 2,96 \text{ kV}/\mu\text{s}$, ce qui est illustré par la figure suivante :

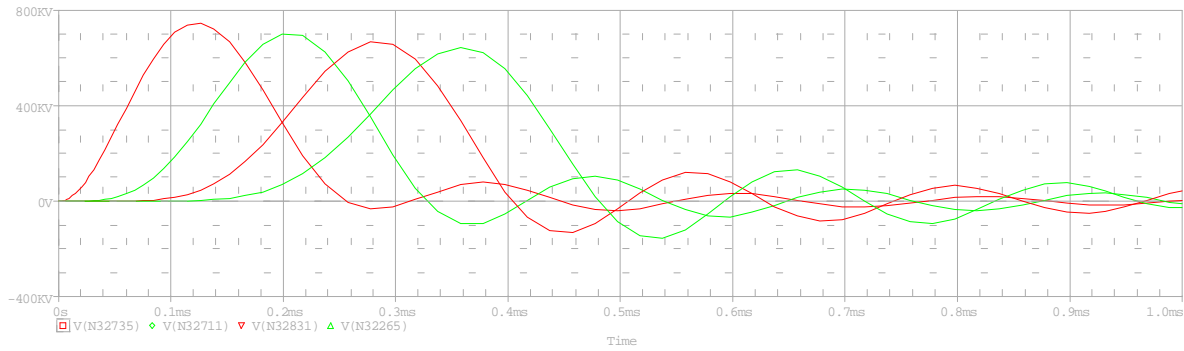


Figure V-5 : variation de la raideur en fonction des distances 20, 40, 60,80Km

Et pour la différence on a les valeurs suivantes ; $K_{24}=5,78\text{kV}/\mu\text{s}$, $K_{46}=3,19\text{kV}/\mu\text{s}$, $K_{68}=2,62\text{kV}/\mu\text{s}$, et pour cela on a trouvé la valeur moyenne de la raideur $K_{\text{moy}}= 3,86\text{kV}/\mu\text{s}$. comme il est illustré dans la figure suivante :

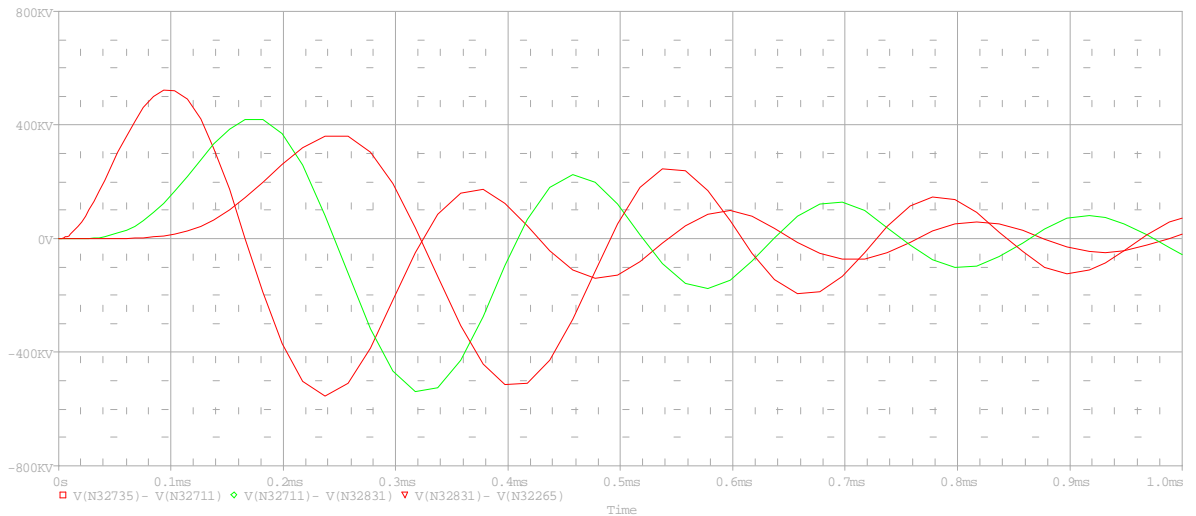


Figure V-5 : variation de la raideur en fonction de la différence entre les distances 20 et 40, 40 et 60,60 et 80Km

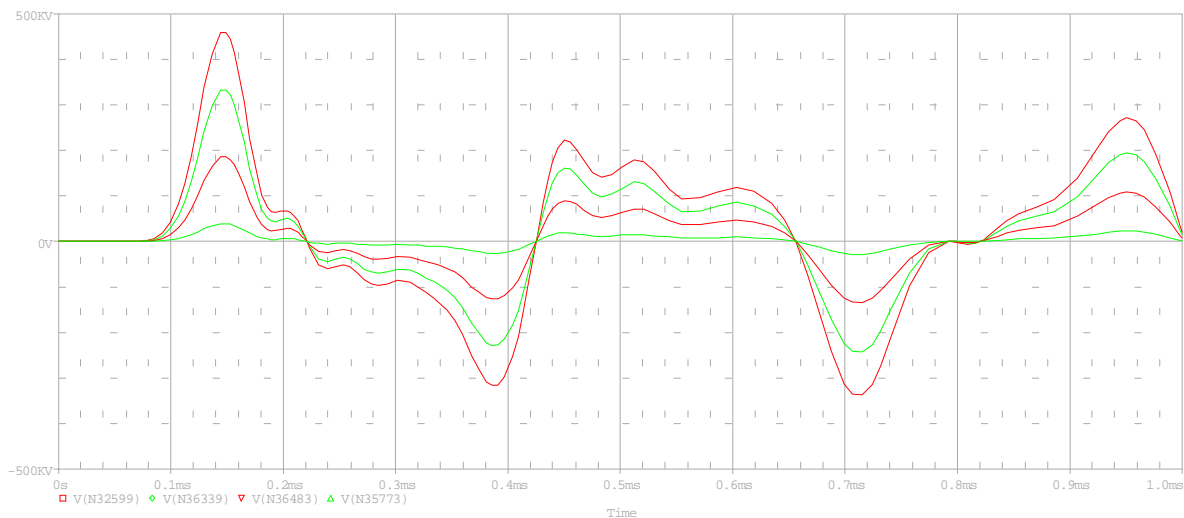


Figure V-6 : la surtension dans le transformateur 110kV (sans parafoudre).

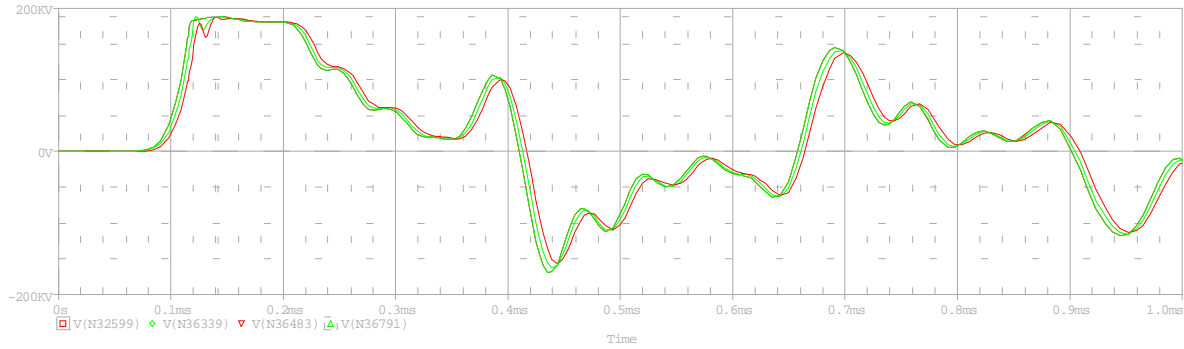


Figure V-8 : la surtension dans le transformateur 110kV (avec parafoudre).

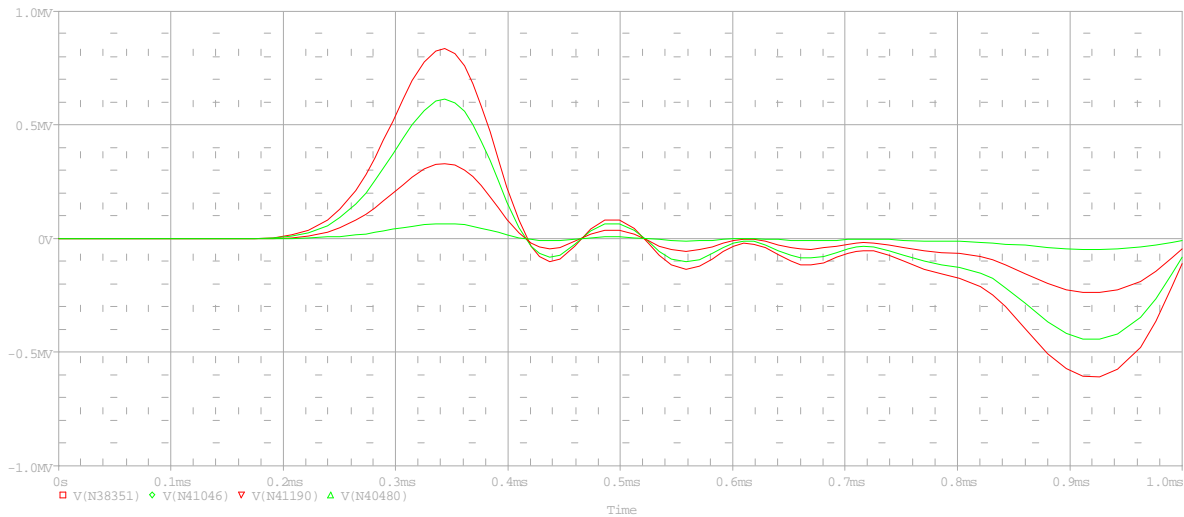


Figure V-7 : la surtension dans le transformateur 330kV (sans parafoudre).

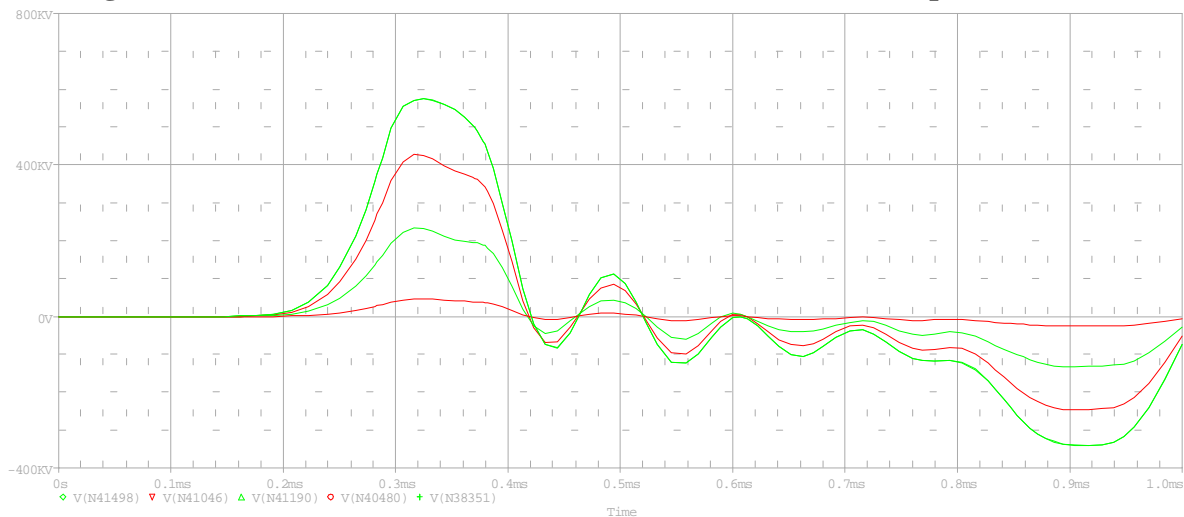


Figure V-9 : la surtension dans le transformateur 330kV (avec parafoudre).

Comme en voit à partir de 45km et 60km les ondes deviennent dangereuses pour les transformateurs 110 et 330kV respectivement. La protection des transformateurs contre les ondes de surtensions est assurée par les parafoudres. Les figures V-6, V-7 qui représentent les surtensions aux bornes des transformateurs 110kV et 330kV montrent que par l'application du parafoudre les surtensions diminuent environ 2,5 et 1,5 fois (189kV, 583kV).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Notre travail est consacré à l'étude de l'influence des paramètres des ondes impulsionnelles venant par les lignes aériennes sur les enroulements du transformateur dans des réseaux de 110 et 330kV qui consiste à mettre en évidence l'influence des surtensions sur les transformateurs en tenant compte de la distance et les déformations des ondes de surtensions, et pour cela nous avons adoptés deux modèles de lignes dont chacune est reliée à un transformateur de 110kV et 330kV.

Les résultats obtenues d'après la simulation montre que :

- Les raideurs pour les passages de différentes dizaines de kilomètre diminuent ainsi leurs amplitudes et le temps du premier maximum diminue considérablement (c.-à-d. entre 100 et 90km, 90 et 80km... etc.) sont égales à 7,49kV/μs, et 5,48 kV/μs, et 4,15 kV/μs, et en fin 3,7 kV/μs pour 110kV.
Et pour 330kV on a trouvé 6,1kV/μs, et 4,43kV/μs, 3,57kV/μs, en fin 2,96kV/μs.
Et comme valeurs moyennes de changement de la raideur on trouve $K_{moy} = 4,26kV/\mu s$ et $K_{moy} = 3,86kV/\mu s$ respectivement pour 110 et 330kV.
- Les ondes de surtensions deviennent dangereuses à partir des distances 45km et 60km qui sont des distances critiques.
- La connexion du parafoudre réduit considérablement les surtensions dans le transformateur et assure sa protection (la tension à l'entrée de l'enroulement n'atteigne pas les valeurs dangereuses). Les tensions diminuent des valeurs (523kV et 830 aux valeurs respectivement 189kV et 583kV, correspondant aux lignes 110 et 330kV.

Notre espoir c'est que ce modeste travail servira les prochains travaux complémentaires dans ce sujet (l'influence des paramètres des ondes impulsionnelles) soit ce qui concerne

- La modélisation de l'arc électrique de contournement ;
- l'influence des charges sur les surtensions et les surintensités ;
- Généralisation de l'étude pour les différentes tensions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] THEODOR .WILDI, électrotechnique 4^{ème} édition ISBN : DBU2-8041 4892-0, P :
- [2] Cahier technique « distribution de l'énergie électrique », SCHNEIDER électrique.
- [3] DEDIER.FULCHIRON, « choix de base des réseaux électriques moyenne tension de distribution publique», D.P ARTICLE SCHNEIDER ELECTRIQUE
- [4] TOMASSET.G, « la conception des réseaux électriques industrielles a haute tension » article 160 PDF, MERLIN .GERIN.
- [5]FREDERICH MACIELA « Parafoudres » Technique de l'ingénieur, génie électrique, doc D4522.
- [6] HANDALLAH .M.A « les cours de technique de la haute tension et théorie de champs électromagnétique» 4^{ème} années ETH.UMMTO.
- [7] VALENTIN .CRASTAN « Les réseaux d'énergie électrique ». Tome 1
- [8]ROLAND CHOQUET « La sécurité électrique et technique de prévention ».BORDAS, PARIS ,1988
- [9] MUFIDZADA .N.A « les cours de réseaux électrique» 4^{ème} Années ETH. UMMTO
- [10]FULCHIRON. « Les surtensions et coordination de l'isolement », CT151, Schneider Electric, edition 1992.
- [11]FRANCOIS GERARD. « Généralités sur la foudre et les surtensions » .ADEE ELECTRIC .Octobre 2008.
- [12]HENRY NEY « équipement de puissance » Paris 1988.
- [13] RAHMANI.S, OUMZAOUECHE .B, « INFLUENCE DU CABLE SUR LES SURTENSIONS DANS UN SYSTEME LIGNE –CABLE- TRASFORMATEUR » .Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, université mouloud Mammeri de tizi ousou.
- [14] : Michel GRACIET & Joseph PINEL « Protection contre les perturbations ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique Doc. D 5 170
- [15]FULCHIRON. « Les surtensions et coordination de l'isolement », CT151, Schneider Electric, edition 1992.
- [16]FRANCOIS GERARD. « Généralités sur la foudre et les surtensions » .ADEE ELECTRIC .Octobre 2008.

Résumé :

Notre travail est consacré à l'étude de l'influence des paramètres des ondes impulsionnelles venant par les lignes aériennes sur les enroulements du transformateur dans des réseaux de 110 et 330kV qui consiste à mettre en évidence l'influence des surtensions sur les transformateurs en tenant compte de la distance et les déformations des ondes de surtensions, et pour cela nous avons adoptés deux modèles de lignes dont chacune est reliée à un transformateur de 110kV et 330kV.