

REPUBLIQUE ALGERRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire

*De fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme
D'ingénieur d'état en électrotechnique*

Option : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

*Etude des surtensions dans la ligne et
transformateur en tenant compte de l'effet
couronne*

Proposé et dirigé par :
M^r: N.MUFIDZADA

étudié par :
M^r: BEN ABDERRAHMANE HACENE
M^r: CHOULI MOHAMED RAFIK
M^{elle}: BALEH DEHIA

PROMOTION 2009

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.

Nous exprimons nos remerciements profonds pour notre Promoteur Mr N.MUFIDZADA, pour avoir accepté de nous encadrer et avoir toujours suivie le progrès de notre travail.

Nous tenant aussi à remercier Mr H.HAOUASSINE et Mr AMRANI pour leurs précieux conseils.

Nous tenant également à remercier les membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail et tous les Enseignants qui ont participé à notre formation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes chers parents qui ont su me tracer le chemin de la réussite, par leur compréhension, leur soutien et leur affection ; ceci n'est qu'un simple témoignage de ma reconnaissance d'affection et de tendresse.

- Mes très chers frères : SOFIANE ,BILLEL et MAMINE.*
- Ma très chère sœur :DALIA ainsi que son cher mari NICOLAS.*
- Mes très chères grandes mères : Fatima et dahbia.*
- Ma très chère Assia.*
- Toute ma famille.*
- Tous mes amies :Mokrane,Djafar ,Karima, Ferhat*
- mes chers binômes Hacene, Dehia*
- A tous ceux que j'ai oubliés .*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents aux quels je dois tout.

Mes très chères sœurs : LILA, YAMINA, DAMIA, MASSILVA.

Mes très chers frères : ABBAS, MUSTAPHA, GHILAS, SOFIANE, AMAZIGH, MASSINISSA.

A la mémoire de ma grand-mère.

A la mémoire de mon oncle BACHIR ainsi qu'à toute sa famille surtout BACHIR junior et ANAIS.

Mon oncle FARID et sa famille.

Mon oncle BELKACEM et sa famille.

Ma cousine HAMMAMA, ainsi que KARIM et KARIMA.

Mon cousin MAKHLOUF ainsi qu'à toute sa famille.

Tous mes cousins et cousines.

A mon meilleur ami HAFIDH.

A celle qui ma toujours soutenu.

A mes amis(es) : MOKRANE, FARIDA, MIMOUNE, M'HA, SAID, MALIK, KHADIR.

A ceux qui m'ont toujours aider.

Mes binômes MOUMOUH, DEHIA.

Les gents de mon village.

La promo 2009.

HACENE.B

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- la mémoire de mon jeune oncle ATIK, et mon grand père que dieu à rappeler à ces côté.*
- mes parents qui m'ont toujours soutenue et qui ont cru en moi.*
- mes frères : aghiles et lakhdar.*
- ma sœur adorée cilva.*
- mes grands parents.*
- mes amies : Nabila, Karima, Noria, Souhila, Assia, Nawal, Amel, Sofia.*
- mes oncles et tentes, et spécialement dahlia.*
- tous mes cousins et cousines.*
- ma tente fettouma qui ma jamais laisser tomber.*
- mokrane qui a toujours été la,comme source d'énergie*
- mes binômes : HACENE et RAFIK que je remercie*
- à tous ceux que j'ai oubliés.*

dahia

sommaire

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur la construction d'une ligne et des transformateurs de grandes puissances.

- I.1. généralités sur les lignes de transport d'énergie .. 2
 - I.1-2 Définition .. 2
 - I.1-3 composants .. 3
 - I.1-3-1 les conducteurs ... 3
 - I.1-3-2 les isolateurs ... 3
 - I.1-3-3 les pylônes ... 4
- I.2. transformateurs de grandes puissances .. 7
 - I.2.1 Définition ... 7
 - I.2.2. Constitution .. 8
 - I.2.2.a) Circuit magnétique ... 8
 - I.2.2-b) Circuit électrique ... 11
 - I.2.2.b.1) Enroulement primaire .. 11
 - I.2.2.b.2) Enroulement secondaire ... 11
 - I.2.3 construction des enroulements en galettes .. 12
 - I.2.4. Principe de fonctionnement .. 15
 - I.2.5 Grandeurs nominales du transformateur .. 15
 - I.2.6. principaux types des transformateurs d'après leurs utilisations.... 16
 - I.2.7. Défauts dans les transformateurs ... 16
 - I.2.7.a) Diélectriques .. 16
 - I.2.7.b) Electrique .. 16
 - I.2.7.c) électrodynamique 17
 - I.2.7.d) électromagnétique .. 17
 - I.2.7.e) thermique .. 17
 - I.2.7.f) mécanique .. 17
 - I.2.8. transformateurs spéciaux .. 17
 - I.2.8. a- transformateur de réglage 17
 - I.2.8.b- transformateurs de couplage de réseaux .. 18
 - I.2.8.c-transformateurs de distribution .. 18
 - I.2.9. isolation et refroidissement des transformateurs ... 18

Chapitre II : éléments de protection.

- II.1 principes de protection .. 19
- II.2 les éclateurs .. 20
 - II.2-1 fonctionnement .. 20
- II.3 les parafoudres .. 21
 - II.3-1 définition .. 21

- II.3-2 différents types de parafoudre 21
 - II.3-2-1 parafoudre a oxyde de zinc (ZnO) 21
 - a) constitution 21
 - b) principe de fonctionnement... 21
 - II.3-2-2 parafoudres à expulsions 23
 - a) constitution 23
 - b) principe de fonctionnement 23
- II.4 le câble de garde 23
- II.5 les sectionneurs 24
- II.6 les disjoncteurs 25

Chapitre III : Généralités sur les surtensions et sur le phénomène de couronne.

- III-1 Définition des surtensions 26
- III-2 origines des surtensions 26
 - III-2-1 origine interne 26
 - III-2-1-1 surtension de manœuvre 26
 - III-2-1-2 surtension lors d'un court-circuit monophasé 27
 - III-2-1-3 surtension de Ferro-résonance 27
 - III-2-2 origine externe 27
- III-3 effets des surtensions 28
 - III-3-1 effets thermiques 28
 - III-3-2 effets électrochimiques 28
 - III-3-3 effets électrodynamiques 28
 - III-3-4 effets électromagnétiques 28
- III-4 nature des surtensions dans les enroulements du transformateur 29
- III-5 atténuation des surtensions transitoires dans les lignes de haute tension 29
- III. 6. L'effet couronne 34
 - III.6 .1 phénomènes de couronne sur une ligne électrique alternative... 37
 - III.6.2 calcul du champ électrique superficiel des conducteurs 37
 - III.6.2.1 champ électrique pour les systèmes usuels 38
 - a-conducteur cylindrique concentrique 38
 - b-lignes bifilaires 39
 - c-système conducteur terre 39
 - III.6.3 tension d'apparition de l'effet couronne 40
 - III.6.3.1 champ électrique critique 40
 - III.6.3.2 tension de seuil de l'apparition de l'effet couronne..... 41

Chapitre IV : Les paramètres de la ligne et du transformateur et leurs modélisations.

- IV.1. modélisation de la ligne et du transformateur sans effet couronne 42
 - IV.1.2. modélisation d'une ligne et d'un transformateur sans tenir compte de l'effet couronne 42
 - IV.1.2.1. définition des paramètres de la ligne 44
 - IV.1.2.2. détermination des paramètres de la ligne 44

Caractéristiques électriques de la ligne 44
 Détermination de la résistance 45
 Détermination de l'inductance 45
 Détermination de la capacité 47
 IV.1.2.3. paramètres du transformateur 48
 Caractéristiques du transformateur triphasé 48
 Caractéristiques géométriques 48
 Détermination de la résistance 50
 Détermination de l'inductance propre et mutuelle 51
 Détermination de la capacité transversale 55
 Détermination de la capacité longitudinale K 56
 Détermination de la capacité des éléments du poste 56
 IV.1.3. modélisation de deux lignes parallèle sans effet couronné 57
 IV.1.3.1. définition des paramètres 57
 IV.1.3.2. détermination des paramètres 57
 Détermination de la résistance 57
 Détermination de l'inductance 57
 Détermination de la capacité 59
 IV.1.4. modélisation de la ligne avec effet couronné 60
 IV.1.4.1. définition des paramètres de la ligne 62
 IV.1.4.2. calcul des paramètres de la ligne 62
 Caractéristiques du modèle de couronné 62
 Calcul de la capacité 65
 Calcul de conductibilité active 65

Chapitre V : simulation et analyse des résultats

V-1 introduction 65
 V-2 simulation des schémas équivalents 65
 V-3 analyse et interprétation des résultats 71

Conclusion générale 75

Introduction Générale

Introduction générale:

L'énergie électrique présente un besoin fondamental dans plusieurs secteurs de l'activité humaine, que ce soit dans notre vie domestique ou dans l'industrie où elle joue un rôle très important. Cette énergie produite dans des centrales électriques, est transportée aux zones de consommation ce qui crée des réseaux électriques. Des régimes endommagés peuvent avoir lieu dans ces réseaux électriques à cause des Changements de leurs régimes.

Le problème des surtensions dans les lignes a toujours été un sujet de controverses passionnées, due à plusieurs phénomènes dont le coup de foudre, d'où l'importance de protéger les installations et les appareils contre les surtensions. Ces surtensions peuvent être perturbée par l'effet couronne et l'effet superficiel (effet de peau) dans les lignes ce qui complique le processus. Afin de limiter les inconvénients dus à ces surtensions on utilise des dispositifs de protections adéquats.

Les expériences acquises chez les électrotechniciens ont permis aujourd'hui de faire un choix pertinent en fonction des contraintes propres à chaque réseau électrique. Nous essayerons d'expliquer au maximum les techniques mathématiques et numériques de calcul pour mieux étudier ces surtensions, avec l'influence de l'effet couronne.

Notre travail, se articule autour de cinq chapitres :

- Le premier chapitre nous donne un aperçu général sur la construction d'une ligne de transport d'énergie électrique (pylône, isolateur, conducteur), et d'un transformateur de grande puissance.

- Le deuxième chapitre, est consacré aux différents éléments de protections (parafoudre, parafoudre a expulsion, câble de garde).

- Les généralités sur les surtensions et le phénomène de couronne sont données dans le troisième chapitre.

- Dans le quatrième chapitre on représente les calculs des paramètres des éléments d'une ligne et du transformateur et leurs modélisations.

- Le dernier chapitre consiste à l'étude et l'analyse des surtensions dans la ligne et dans le transformateur en tenant compte de l'effet couronne.

Chapitre I :

Généralités sur la construction d'une ligne électrique et d'un transformateur de grande puissance

Les lignes aériennes constituent le moyen le plus important pour le transport d'énergie électrique entre les centrales de production et les zones de consommation.

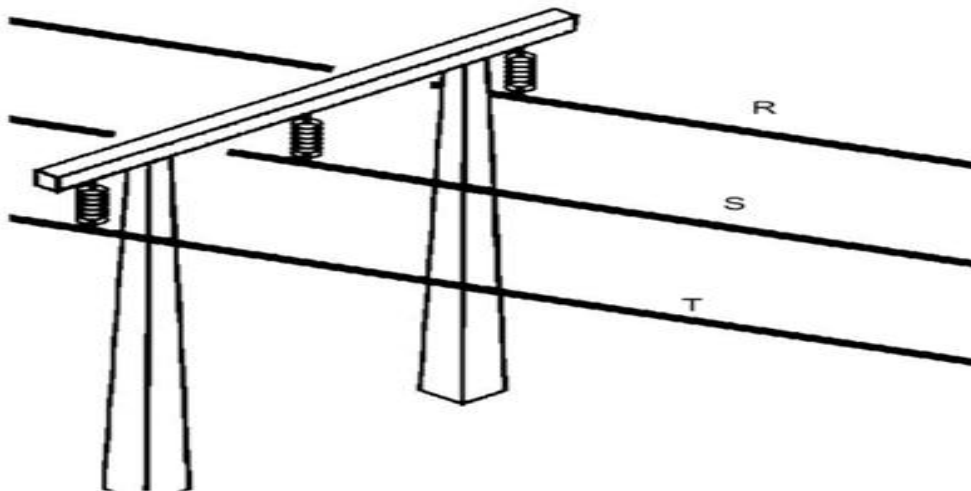
Une ligne aérienne est composée de pylônes, de câbles conducteurs, de câbles de garde et d'isolateurs.

I.1 La ligne de transport d'énergie électrique.

I. 1-2 Définition :

Les lignes de transport sont parmi les principaux éléments des réseaux électriques. Elles peuvent être aussi bien aériennes que souterraines ou marines. Elles servent au transport, sur les longues distances, de l'énergie électrique produite par diverses centrales électriques ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques.

Le but d'utilisation de la haute tension dans le transport d'énergie électrique est de réduire les chutes de tension, les pertes de puissance dans les constructions des lignes et également d'améliorer la stabilité des réseaux. La ligne aérienne (figure1) se compose des conducteurs de phase (RST) suspendus au moyen de chaînes d'isolateurs à des pylônes mis à terre. Un ou plusieurs conducteurs supplémentaires appelés câbles de garde connectés à la terre par chaque pylône, assurent principalement la protection contre le coup de foudre sur les lignes [1].



(Figure 1)

I.1-3 Composants :

I.1-3-1 Les conducteurs :

Un conducteur est un matériau qui conduit aisément le courant électrique. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément comme l'or, l'argent, cuivre et l'aluminium, ayant une assez grande conductibilité. Pour les lignes aériennes on utilise toujours l'aluminium à cause de son prix bas.

Les lignes de transport d'énergie possèdent trois conducteurs pour les trois phases. Afin de limiter les pertes de puissances par effet couronne, pour une phase, on peut trouver un faisceau de 2 à 5 et plus de conducteurs à la place d'un conducteur simple. Les conducteurs utilisés sont en aluminium ou en alliage aluminium acier.

I.1-3-2 Les isolateurs :

Un isolant est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. L'utilisation des isolateurs est destinée pour isoler les conducteurs étant sous la tension de service par rapport à la terre (à travers les pylônes).

Les conducteurs des lignes aériennes sont fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs réalisés en verre ou en porcelaine. Dans les réseaux de haute tension on utilise les isolateurs en porcelaine. Généralement, les isolateurs ont la forme d'une assiette. Ces derniers sont associés entre eux pour former une chaîne d'isolateurs (figure 2) [2].

Les isolateurs doivent présenter une rigidité diélectrique suffisante pour tenir la tension de service sans qu'ils produisent ni percement ni arc de contournement.



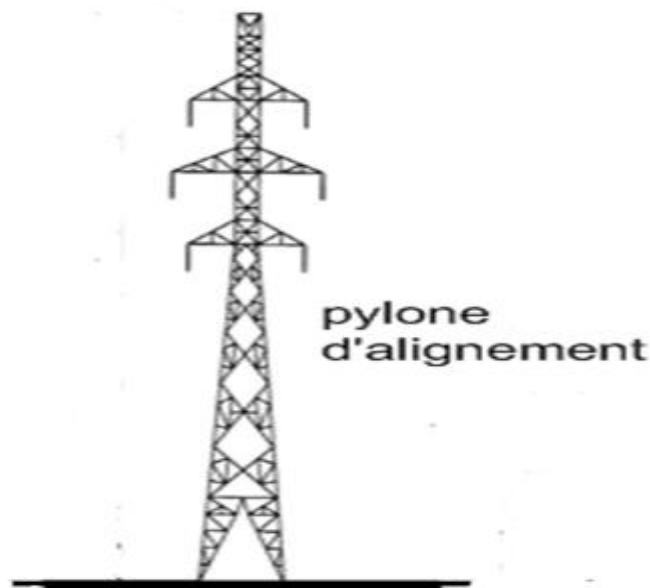
(Figure 2)

I.1-3-3 Les pylônes :

Un pylône électrique est un support vertical portant les conducteurs d'une ligne de transport d'énergie électrique, qui sont tendus dans les deux portées adjacentes de pylône [1].

a-Pylône d'alignement :

Ce sont des pylônes placés successivement au long de la ligne, sur lesquels les conducteurs sont suspendus (les conducteurs ne sont pas fixes). (figure3).



(Figure 3)

b-Pylônes d'ancrage :

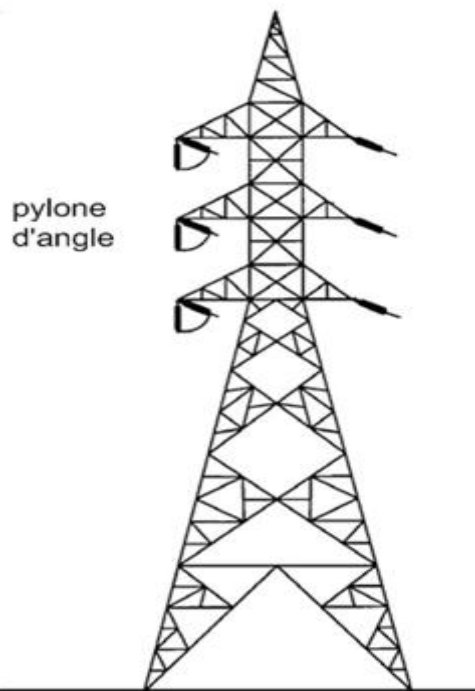
En cas de rupture d'un ou plusieurs conducteurs d'une portée, les pylônes successifs pourraient s'incliner (ou même se renverser) de proche en proche. Il faudrait donc prévoir de distance en distance des pylônes d'ancrage, sur lesquels les conducteurs sont fixes. C'est pour cette raison que ce type de pylône a une grande rigidité, capable de supporter la tension mécanique de tous les conducteurs d'une portée (figure 4).



(Figure 4)

c-Pylônes d'angle :

Les pylônes d'angle devront posséder une rigidité suffisante, surtout dans le sens bissectrice des deux directions prises par les conducteurs. [2].



(Figure 5)

On utilise trois matériaux principaux pour la constitution des pylônes de lignes aériennes :

Le bois, le béton et le acier. Actuellement, le acier est le matériau le plus utilisé. On distingue deux catégories de pylônes fabriqués à base de ce

dernier .La première ayant des conducteurs disposés au même niveau, la seconde ayant des conducteurs étagés [1].

Dans la première catégorie on trouve les types suivants :

- Pylônes à nappe horizontale.
- Pylônes de type chat.

Dans la deuxième catégorie on a :

- Pylône triangle.
- Pylône drapeau.
- Pylône double drapeau.
- Pylône double triangle.

I.3.Transformateurs de grandes puissances.

I.3.1.Définition :

Le transformateur est un appareil électromagnétique statique destiné à transformer un courant alternatif primaire en un autre courant secondaire de même fréquence ayant dans le cas général d'autres caractéristiques, en particulier, une autre tension et un autre courant.

Les transformateurs sont des machines à induction électromagnétique ne comportant aucune partie tournante, d'où leur nom de <<transformateurs statiques>> .Ces appareils sont réversible permettant soit l'élévation ou l'abaissement de tension (voir figure).



I.3.2.Constitution :

Dans sa forme la constitution est constituée de deux bobines couplées appelées primaire et secondaire (coté charge) montées sur un noyau.

I.3.2. a) Circuit magnétique :

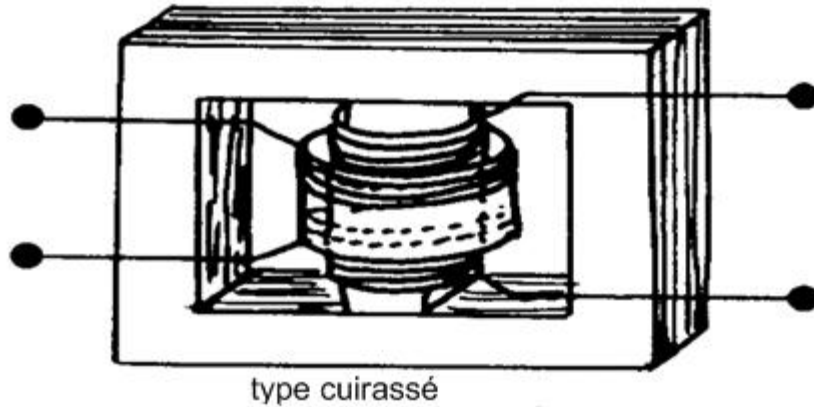
Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles de fer minces (0.3 - 0.4mm) isolées les unes des autres pour réduire les pertes par courants de Foucault .Pour réduire les pertes par hysteresis, les tôles possèdent un certain pourcentage de silicium (0.8 - 3.5%) ou sont à grains orientés.

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux types de dispositions principales. [3]

Type cuirassé :

Le circuit magnétique entoure les enroulements, cette disposition est

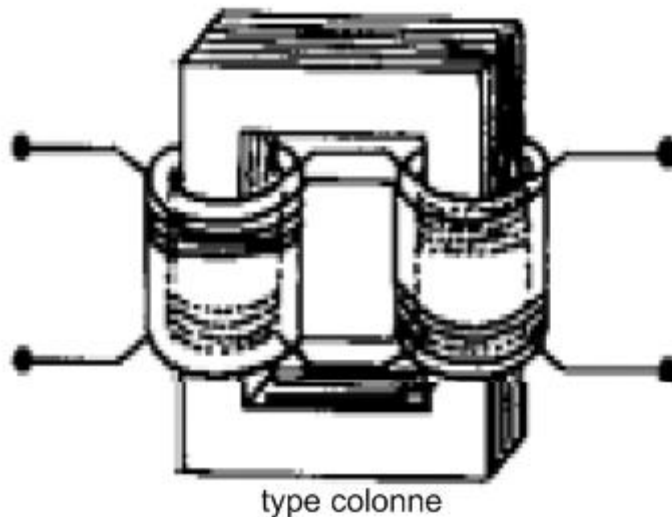
surtout utilisée pour les basses tensions, les petites puissances et les fortes intensités (alimentation des fours électriques), ce type de circuit est représenté sur la figure(6).



(Figure 6)

Type colonnes :

Les enroulements entourent le circuit magnétique. Les colonnes, sur les quelles sont enroulées les bobines, sont reliées entre elles par les culasses pour fermer le circuit magnétique (figure 7).



(Figure 7)

La construction d'un transformateur triphasé à trois colonnes avec enroulement cylindrique, que l'on voit sur la figure 8 correspond à la réalisation de principe du schéma à Cinq éléments 6-f. la construction d'un transformateur triphasé à Cinq colonnes avec enroulement cylindrique, représenté sur la figure 9, correspond à la réalisation de principe du schéma à sept éléments de figure 6.g

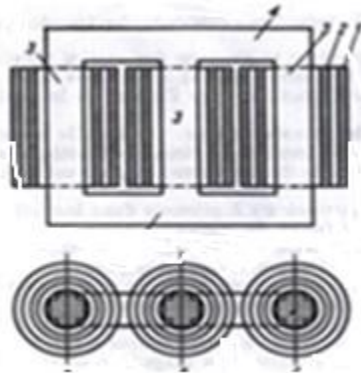
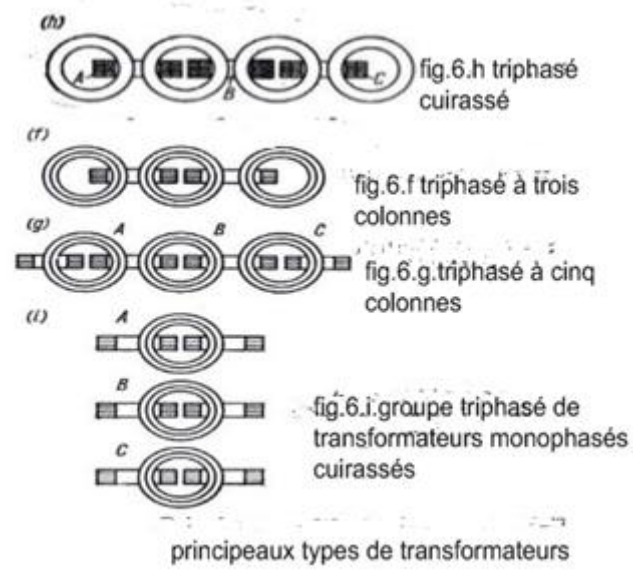


Fig.8. Transformateur triphasé à colonnes à enroulements concentriques

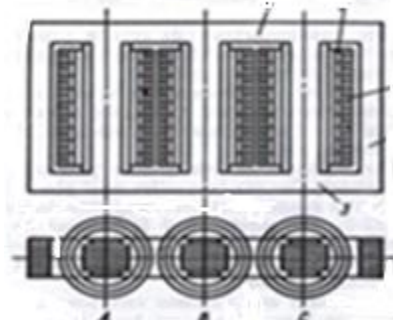


Fig.9. Transformateur triphasé à cinq colonnes à enroulements concentriques

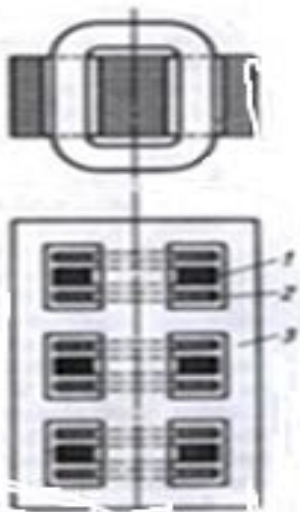


Fig.10. Transformateur triphasé cuirassé à enroulements alternés

La construction d'un transformateur triphasé cuirassé avec enroulements en anneaux alternants est donnée sur la figure 10. Elle correspond à la réalisation du principe du schéma à 9 enroulements de la figure 6-i mais puisque dans ce cas les six circuits magnétiques peuvent être réalisés sous la forme d'un seul circuit magnétique commun on monte ce système en quatre éléments dont trois d'enroulements et un circuit magnétique.

Les transformateurs cuirassés présentent un certain avantage. Ils possèdent un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus petit et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans un transformateur à colonnes. Mais il présente aussi certains inconvénients. Ces enroulements sont moins accessibles à l'agent réfrigérant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et il demande davantage de matériaux isolants pour la haute tension que le transformateur à colonnes. Au contraire pour obtenir des forts courants de basse tension les transformateurs cuirassés conviennent mieux [3].

I.3.2 b) Circuit électrique :

Les enroulements sont distincts, leurs nombre de spires diffèrent en général. L'enroulement qui comporte le plus de spires est dit haute tension (HT), il est en fil plus fin que l'autre qui est dit basse tension (BT).

I.3.2.b.1) Enroulement primaire :

Enroulement primaire (appelé simplement primaire) qui reçoit l'énergie électrique et la transforme en énergie magnétique par induction.

I.3.2.b.2) Enroulement secondaire :

Enroulement secondaire (ou secondaire) qui, étant traversé par le champ magnétique produit par le primaire, fournit un courant alternatif de même fréquence mais de tension qui peut être plus supérieure ou inférieure à la tension primaire.

Un transformateur qui produit une tension plus grande est dit élévateur de tension, à l'inverse il est dit abaisseur de tension. [4]

Un transformateur peut comporter plusieurs enroulements secondaires.

1.3.3 Construction des Enroulements en galettes :

Avec le souci de rechercher des constructions d'enroulements à isolement aussi uniformes que possible, quelle que soit les contraintes électriques auxquelles ils sont soumis, les constructeurs ont imaginé des dispositions relatives de spires les unes par rapport aux autres, qui toutes visent à réduire le rapport capacité dérivée sur capacité série.

Par capacité dérivée, on entend la capacité répartie d'un enroulement par

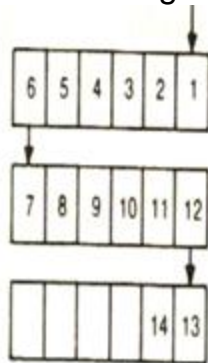
rapport à son environnement, c'est-à-dire soit circuit magnétique ou cuve, soit enroulement adjacent.

Par capacité série, on entend soit des capacités entre spires, soit les capacités entre groupes de spires.

Cette recherche d'homogénéisation des contraintes a d'autant plus d'importance que les tensions auxquelles sont soumis les enroulements sont plus élevées sans toute fois être indépendantes des puissances unitaires dont l'accroissement est, en général, un facteur favorable à une meilleur distribution des tensions.

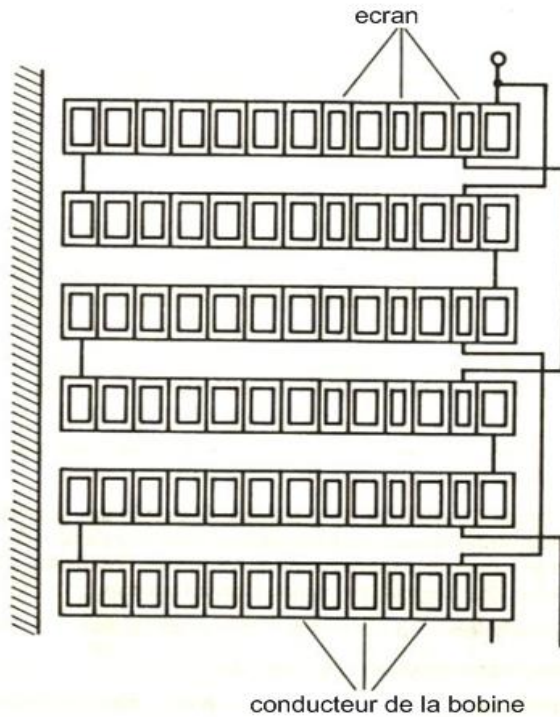
On rencontrera donc dans nos constructions suivant les cas :

- Des enroulements en galettes continues

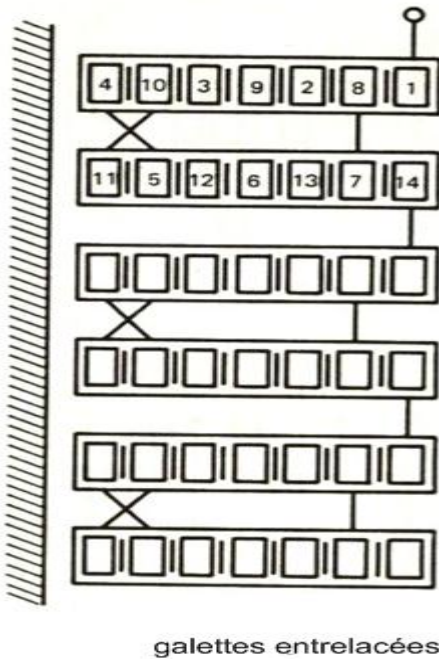


galettes continues

-Des enroulements en galettes continues avec écrans à potentiel flottant ces écrans sont en général constitué par une spire non parcourue par le courant qui vient s'intercaler entre les spires superposées de deux bobines adjacentes. La tension entre cet écran et les spires adjacentes étant relativement plus élevée que celles de seulement deux spires voisines, on conçoit que l'énergie capacitive série emmagasinée par l'enroulement se trouve ainsi augmentée.

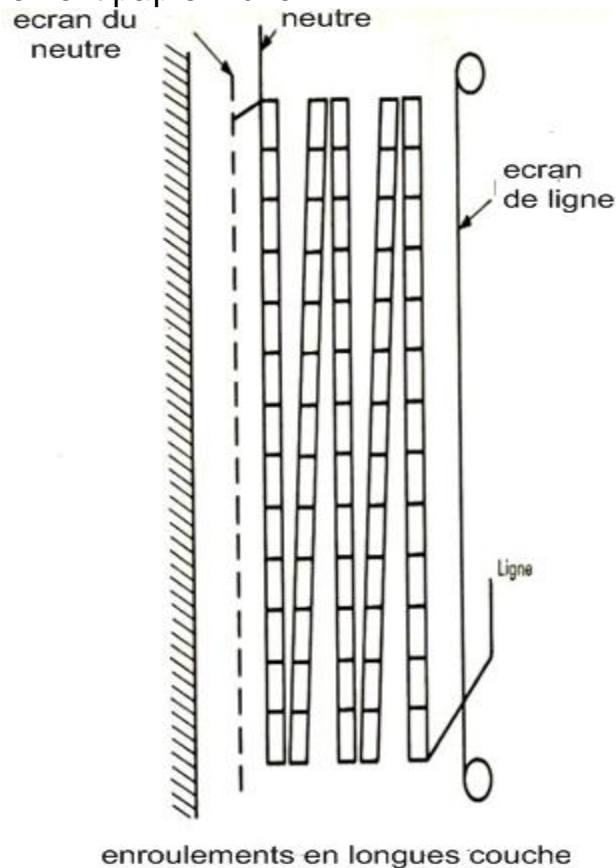


- Des enroulements dits en galettes entrelacées. Cette disposition est voisine de la précédente mais l'accroissement d'énergie capacitive est obtenu en entrelaçant systématiquement les spires d'une bobines avec celles de la suivantes ; pour des raisons économiques de coefficient de remplissage, ces spires qui jouent le rôle d'écran capacitif du cas précédant sont parcourues par le courant et sont des spires de l'enroulement lui-même ;



-Des enroulements en longues couche. Dans ce type d'enroulement, les spires adjacentes ne sont plus disposées radialement mais axialement et l'enroulement est constituée d'un certain nombre de couches concentriques,

séparée par un isolement papier huile.



Alors que dans les enroulements en galettes, on cherche à augmenter la capacité série, les enroulements en couches tendent à diminuer la capacité dérivée, les couches constituant des condensateurs coaxiaux sont connectées en série vis-à-vis de la masse. Pour les très hautes tensions, la distribution des tensions est encore améliorée par l'utilisation d'écrans électrostatiques disposés concentriquement aux couches et qui sont en général connectés, soit à la ligne soit au neutre ou quelques fois à ces deux extrémités.

Ces types d'enroulement conviennent particulièrement bien à la construction d'autotransformateurs interconnectant deux réseaux à très haute tension [5].

I.3.4. Principe de fonctionnement :

Le primaire raccordé au réseau est alors traversé par courant, le quel crée un flux magnétique. Ce flux variable (courant alternatif) embrassé par le secondaire produit une f.é.m. induite à la même fréquence on branche aux bornes du secondaire un récepteur quelconque, un courant alternatif parcourt alors le circuit secondaire ainsi fermé. Par induction mutuelle à l'intermédiaire du flux créé par le primaire, une puissance électrique alternative passe d'un circuit à l'autre.

Le rapport de transformation est une des caractéristiques de base qui définit le type d'appareil à notre possession. Il se définit par le rapport de nombre de spire ou le rapport des f.e.m, des tensions ou encore par celui du courant.

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{ou} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Autrement dit, en charge normale les intensités primaire et secondaire sont inversement proportionnelles aux nombres de spires primaires et secondaires. Par contre l'intensité primaire est proportionnelle à l'intensité secondaire ce qui amène à dire que le transformateur est autorégulateur en charge normale.

I.3.5. Grandeurs nominales du transformateur :

Elles sont données par le constructeur et sont notées sur la plaque signalétique du transformateur.

Puissance apparente S_n .

-Tension nominale U_n (tension composée entre deux phases).

-Tension de court circuit : $U_{cc} \frac{U_{cc}}{U_n} \%$

-Courant du régime à vide I_0

Avec : X_t réactance d'induction de la enroulement considéré.

-Perte de puissance en régime à vide p_0 KW

-Perte de puissance en régime de court-circuit PC_c KW

-Rapport de transformation : $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$, N_1, N_2 sont respectivement les nombres de spires du primaire et du secondaire.

I.3.6 Principaux types de transformateurs d'après leurs utilisations :

Les transformateurs les plus utilisés sont :

-Les transformateurs de puissances destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.

-Les transformateurs destinés à régler la tension dans les limites restreintes pour le couplage des réseaux et la mise en marche des moteurs à courant alternatif.

-Les transformateurs de mesure de tension et de courant pour le branchement dans les schémas des appareils de mesure.

-Les transformateurs destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques (redresseur à vapeur de mercure, ignitrons, soupape à semi-conducteurs).pour la transformation du courant alternatif en courant continu ou du courant continu en courant alternatif.

-Les transformateurs de essai destinés aux essais sous haute et très haute tension.

-Les transformateurs de puissance spéciaux pour les alimentations des fours, poste de soudage.

-Les autotransformateurs servant à transformer la tension dans des limites relativement restreintes pour le couplage des réseaux interconnectés de différentes tensions pour la mise en marche des moteurs à courant alternatif.

-Les transformateurs utilisés en radiotechnique [6].

I.3.7. Défaits dans les transformateurs :

Les transformateurs sont exposés à des défauts de nature divers.

I.3.7.a) Diélectriques :

Décharges partielles et amorçage entre enroulement, entre éléments des enroulements et la masse ou entre les éléments sous tension.

I.3.7.b) Electriques :

Mauvais contact dans les connexions et les changeurs de prises.

I.3.7.c) Electrodynamique :

Efforts dus à un court-circuit interne ou externe.

I.3.7.e) Electromagnétique :

Courants de Foucault induits dans le circuit magnétique, les pièces de serrage, la cuve.

I.3.7.f) Thermique :

Echauffement anormal chaud, vieillissement thermique, pollution de l'huile.

I.3.7.g) Mécanique :

Vibrations, fuites, fonctionnement défectueux du changeur de prises [7].

I.3.8.Transformateurs spéciaux.**I.3.8.a-Transformateurs de réglage :**

Les transformateurs de réglage permettent une correction de la tension sous charge. Pour cela l'enroulement TS est subdivisé en enroulement de base et enroulement à muni gradins. L'enroulement à gradins est muni de prises commutables par un commutateur à gradins. Les bobines TS des transformateurs triphasés sont normalement couplées en étoile et ont ainsi un centre commun ; un seul commutateur à gradins suffit alors pour les trois enroulements. L'enroulement TS a l'avantage, par rapport à l'enroulement TI d'être parcouru par courant moindre, mieux maîtrisé par le commutateur.

Les transformateurs à gradins sont relativement chers et sont utilisés surtout dans les réseaux HT et MT, là où les différences de tensions entre marche à vide et en pleine charge sont élevées. Le commutateur peut être commandé manuellement ou automatiquement par un régulateur de tension. Cette régulation de tension permet de mieux maîtriser le flux de puissances réactives. Le réglage de la puissance active demande par contre des transformateurs capables de déphasé la tension de sortie par rapport à celle d'entrée [8].

I.3.8.b-Transformateurs de couplage de réseaux :

Dans ce but, on utilise le couplage $Yy0$ et le montage autotransformateur. Les points médians sont, en général, mis à la terre des deux côtés. Souvent les transformateurs de couplage de réseaux sont employés comme transformateurs de réglage

I.3.8.c-Transformateurs de distribution :

Les transformateurs de distribution installés dans les sous-stations alimentent les réseaux basse tension. Les points médians sont mis à la terre du côté basse tension. Les groupes de couplages utilisés sont $Dy5$ et $Yz5$. Le domaine des puissances se situe entre environ 100KVA et 2MVA. Les puissances normalisées sont 400, 630, 1000, 1600KVA pour le couplage $Dy5$. Pour des puissances de 250KVA et moins, on préfère le couplage $Yz5$ qui se comporte mieux en cas de charge déséquilibrée ; pour les petites

puissances, les charges monophasées sont en général statistiquement moins bien réparties sur les trois phases [8].

I.3.9- Isolation et refroidissement des transformateurs :

En ce qui concerne l'isolement on distingue dans le domaine de transport et de la distribution de l'électricité, les transformateurs isolés aux résines d'induction au SF₆ et au papier imprégné à l'huile minérale. Les deux premiers sont employés jusqu'aux moyennes tensions pour les petites et moyennes puissances, alors que les transformateurs à huile minérale peuvent être utilisés jusqu'aux tensions et puis puissances les plus élevées.

Avec le refroidissement à l'air, employé pour les petites et moyennes puissances, la surcharge possible est petite. Le refroidissement à l'huile permet des surcharges temporaires nettement plus élevées.

Une innovation vraisemblablement intéressante pour l'avenir est le transformateur supraconducteur dont les enroulements sont isolés et refroidis à l'azote liquide. Le but est de réduire le poids de moitié et les pertes dans le cuivre à environ 25%. Son intérêt économique dépend essentiellement du coût des éléments supraconducteurs [8].

Chapitre II :

Éléments de protection

La protection des réseaux électriques contre les effets des surtensions peut se concevoir de deux manières : on adapte dans la structure des lignes des dispositions (câble de garde, chaîne d'isolateurs etc.) afin de réduire les contraintes résultantes des surtensions et en installant des dispositifs de protection dans les postes.

II.1 Principe de la protection : [9]

La protection des installations et des personnes contre les surtensions est d'autant meilleure qu'un écoulement des perturbations vers la terre est assuré, et ceci le plus près possible des sources de perturbation. Cela impose la mise en œuvre de prise de terre de faible impédance. Ainsi on distingue 3 niveaux de protection contre les surtensions :

1^{er} niveau de protection :

L'objectif est d'éviter l'impact direct sur les ouvrages en captant la foudre et en l'orientant vers des lieux d'écoulement privilégiés, au moyen de :

- Paratonnerres, dérivateurs dont le principe est basé sur la distance de amorçage ; une tige placée en haut de la structure à protéger capté la foudre et l'écoulé a travers le réseau de terre.

- Cages maillées ou de faraday.

- Câble de garde.

2^{eme} niveau de protection :

Son but est d'assurer que le niveau d'isolement au choc des éléments n'est pas dépassé.

Il est réalisé en HT au moyen d'éléments assurant l'écoulement de l'onde de foudre à la terre tels que :

- Eclateurs.

- Parafoudres HT.

3^{eme} niveau de protection :

Utilisé en BT comme protection complémentaire des équipements sensible (informatique, appareil de télécommunication etc) il est réalisé au moyen de :

- Filtre série.

- Limiteurs de surtension.

- Parafoudre BT.

Notre étude est basée essentiellement sur le parafoudre et l'éclateur.

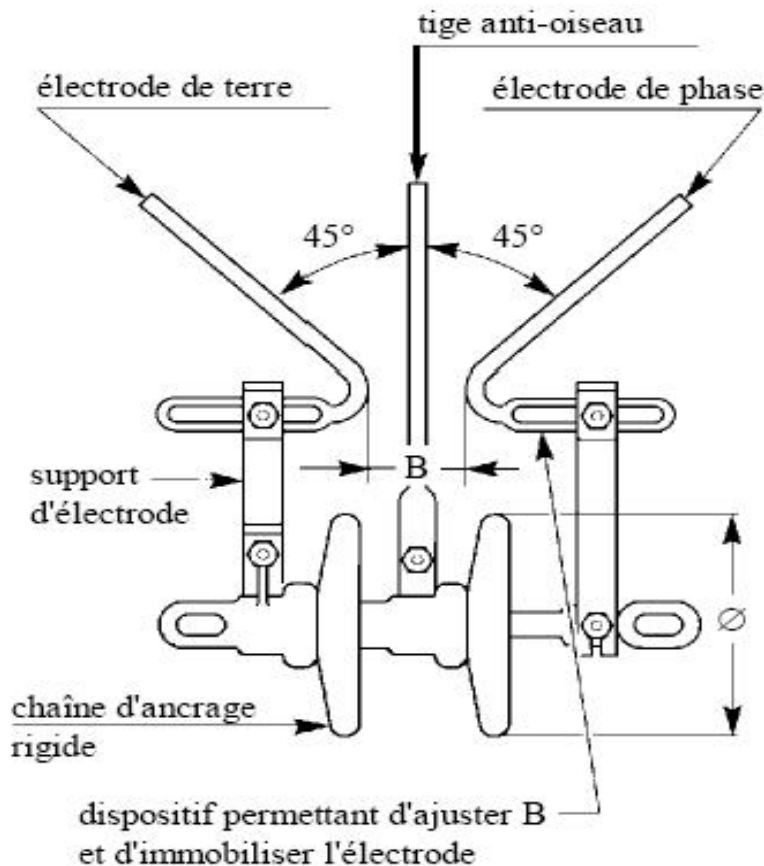
II.2 Les éclateurs : [10]

II.2.1 Fonctionnement :

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

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

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



II.3 Les parafoudres :

II.3.1 Définition :

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

II.3.2 Différents types de parafoudre :

II.3.2.1 Parafoudre à oxyde de zinc : [10]

a) Construction :

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

b) Principe de fonctionnement :

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

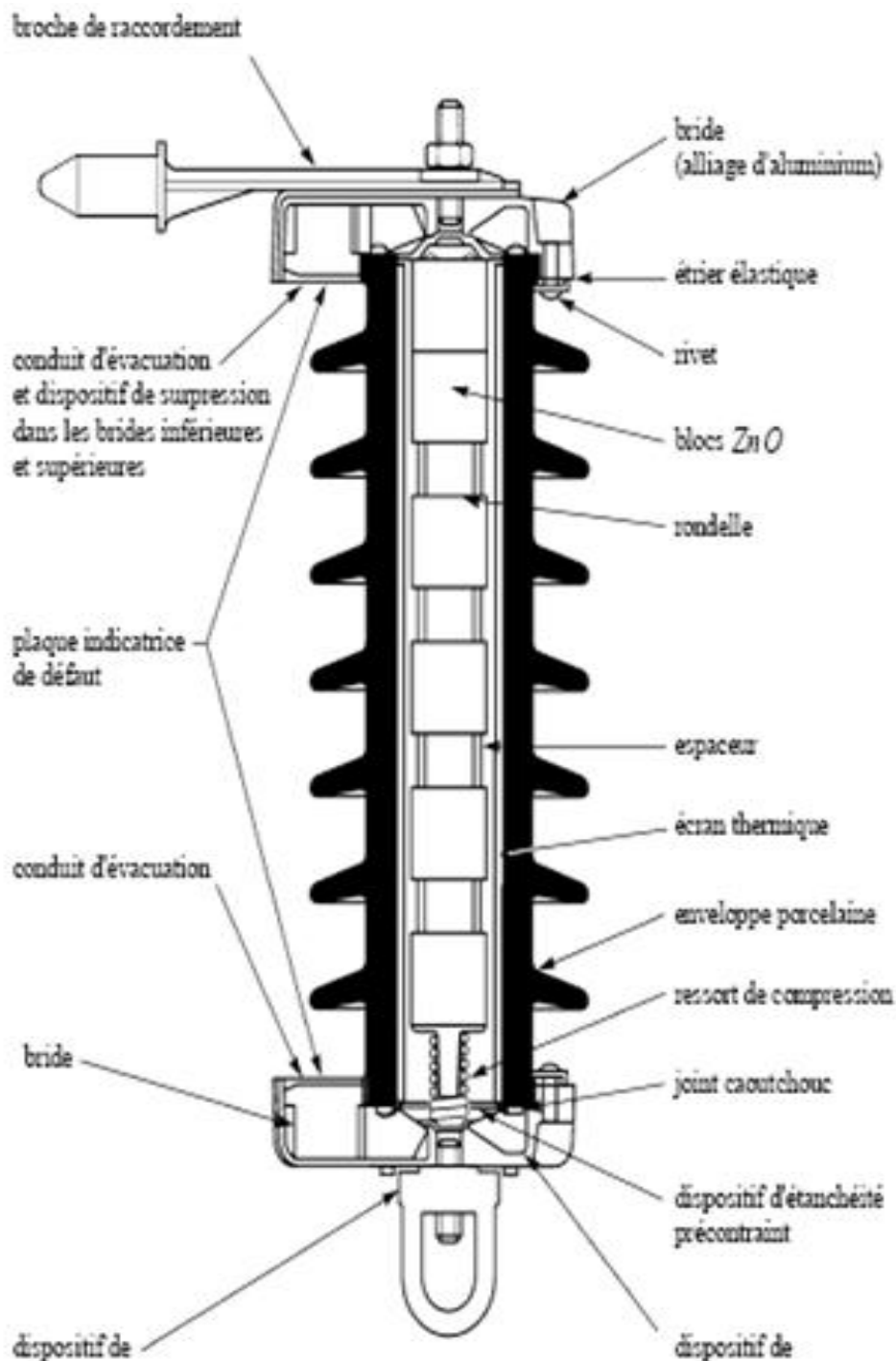
Après écoulement de l'onde de choc à la terre, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

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

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

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à

résistance et éclateurs, la plus classique utilise une résistance au carbure de silicium, certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflages de l'arc (aimants ou bobines de soufflage magnétique).



Exemple de structure d'un parafoudre ZnO enveloppé en porcelaine

II.3.2.2 Parafoudre à expulsion :

a) Construction :

Les parafoudres à expulsion sont des éclateurs possèdent un pouvoir de coupure appréciable. Ils sont constitués de deux éclateurs en série.

L'un de ces éclateurs, dit auxiliaire, évite le maintien en permanence, sous pleine isolation du dispositif de coupure. L'autre éclateur, placé à l'intérieur d'un tube en fibre, possède un niveau d'amorçage assez bien défini, il forme la partie active du parafoudre.

b) Principe de fonctionnement :

Lorsque un arc s'amorce à l'intérieur du tube, il décompose la fibre et donne naissance à une masse de gaz peu conductrice qui s'expulse violemment par l'ouverture inférieure, l'arc est alors soufflé et s'éteint en une demi période.

Les parafoudres à expulsion sont installés sur les pylônes des lignes à proximité des postes pour diminuer les courants d'amorçage des parafoudres d'oxyde de zinc au carbure de silicium. [9]

II.4 Le câble de garde :

Les câbles de garde sont destinés pour la protection des lignes contre les coups de foudre. Ce sont des conducteurs en acier, de faible section, situés au dessus des conducteurs de phases et reliés à la terre par l'intermédiaire des pylônes. Ils constituent une protection efficace contre le foudroiement des lignes aériennes, leur mission est de capter les coups de foudre [11].

Rôles du câble de garde :

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

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

- Rôle statique.
- Rôle dynamique.

Rôle statique :

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

Rôle dynamique :

Les rôles dynamiques du câble de garde sont du type :

- Protection contre l'impact direct de la foudre.
- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.
- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension sur les lignes de télécommunications.

II.5 Les sectionneurs

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



II.6 Les disjoncteurs :

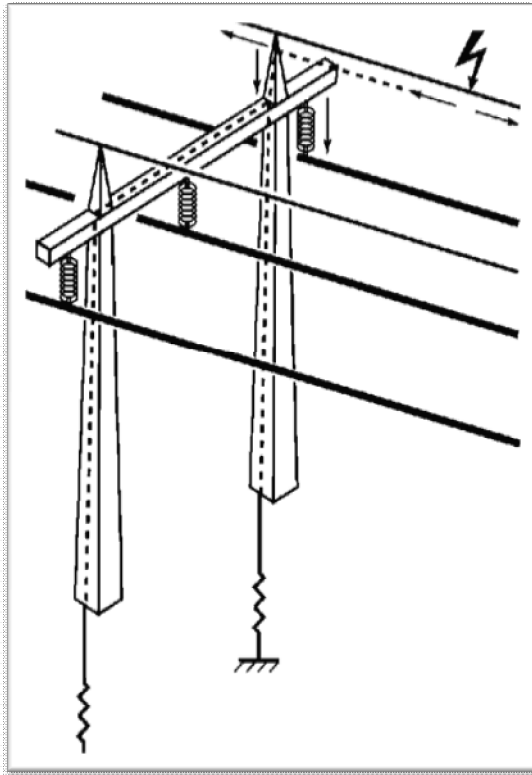
Le disjoncteur est un appareil dont la fonction est d'établir ou d'interrompre tout courant pouvant apparaître dans un circuit à vide, en charge, en surcharge ou en défaut, c'est-à-dire en court-circuit. Il peut donc être utilisé comme un gros interrupteur, commandé sur place par un bouton-poussoir ou télécommandé. De plus le disjoncteur ouvre un circuit automatiquement dès que le courant qui le traverse dépasse une valeur prédéterminé. Quand il sert à interrompre les forts courant de court-circuit, il joue le même rôle qu'un fusible, mais il est d'un fonctionnement plus sûr et on a pas besoin de le remplacé après chaque interruption.

Chapitre III :

Généralités sur les surtensions et sur le phénomène de couronne

III-1 Définition des surtensions :

Les surtensions sont toutes les tensions qui dépassent la tension maximale en régime permanent. Elle caractérise des phénomènes sous forme d'impulsion périodique ou apériodique.



III-2 Origines des surtensions :

On distingue une infinité de cas de surtension, et pour faciliter leur étude la CEI les a classifiés comme tel :

III-2-1 Surtension d'origine interne :

Elles résultent d'un changement de régime en un point d'un réseau. Parmi ces surtensions on trouve :

III-2-1-1 Surtension de manœuvre :

Les changements de configuration électrique du réseau se traduisent par des régimes transitoires complexes, pouvant comporter des surtensions plus ou moins élevées.

III-2-1-2 Surtensions lors d'un court-circuit monophasé :

Les réseaux de transport ou de distribution d'énergie sont constitués de lignes triphasées. Si le neutre du réseau est isolé lors de la mise à la terre accidentelle d'une phase du réseau, le potentiel entre les phases saines et la terre prend alors la valeur de la tension composée (phase-phase). Cependant, ce potentiel reste à la tension simple si le neutre est directement connecté à la terre.

Cette variation de la tension que subissent les phases saines d'un réseau dans le cas d'un défaut monophasé à la terre se produit par une surtension [5]. Sur le pont de court-circuit un arc intermittent se crée.

L'amorçage et l'extinction de cet arc produit une surtension dont l'amplitude peut atteindre $(3,2-3,5) U_{ph}$

III-2-1-3 Surtension de Ferro-résonance :

Ce type de surtension apparaît toujours dans des parties du réseau où existent simultanément de fortes capacités localisées et des inductances non linéaires.

III-2-2 Surtension d'origine externe :

Ces surtensions ont pour causes générales les décharges atmosphériques (coup de foudre). Cette dernière est un phénomène naturel.

Par beau temps, le champ électrique au niveau du sol est d'environ 100V/M en direction de la terre. Ce champ électrique est dû au fait que les hautes couches de l'atmosphère sont chargées positivement tandis que la terre est chargée négativement [12].

Par mauvais temps, le foudroiement est causé par un nuage orageux qui est scientifiquement appelé cumulo-nimbus.

III-3 Effet des surtensions :

III-3-1 Effets thermiques :

On distingue deux effets thermiques :

Effets thermiques liés à la charge Q : la foudre peut, par fusion des tôles, percer une toiture métallique lorsqu'elle frappe directement sur celle-ci ;

L'échauffement des conducteurs dû à l'effet joule peut se produire sur les conducteurs mal dimensionnés (faible section ou sur les mauvais conducteurs) [5]

III-3-2 Effets électrochimiques :

Il n'y a pas lieu de craindre que le courant de foudre produise des décompositions électrolytiques sur les conducteurs ou aux prises de terre. Par ailleurs, la décharge électrique de la foudre apporte une énergie suffisante pour que des réactions chimiques aient lieu à partir de l'oxygène de l'air [13]

III-3-3 Effets électrodynamiques :

Des effets électrodynamiques se produisent lorsque les conducteurs sont parcourus par un courant créé par la foudre

III-3-4 Effets électromagnétiques :

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence provoquant des perturbations radiophoniques [13].

III-4 Nature des surtensions dans les enroulements du transformateur :

La nature des phénomènes se produisant dans un transformateur pendant des surtensions, dépend de la forme de l'onde de surtension venant des lignes de transport.

On sait que les surtensions peuvent être d'origine externe (surtension atmosphérique) ou interne (perturbation sur le réseau) ; ce sont ici les coups de foudre directs ou indirects, qui sont dangereux pour les enroulements des transformateurs.

Un coup de foudre détermine sur le réseau l'onde de surtension à front raide qui se propage le long de la ligne et venir aux postes ; il en

résulte une répartition très inégale de la tension entre les différentes spires de l'enroulement lorsque l'onde aborde le transformateur ; les spires d'extrémités supportent une différence de potentiel très supérieure à celle qui est supportée par les spires extrêmes si le neutre est mis à la terre ; tout se passe comme si le bobinage se opposait au passage de l'onde. Il en résulte un risque de amorçage avec perforation d'isolant, court-circuit, etc.

III-5-Atténuation des surtensions transitoires dans les lignes de haute tension.

Sous l'influence de l'intense effet de couronne qui accompagne les surtensions atmosphériques lorsqu'elles se propagent le long des conducteurs des lignes aériennes de transport de l'énergie électrique, ces surtensions subissent une déformation en même temps qu'une atténuation de leur amplitude.

Ce phénomène de distorsion, qui se superpose à la distorsion par effet pelliculaire, est du à la dissipation d'énergie par injection de charges d'espace autour des conducteurs : ce processus a lieu dès que la tension instantanée dépasse la tension de seuil de l'effet couronne des conducteurs.

Ce problème est posé depuis un demi-siècle déjà, cependant les travaux ont été réalisés sans ordinateurs, sur des conducteurs de faibles rayons et de petites longueurs de propagation (3Km). Un nouvel appui adapté aux lignes d'aujourd'hui, ainsi qu'un affinement des moyens de simulation est devenu aujourd'hui nécessaire. L'effet couronne, responsable de pertes de puissance active et de perturbations radioélectrique, possède donc un effet bénéfique en ce sens qu'il réduit les surtensions transitoires qui apparaissent dans les réseaux de transport et se propage sur les lignes contraintes dans les postes de transformation par rapport auxquelles est dimensionné le matériel sont alors réduites par rapport aux valeurs que l'on calcule et que l'on utilise habituellement les conséquences pratique d'une telle étude sont donc une connaissance considérablement améliorée des contraintes électriques affectant les ouvrages et par suite une meilleure mise en œuvre des moyens de protection et de dimensionnement.

Pour étudier expérimentalement ce phénomène, une première idée consiste à injecter, dans une ligne réelle de transport, des chocs de tension d'amplitude suffisante à l'aide d'un générateur de choc, et à enregistrer la forme et l'amplitude de ces chocs lors de leur passage en divers points choisis le long de la ligne. C'est évidemment la méthode la plus réaliste, mais sa mise en œuvre est trop lourde. Une deuxième idée consiste à étudier des échantillons de lignes de longueur d'un laboratoire. Cette dernière a l'avantage d'utiliser plusieurs échantillons.

Ne possédant pas les moyens expérimentaux, nous allons utiliser les résultats des expériences de différents laboratoires et les adapter par le calcul mathématique aux différentes lignes et surtensions données. Nous avons comparé les surtensions le long de la ligne à différentes distances du point d'impact pour apprécier l'amortissement et la déformation des ondes de surtensions à travers la diminution de leurs amplitudes et changement de leur

raideurs, périodes. Nous avons considéré la surtension $1,2/50 \mu s$ simulant la surtension de foudre. Cet amortissement est étudié en fonction de l'amplitude de la surtension au point d'impact ainsi que de l'effet de la polarité [14].

Le principe de calcul consiste à appliquer la tension transitoire $u(t)$ à un conducteur, d'une quinzaine de mètres de longueur, et à mesurer la charge d'espace $q(t)$ injectée par effet de couronne dans son voisinage. Un oscillographe qui enregistre u et q respectivement sur les axes x et y fait apparaître des cycles charge-tension (q, u) en forme de boucle fermées.

Première interprétation : retard de propagation lorsque $u(t)$ est inférieure à la tension critique de l'effet couronne, la charge q est dite géométrique

$$q_g = C_g * u$$

Au dessus du seuil critique, apparaît une charge d'espace q_e . la charge mesurée sera la somme de la charge géométrique et de la charge

$$q = q_g + q_e$$

Le modèle de Gary, généralement utilisé dans ce domaine, donne la charge induite dans le conducteur

$$q_i = q_e \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Où R_1, R_2 et r_c sont respectivement les rayons du conducteur, du cylindre représentant la terre et de la couronne. On démontre expérimentalement que q_e est une fonction de r_c et celui-ci même une fonction de la tension u

$$q_e = C_e * u$$

C_e est une capacité variable par rapport à la tension u . La charge totale est calculée tel que :

$$q = C_d * u$$

Avec : $C_d = C_g + C_e$ une capacité dynamique variable par rapport à la tension et toujours supérieure à C_g .

La figure 1 montre que $C_d = \frac{dq}{du}$, représente la tangente en tout point (q, u) de la courbe représentative de $q(t)$.

La figure 2 montre la forme des ondes qui simulent les surtensions transitoires de foudres pleines. Les ondes de tension et de courant lié à ces surtensions se propageant sur les lignes sont déterminées de la solution des équations télégraphistes

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = -L \frac{d^2 i}{dx^2} \text{ et } \frac{d^2 i}{dx^2} = -C \frac{d^2 u}{dx^2}$$

Leur vitesse de propagation est

$$v = 1/\sqrt{LC}$$

L et C étant respectivement l'inductance et la capacité par unité de longueur de la ligne. Sans effet couronne la capacité C est à C_g . La vitesse est égale à celle de la lumière $c = 3.10^8$ m/S. Avec effet couronne la vitesse est calculée en utilisant la capacité dynamique

$$v = 1/\sqrt{LC_d}$$

C_d étant plus élevée que C la vitesse de propagation de la surtension le long d'une ligne avec effet couronne est plus petite que sans effet couronne

$$\Delta t = \Delta l (1/Y - 1/C)$$

Est le retard caractéristique de la distorsion .fig. 1 2 3

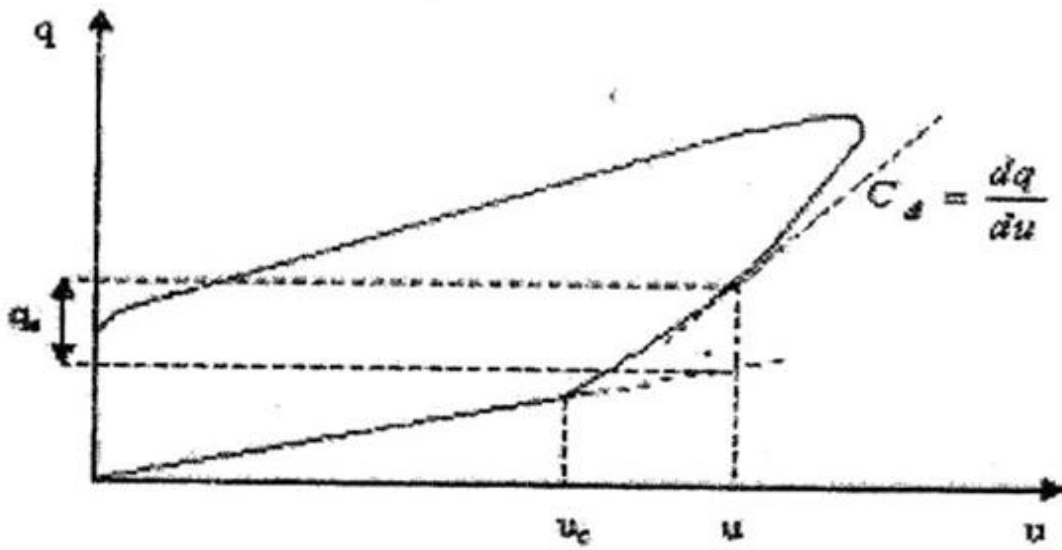


fig.1.cycle charge-tension

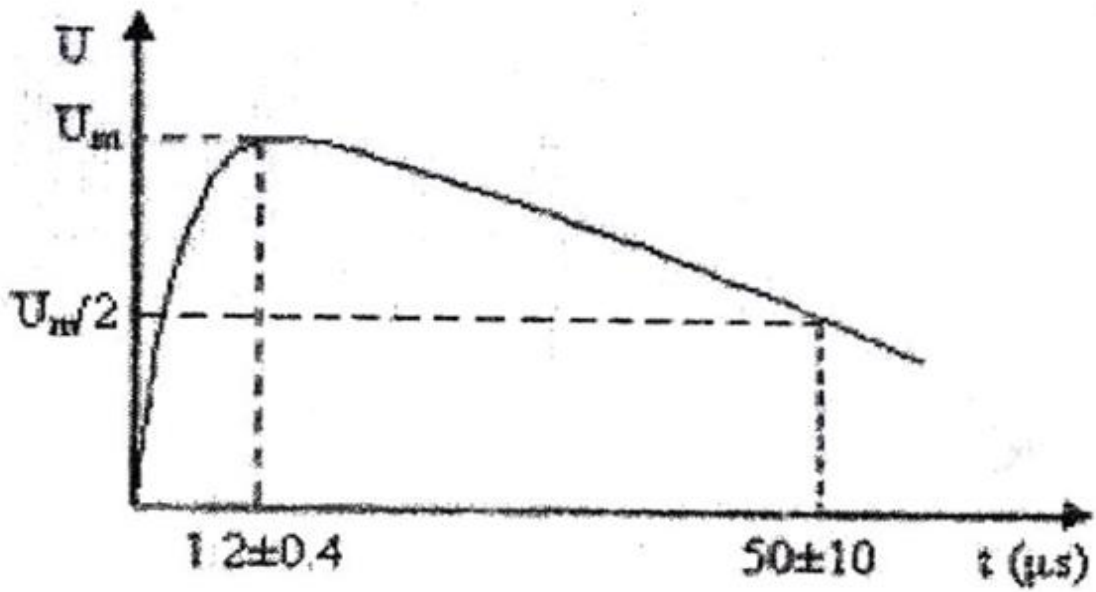


fig.2. onde de choc simulant la surtension de foudre

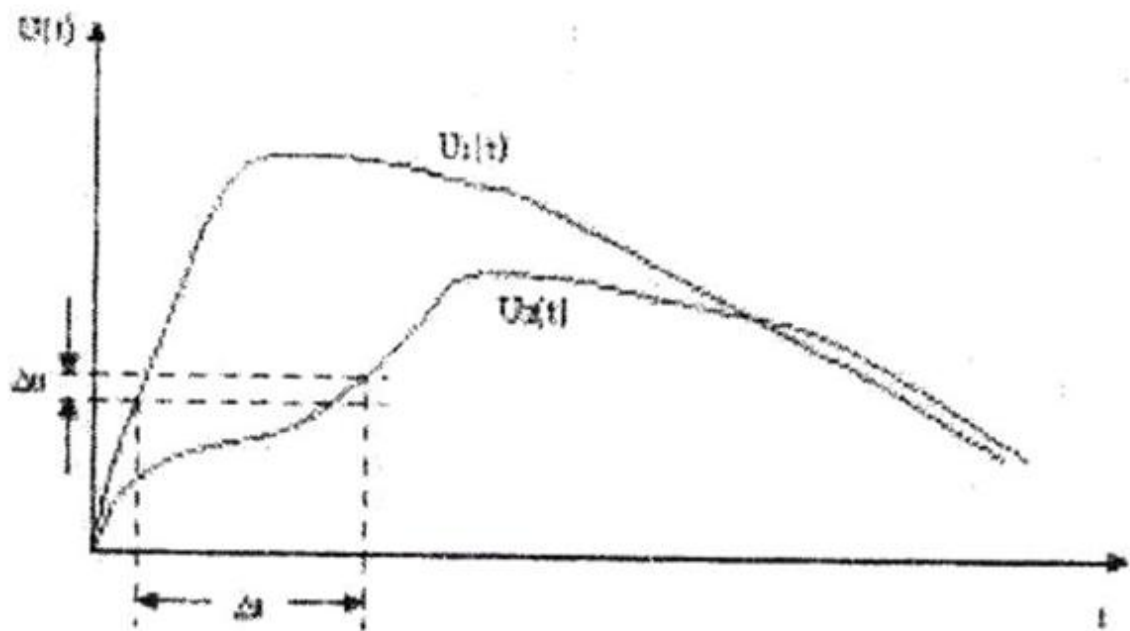


fig.3. distorsion et amortissement d'une onde de choc par le retard de propagation du front d'onde

L'effet couronne devient de plus en plus important avec l'augmentation de la capacité C_d et par suite fait diminuer la vitesse de propagation. La figure 3 montre les points de la surtension qui peuvent être considérés se propageant avec la même vitesse. Ce sont ceux qui appartiennent à un même tronçon de la ligne de longueur $^a l$ pour qui la méthode reste valable. $^a l$ est choisit en fonction de la vitesse de montée de l'onde de choc. Généralement elle est égale à 10m/ s.

Deuxième interprétation : perte d'énergie

L'énergie dissipée par les charges d'espace au cours d'un cycle de tension

$$W = \int u dq$$

En dépit de la dissipation d'énergie, l'impédance de la ligne est considérée constante.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{Cg}}$$

L'énergie dissipée le long du tronçon $^a l$

$$W = 1/z \int_0^{\alpha} [u_1^2(t) - u_2^2(t)] dt = w \Delta l$$

L'énergie dissipée le long d'un tronçon de longueur $^a l$ est égale au produit de l'énergie w dissipée par un cycle $q-u$ multipliée par la longueur du tronçon $^a l$, à condition que celui-ci soit suffisamment court pour considérer que le cycle $q-u$ utilise reste le même durant la propagation de l'onde de surtension le long de ce tronçon. Une discrétisation de la ligne par éléments $^a l$ suffisamment courts doit se faire pour que la modification de l'onde reste faible sur $^a l$. [14].

Les lignes sont le siège des pertes engendré principalement par le phénomène d'effet couronne.

III.6. L'effet couronne :

L'effet corona, aussi appelé « effet couronne » est une décharge électrique entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur. Elle se produit lorsque le potentiel électrique dépasse une valeur critique mais que les conditions ne permettent pas la formation d'un arc.

Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment fort, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge de corona. Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges de corona se produisent donc en général autour d'une électrode de rayon de courbure fort (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'une couche d'air ionisé, et une autre de rayon de courbure faible (une plaque métallique ou la terre).

Une des conséquences indésirable du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne. Ce phénomène se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs aériens, lorsque ceux-ci sont portés à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique dépasse le seuil d'apparition de l'effet de couronne.

Une décharge de corona peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de fort rayon de courbure. Si elle est positive, on parle de corona positif, sinon, de corona négatif. Du fait de la différence de masse entre les électrons et les ions, la physique de ces deux types de corona est radicalement différente.

Si la géométrie du conducteur et la valeur du champ sont telles que la région ionisée s'étend au lieu de se stabiliser, le courant peut finir par trouver un chemin jusqu'à l'électrode inverse, il se forme alors des étincelles ou un arc électrique.

Les décharges de corona, qu'elles soient positives ou négatives ont des

mécanismes en commun :

1. Un atome ou une molécule neutre du fluide environnant l'électrode est ionisée par un évènement extérieur (par exemple par interaction avec un photon), un ion positif et un électron sont créés.

2. Ces deux particules étant de charge inverses, elles subissent une force électrique égale en norme mais de sens opposé et les sépare, empêchant leur recombinaison et leur apportant une énergie cinétique importante.

3. Des ions ainsi créés sont attirés par la seconde électrode et permettent ainsi l'établissement d'un courant

La puissance dissipée est le produit de ce courant et de la tension entre les deux électrodes.

Applications des décharges de corona :

Les décharges de corona ont de nombreuses applications commerciales et industrielles.

- * Production d'ozone.
- * Filtrage des particules contenues dans l'air (système d'air conditionné).
- * Destruction de particules organiques contenues dans l'atmosphère : pesticide, solvant, O_3
- * Traitement de surface de certains polymères.
- * Photocopieur.
- * Laser à azote.
- * Séparation électrostatique de matières conductrices et non-conductrices.
- * Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud)
- * Coloration des véhicules.

Problèmes liés aux décharges de corona :

Les décharges de corona déforment les courbes de tensions (courant) et produisent des harmoniques, bruits audibles et des perturbations sur les fréquences radio, en particulier à proximité des lignes à haute tension. Elles représentent également une perte de puissance. Enfin, les réactions qu'elles provoquent dans l'atmosphère pourraient avoir un impact sur la santé. C'est pourquoi les installations de transmission électrique sont conçues pour minimiser la formation des décharges de corona.

Les décharges de corona sont particulièrement à éviter dans :

* Les installations de transmission électrique où elles provoquent une perte d'énergie, du bruit et de la distorsion des tensions et courants.

* La plupart des équipements électriques : transformateurs, machines électriques (aussi bien générateurs que moteurs), etc. où elles endommagent progressivement les isolants amenant à une détérioration prématurée des équipements.

* Toutes les situations nécessitant une tension importante mais où la production d'ozone doit être minimale.

Réduction de l'effet corona sur les lignes électriques :

La réduction de l'effet corona sur les lignes à haute tension par des mesures spécifiques n'est en général nécessaire que quand le niveau de tension de la ligne dépasse 245 kV. Au delà de la réduction des nuisances aux populations, le coût économique des pertes en ligne par effet Corona peut justifier à lui seul de prendre des mesures correctives. Ces mesures sont de 2 types :

* Utilisation de conducteurs de gros diamètre, pour limiter le champ électrique à la surface. Cette mesure est souvent inefficace, et rarement économiquement justifiée, car l'effet de peau rend souvent inefficace le choix de conducteurs de grosse section.

* Utilisation de faisceau de conducteurs (typiquement 2 conducteurs ou plus en 400 kV, 3 conducteurs ou plus en 500 kV).

Le choix du nombre de conducteurs d'une ligne électrique se fait donc en fonction du courant à transiter, des conditions climatiques, des effets de peau et corona, et bien-sûr des aspects économiques. Un critère simple permettant de limiter l'effet corona sur les lignes électriques consiste à s'assurer que le champ superficiel sur le conducteur ne dépasse pas une valeur de l'ordre de 17 kV/cm [15].

Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1915 avec les travaux effectués par F.W.PEEK [15], qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés [15].

L'effet de couronne est à l'origine d'interférences radiophoniques et télévisuelles, téléphonique de bruits audibles, de pertes électriques importantes et de vibrations mécaniques. Ces vibrations sont appelées "Vibrations Induites par Effet de Couronne" [15].

III.6.1. Phénomène couronne sur une ligne à courant alternatif :

Dans le cas de tension alternative les charges accomplissent le déplacement aller-retour après le changement de la polarité du conducteur, seulement une petite partie de ces charges sortent de la zone d'ionisation et elles approchent les conducteurs voisins.

Champ électrique sur la surface du conducteur lors de tension sinusoïdal, supposons que la ligne est connecté à la source à l'instant où la tension passe par sa valeur nulle.

III.6.2. Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs :

Champ électrique sur le pourtour d'un conducteur d'un faisceau :

Le champ théorique est donné de façon approchée par :

$$E = [1 - (n-1) (2r_1/R)] E_m \quad \text{v/m} \quad [1]$$

Où n est le nombre de conducteurs de faisceaux et E_m est la valeur moyenne de l'intensité du champ électrique sur le contour du conducteur, valant :

$$E_m = U / (n r_1 \ln \frac{D_e}{r_e}) \quad \text{v/m} \quad [1]$$

Dans cette formule U est la tension du faisceau contre terre, r_e le rayon équivalent couronne de l'ensemble des conducteurs du faisceau et D_e une distance équivalente par rapport au sol.

Le paramètre caractéristique le plus évident auquel on a coutume de rattacher l'intensité de l'effet couronne est le champ électrique à la surface du conducteur ou gradient superficiel. En raison de la grande sensibilité du phénomène couronne à la valeur de ce champ, il est nécessaire d'employer une méthode de calcul fournissant le champ avec une précision de l'ordre 1 %. De la façon la plus général, le champ superficiel se calcul par le théorème de Gauss

$$E = \frac{Q}{2\pi R \epsilon_0} \quad (1)$$

Avec E (v/cm) : champ superficiel.

Q (c/m) : charge superficiel

R (cm) : rayon du conducteur lisse équivalent.

ϵ_0 : la permittivité du vide (ou de l'air), en F/m

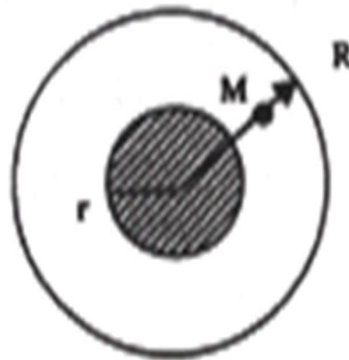
III.6.2.1. Champs électrique pour des systèmes usuels :

Pour des systèmes usuels simples, le champ électrique peut être calculé en utilisant le théorème de Gauss ou la méthode des images électrique pour certains [16].

a) Conducteurs cylindrique concentrique :

Pour $r_1 \leq x \leq r_2$:

$$E(x) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 x^2} \quad (1 - 2)$$



$$E_{max} = E(r) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1 - 3)$$

b) Ligne bifilaire :

On considère que la ligne est constituée de deux conducteurs cylindriques d'axes parallèles de même rayon (r) et isolé de tout Corp. Nous supposons que la charge se répartie uniformément à la surface de chacun des conducteur.

L'intensité du champ électrique E en un point quelconque x situé sur le plan des axes des deux conducteurs à pour expression :

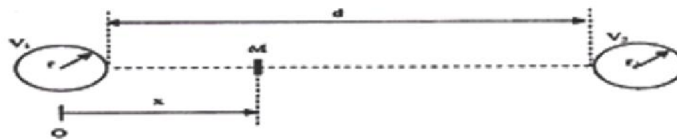
Notant V1-V2=U

$$E(x) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 x^2} * \frac{1}{2} + \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 x^2} \quad (1 - 4)$$

Champ maximum (x=r)

$$E(r) = E_{max} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r^2} * \frac{1}{2} + \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$E_{max} = \frac{3Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$



c) Système conducteur terre :

Système conducteur terre :

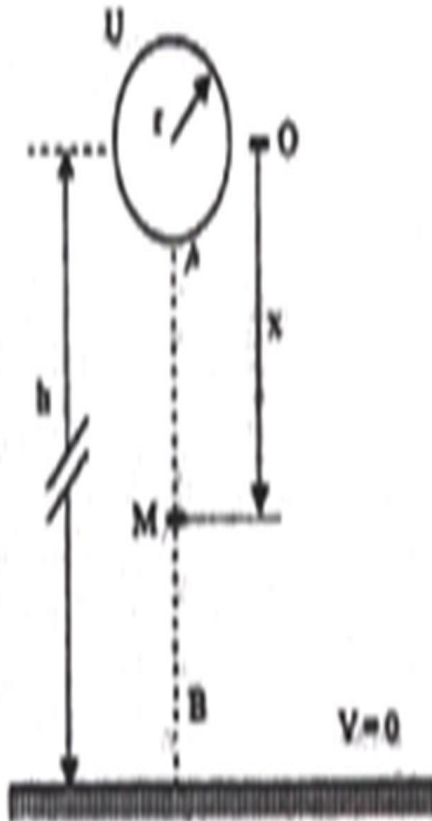
U : potentiel du conducteur par rapport au sol. On suppose que la charge électrique se répartie uniformément sur le conducteur.

L'intensité du champ électrique E en un point quelconque x situé sur le plan AB a pour expression :

$$E(x) = \frac{U}{x^2} \left(1 + \frac{r}{x} \right)$$

Cette relation peut être établie en utilisant la méthode des images électriques.
 Le champ maximum ($x=r$) dans ce cas :

$$E_{max} = E(r) = \frac{U}{r^2} \left(1 + \frac{r}{r} \right) = \frac{2U}{r}$$



III.6.3. Tension de disparition de l'effet couronne :

III.6.3.1 Champ électrique critique (formule de peek) :

L'effet couronne apparaît lorsque le gradient superficiel dépasse une certaine valeur dite valeur critique du champ ; cette valeur est liée non seulement à l'état du gaz avoisinant, mais aussi au rayon du conducteur.

Les lois de l'effet couronne ont été étudiées par divers auteurs, on utilise généralement la formule de peek qui est la plus connue. Elle a pour expression :

$$E_c = E_0 \left[1 + \frac{r}{\delta} \right] \text{ en KV/Cm} \quad (1-5)$$

Avec :

E_0 : valeur de crête du champ électrique aux conditions normales.

r : rayon du conducteur en Cm

δ : Densité de l'air

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

$$P_0 = 76 \text{CmHg} \quad t_0 = 25^\circ\text{C}$$

m_1 : coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (irrégularité géométrique du conducteur).

$m_1 = 1$: pour un conducteur idéal, parfaitement lisse.

$m_1 = 0.9$: pour un conducteur normal.

$m_1 = 0.8$: pour un conducteur présentant des arrêtes vives.

m_2 : coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs.

$m_2 = 0.9$: pour un conducteur de propreté technique.

$m_2 = 0.3$: pour un conducteur fortement pollué.

Souvent le produit $m_1 m_2$ est remplacé par un seul coefficient m [16].

III.6.3.2 Tension de seuil de l'effet couronne :

Il est plus intéressant de connaître U_c (tension d'apparition de l'effet couronne) que E_c (champ critique de l'apparition de l'effet couronne) ainsi on aura :

$$U_c = E_0 \cdot m_1 m_2 \left[1 + \frac{1}{m_1 m_2} \right] \cdot r \ln \frac{D}{r}$$

Chapitre IV :

Les paramètres de la ligne et du transformateur et leurs modélisations

Les lignes électriques aériennes sont le siège de l'effet couronne à partir d'un certain niveau de tension 245KV.

Dans le but de mettre en évidence ce phénomène, nous avons étudié par voie de la modélisation mathématique en premier lieu une ligne et un transformateur, puis deux lignes en parallèles sans tenir compte de l'effet couronne d'une part, et d'autre une ligne et un transformateur avec l'effet couronne.

IV-1-Modélisation de la ligne et du transformateur sans effet couronne :

IV-1-2- Modélisation d'une ligne et d'un transformateur sans tenir compte de l'effet couronne (deux conducteurs) :

Nous utilisons le schéma équivalent de la ligne et du transformateur de tension nominale 330KV, avec deux conducteurs par phase représenté sur la figure (1).

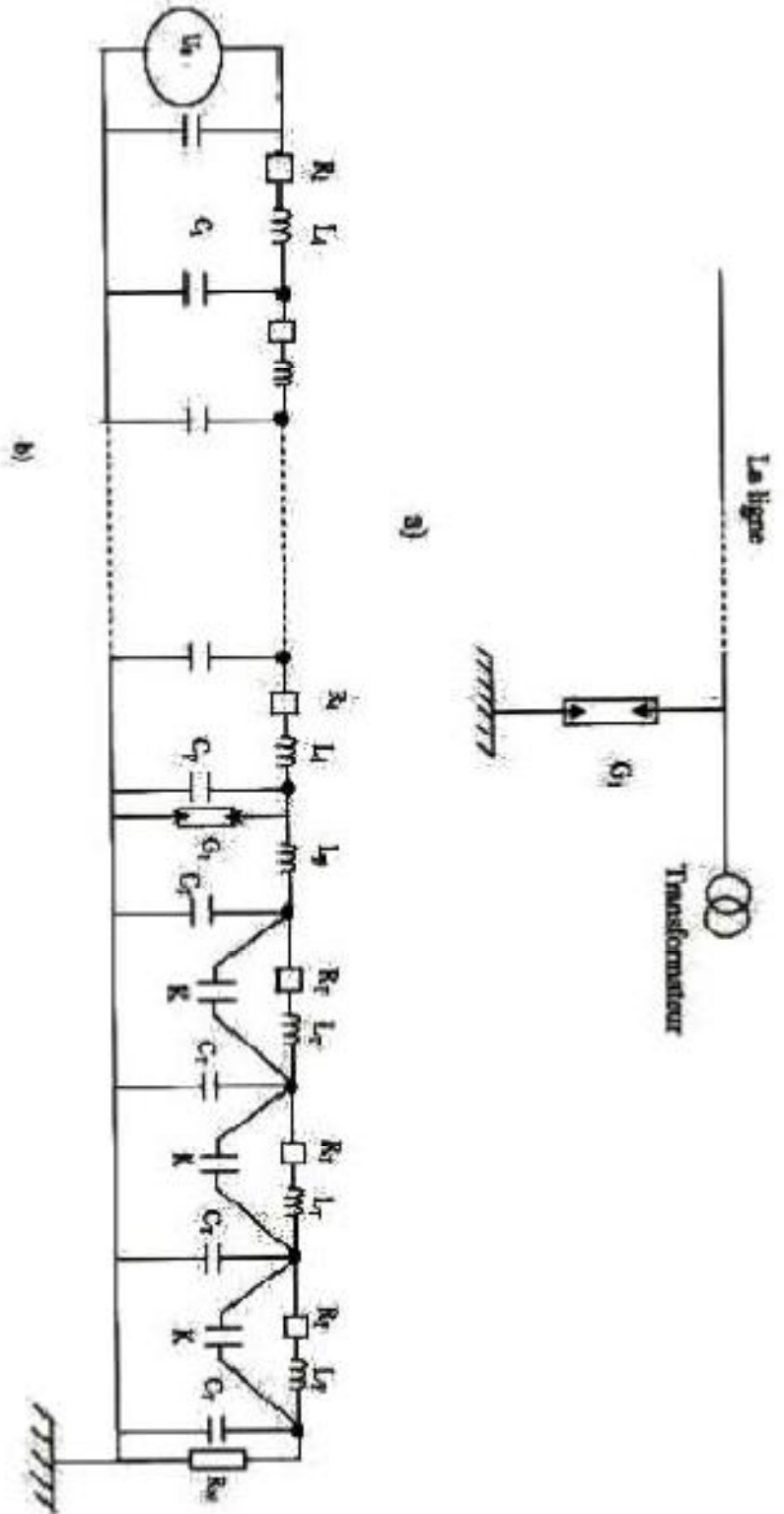


Fig. 1. le schéma réel et équivalent de la ligne et du transformateur.

IV-1-2-1 Définition des paramètres :

Sur le schéma équivalent de la figure (1), nous avons :

- R_i : résistance d'un élément de la ligne [Ω]
- L_i : l'inductance d'un élément de la ligne [H] ;
- C_i : capacité d'un élément de la ligne [F] ;

g_l : conductibilité d'un élément de la ligne [Ω^{-1}].

R_t : résistance du transformateur [Ω]

L_i : inductance propre [H]

M_{ij} : mutuelle entre les éléments [μH]

C : la capacité transversale [F]

K : la capacité longitudinale [F]

C_{poste} : la capacité du poste [pf]

C_p : capacité du parafoudre [PF]

LP : inductance du parafoudre [μF]

IV-1-2-2-Détermination des paramètres de la ligne :

- Caractéristique de la ligne :

Résistance kilométrique : $R_0=0,12$ [Ω / Km]

Réactance kilométrique : $X_0=33,1$ [$\Omega / 100 Km$]

Puissance réactive : $Q_0=40,6$ [MVAR/100Km]

Nombre de conducteurs par phase : $n=2$

Distance moyenne entre phase : $D_m=11$ [m]

Conductibilité réactive kilométrique: $B_0=3,38 \cdot 10^{-4}$ [$1/\Omega \cdot 100 Km$]

Fréquence : $f=50$ [Hz]

- Détermination de la résistance de la ligne

$$R_{\text{total}} = R_0 \cdot l \quad [\Omega]$$

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

R_{total} : La résistance totale de la ligne.

l : longueur de la ligne en [Km]

S : section du conducteur en [mm^2]

ρ : résistivité en [$\Omega \cdot mm^2 / Km$]

Pour les conducteurs sectionnés :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{n \cdot S}$$

n : Le nombre de section d'un conducteur et qui est égale à 2

$$R_{\text{total}} = \frac{\rho \cdot l}{n \cdot S} \cdot 100$$

$R_{\text{total}} = 6$ [Ω] La résistance d'un élément de la ligne est donnée par la relation suivante:

$$R_{\text{total}} = \frac{\rho \cdot l}{n \cdot S}$$

n : le nombre d'élément qui est égale à 10.

$$R_{\text{total}} = \frac{\rho \cdot l}{10 \cdot S} = 0.6$$
 [Ω]

$$R_{\text{total}} = 0.6$$
 [Ω]

Détermination de l'Inductance

Pour calculer l'inductance de la ligne il faut d'abord connaître sa réactance

$$X_0 = 0.339 \log \left[\frac{D_m}{r_c} \right]$$

$$X_0 = 0,144 \log \frac{D_m}{r_c} + 0.016$$

$$D_m = \sqrt[3]{1.222 \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}$$

r_c : rayon d'un seul conducteur

r_{eq} : rayon équivalent des conducteurs sectionnés

D_m : distance moyenne entre phase

a_n : distance moyenne entre conducteurs de phase

La réactance totale de la ligne est :

$$X_{02} = X_0 \cdot n \quad [\hat{\Omega}]$$

Pour les conducteurs sectionnés :

$$X_0 = 0,144 \log \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0,016}{n}$$

$$r_{eq} = (a_n^{n-1} \cdot r_c)^{1/2}$$

$$a_n = (a_1 \cdot a_2 \cdot a_3)^{1/2}$$

n : Le nombre de section dans un conducteur et égale à 2

$$X_{02} = 0.339 \cdot 100$$

$$X_{02} = 33.9 \quad [\hat{\Omega}]$$

La réactance d'un élément est:

$$X_{01} = \frac{X_{02}}{n}$$

n : le nombre d'élément de la ligne qui est égale à 10

$$X_{01} = \frac{33.9}{10} = 3.39 \quad [\hat{\Omega}]$$

Pour calculer l'inductance d'un élément on utilise la loi suivante :

$$L_0 = \frac{X_{01}}{\omega} \quad L_0 = \frac{3.39}{\omega}$$

Avec: $\omega = 2\pi f$ la Pulsation propre et $f = 50$ [Hz].

$$L_0 = \frac{3.39}{2\pi \cdot 50}$$

$$L_0 = 10796.17 \quad [\mu H]$$

-Détermination de la Capacité de la ligne:

$$X_c = 3.3 \cdot 10^6 \cdot \omega \quad [\hat{\Omega}]$$

X_c : La conductibilité réactive de la ligne

$$X_c = 7,58 \cdot \frac{10^6}{\omega}$$

Pour un conducteur sectionné on a la formule suivante :

$$X_c = 7,58 \cdot \frac{10^6}{\omega}$$

La conductibilité réactive de la ligne :

$$X_{c2} = X_c \cdot n$$

$$X_{c2} = 3,3 \cdot 10^6 \cdot 100$$

$$X_{c2} = 3.38 \cdot 10^8 \quad [\hat{\Omega}]$$

La conductibilité réactive pour un élément est donnée par la loi suivante :

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega}}{X_{\Omega}}$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega} \cdot X_{\Omega}}{X_{\Omega}} = 3,3 \cdot 10^{\Omega} \Omega^{\Omega}$$

$$X_{\Omega} = X_{\Omega} \cdot X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega}}{X_{\Omega}}$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega} \cdot X_{\Omega}}{X_{\Omega}}$$

$$X_{\Omega} = 0,105095541 \text{ F}$$

IV-1-2-3-Les Paramètres du Transformateur:

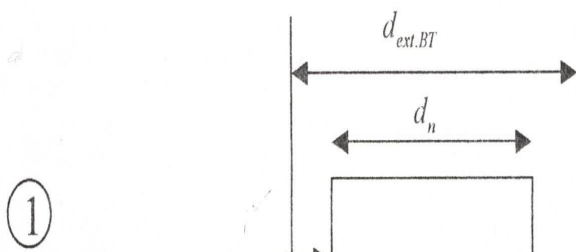
-Caractéristiques du transformateur triphasé :

- TD : 125000/330
- Puissance nominale apparente : $S_n=125$ [MVA].
- Tension du coté haute tension : $HT=347$ [K V].
- Tension du coté basse tension : $BT=10,$ [KV].
- Perte de puissance à vide : $p_0=125$ [KW]
- Tension de court-circuit : $cc=11\%$
- Perte de puissance en court-circuit : $\Delta P_{cc} \approx 380$ [KW]
- Courant à vide : $I_0=0,55 \%$.

Fréquence de service de transformateur : $f= 50$ [Hz].

-Caractéristiques géométrique:

- Diamètre extérieur de l'enroulement haut tension : $d_{Hext} = 1890$ [mm]
- Diamètre intérieur de l'enroulement haut tension : $d_{Hint} = 1350$ [mm].
- Diamètre extérieur de l'enroulement basse tension : $d_{bext} = 1150$ [mm].
- Diamètre intérieur de l'enroulement basse tension : $d_{bint} = 930$ [mm].
- Longueur de l'enroulement : $l_{en} = 2040$ [mm]
- $d_n=900$ [mm].



-Détermination de la résistance :

Transformateur de forme bi-exponentielle Lors de l'application d'une onde sur les enroulements du, la résistance sera calculée par la formule (5.1) [12].

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} \cdot \frac{1}{k} \quad (1) \quad [17]$$

Avec :

$$k = \frac{U_a}{\sqrt{U_a^2 + U_r^2}} \quad (2)$$

Tel que : $U_r = 50$ [V] Est la longueur d'onde

$$k = \frac{U_a}{\sqrt{U_a^2 + 50^2}} = 8.4398 \text{ le facteur de précision de la résistance.}$$

Et R_0 : la résistance de l'enroulement HT correspond à une fréquence de 50Hz.

$$R_0 = \frac{\Delta U}{I} \quad (3) \quad [17]$$

$$R_0 = \frac{U_a - U_r}{I_a} = \frac{22.35 - 50}{2.6484} = 2.6484 \text{ [} \hat{\Omega} \text{]}$$

$$R_0 = 2.6484 \text{ [} \hat{\Omega} \text{]}$$

$$R_a = 2.6484 \cdot 8.4398 = 22.35 \text{ [} \hat{\Omega} \text{]}$$

La résistance d'un élément de transformateur est donnée par la loi suivante :

$$L_{cc} = \frac{L_{cc}}{n} \quad (4)$$

n : nombre de élément qui égale à 10

$$L_{cc} = \frac{22.22}{10} = 2.235 \quad [\hat{o}]$$

-Détermination de l'Inductance propre :

Pour déterminer l'inductance propre, il est nécessaire de calculer la valeur de l'inductance de l'enroulement L_{cc} en court-circuit qui est donnée par la formule suivante :

$$L_{cc} = \frac{L_{cc}}{n} * \frac{L_{cc}}{L_{cc}} \quad (5) \quad [18]$$

$$L_{cc} = \frac{L_{cc}}{L_{cc}}$$

$$L_{cc} = 0.3051 \quad [\hat{o}]$$

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

$$L_{cc} = L_{cc} * L_{cc} \quad (6) \quad [18]$$

Avec L_{cc} : est le facteur de précision pour l'inductance L , qui tient compte de la forme d'onde appliquée à l'enroulement, en générale

$$L_{cc} = 0.65$$

$$L_{cc} = 0.65 * 0.3051 = 0.1983 \quad [H]$$

L_{cc} : inductance totale d'un élément, elle est calculé comme suit :

$$L_{cc} = \frac{L_{cc}}{n} \quad (7)$$

$$L_{cc} = \frac{L_{cc}}{n}$$

$L_{cc} = 0.01983 \quad [H]$ L'inductance L_i d'un élément de l'enroulement se calcul selon la loi suivante :

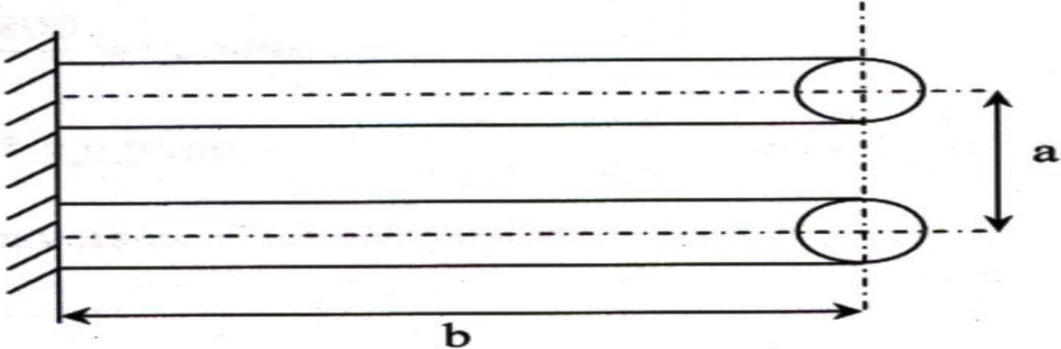
$$L_{cc} = L_i + \sum L_{cc} \quad (8)$$

$$L_{cc} = L_i * (1 + \frac{\sum L_{cc}}{L_{cc}}) \quad (9)$$

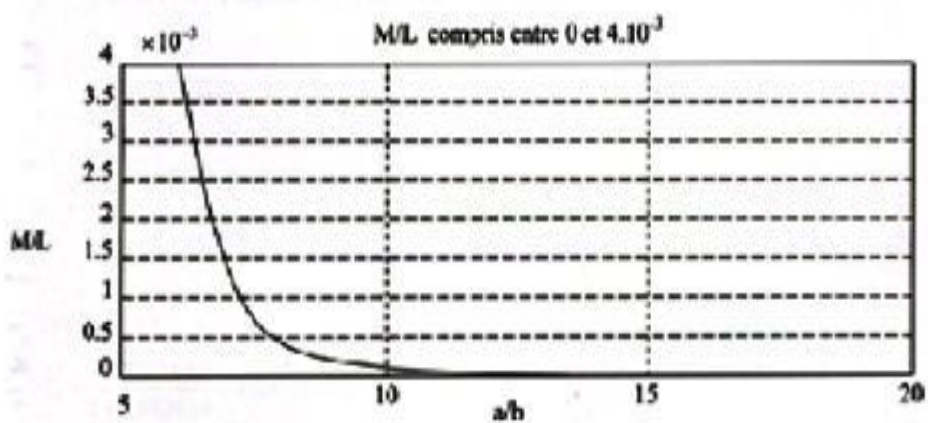
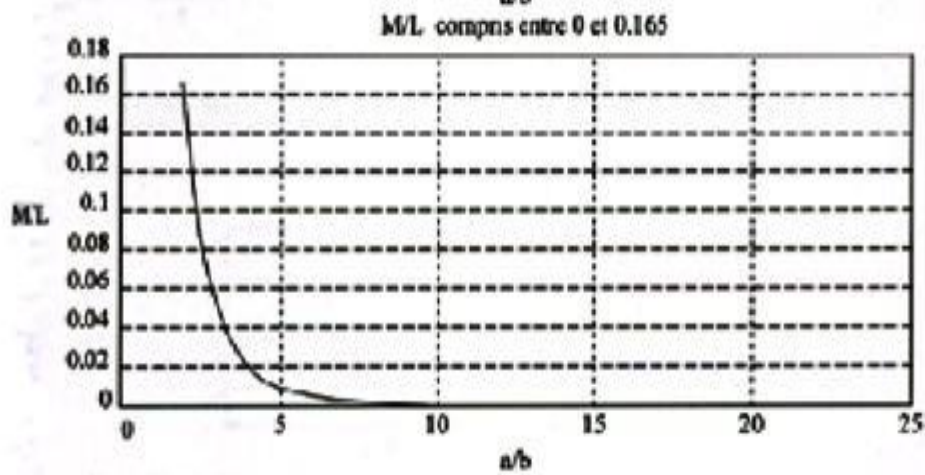
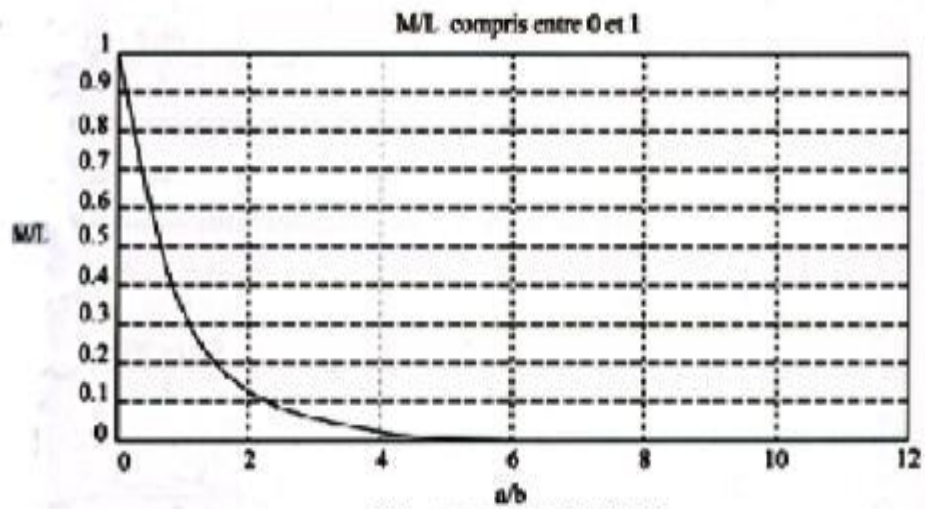
$$L_i = \frac{L_{cc}}{\frac{\sum L_{cc}}{L_{cc}}} \quad (10)$$

Cela revient à calculer les valeurs des coefficients de mutualités $\frac{L_{cc}}{L_{cc}}$ qui sont donnés par dépendance.

$$\frac{L_{cc}}{L_{cc}} = f\left(\frac{L_{cc}}{L_{cc}}\right) \quad [18]$$



Disposition schématique des spires



Représentation de la fonction $f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{M}{L}$

$$a = \frac{2000}{10} = 204 \text{ [mm]} \quad (12)$$

a est la distance entre les élément d'un enroulement

$$b = r_{HT} - r_{BT} \quad (13)$$

b est la distance entre les l'enroulement HT et l'enroulement BT

$$L_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000}{2000} \quad (14)$$

$$L_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000}{2000} = 810 \text{ [mm].}$$

$$L_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000}{2000} \quad (15)$$

$$L_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000}{2000} = 520 \text{ [mm].}$$

Disposition schématique des spires :

N=°	a(mm)	b(mm)	$\frac{a}{b}$	$\frac{a^2}{b^2}$	$\frac{a^3}{b^3}$
1	204	290	0.7034	0.51	5231.91
2	408	290	1.4068	0.19	1949.14
3	612	290	2.1103	0.11	1128.45
4	816	290	2.8137	0.062	636.03
1	1020	290	3.5172	0.041	420.60
2	1224	290	4.2206	0.018	184.65
7	1428	290	4.9241	0.0012	12.31
8	1632	290	5.6275	0.0008	8.206
9	1836	290	6.3310	0.00035	3.59

$$\frac{1}{0.933}$$

D où

$$L_i = \frac{2000 \times 2000}{2000 \times 2000} = 10258.665 \text{ [H].}$$

L_{12} : L'inductance placée entre le transformateur et le parafoudre (d'une distance de 120m), elle est égale :

$$L_p = 1.33 \text{ [H/m].}$$

$$L_p = 1.33 \times 120 = 160 \text{ [H].}$$

$$L_{12} = 160 \text{ [H].}$$

-Détermination des capacités transversales :

La capacité totale C_{12} entre l'enroulement HT et BT est donnée par :

$$C_{12} = C_{12} \cdot l \cdot \frac{2000 \times 2000 \times 2000}{2000 \times 2000} \quad [19]$$

$$C_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000}{2000}$$

$$C_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000}{2000} = 1620 \text{ [mm].}$$

$$C_{12} = \frac{2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000 \times 2000}{2000}$$

IV-1-3-Modélisation d'une ligne sans effet couronne (un conducteur):

Nous utilisons le schéma équivalent de la ligne et du transformateur de tension nominale 330KV, avec un conducteur par phase représenté sur la figure (1).

IV-1-3-1-Définition des paramètres :

R_l : résistance de la ligne [$\hat{\Omega}$]

C_L : capacité de la ligne [F].

L_l : inductance de la ligne [μH]

IV-1-3-2-Détermination des paramètres de la ligne :

Détermination de la résistance

$$R_0 = 0.12 [\hat{\Omega} / \text{Km}]$$

$$R_{lt} = R_0 \cdot l$$

$$R_{lt} = 0.12 \cdot 100 = 12 [\hat{\Omega}]$$

$$R_l = \frac{R_{lt}}{l} = \frac{12}{10} = 1.2 [\hat{\Omega}]$$

Détermination de l'inductance :

Pour calculer l'inductance de la ligne il faut d'abord connaître sa réactance

$$X_0 = 0.456 \log \left[\frac{D_m}{r_{eq}} \right]$$

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

$$D_m = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}$$

r_c : rayon d'un seul conducteur

r_{eq} : rayon équivalent des conducteurs sectionnés

D_m : distance moyenne entre phase

a_n : distance moyenne entre conducteurs de phase

La réactance totale de la ligne est :

$$X_{lt} = X_0 \cdot l [\hat{\Omega}]$$

Pour les conducteurs sectionnés :

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

$$r_{eq} = (a_n^{n-1} \cdot r_c)^{1/2}$$

$$a_n = (a_1 \cdot a_2 \cdot a_3)^{1/2}$$

n : Le nombre de section dans un conducteur et égale à 2

$$X_0 = 0.456 \cdot 100$$

$$X_0 = 45.6 [\hat{\Omega}]$$

La réactance d'un élément est:

$$X_l = \frac{X_{lt}}{n}$$

n_l : le nombre d'élément de la ligne qui est égale à 10

$$X_l = \frac{45.6}{10} = 4.56 [\hat{\Omega}]$$

Pour calculer l'inductance d'un élément on utilise la loi suivante :

$$X_L = 2\pi f L \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Avec: $\omega = 2\pi f$ la Pulsation propre et $f=50\text{Hz}$.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_C = 14522 \text{ [}\Omega\text{]}$$

Détermination de la capacité :

$$X_C = 2.48.10^4 \text{ [}\Omega\text{]}$$

X_C : La conductibilité réactive de la ligne

$$X_C = 7,58. \frac{10^4}{10^4}$$

Pour un conducteur sectionné on a la formule suivante :

$$X_C = 7,58. \frac{10^4}{10^4}$$

La conductibilité réactive de la ligne :

$$X_{C_{\text{total}}} = X_C$$

$$X_{C_{\text{total}}} = 2.48. 10^4 * 100$$

$$X_{C_{\text{total}}} = 2.48 10^6 \text{ [}\Omega\text{]}$$

La conductibilité réactive pour un élément est donnée par la loi suivante :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = 2.48. 10^6 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_C = 2\pi f L \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$C = 0,07898 \text{ [F]}$$

Détermination de capacité C11:

$$C_{11} = C_L/2 + C_P/2 + C_{\text{post}}$$

$$C_{11} = \frac{0,07898}{2} + \frac{0,07898}{2} + 0.001 = 0.0409898 \text{ [F]}$$

IV-1-4-Modélisation de la ligne avec effet couronne :

Lors du couronnement des conducteurs des lignes, certaines capacités et conductibilités sont additionnées sur les capacités et les conductibilités géométriques de la ligne.

Nous utilisons le schéma équivalent de la ligne et du transformateur de tension nominale 330KV, avec un conducteur par phase représenté sur la figure 2.

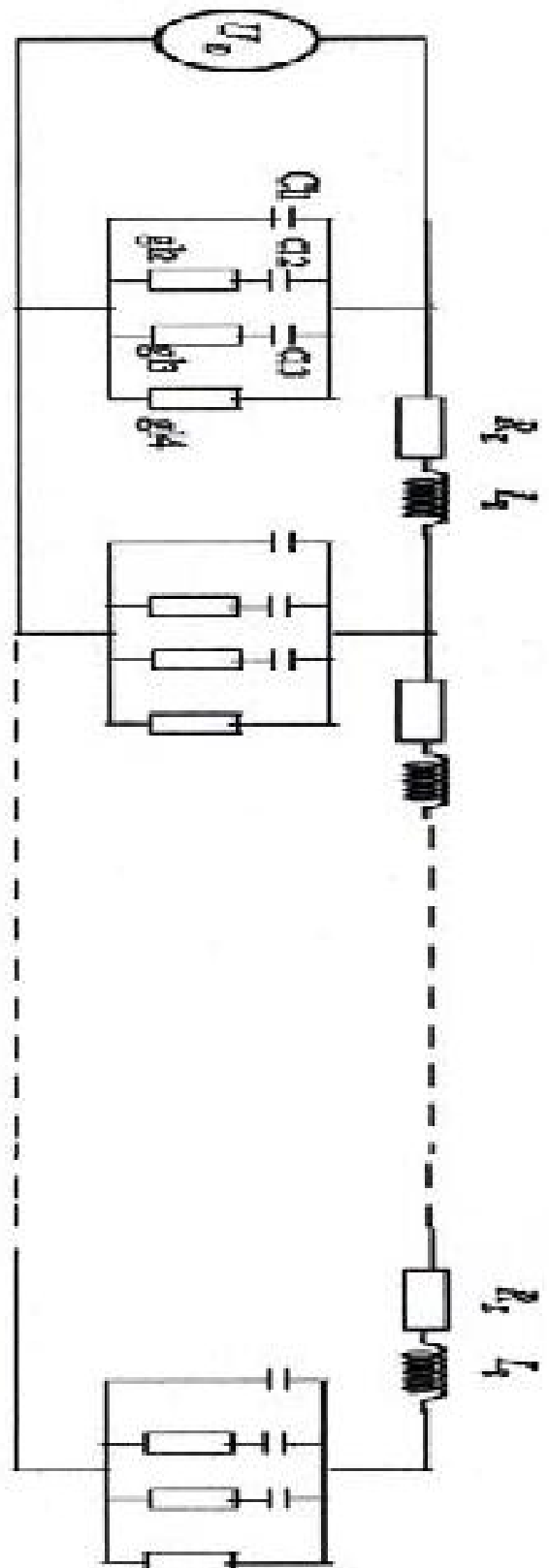


Fig. 2. schéma équivalent de la ligne avec effet couronne de fréquence $f=1000\text{Hz}$.

IV-1-4-1- Définition des paramètres .

Sur le schéma équivalent de la figure :

C_{11} , C_{12} et C_{13} sont respectivement les capacités de la chaîne 1,2 et 3 du modèle.

g_{12} , g_{13} et g_{14} sont respectivement les conductibilités actives des chaînes 2,3 et 4.

IV-1-4-2-Calcul des paramètres de la ligne :

Caractéristiques du modèle d'effet couronne :

$C_{10}=173.7$ [pF/Km] : capacité kilométrique

$C_{20}=621.5$ [pF/Km] : capacité kilométrique

$C_{30}=394.5$ [pF/Km] : capacité kilométrique

$R_{20}=1.1$ [Mô .Km] : résistance kilométrique

$R_{30}=0.9$ [Mô .Km] : résistance kilométrique

$R_{40}=3.030303030$ [Mô .Km] : résistance kilométrique

$g_{20}=0.9090909$ [1/Mô .Km] : conductibilité active kilométrique de la chaîne 2.

$g_{30}=1.111111$ [1/Mô .Km] : conductibilité active Kilométrique de la chaîne 3.

$g_{40}=3.03030303$ [1/Mô .KM] : conductibilité active kilométrique de la chaîne 4.

Calcul des capacités :

La capacité de la ligne est donnée par la relation suivante :

$$C=C_0^*$$

C : capacité totale du modèle de la couronne.

Pour la longueur de la ligne $l=100\text{Km}$.

$$C_1=C_{10}^*$$

$$C_1=173.7*100=17370 \text{ [pF]}.$$

$$C_2=C_{20}^*$$

$$C_2=621.5*100=62150 \text{ [pF]}.$$

$$C_3=C_{30}^*$$

$$C_3=394.5*100=39450 \text{ [pF]}.$$

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

$$C_1 = 17370/10 = 1737 \text{ pF} = 0.001737 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_2 = 62150/10 = 6215 \text{ pF} = 0.006215 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_3 = 39450/10 = 3945 \text{ pF} = 0.003945 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

Calcul des conductibilités actives:

La conductibilité active de la ligne est donnée par la relation suivante :

$$g = g_0^*$$

g : conductibilité active de la ligne.

Pour une longueur donnée de la ligne $l=100\text{Km}$.

$$g_2 = g_{20}^*$$

$$g_2 = 0.9090909 * 100 = 90.90909 \quad [1/M\hat{o}].$$

$$g_3 = g_{30}^*$$

$$g_3 = 1.111111 * 100 = 111.1111 \quad [1/M\hat{o}].$$

$$g_4 = g_{40}^*$$

$$g_4 = 3.030303 * 100 = 303.030303 \quad [1/M\hat{o}].$$

On divise la ligne par 10 éléments, donc pour un élément de la ligne qui est équivalent à $a^a = 10\text{Km}$.

$$g_2 = 90.90909 / 10 = 9.090909 \quad [1/M\hat{o}].$$

$$g_3 = 111.1111 / 10 = 11.11111 \quad [1/M\hat{o}].$$

$$g_4 = 303.030303 / 10 = 30.3030303 \quad [1/M.\hat{o}].$$

Chapitre V : Simulation et analyse des résultats

V-1 Introduction :

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

- Les ondes de surtensions ayant les différents paramètres (amplitude, raideur, longueur) se propagent le long des lignes.
- Lors de 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.

Ceci est possible par l'utilisation de logiciels spécialisés qui simulent le comportement de la ligne et du transformateur. Dans ce présent travail, on utilise le P-spice.

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

v-2 simulation des schémas équivalents :

Nous considérons un poste unidirectionnelle de tension nominale de 330KV et une ligne de 100Km où le phénomène de couronne peut avoir lieu. Pour la simulation la ligne et le transformateur sont divisés en dix éléments. Un élément de la ligne est équivalent à 10Km.

Afin de considérer et évaluer l'effet couronne on simule :

- La ligne sans effet couronne (un seul conducteur par phase, avec existence et absence du parafoudre).
- La ligne sans effet couronne (deux conducteurs par phase, avec existence et absence du parafoudre).
- La ligne avec effet couronne (avec existence et absence parafoudre).

Pour ce but on utilise le schéma équivalent reproduisant l'effet couronne proposé par l'université polytechnique de Saint-Pétersbourg. Comme surtension nous choisissons la surtension impulsionnelle (1,2/50 s) avec l'amplitude 725KV (c'est la surtension maximale qu'on peut avoir sur la ligne de tension nominale 330Kv).

Les résultats de calculs sont représentés dans les tableaux 1-2 et sur les figures 1-6.

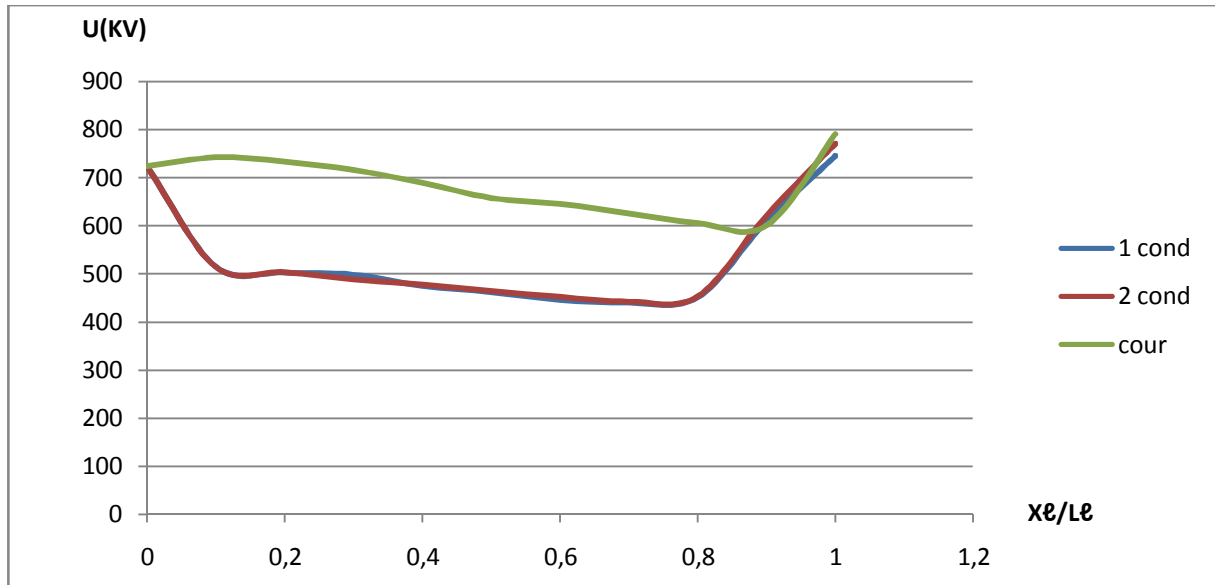


Fig.1.surtension dans la ligne (le parafoudre ne fonctionne pas).

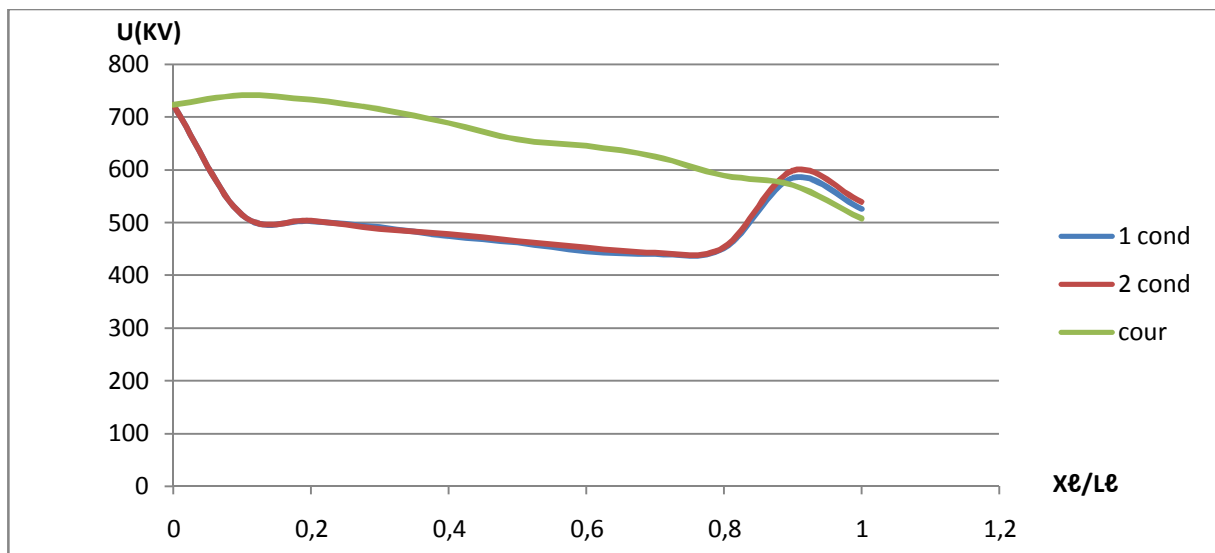


Fig.2.surtension dans la ligne (le parafoudre fonctionne).

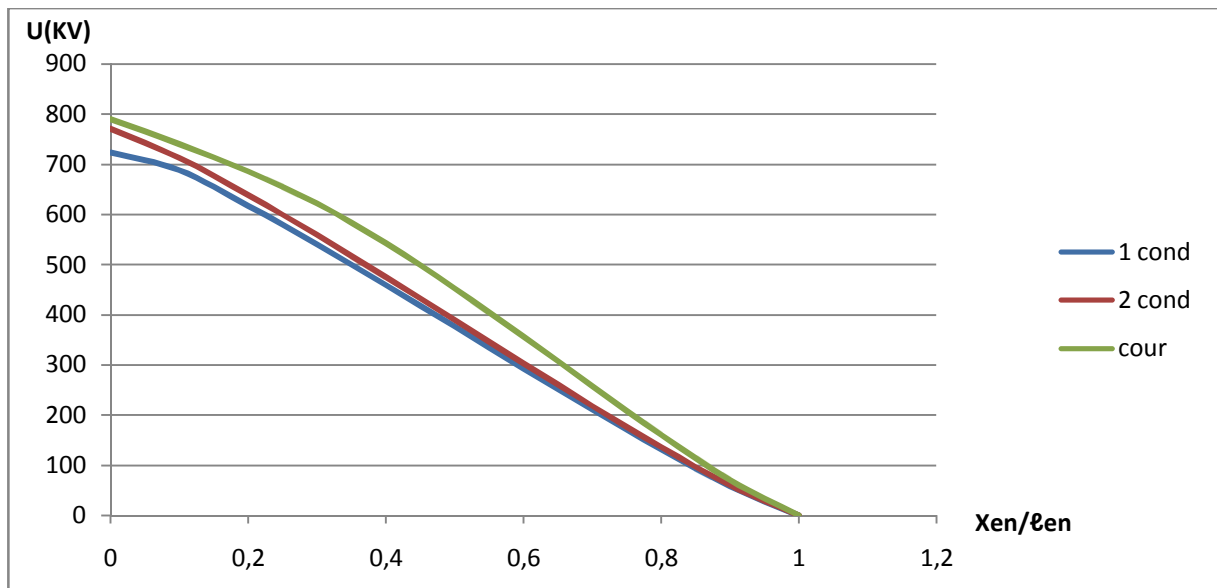


Fig.3.surtension dans le enroulement du transformateur (le parafoudre ne fonctionne pas).

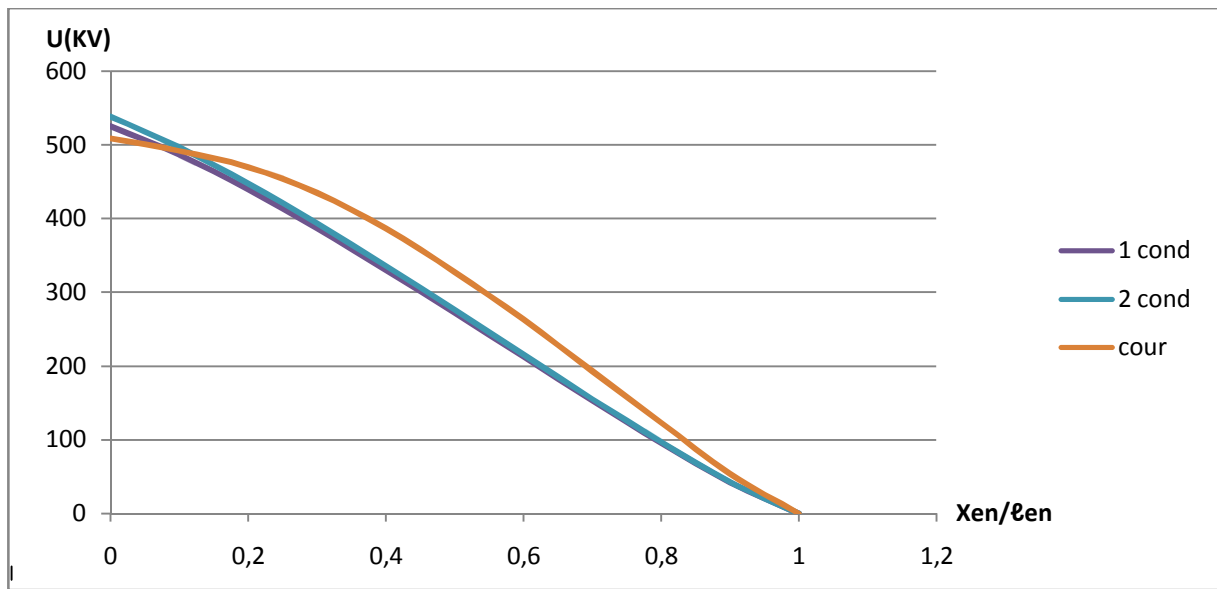


Fig.4.surtension dans le enroulement du transformateur(le parafoudre fonctionne).

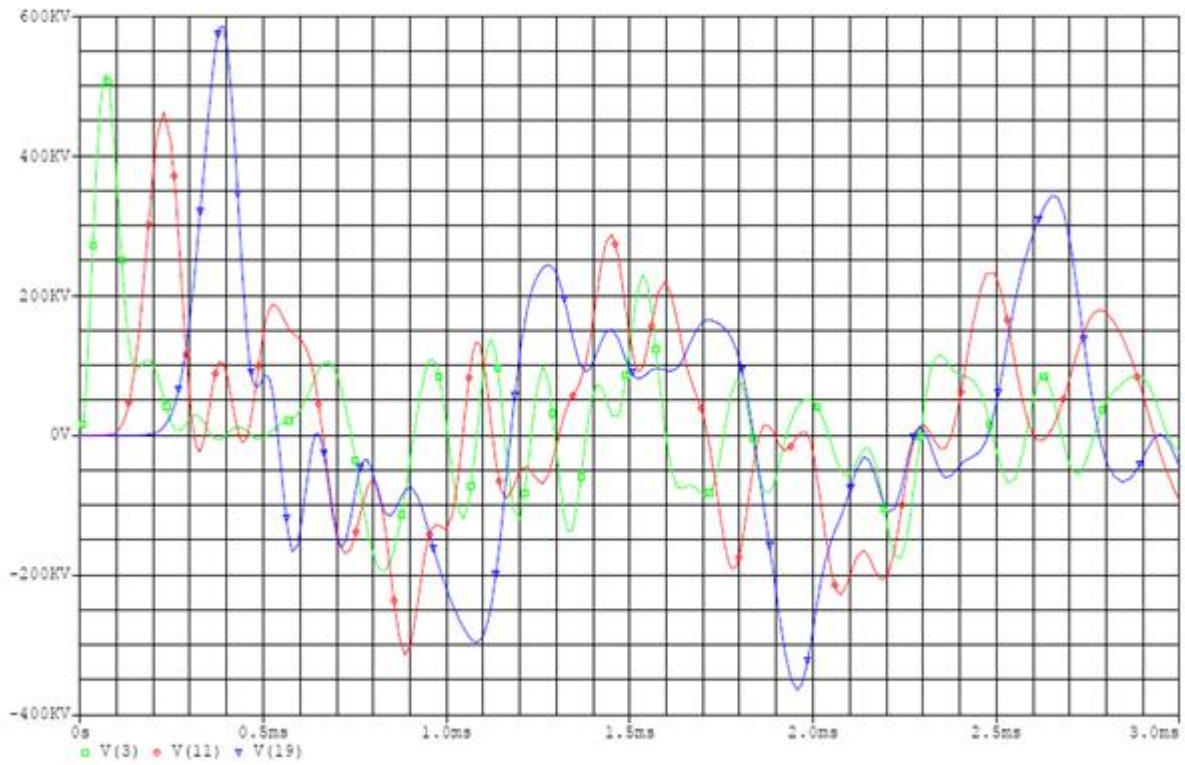


Fig.5. surtension de la ligne avec un conducteur (sur les points 2,6 et 10)

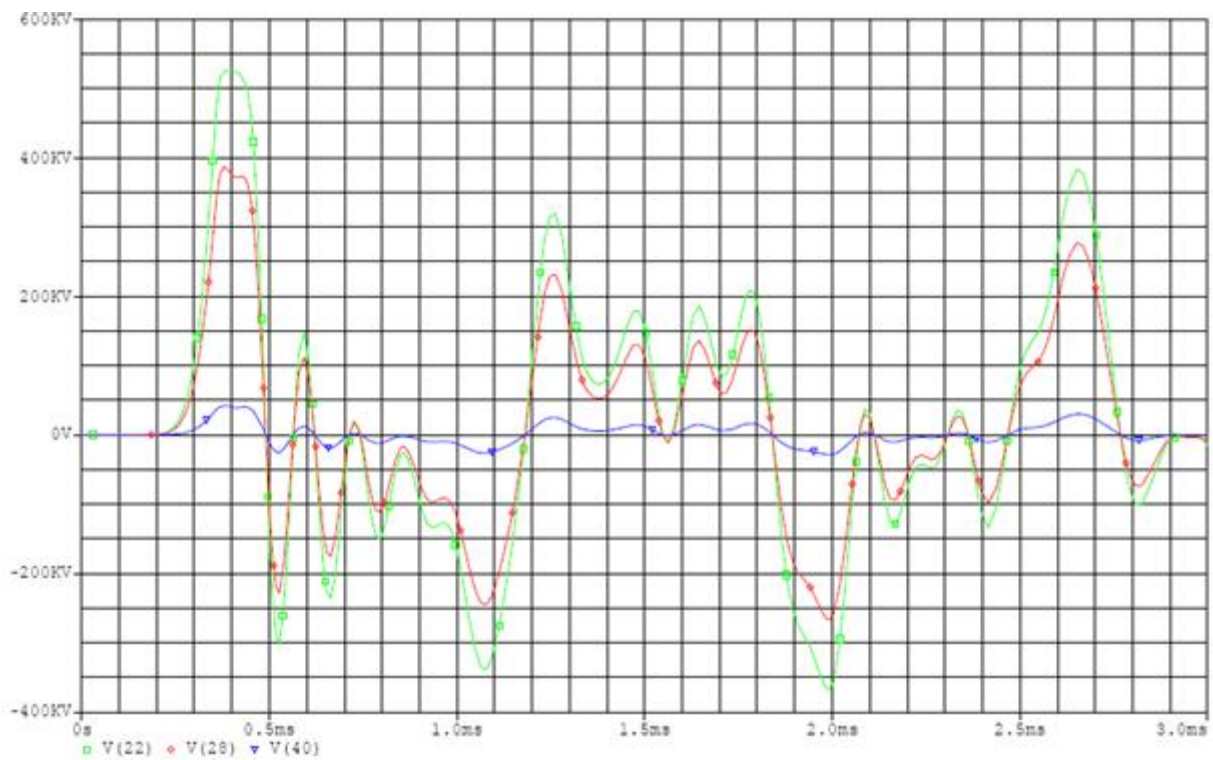


Fig.6 .surtension du transformateur (ligne avec un conducteur) sur les points 1,4 et 10.

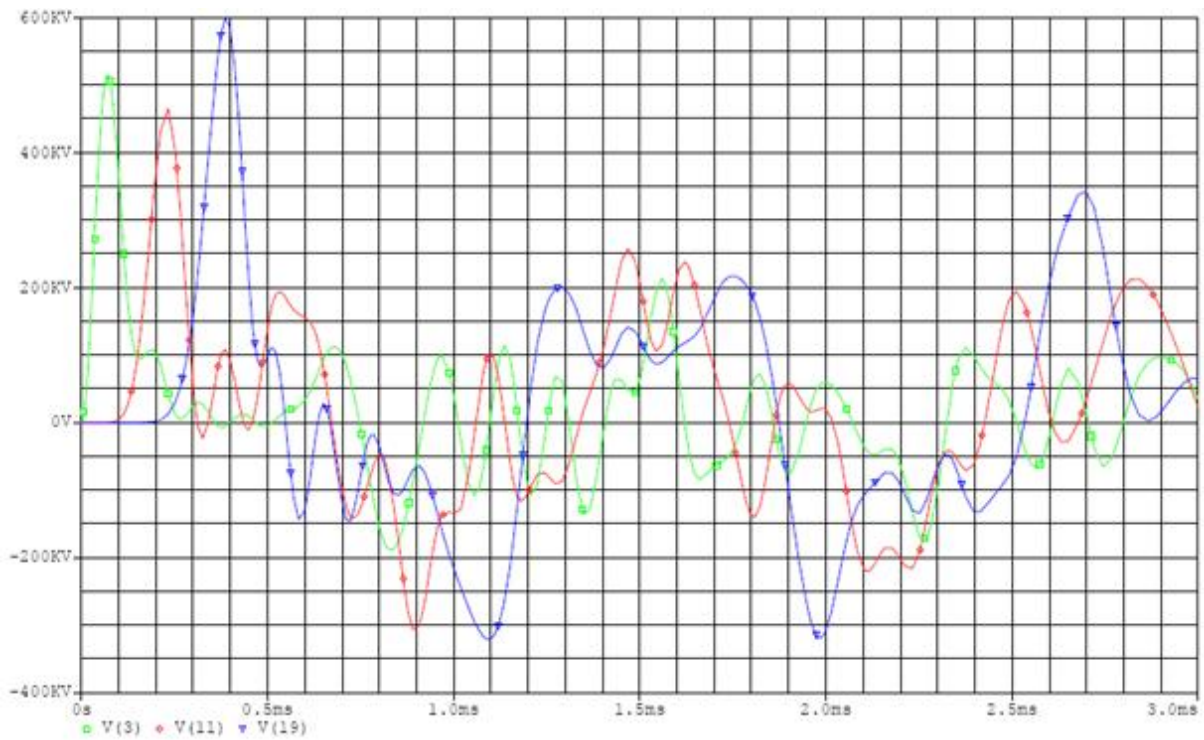


Fig.7. surtension de la ligne avec deux conducteurs (sur les points 2,6 et 10).

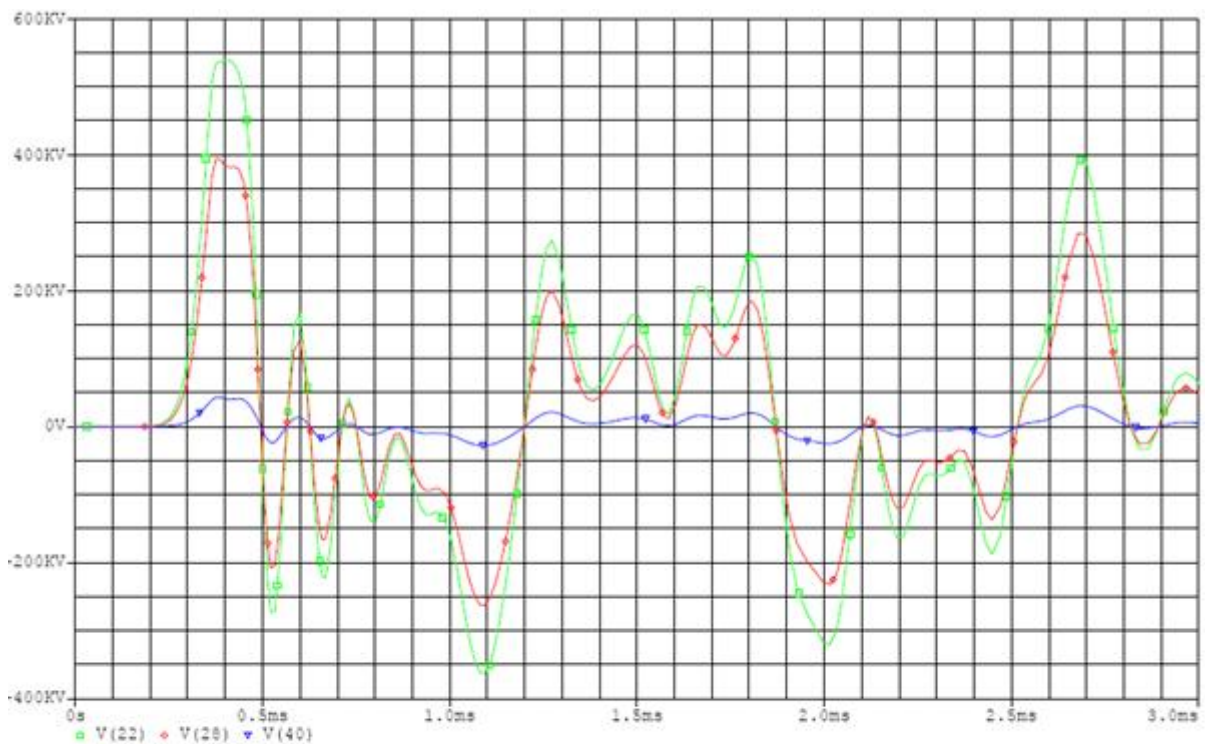


Fig.8. surtension du transformateur(ligne avec deux conducteurs) sur les points 1,4 et 10.

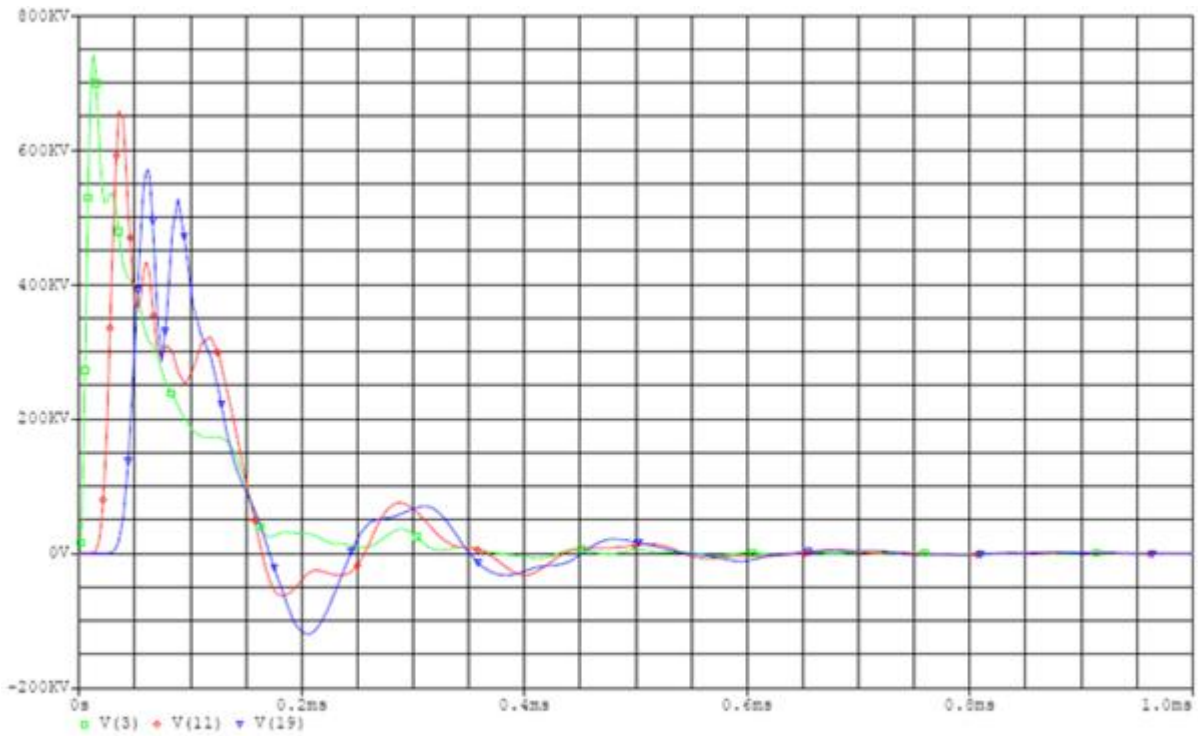


Fig.9. surtension dans la ligne avec effet couronne(sur les points 2,6 et 10).

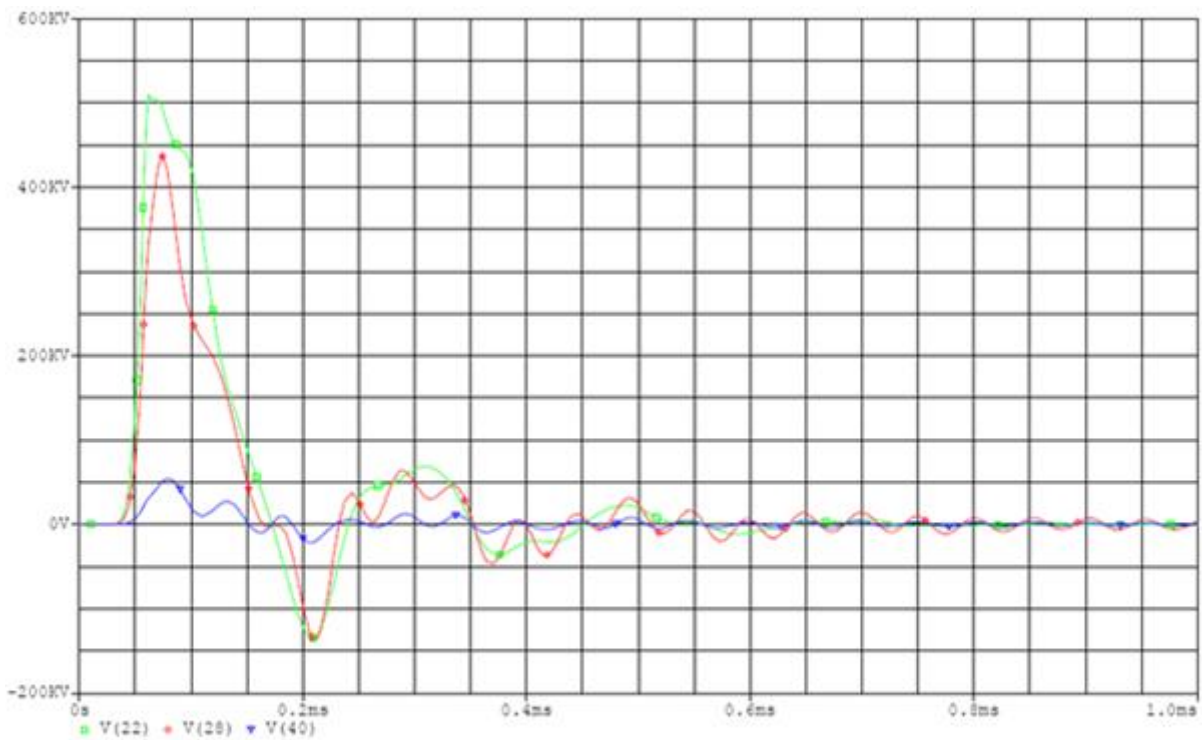


Fig.10. surtension du transformateur(ligne avec effet couronne) sur les points 1,4 et 10.

V-3 Analyse et Interprétation des résultats:

A partir de tableau 1 et 2, et des figures 1-4 qui représentent les surtensions sur la ligne et le transformateur, pour les lignes avec un seul conducteur, deux conducteurs et celle avec effet couronne. On constate qu'au début de la ligne la surtension est égale à 723.6KV et cette valeur diminue progressivement, puis cette diminution est ralentie sur une partie importante de la ligne-fig.1.

Sur cette grande partie de la ligne la surtension ne dépasse presque pas 500KV. On observe une augmentation des surtensions en approchant du transformateur. Sur le point de connexion de la ligne et du transformateur la tension atteint 744.66KV, 770 et 790KV correspondant aux cas d'un seul conducteur, de deux conducteurs et à la considération de couronne. Le fonctionnement du parafoudre diminue ces valeurs jusqu'à 526,539 et 507KV respectivement . fig.2.

Le fonctionnement du parafoudre ne diminue que les surtensions à la fin de la ligne, ce qui est bien visible sur la figure 2.

Les surtensions augmentent à cause de la différence des impédances caractéristiques de la ligne et du transformateur, qui produit une onde réfléchissante de surtension positive.

Au début de l'enroulement du transformateur, on a la même tension que sur l'élément précédent, si on ne considère pas le fonctionnement du parafoudre dans le transformateur, la tension diminue le long de l'enroulement jusqu'au dernier point qui est mis à la terre-fig.3.et 4.

Les figures 5, 7 et 9 illustrent les courbes de surtension sur les lignes avec un conducteur, deux conducteurs et avec effet couronne, par contre les figures 6, 8 et 10 illustrent les courbes de surtension dans le transformateur pour les trois cas précédent.

On déduit que l'application de deux conducteurs en parallèle sur chaque phase, par conséquent diminue la surtension à 12KV c'est-à-dire à 2%.

La répartition de la tension sur les lignes avec un et deux conducteurs sont quasiment les mêmes, parce que la résistance de la ligne de tension nominale 330KV sont très petite et la différence entre les réactances d'inductions ne sont pas très grandes.

La considération de l'effet couronne montre que dans ce cas la surtension sur la ligne augmente . fig.1, 2. On observe aussi l'augmentation de surtension dans le transformateur. Mais, dans le transformateur cette augmentation est un peu légère.

L'effet couronne augmentent aussi l'atténuation de l'oscillation des surtensions sur la ligne. Comme on voit des figures .5-10, par exemple l'instant de 2-3ms sur la ligne sans effet couronne la surtension atteint à peut près jusqu'à 400KV, tandis que sur la ligne avec effet couronne à l'instant $t=0,4ms$ la surtension ne dépasse pas 20KV .ceci à lieu aussi dans le transformateur.

Lors de l'existence de l'effet couronne la période de la surtension diminue aussi considérablement. D'après les courbes des figures .5, 7 et 9 on trouve que la période diminue de 1,2ms à 0,2ms c'est-à-dire environ 6 fois.

La création de l'effet couronne augmente aussi considérablement la raideur de surtension.

Comme on voit la création de l'effet couronne fait une déformation importante sur la surtension. D'une part l'augmentation de l'amplitude et de la raideur augmentent le danger causé par l'effet couronne, d'autre part l'atténuation de l'oscillation de surtension diminue ce danger.

Dans le cas d'une ligne avec effet couronne l'augmentation de surtension dans la ligne dépasse les 30% et dans le transformateur atteint 15%.

V-1 Introduction :

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

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

Ceci est possible par l'utilisation de logiciels spécialisés qui simulent le comportement de la ligne et du transformateur. Dans ce présent travail, on utilise le P-spice.

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

v-2 simulation des schémas équivalents :

Nous considérons un poste unidirectionnelle de tension nominale de 330KV et une ligne de 100Km où le phénomène de couronne peut avoir lieu. Pour la simulation la ligne et le transformateur sont divisés en dix éléments. Un élément de la ligne est équivalent à 10Km.

Afin de considérer et évaluer l'effet couronne on simule :

- La ligne sans effet couronne (un seul conducteur par phase, avec existence et absence du parafoudre).
- La ligne sans effet couronne (deux conducteurs par phase, avec existence et absence du parafoudre).
- La ligne avec effet couronne (avec existence et absence parafoudre).

Pour ce but on utilise le schéma équivalent reproduisant l'effet couronne proposé par l'université polytechnique de Saint-Petersbourg. Comme surtension nous choisissons la surtension impulsionnelle (1,2/50 s) avec l'amplitude 725KV (c'est la surtension maximale qu'on peut avoir sur la ligne de tension nominale 330Kv).

Les résultats de calculs sont représentés dans les tableaux 1-2 et sur les figures 1-6.

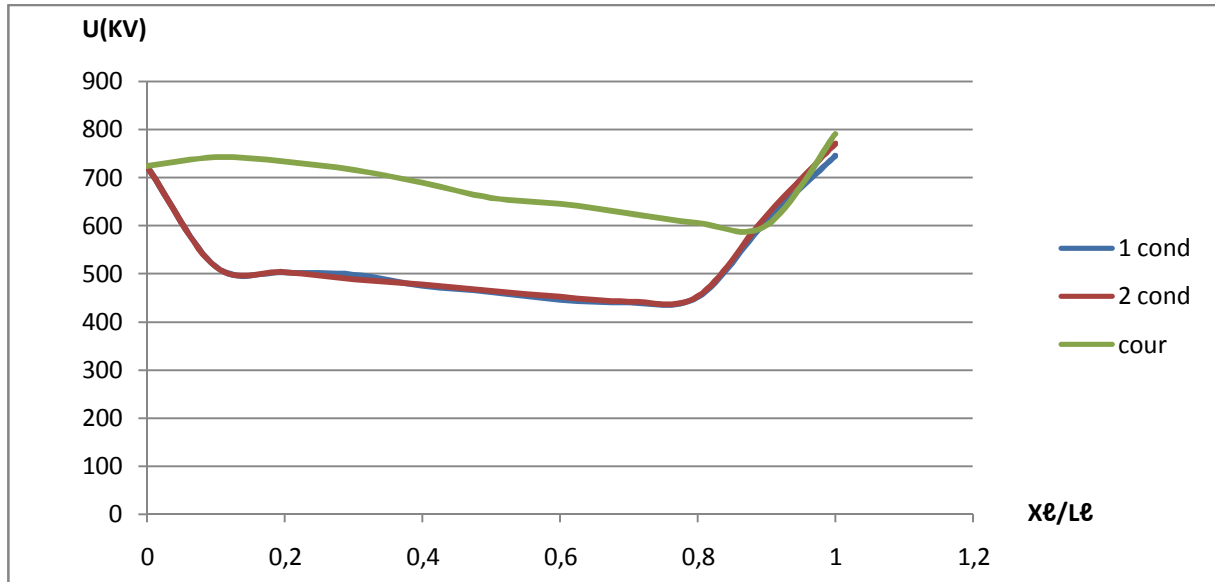


Fig.1.surtension dans la ligne (le parafoudre ne fonctionne pas).

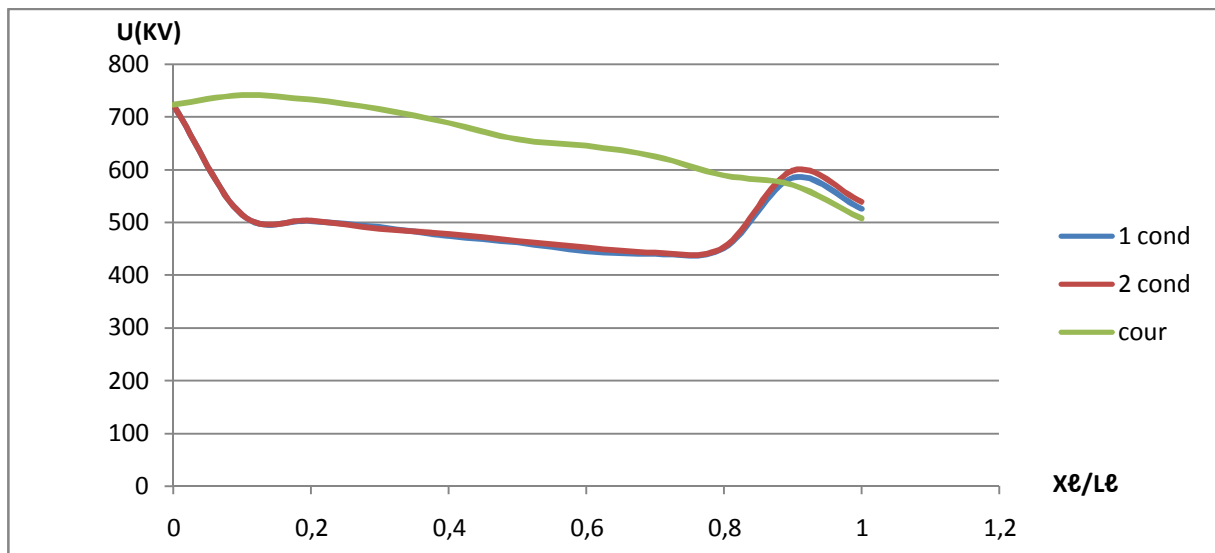


Fig.2.surtension dans la ligne (le parafoudre fonctionne).

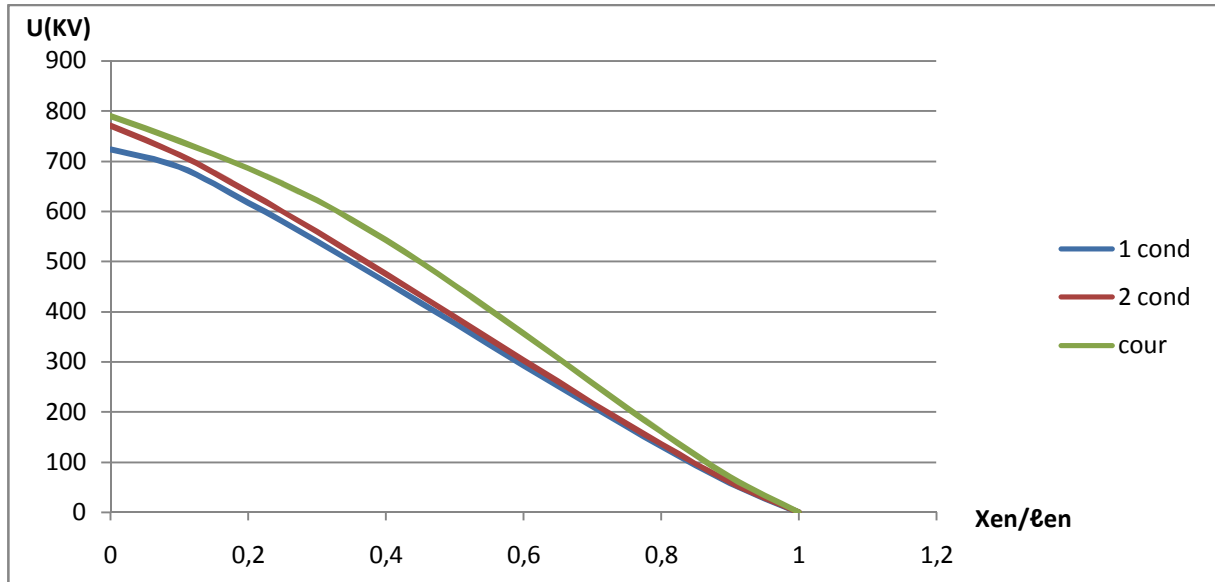


Fig.3.surtension dans le enroulement du transformateur (le parafoudre ne fonctionne pas).

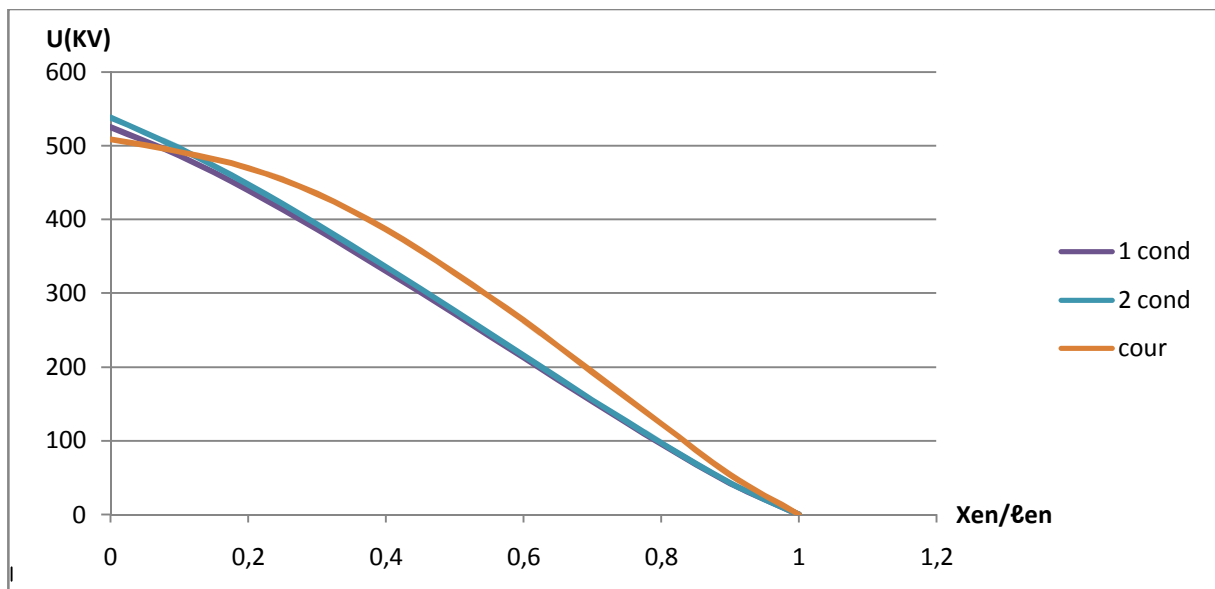


Fig.4.surtension dans le enroulement du transformateur(le parafoudre fonctionne).

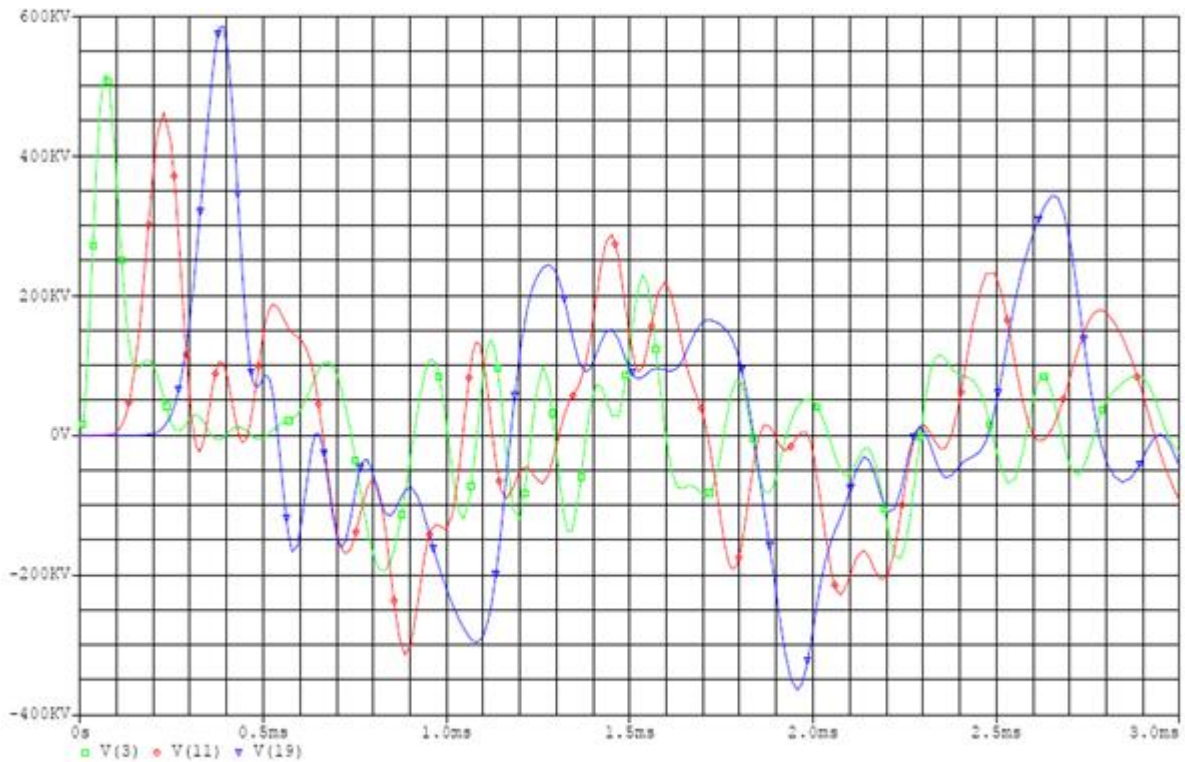


Fig.5. surtension de la ligne avec un conducteur (sur les points 2,6 et 10)

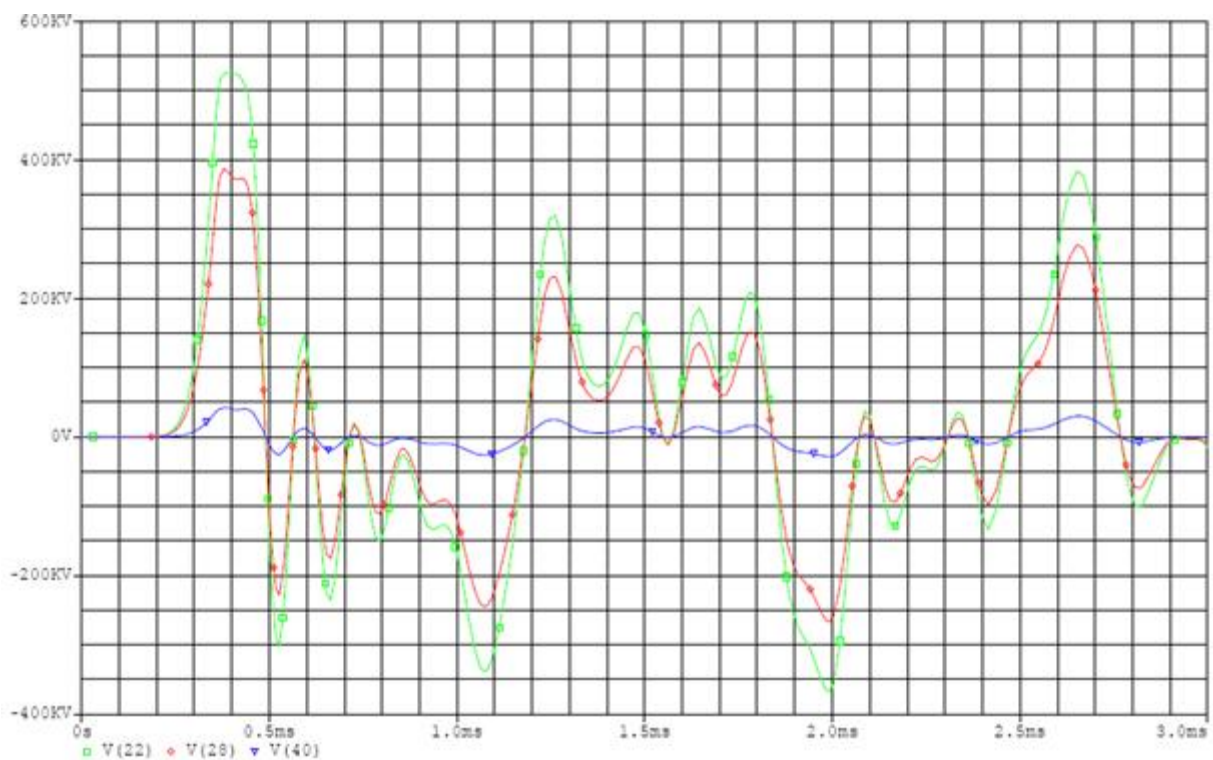


Fig.6 .surtension du transformateur (ligne avec un conducteur) sur les points 1,4 et 10.

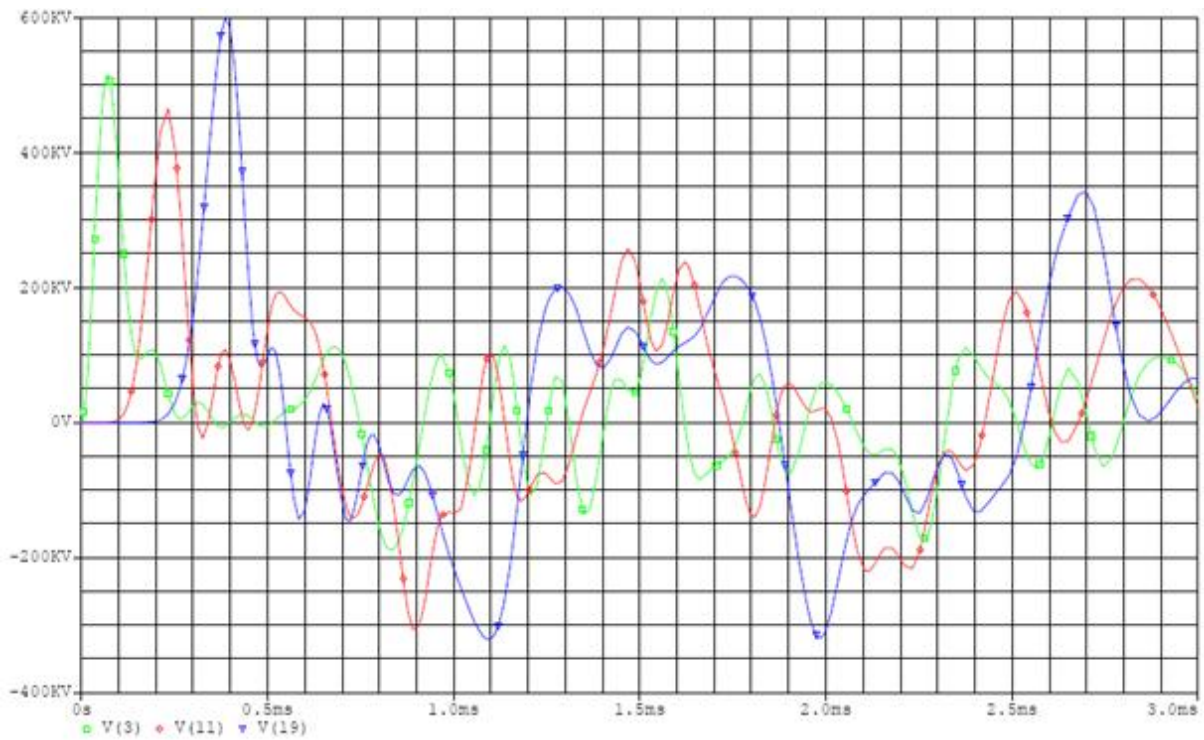


Fig.7. surtension de la ligne avec deux conducteurs (sur les points 2,6 et 10).

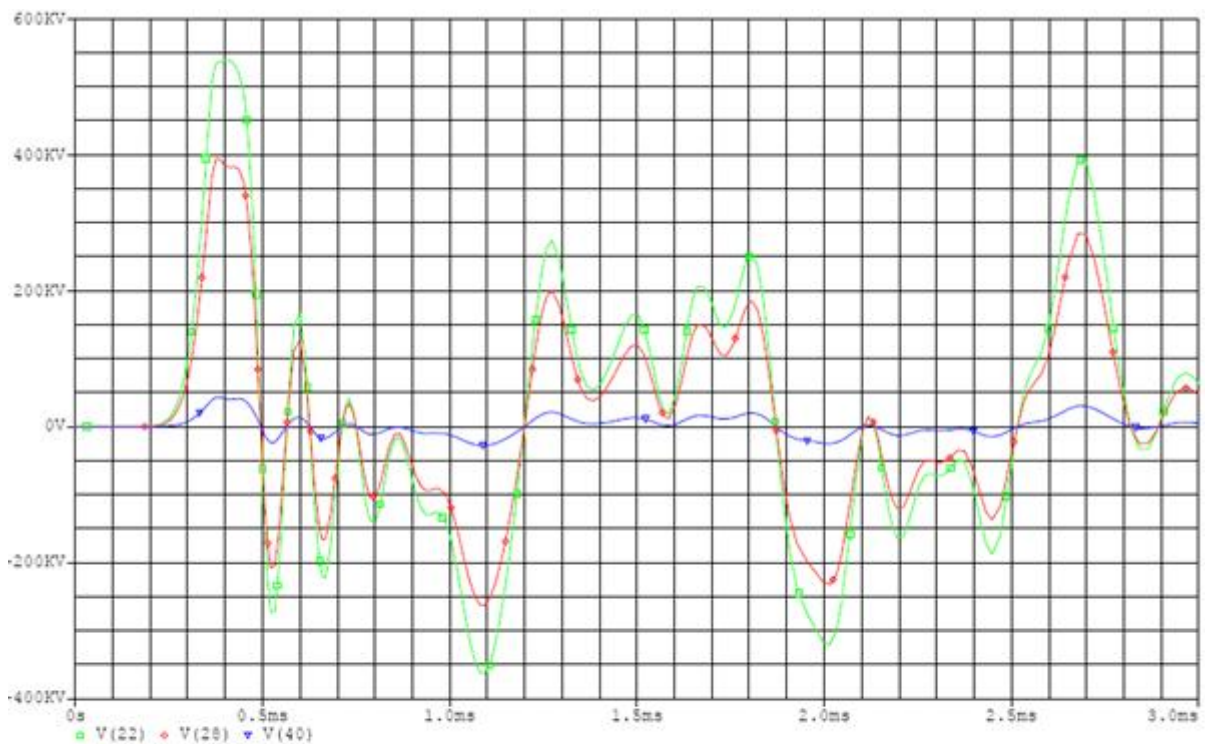


Fig.8. surtension du transformateur(ligne avec deux conducteurs) sur les points 1,4 et 10.

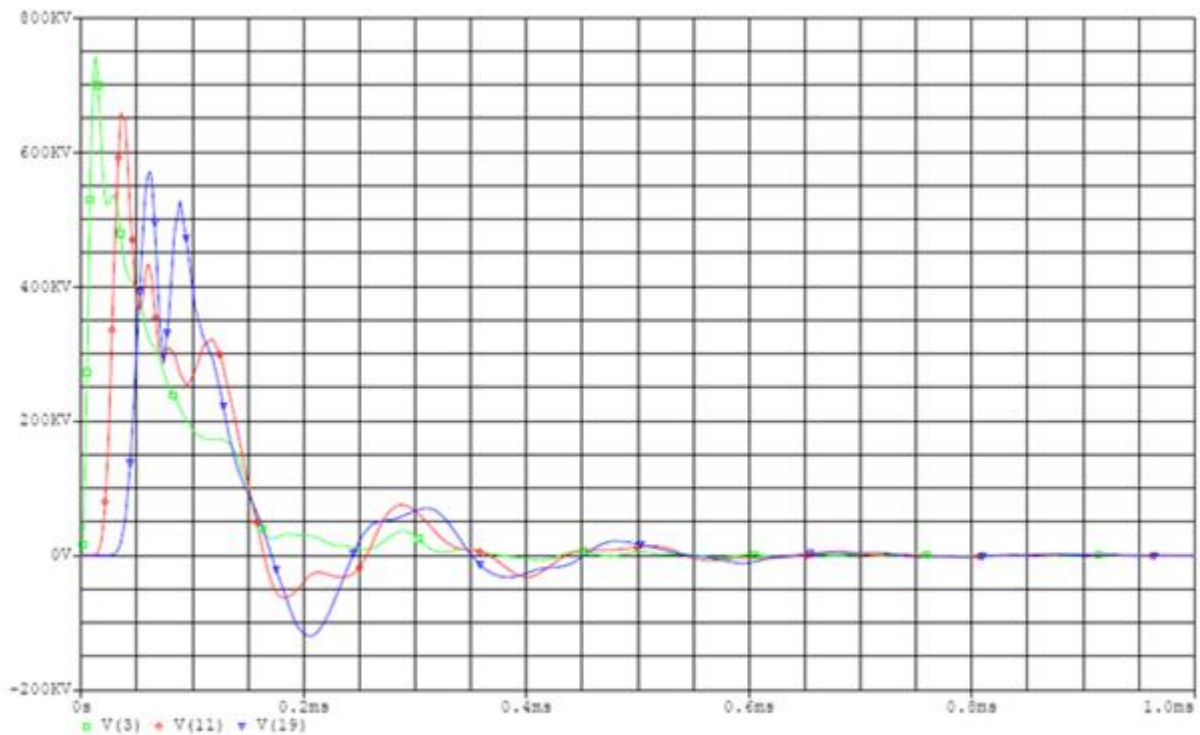


Fig.9. surtension dans la ligne avec effet couronne(sur les points 2,6 et 10).

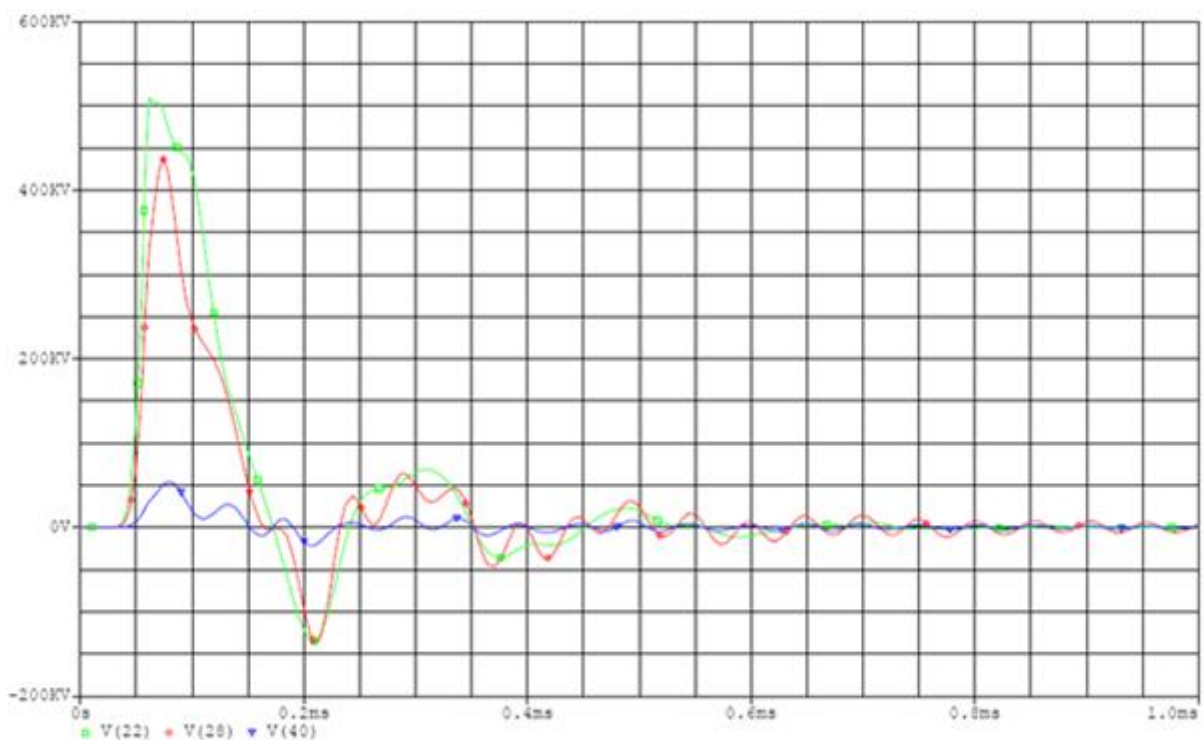


Fig.10. surtension du transformateur(ligne avec effet couronne) sur les points 1,4 et 10.

V-3 Analyse et Interprétation des résultats:

A partir de tableau 1 et 2, et des figures 1-4 qui représentent les surtensions sur la ligne et le transformateur, pour les lignes avec un seul conducteur, deux conducteurs et celle avec effet couronne. On constate qu'au début de la ligne la surtension est égale à 723.6KV et cette valeur diminue progressivement, puis cette diminution est ralentie sur une partie importante de la ligne-fig.1.

Sur cette grande partie de la ligne la surtension ne dépasse presque pas 500KV. On observe une augmentation des surtensions en approchant du transformateur. Sur le point de connexion de la ligne et du transformateur la tension atteint 744.66KV, 770 et 790KV correspondant aux cas d'un seul conducteur, de deux conducteurs et à la considération de couronne. Le fonctionnement du parafoudre diminue ces valeurs jusqu'à 526,539 et 507KV respectivement . fig.2.

Le fonctionnement du parafoudre ne diminue que les surtensions à la fin de la ligne, ce qui est bien visible sur la figure 2.

Les surtensions augmentent à cause de la différence des impédances caractéristiques de la ligne et du transformateur, qui produit une onde réfléchissante de surtension positive.

Au début de l'enroulement du transformateur, on a la même tension que sur l'élément précédent, si on ne considère pas le fonctionnement du parafoudre dans le transformateur, la tension diminue le long de l'enroulement jusqu'au dernier point qui est mis à la terre-fig.3.et 4.

Les figures 5, 7 et 9 illustrent les courbes de surtension sur les lignes avec un conducteur, deux conducteurs et avec effet couronne, par contre les figures 6, 8 et 10 illustrent les courbes de surtension dans le transformateur pour les trois cas précédent.

On déduit que l'application de deux conducteurs en parallèle sur chaque phase, par conséquent diminue la surtension à 12KV c'est-à-dire à 2%.

La répartition de la tension sur les lignes avec un et deux conducteurs sont quasiment les mêmes, parce que la résistance de la ligne de tension nominale 330KV sont très petite et la différence entre les réactances d'inductions ne sont pas très grandes.

La considération de l'effet couronne montre que dans ce cas la surtension sur la ligne augmente . fig.1, 2. On observe aussi l'augmentation de surtension dans le transformateur. Mais, dans le transformateur cette augmentation est un peu légère.

L'effet couronne augmentent aussi l'atténuation de l'oscillation des surtensions sur la ligne. Comme on voit des figures .5-10, par exemple l'instant de 2-3ms sur la ligne sans effet couronne la surtension atteint à peut près jusqu'à 400KV, tandis que sur la ligne avec effet couronne à l'instant $t=0,4ms$ la surtension ne dépasse pas 20KV .ceci à lieu aussi dans le transformateur.

Lors de l'existence de l'effet couronne la période de la surtension diminue aussi considérablement. D'après les courbes des figures .5, 7 et 9 on trouve que la période diminue de 1,2ms à 0,2ms c'est-à-dire environ 6 fois.

La création de l'effet couronne augmente aussi considérablement la raideur de surtension.

Comme on voit la création de l'effet couronne fait une déformation importante sur la surtension. D'une part l'augmentation de l'amplitude et de raideur augmentent le danger causé par l'effet couronne, d'autre part l'atténuation de l'oscillation de surtension diminue ce danger.

Dans le cas d'une ligne avec effet couronne l'augmentation de surtension dans la ligne dépasse les 30% et dans le transformateur atteint 15%.

Conclusion **Générale**

Conclusion générale

Le but de notre travail consiste à mettre en évidence l'influence des surtensions sur les transformateurs en tenant compte de l'effet couronne sur les lignes, pour cela nous avons adopté trois modèles de ligne (une ligne avec un conducteur, une avec deux conducteurs et une autre avec effet couronne dont chacune est reliée à un transformateur de 330KV.

- Les deux modèles adoptés sans effet couronne avec un seul et deux conducteurs sont quasi équivalents malgré que ce dernier (ligne sectionné) à l'avantage de diminuer l'effet couronne.
- Dans le modèle d'une ligne avec effet couronne, l'amplitude et la raideur des surtensions augmente, le temps du premier maximum diminue considérablement.
- L'atténuation de l'oscillation des surtensions augmente aussi considérablement.
- L'augmentation de surtension dans la ligne dépasse 30%, dans le transformateur cette valeur atteint environ 15%.
- Les courbes de surtension subissent une déformation importante à cause de la création de couronne.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] : MICHEL AGUEL et MICHEL IANOZ."
<<Traité d'électricité, haute tension>>.volume XXII.
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Publie sous la direction
JACQUES NE IRYNCK.
- [2] : EDGAR GILLON.
<< Cours d'électrotechnique >>.les machines électriques volume I.
- [3] : RAZEVIQUE D.V, Techniques de hautes
tensions<<ENERGUIYA>>, MOSCOU, 1976.
- [4] : GUY SEGUIER, FRANCIS NOTELET<<électronique industrielle
- [5] : BERNARD HOC HART. Coordonnateur. << Le transformateur de
puissance >> France 1988
- [6] : VALENTIN CRASTAN <<les réseaux d'énergie électrique
1>> .BIENNE, octobre 2006
- [7] : Guide de conception des réseaux électriques industriels<<T ? D>>
Schneider Electric.6 883 427/A
- [8] : D.FULCHIRON, <<cahier technique n°151>>édition décembre 1992.
- [9μ] : FRANCOIS GIRARD-ADEE <<généralités foudre>>Edition octobre
1998.cahier technique.
- [10] : LOUNASSI S, MANSOUR N<<influence de la distance entre le
parafoudre et le transformateur sur les surtensions dans les
enroulements du transformateur>>mémoire d'ingénieur 2001.UMMTO.
- [11] : A.NEGUAB, S.KHEMLICHE, <<étude des protections contre les
surtensions de foudre >>.mémoire d'ingénieur 1997.
- [12] : CNHT2009-7ème conférence nationale sur la haute tension, SIDI
Bel-Abbés, 19-21 Avril 2009.
- [13] : www.wikipédia.com (encyclopédie libre).
- [14] : HANDALA M <<cours de haute tension TEC 424>>UMMTO.
- [15] : GUELLER-B, VEVERKA-A, les processus impulsionnels dans les
machines électriques « ENERGUIYA »MOSCOU ,1973.
- [16] : LOKHANINE A.K .détermination des inductances des
transformateurs HT <<ELECTRITCHESTVO >>MOSCOU ,1976.
- [17] : LOKHANINE A-K, POGOSTINE VI, calcul des capacités des
enroulements de transformateurs HT <<ELECTROTECHNICA>>LVOV ,
1973.

