

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

Option : Réseaux électriques

THÈME :

*Influence du câble sur les surtensions
dans un système ligne - câble - transformateur.*



Etudié et présenté par :

- M^R : OUMEZZAOUCHE Boussad
- M^R : RAHMANI Samir

Proposé et dirigé par :

M^R : N. MOUFIDZADA

Promotion 2009

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements accompagnés de toute notre profonde gratitude à notre promoteur Monsieur N. MUFID ZADA, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, de nous avoir proposé ce sujet, pour sa disponibilité permanente, pour son aide ainsi que pour les conseils précieux qu'il n'a cessés de nous prodiguer qui ont contribué énormément à l'élaboration de ce mémoire.

Notre reconnaissance va particulièrement à Monsieur H. HOUASSINE, Maître assistant, chargé de cours à l'université de Médéa, pour ses précieuses aides, pour ses fructueux conseils, ses suivi constants, sa courtoisie si raffinée et ses qualités humaines.

Par la même occasion, nos remerciements vont également à tous les responsables du laboratoire de recherche (Réseaux électriques) en particulier Monsieur T. OTHMANE CHERIF, de nous avoir permis de suivre notre travail au sein de ce dernier.

Nous ne saurons terminer nos remerciements sans exprimer notre profonde gratitude à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de notre travail, ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ✚ Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'éclairer la vie et à qui je dois tout ;

- ✚ La mémoire : de ma très chère et regretté tante Ouiza, de mes grands parents paternels Hamitouche et Fatma et de mon grand père maternel Amrane ; que dieu les accueille dans son vaste paradis.

- ✚ Mon frère Krimo et mes soeurs (Kaissa, Dehbia, Djamila,...);

- ✚ Ma sœur Nadia et son mari Ali sans oublier ses petits anges Sarah et Said ;

- ✚ Tous mes oncles et tantes et leur famille ;

- ✚ Tout mes cousins et cousines, en particulier : Rabah, Farid, Said, Houali, Madjid, Amrane, Kamel, Moh, Mustapha, Meziane et sans oublier ma grande famille en France ;

- ✚ Mon très cher ami MOH que j'estime beaucoup ;

- ✚ Touts mes amis : Kamel, Mourad, Marzouk, Hafid, Yacine, Belkacem, Omar, Hakim, Borjo, Hamza, Djamila, Naima ...;

- ✚ Mon très cher ami et collègue Boussad et sa famille;

- ✚ Toute personne qui pense à moi de proche ou de loin;

- ✚ Tous les étudiants de département électrotechnique et de la cité 1^{er} Novembre de Oued-Aissi.

SAMIR

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à :

- ✚ Ma très chère mère qui m'a toujours soutenu.
- ✚ La mémoire de mon très cher et regretté père.
- ✚ Tous mes frères et sœurs.
- ✚ Mon frère Ahcene et sa femme Ouiza à l'occasion de leur mariage.
- ✚ Mes oncles, mes tantes et leur progéniture.
- ✚ Toute la famille OUMEZZAOUCHE.
- ✚ Mon neveu * PETIT ANGE * Arab.
- ✚ Ma petite nièce Tinhinane.
- ✚ La naissance de ma nièce sabrina.
- ✚ Mon cher collègue adoré Samir et sa famille.
- ✚ Mon cher ami Moh que j'aime.
- ✚ Mes amis Rabah, Krimo, Omar, Merzouk, Hafid et Djidji.
- ✚ Toi Naima.
- ✚ Toute la promotion 2009.

BOUSSAD



<i>Introduction générale</i>	1
 Chapitre I : Organisation d'un réseau de transport d'énergie électrique.	
I.1) Les lignes	3
I.1.1) Définition et composants	3
I.1.1.a) Les conducteurs	3
I.1.1.b) Les isolateurs	3
I.1.1.c) Les supports	5
I.1.2) Types des lignes	6
I.1.2.a) Lignes de distribution à basses tensions BT	6
I.1.2.b) Lignes de distribution à moyennes tensions MT	6
I.1.2.c) Les lignes de transport à hautes tensions HT	6
I.1.2.d) Les lignes de transport à très hautes tensions THT	6
I.1.2.e) Les lignes de transport à ultra hautes tensions UHT	6
I.1.3) Construction d'une ligne	6
I.1.4) Le fil de garde	7
I.2) Les câbles	7
I.2.1) Définition	7
I.2.2) Types d'isolation	8
I.2.3) Conditions de pose	8
I.3) Les transformateurs	9
I.3.1) Définition	9
I.3.2) Types des transformateurs	10

I.3.2.1) Transformateurs monophasés	10
I.3.2.1.a) Réalisation	10
I.3.2.1.b) Transformateur élémentaire	10
I.3.2.1.c) Construction :	11
I.3.2.2) Transformateurs triphasés	12
I.3.2.2.a) Description	12
I.3.2.2.b) Modes de couplages des enroulements	12
I.3.2.2.c) Classification des transformateurs	13
I.3.2.2.d) Transformateurs de puissance	13
I.3.3) Isolation et refroidissement des transformateurs	14
Chapitre II : Surtensions sur les réseaux électriques.	
II.1) Définition des surtensions	15
II.2) Origine des surtensions	15
II.2.1) Surtension d'origine interne	15
II.2.1.1) Surtensions de manœuvres	16
II.2.1.1.a) Surtension due à la coupure d'un courant inductif	17
II.2.1.1.b) Surtension due à la coupure d'un courant capacitif	17
II.2.1.2) Surtension provoquée par un défaut d'isolement	18
II.2.1.3) Surtensions par ferro-résonance	18

II.2.1.4) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti)	19
II.2.2) Surtension d'origine externe	19
II.2.2.1) Nature de la foudre	19
II.2.2.2) Mécanisme du coup de foudre	20
II.2.2.3) Schéma électrique équivalent	21
II.2.2.4) Surtensions dues à la foudre	21
a) Impact direct dans le conducteur d'une ligne aérienne	21
b) Impact direct dans le fil de garde	22
c) Impact dans un pylône mis à la terre	22
II.2.2.5) Paramètres de la foudre	23
II.2.2.6) Effets de la foudre	24
II.2.2.6.a) Les effets mécaniques	24
II.2.2.6.b) Les effets électriques	24
II.3) Conclusion	25
Chapitre III : Protection des réseaux électriques contre les surtensions.	
III.1) Introduction	26
III.2) Rappels sur les éclateurs	26
III.2.1) Avantages et inconvénients	27
III.3) Parafoudres	27
III.3-1) Définition	27
III.3.2) Types des parafoudres	28
III.3.2.1) Parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs	28

III.3.2.1.a) Parafoudre moyenne tension (HTA).....	29
• Constitution.....	29
• Principe de fonctionnement	30
III.3.2.1.b) Parafoudre haute tension (HTB).....	30
• Constitution	30
• Principe de fonctionnement	31
III.3.2.2) Parafoudres à oxyde de zinc	33
• Constitution	33
• Principe de fonctionnement	34
• Dimensionnement.....	35
III.3.2.3) Nouveaux parafoudres, (parafoudres à enveloppe synthétique)	37
III.3.2.4) Parafoudres pour applications spéciales	38
III.3.3) Mise en œuvre et installation des parafoudres	39
III.3.3.1) Choix des parafoudres	39
III.3.3.2) Distance de protection	40
 Chapitre IV : Régime transitoire dans un transformateur soumis aux surtensions.	
IV.1) Schéma équivalent d'un transformateur soumis aux surtensions	43
IV.2) Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT	43
IV.3) Equations du circuit	44
IV.4) Répartition de la tension le long de l'enroulement	46
IV.4.1) Hypothèses simplificatrices	46
IV.4.2) Répartition initiale de la tension	47

IV.4.2.1) Répartition initiale de la tension sur l'enroulement dans le neutre est mis à la terre	47
IV.4.2.2) : Répartition initiale de la tension sur l'enroulement dans le neutre est isolé de la terre	49
IV.4.3) Répartition finale de la tension	51
IV.4.4) Gradient de la tension	52
IV.5) Régime transitoire de la tension	53
Chapitre V : Calcul des paramètres.	
V.1) Caractéristiques	55
V.1.1) Caractéristiques des lignes et des câbles	55
V.1.2) Caractéristiques des transformateurs	56
V.2) Schémas équivalents	57
V.3) Calcul des paramètres	60
V.3.1) Pour une tension 110 KV	60
V.3.1.1) Calcul des paramètres de la ligne	60
V.3.1.1.1) Calcul de la résistance	60
V.3.1.1.2) Calcul de l'inductance	60
V.3.1.1.3) Calcul de la capacité	60
V.3.1.2) Calcul des paramètres du câble	61
V.3.1.2.1) Calcul de la résistance	61
V.3.1.2.2) Calcul de l'inductance	61
V.3.1.2.3) Calcul de la capacité	61

V.3.1.3) Calcul des paramètres du transformateur	62
V.3.1.3.1) Calcul de la résistance	62
V.3.1.3.2) Calcul de l'inductance propre d'un élément de l'enroulement	63
V.3.1.3.3) Calcul de la capacité transversale	66
V.3.1.3.4) Calcul de la capacité longitudinale	67
V.3.2) Pour une tension 220 KV	69
V.3.2.1) Calcul des paramètres de la ligne	69
V.3.2.1.1) Calcul de la résistance	69
V.3.2.1.2) Calcul de l'inductance	69
V.3.2.1.3) Calcul de la capacité	69
V.3.2.2) Calcul des paramètres du câble	70
V.3.2.2.1) Calcul de la résistance	70
V.3.2.2.2) Calcul de l'inductance	70
V.3.2.2.3) Calcul de la capacité	70
V.3.2.3) Calcul des paramètres du transformateur	71
V.3.2.3.1) Calcul de la résistance	71
V.3.2.3.2) Calcul de l'inductance propre d'un élément de l'enroulement	71
V.3.2.3.3) Calcul de la capacité transversale	72
V.3.2.3.4) Calcul de la capacité longitudinale	73
V.3.3) Pour une tension 330 KV	75
V.3.3.1) Calcul des paramètres de la ligne	75

V.3.3.1.1) Calcul de la résistance	75
V.3.3.1.2) Calcul de l'inductance	75
V.3.3.1.3) Calcul de la capacité	75
V.3.3.1.4) Calcul de la conductibilité	75
V.3.3.2) Calcul des paramètres du câble	76
V.3.3.2.1) Calcul de la résistance	76
V.3.3.2.2) Calcul de l'inductance	76
V.3.3.2.3) Calcul de la capacité	76
V.3.3.3) Calcul des paramètres du transformateur	76
V.3.3.3.1) Calcul de la résistance	76
V.3.3.3.2) Calcul de l'inductance propre d'un élément de l'enroulement	77
V.3.3.3.3) Calcul de la capacité transversale	78
V.3.3.3.4) Calcul de la capacité longitudinale	78
Chapitre VI : Modélisation et analyse des résultats.	
VI.1) Mise en équations du schéma électrique équivalent	81
VI.1.1) Ecriture linéaire des équations du schéma équivalent	81
VI.1.1.1) Pour la ligne	81
VI.1.1.1.a) Equations des tensions	81
VI.1.1.1.b) Equations des courants	81
VI.1.1.2) Pour le câble	82
VI.1.1.2.a) Equations des tensions	82

VI.1.1.2.b) Equations des courants	83
VI.1.1.3) Pour le transformateur	84
VI.1.1.3.a) Equations des tensions	84
VI.1.1.3.b) Equations des courants	84
VI.1.2) Ecriture matricielle des équations du schéma équivalent	85
VI.1.2.1) Pour la ligne	85
VI.1.2.1.a) Matrice des tensions	85
VI.1.2.1.b) Matrice des courants	85
VI.1.2.2) Pour le câble	86
VI.1.2.2.a) Matrice des tensions	86
VI.1.2.2.b) Matrice des courants	87
VI.1.2.3) Pour le transformateur	87
VI.1.2.3.a) Matrice des tensions	87
VI.1.2.3.b) Matrice des courants	87
VI.2) Principe de la simulation	88
VI.2.1) Détermination des impédances caractéristiques	90
VI.2.2) Evaluation de la tension dans le câble	91
➤ Interprétations des résultats	99
VI.2.3) Régime transitoire dans le câble	100
➤ Interprétation des résultats	105
VI.2.4) Variation de la surtension et de la période dans le câble	107
VI.2.4.1) Pour la tension nominale 110 KV, la ligne et le transformateur remplacés par deux impédances variables Z_{cl} et Z_{ctr} respectivement	107

➤ Interprétation des résultats	115
VI.2.4.2) Pour la tension nominale 110 KV, le transformateur remplacé par une impédance variable Z_{ctr}	117
➤ Interprétation du résultat	121
VI.2.4.3) La surtension dans le câble en dépendance des longueurs de la ligne et du câble l_l et l_c respectivement pour les tensions 110, 220 et 330 KV	122
➤ Interprétation des courbes	124
<i>Conclusion générale</i>	125



Introduction générale.

L'électricité fait partie intégrante de notre vie. Cette dépendance impose aux entreprises de production et de transport de l'énergie électrique un service permanent, surtout en ce qui concerne les infrastructures stratégiques. Une interruption de l'alimentation peut leur causer des dégâts irrémediables.

Les ouvrages de transport d'énergie électrique (ligne, câble et poste de transformation) peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature, ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolement des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique.

Les chercheurs dans le domaine ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tension. Les surtensions de foudre sont les plus difficiles et les plus contraignantes que subissent les postes de transformation.

Par suite la nécessité de se protéger contre ces surtensions est indispensable. Pour cela, il faut utiliser des moyens de protection très performants et fiables. Chose qui n'est pas facile à atteindre et il a fallu des décennies pour arriver au moyen le plus utilisé actuellement qui est le parafoudre à base d'oxyde de zinc.

Le travail, présenté dans le cadre de ce projet de fin d'études, consiste à l'étude du comportement du câble dans un système ligne - câble - transformateur soumis à une surtension externe (impact direct d'un coup de foudre) pour les différentes tensions nominales a savoir 110, 220 et 330 KV, la considération de ce problème était réalisée avec une grande simplification. Par exemple, dans certaines études la ligne et le transformateur étaient représentés par leurs impédances caractéristiques.

Afin de bien mener cette étude, nous avons structuré notre travail en six chapitres dont voici les principaux contours :

Le premier chapitre donne une idée générale sur l'organisation d'un réseau de transport d'énergie électrique et les équipements qui le constituent.

Nous avons consacré le deuxième chapitre pour l'étude des différentes surtensions qui peuvent perturber le bon fonctionnement des réseaux électriques où on a précisé leurs origines et leurs effets sur ces derniers.

La protection des réseaux électriques contre les surtensions est devenue aujourd'hui un problème préoccupant, le parafoudre qui fait le sujet du troisième chapitre est le meilleur moyen de protection des transformateurs où nous avons cité ces différents types en précisant leurs constituants, leurs principes de fonctionnement et leurs emplacements.

Une étude théorique sur les phénomènes transitoires apparaissant dans les enroulements du transformateur suite à une surtension de type impulsionnel, fera l'objet du quatrième chapitre.

Le calcul des paramètres de la ligne, du câble et du transformateur pour les différentes tensions nominales est représenté dans le cinquième chapitre.

Enfin, le sixième chapitre portera une étude sur le comportement du câble soumis aux surtensions. Pour faciliter l'étude, nous avons besoin d'un modèle numérique qui nous permet de simuler la répartition de la tension le long du système, pour cela nous avons utilisé le logiciel **P-Spice** (Orcad_10.5) vu sa simplicité, sa rapidité et sa précision.

Chapitre I :

Organisation d'un réseau de transport
d'énergie électrique.

Un réseau de transport d'énergie électrique se constitue essentiellement de lignes aériennes, de câbles sous terrains, et de transformateurs. Ceux-ci malgré leur simplicité apparente, ils cachent des propriétés importantes qui influent grandement sur le transport de cette énergie.

I.1) Les lignes :

I.1.1) Définition et composants : [2]

Une ligne se compose de conducteurs supportés par des poteaux ou des pylônes à l'aide des chaînes d'isolateurs rigides ou suspendus.

I.1.1.a) Les conducteurs : [1,2]

Les conducteurs des lignes aériennes sont toujours nus, constitués de brins toronnés dans le but de réduire l'effet de peau encore sont isolés l'un de l'autre par une couche d'oxyde, on emploie presque exclusivement des fils en cuivre ou des fils en aluminium avec âme en acier qui assure une résistance mécanique plus élevée, ces derniers sont plus économiques. L'aluminium est beaucoup plus léger et moins cher, sa résistivité est 1,62 fois que celle de cuivre, soit $36 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Le cuivre est rare dans les lignes nouvelles.

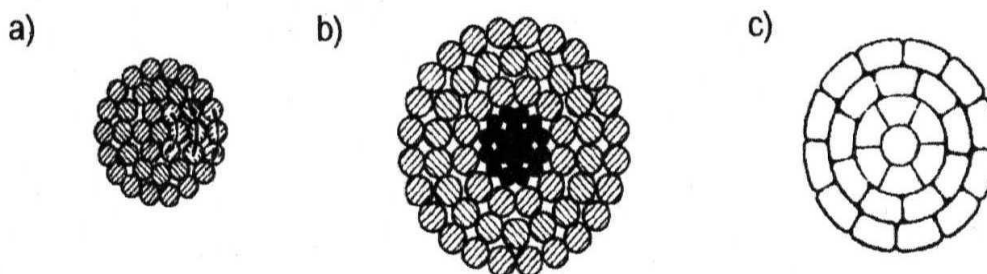


Figure (I.1) : Conducteurs des lignes aériennes.

a) Conducteur simple b) Conducteur Al-acier c) Conducteur compact.

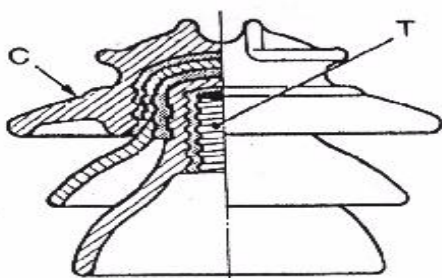
I.1.1.b) Les isolateurs : [1]

Les chaînes d'isolateurs servent à supporter et à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et la terre, ils sont presque toujours fabriqués en verre ou en porcelaine ayant respectivement une rigidité diélectrique de 120 KV/mm et de 12 à 28 KV/mm. [8]

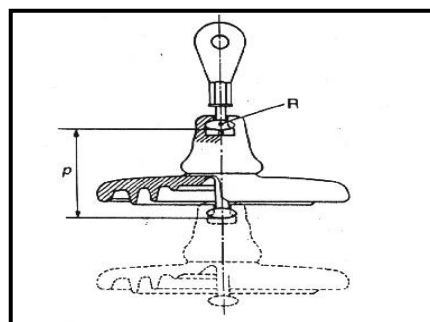
Les isolateurs doivent s'offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. A fin d'augmenter leur résistance de contournement, on leur donne une forme de jupe. Au point de vue mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les forces énormes dues au poids des conducteurs.

• **Types d'isolateurs : [8]**

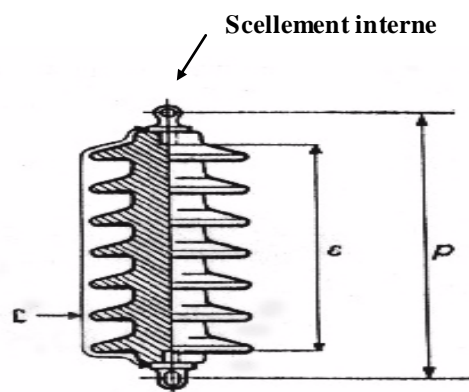
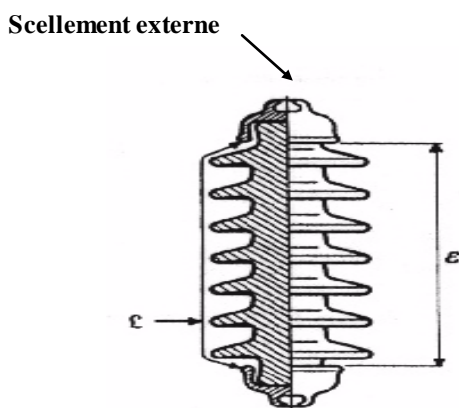
Il existe plusieurs types d'isolateurs parmi eux on trouve : les isolateurs rigides qui sont utilisés pour des tensions inférieurs à 50 KV, les isolateurs suspendus fabriqués en plusieurs éléments sont plus économiques car en cas de détérioration seul l'élément d'effectué sera remplacé, les isolateurs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



Isolateur rigide en verre



Assemblage à rotules



Isolateur à long fût en porcelaine

Figure (L2) : Quelques types d'isolateurs.

I.1.1.c) Les supports :

Les supports ou les pylônes maintiennent les conducteurs à une hauteur convenable ou dessus du sol par intermédiaire des travers ou bras. [1]

- **Types du support : [2]**

On distingue plusieurs types de pylônes et parmi eux on trouve : le pylône métallique en treillis qui est constitué par un assemblage de membrures formant un treillis et destiné à la plupart des lignes de transport de l'électricité, il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Le pylône haubané à chaînette supporte des conducteurs à 735 KV, ce type de pylône nécessite moins d'acier galvanisé que le pylône haubané en V ; il est donc comparativement moins lourd et moins cher. Le pylône en béton est fréquent en HTA, mais on le rencontre aussi en HTB utilisé pour des tensions allant jusqu'en 380 kV, ce pylône est préfabriqué en usine. Le pylône en bois est essentiellement utilisé en HTA, quoiqu'on le trouve dans certains pays jusqu'en 161 kV. Des prototypes existent aussi pour des tensions supérieures.

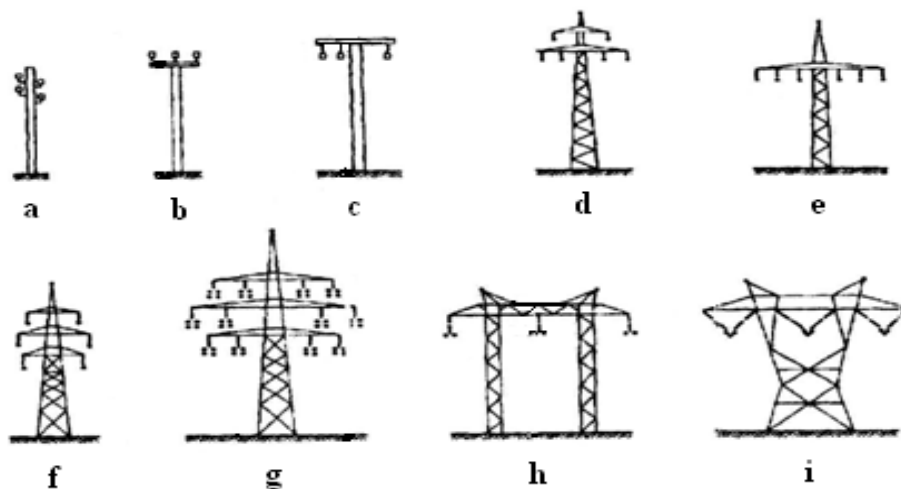


Figure (L3) : Types usuels des pylônes pour des lignes triphasées.

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

I.1.2) Types des lignes : [1]

Celons la tension appliquée, nous distinguons quatre types de lignes qui sont :

I.1.2.a) Lignes de distribution à basses tensions BT :

Ce sont les lignes et la filerie installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons, ces lignes fonctionnent à des tensions $< 600V$.

I.1.2.b) Lignes de distribution à moyennes tensions MT :

Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformations principaux, leur tension est comprise entre 2,4 et 69KV.

I.1.2.c) Les lignes de transport à hautes tensions HT :

Ce sont les lignes reliant les postes de transformations principaux aux centrales de génération, ces lignes fonctionnent pour les tensions 110 et 220 KV.

I.1.2.d) Les lignes de transport à très hautes tensions THT :

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

I.1.2.e) Les lignes de transport à ultra hautes tensions UHT :

Elles fonctionnent pour les tensions 765 et 1200 KV.

I.1.3) Construction d'une ligne : [1]

Une fois que la section des conducteurs, la hauteur des pylônes et la distance entre eux (portée) sont déterminées, on peut procéder à la pose des conducteurs. Un fil supporté et tendu entre deux poteaux n'est pas horizontal, il prend plutôt une forme courbée.

La distance verticale entre la droite qui joint les deux points de support et le point le plus bas d'un fil porte le nom flèche. Plus le fil est tendu plus la flèche est courte.

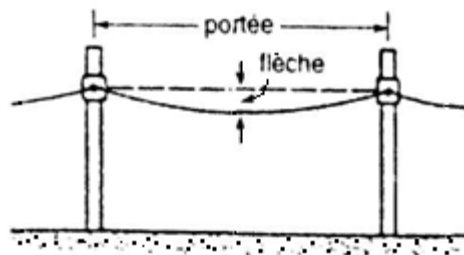


Figure (I.4) : Flèche et portée d'une ligne.

I.1.4) Le fil de garde : [1]

Le fil de garde est un conducteur non isolé disposé aux sommets des pylônes, il sert à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous tensions, on le relie solidement à la terre dans chaque pylône. Il ne porte normalement aucun courant, pour cette raison il est ordinairement en acier.

I.2) Les câbles :

I.2.1) Définition : [2]

Les câbles sont des conducteurs entourés d'une gaine armée ou non qui protège ces derniers et les isolent contre les contraintes électriques, mécanique et chimiques. On les trouve essentiellement dans les zones urbaines, en moyenne tension les câbles sont tripolaires, ils peuvent être à champ radial figure (I.5.a) dont chaque conducteur est entouré d'un écran ou à champ non radial figure (I.5.b) dont un écran unique entoure tous les conducteurs. Dans les câbles à moyenne tension, les conducteurs peuvent être en cuivre ou en aluminium avec différentes sections justifiées par leurs aptitudes à alimenter les charges de ce réseau en vue des différentes contraintes (chute de tension, tenue en court-circuit et tenue mécanique).

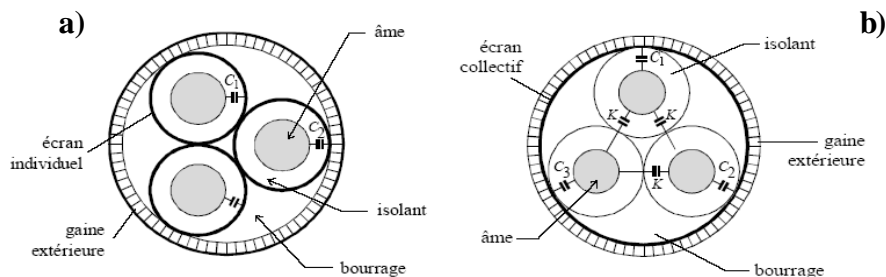


Figure : (I.5) [7]

I.2.2) Types d'isolation : [2]

Selon les tensions appliquées sur les câbles, on distingue plusieurs types d'isolations telle que :

- Isolation en papier : (papier imprégné d'huile minérale et de serine).
- Isolation en matières synthétiques : les plus employés sont :
 - Le polyéthylène (PE), le polyéthylène réticulé (PER) ainsi le polyvinyle (PVC) et la gomme synthétique (EPR)
 - Le (PE) est caractérisé par des pertes nettement inférieures.
- Isolation gazeuse : on utilise l'azote avec une pression interne d'environ 15 bars.
- Isolation à l'huile.

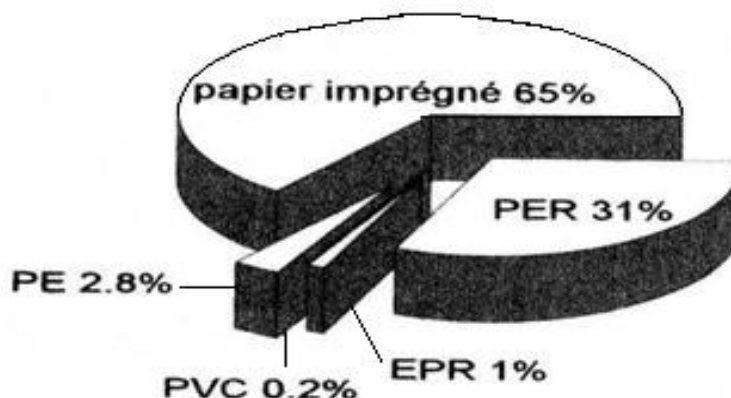


Figure (I.6) : Estimation du type d'isolation des câbles moyennes tensions.

I.2.3) Conditions de pose : [4]

Les conditions de pose des câbles en pleine terre et les règles de voisinage avec les autres occupants du sous-sol doivent satisfaire aux règles d'un arrêté interministériel, dit Arrêté Technique. En outre, divers documents et règlements locaux viennent à compléter les dispositions générales de l'Arrêté Technique.

Un câble ne peut être enterré directement que s'il est capable de supporter le tassement des terres ; en pratique, il comporte soit une armure, soit une gaine extérieure renforcée. Dans le cas contraire, une protection mécanique doit lui être associée : par exemple, le câble peut être mis en fourreau ou en caniveau ou bien recouvert de dalles de béton.

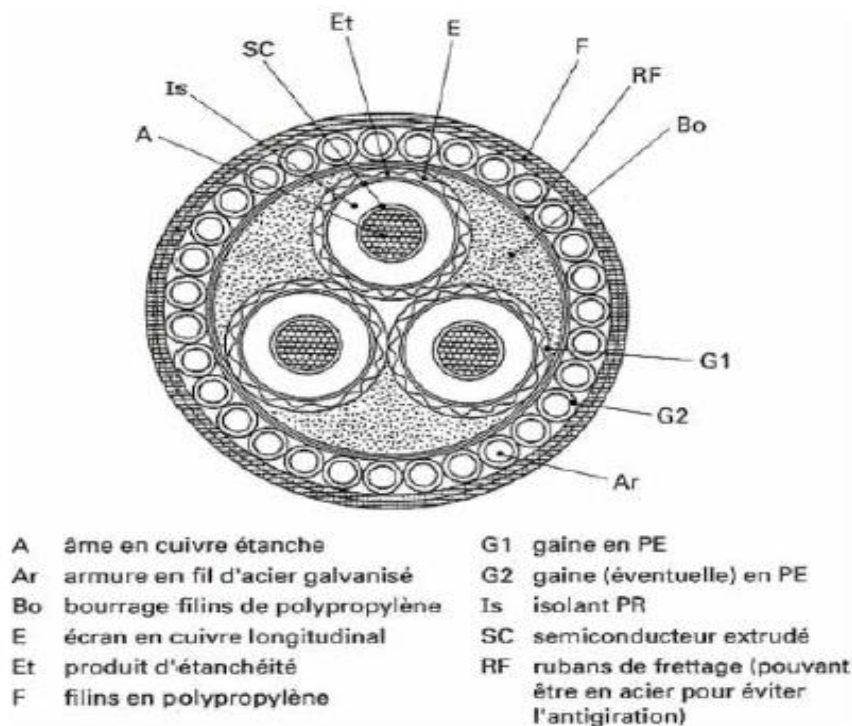


Figure (I.7) : Câble sous-marin triphasé 20 KV.

I.3) Les transformateurs :

I.3.1) Définition : [4]

Le transformateur appartient à la famille des composants passifs, il est l'instrument électrique qui convertit un système de tensions et de courants en un autre, sans changer la fréquence, cette conversion se fait à travers un circuit magnétique. Il se compose d'une ou de plusieurs bobines de fil placées à proximité d'une ou de plusieurs autres bobines.

Le transformateur est utilisé pour coupler des circuits de courant alternatif, les « bobines primaires » sont les bobines connectées à la source d'énergie et les autres bobines sont des « bobines secondaires ». Le transformateur élévateur de tension, ou survolteur, est un transformateur dans lequel la tension secondaire est supérieure à la tension primaire. Dans le cas contraire, il s'agit d'un transformateur abaisseur de tension, ou dévolteur. Les transformateurs électriques doivent être efficaces et doivent également dissiper aussi peu d'énergie calorifique que possible pendant la transformation. Les rendements dépassent couramment 99 % du fait de l'utilisation d'alliages d'acier spéciaux permettant de coupler les

champs magnétiques induits entre les bobines primaires et secondaires.

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

I.3.2) Types des transformateurs : [2]

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

I.3.2.1) Transformateurs monophasés :

I.3.2.1.a) Réalisation : [2]

Sont réalisés à deux variantes, avec enroulements simples ou doubles. Le parcours des lignes de flux magnétique est esquissé dans la figure (I.8).

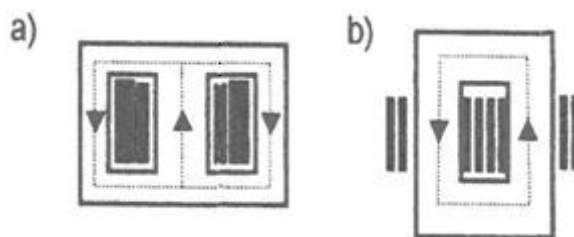


Figure (I.8) : Transformateur monophasé :

a) Enroulement simple b) Enroulement double.

I.3.2.1.b) Transformateur élémentaire : [1]

Une bobine à noyau d'air est alimentée par une source de tension E_g , le courant magnétisant I_m produit un flux total \emptyset qui dispersé autour de l'enroulement figure (I.9), si l'on approche de ce montage une deuxième bobine, une partie de ce flux est captée par les spires de cette dernière et une tension E_2 est induite à ses bornes. L'ensemble de ces deux bobines constitue un transformateur, la bobine accrochée à la source est appelée primaire, tant que l'autre est appelée secondaire.

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

que le couplage est faible. Pour obtenir un meilleur couplage en rapprochant les deux enroulements.

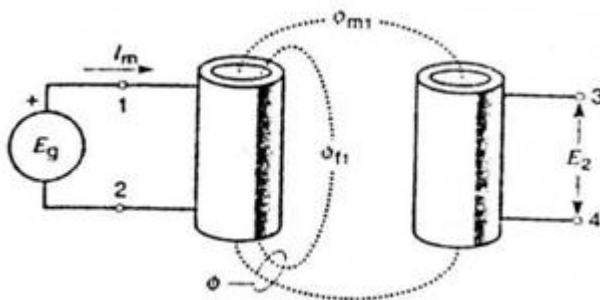


Figure (I.9) : Transformateur élémentaire.

On peut l'améliorer de beaucoup en bobinant le secondaire par-dessus le primaire figure (I.10), avec cette construction la presque totalité de flux est accrochée par le secondaire.

I.3.2.1.c) Construction : [1]

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

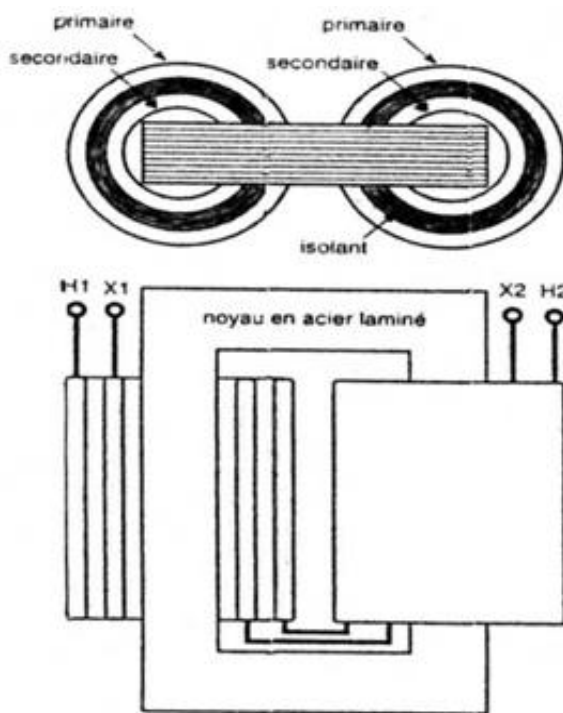


Figure (I.10) : Construction d'un transformateur monophasé.

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

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

I.3.2.2) Transformateurs triphasés :

I.3.2.2.a) Description : [2]

On peut obtenir un transformateur triphasé simplement par couplage triphasé de trois transformateurs monophasés, ce qui est onéreux à cause de gaspillage du matériel. La solution habituelle pour ce type est le transformateur à trois colonnes. La figure (I.11) illustre sa formation en partant de trois transformateurs monophasés figure (I.11.a), à la place de six colonnes on a besoin seulement de quatre colonnes figure (I.11.b).

La somme des trois flux déphasés de 120° étant nulle en régime équilibré, on peut même renoncer à la colonne centrale dans la figure (I.11.b) en pointés avec épargne supplémentaire de matériels. Si en fin on ramène les trois colonnes restantes dans un plan figure (I.11.c), on obtient une solution très simple présentant une légère dissymétrie magnétique qui cependant ne perturbe pas les bons fonctionnements.

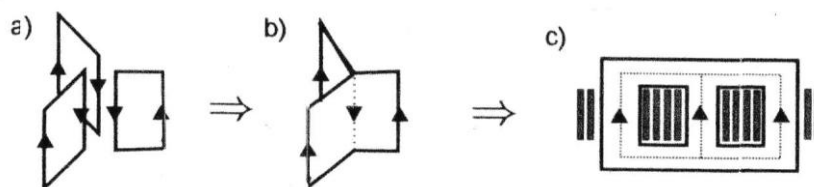


Figure (I.11) : Formation de transformateur triphasé.

I.3.2.2.b) Modes de couplages des enroulements : [2]

Les enroulements des tensions primaires et secondaires des trois phases peuvent être connectés en étoile, en triangle ou en zigzag figure (I.12). On obtient ainsi une multitude de

combinaison possible ou de modes de couplages. Les modes les plus importants pour la technique des réseaux d'énergie électrique sont montrés dans la figure, chaque mode (appelé aussi groupe horaire) est caractérisé par des symboles.

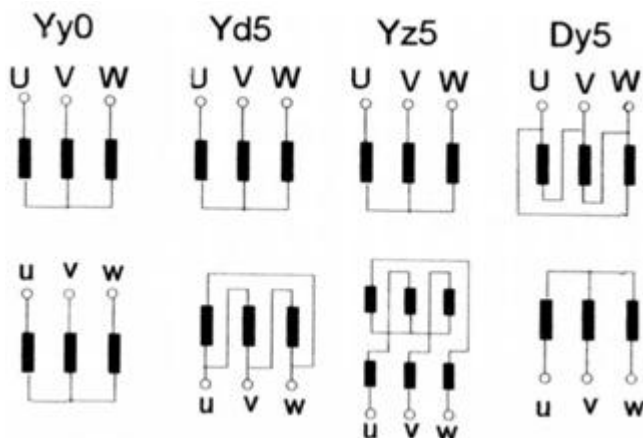


Figure (I.12) : Modes de couplage de transformateur triphasé.

I.3.2.2.c) Classification des transformateurs : [7]

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

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

I.3.2.2.d) Transformateurs de puissance :

La Figure (I.13) représente quelques types des transformateurs de puissance.

➤ **Figure (I.13.a)** : Transformateur à l'huile avec niveau d'isolement primaire et secondaire jusqu'à 36 KV , ajustable par commutateur hors tension, avec enroulements en cuivre.

➤ **Figure (I.13.b)** : Transformateur de puissance **TTHI** immergé dans l'huile ou sec enrobé époxy pour des puissances de 100 à 1250 KVA en complément d'une large gamme de transformateurs de distribution en HTA/HTI.

➤ **Figure (I.13.c)** : Transformateur de puissance **SMIT** (5 à 1000 MVA).

➤ **Figure (I.13.d) :** Transformateur SEC avec une auto-extinguibilité en cas d'incendie, résistant aux variations de charge et aux surcharges, et insensibilité à la pollution et à la condensation.

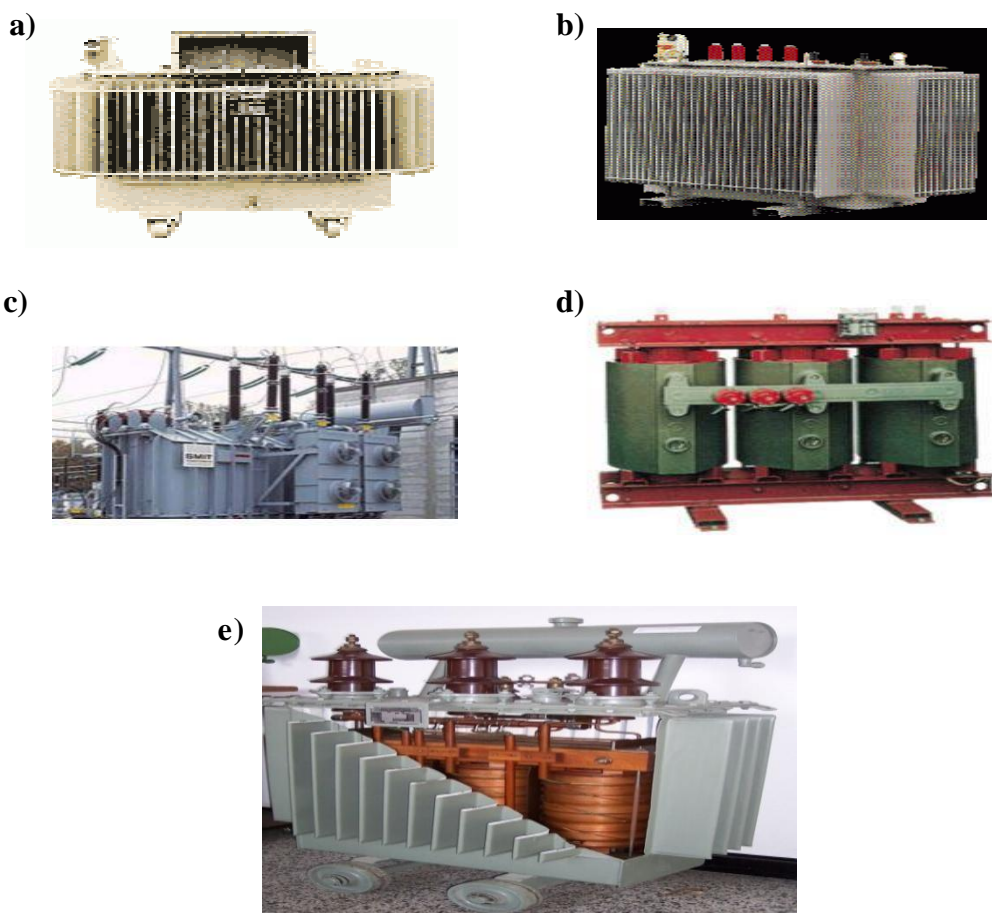


Figure (I.13) : Différents types des transformateurs de puissance.

I.3.3) Isolation et refroidissement des transformateurs :

En ce qui concerne l'isolement on distingue les transformateurs isolés aux résines d'enduction, au SF₆ et aux papiers imprégnés à l'huile minérale.

Les deux premiers sont employés jusqu'aux moyennes tensions, pour les petites et moyennes puissances alors que les transformateurs à l'huile minérale peuvent être utilisés jusqu'aux tensions et puissances les plus élevées.

Avec le refroidissement à l'air employés pour les petites et moyennes puissances, la surcharge possible est petite, le refroidissement à l'huile (et surtout le refroidissement à circulation d'huile) permet des surcharges temporaires nettement plus élevées.

Chapitre II :



Surtensions sur les réseaux électriques.

II.1) Définition des surtensions :

On définit par phénomène transitoire, l'évolution des surtensions entre deux états de fonctionnement permanent. On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale. [10]

Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets. Les perturbations peuvent conduire à :

- des interruptions courtes (réenclenchements automatiques sur les réseaux de distribution publique MT par lignes aériennes).
- des interruptions longues (intervention pour changement d'isolants détruits, voire remplacement de matériel). Pour cela, la compréhension préalable des différents types de surtension est indispensable, c'est l'objet de ce chapitre. [11]

II.2) Origine des surtensions:

Les surtensions peuvent avoir pour origine:

II.2.1) Surtension d'origine interne: [2,5]

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

- Coupure ou enclenchement des circuits, dites surtensions de manœuvre ou surtensions de commutations.
- Surtension d'amorçage d'arc lors d'un court-circuit monophasé :
 - Amorçage entre enroulement (HT/BT) dans un transformateur.
 - Amorçage entre conducteurs haute tension et les masses du poste de transformation.
 - Amorçage entre canalisations qui se croisent ou sont fixées sur les mêmes supports, alimentées par des tensions différentes.

- Par ferro-résonance.
- Mise sous tensions des lignes.
- Enclenchement et déclenchement des charges.

Les surtensions ont des composantes à la fréquence du réseau et d'autres à la fréquence ou les fréquences propre du réseau. Ces fréquences propres se situent entre 100Hz et 50 kHz.

II.2.1.1) Surtensions de manœuvres :

Ce type de surtensions apparait sur les réseaux électriques subissant des modifications rapides de leurs structures, ces surtensions se propagent en général sous forme d'ondes haute fréquence à amortissement rapide. L'étude statique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des ondes représentées sur la figure (II.3).

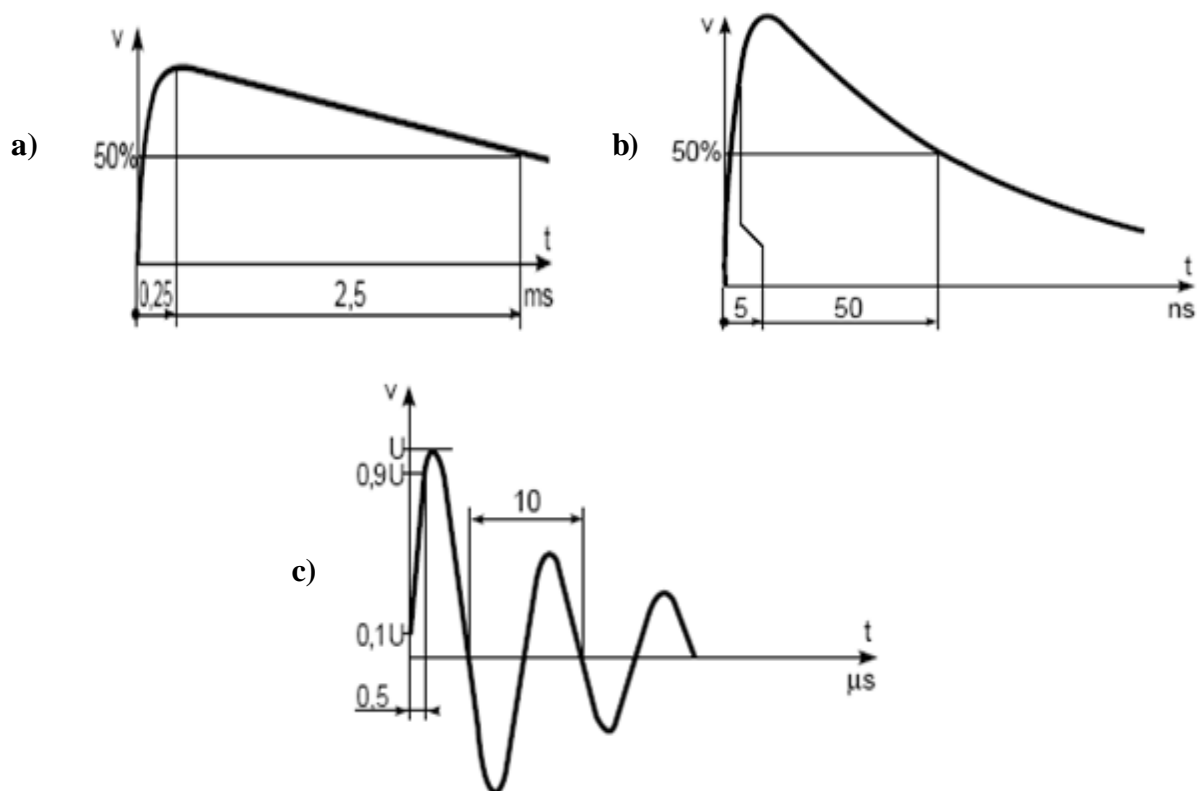


Figure (II.3): Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre.

- a) Onde 250/2500 μs dite onde longue amortie.
- b) Onde 5/50 ns dite onde impulsionnelle récurrente.
- c) Onde 0,5 μs/100 kHz dite onde sinusoïdale amortie.

II.2.1.1.a) Surtension due à la coupure d'un courant inductif : [6]

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

En effet, la coupure d'un circuit, tel que celui représenté sur la figure (II.1.a), entraîne une brusque variation de l'intensité du courant électrique parcourant l'élément d'inductance L ; celui-ci engendre alors, dans le circuit, une surtension V_{st} , tel que :

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

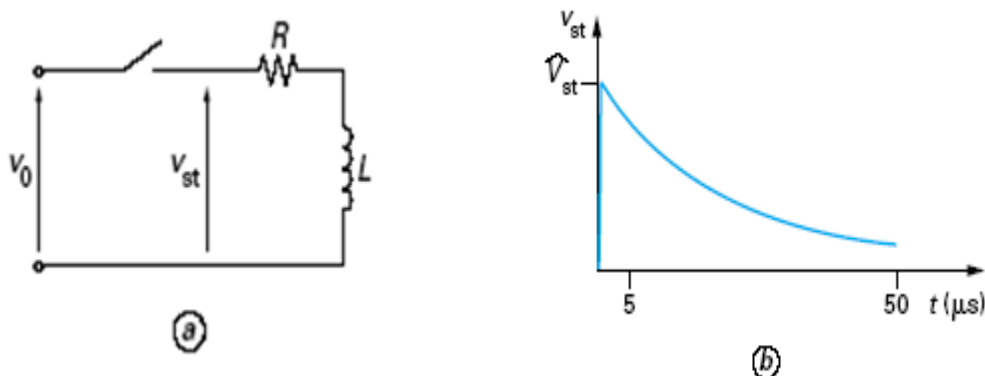


Figure (II.1): Forme de décharge inductive due à la coupure d'un circuit avec inductance L

V_0 tension aux bornes du circuit avant la coupure.

II.2.1.1.b) Surtension due à la coupure d'un courant capacitif : [6]

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

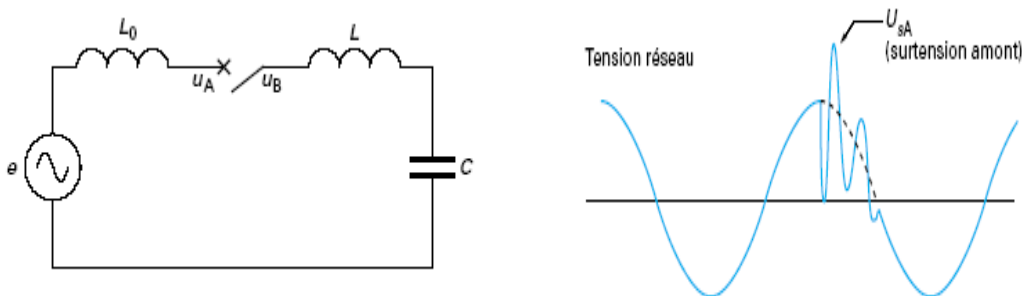


Figure (II.2) : Forme de la surtension lors du couplage au réseau d'une batterie de condensateurs.

II.2.1.2) Surtension provoquée par un défaut d'isolement : [11]

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

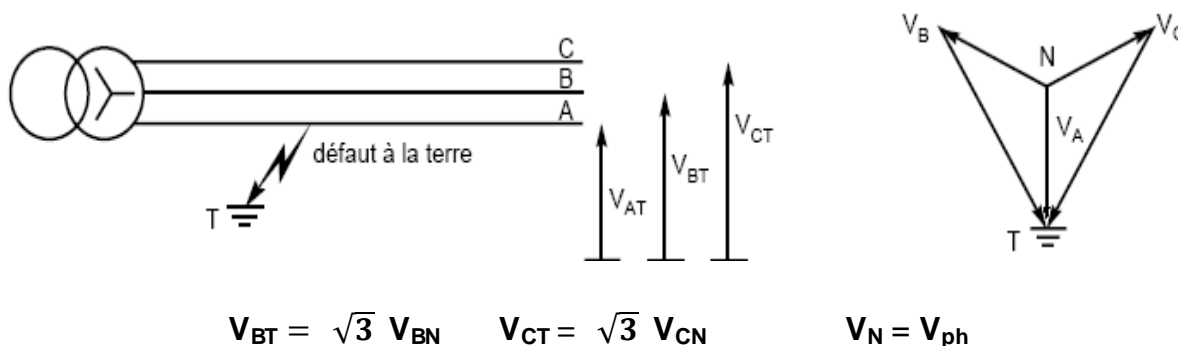


Figure (II.3): Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.

II.2.1.3) Surtensions par ferro-résonance:

La ferro-résonance est un phénomène de résonance affectant les réseaux électriques impliquant une inductance non linéaire et une capacité alimentées par une source sinusoïdale. Un réseau ferro-résonnant comporte en général deux états : un état stable, correspondant au régime nominal du réseau (associé en général à un état non saturé de

l'inductance), et un ou plusieurs autres états dits ferro-résonnants (associés en général à un état de saturation de l'inductance), où les courants sont non sinusoïdaux, et les courants et tensions sont hors de leur valeur nominale. Les réseaux ferro-résonnants peuvent avoir des comportements chaotiques, difficiles à analyser ou simuler, car la valeur du courant et de la tension à un instant donné dépendant très fortement des valeurs initiales. La transition de l'état nominal à un état perturbé requiert un phénomène transitoire engendre une surtension.

II.2.1.4) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti): [11]

Une surtension peut se produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. Elle est due à un phénomène de résonance qui se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le long de la ligne. Le facteur de surtension est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300 km et de 1,16 pour une ligne de 500 km. Ces valeurs sont sensiblement les mêmes pour les lignes HT et THT. Ce phénomène se produit en particulier lorsqu'une ligne longue est brusquement déchargée.

II.2.2) Surtension d'origine externe:

II.2.2.1) Nature de la foudre: [1]

Par un procédé qui n'est pas entièrement compris, il se produit à l'intérieur de certains nuages une séparation des charges positives et négatives, les charges positives allant vers le haut du nuage alors que les charges négatives restent en bas. Cependant la charge négative proche de la surface de la terre chasse des électrons de celle-ci, de sorte que la région située au dessous du nuage prend une charge positive par influence. Par conséquent, des lignes de champ et une **d.d.p** s'établissent entre le bas du nuage et la terre.

À mesure que le transfert de charge se poursuit à l'intérieur du nuage, le champ électrique en dessous devient très fort, pouvant atteindre la valeur critique d'ionisation de 3MV/m. lorsque le champ devient assez intense, un éclair jaillit entre le nuage et la terre. La décharge d'un éclair est accompagnée d'un transfert d'électricité de 0.2 à 20 coulomb sous une tension de plusieurs centaines de milliers de volts.

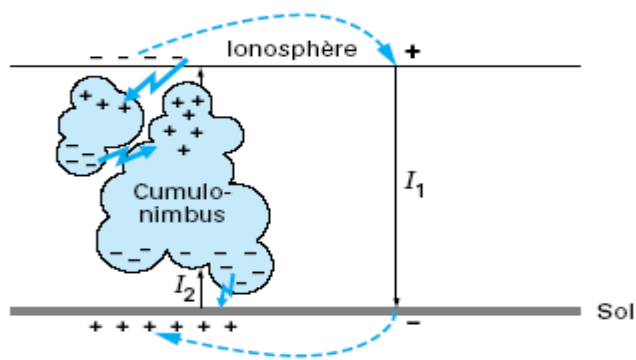


Figure (II.4): Circuit atmosphérique. « I_2 courant associé au coup de foudre ». [21]

II.2.2.2) Mécanisme du coup de foudre : [21]

Les chercheurs ont montrés que **85 à 90%** des foudres sont négatives et que seul **10 à 15%** des foudres sont descendantes. Le déroulement d'un coup de foudre négatif fait intervenir une série d'impulsions dont la représentation schématique est donnée sur la figure (II.5). La première impulsion débute par une série de pré décharges, qui trace un chemin préférentiel (précurseur par pas), du nuage vers le sol pour un coup de foudre descendant, sous la forme d'un canal ionisé. Dès que ce chemin est continu entre le nuage et le sol, la décharge principale va s'effectuer du sol vers le nuage (arc en retour). Cette première impulsion est en général la plus longue et fournit au sol plus d'énergie que les suivantes.

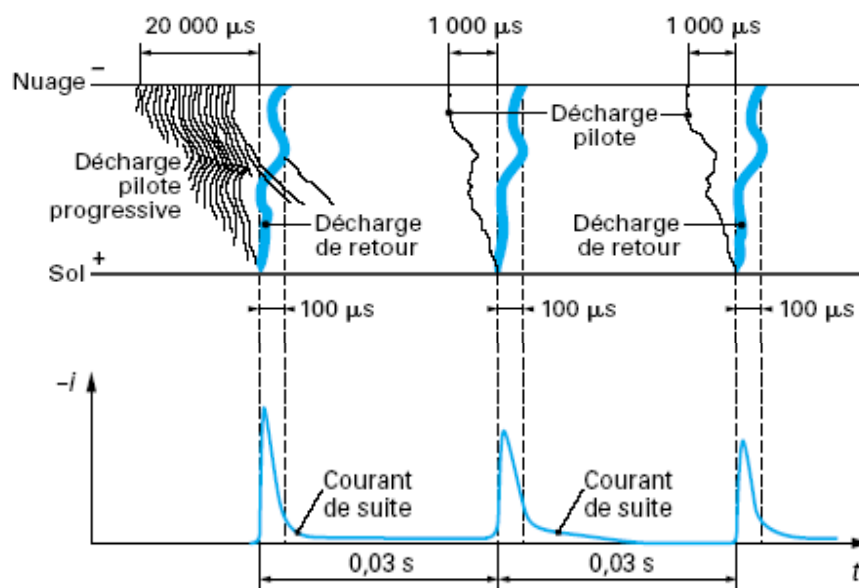


Figure (II.5): Mécanisme du coup de foudre.

II.2.2.3) Schéma électrique équivalent: [21]

Le schéma équivalent pour les décharges est donné sur la Figure (II.6). Les valeurs de la résistance R et de l'inductance L dépendent du chemin pris par le courant de décharge i . La différence de potentiel correspondante: $u = R.i + L \frac{di}{dt}$ n'est donc pas une donnée intrinsèque du coup de foudre, qui ne peut être défini que par son courant, c'est-à-dire par une surintensité.

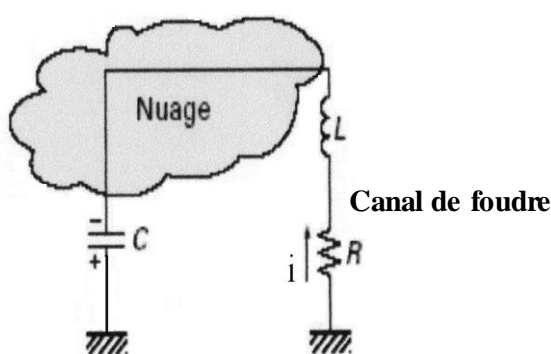


Figure (II.6): Décharges: schéma électrique équivalent.

II.2.2.4) Surtensions dues à la foudre:

Dans tous les circuits électriques au voisinage du canal de la foudre, une tension proportionnelle au courant de foudre et à l'inductance mutuelle entre circuit et canal de foudre sera induite. Les réseaux d'énergie électrique sont particulièrement touchés par les impacts directs de la foudre soit dans les conducteurs, dans les fils de garde ou dans les pylônes des lignes. Analysons les trois cas suivant:

a) Impact direct dans le conducteur d'une ligne aérienne : [2]

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

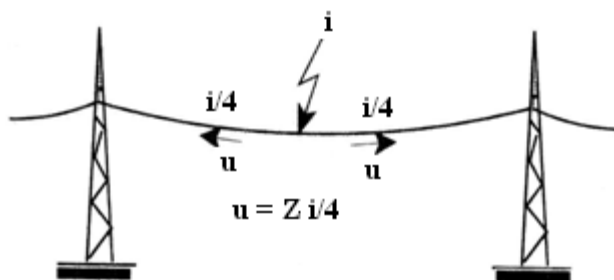


Figure (II.7): Coup de foudre dans les conducteurs d'une ligne.

b) Impact direct dans le fil de garde : [2]

Si la foudre tombe sur le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique (pylônes) par rapport à la terre. La surtension U correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV. $U = R \cdot \frac{i}{4} + \frac{1}{4} L \frac{di}{dt}$ avec R , résistance en onde raide de la prise de terre et L , l'inductance du pylône.

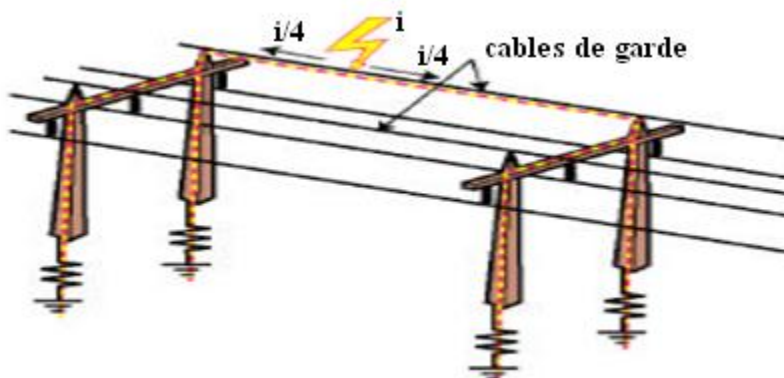


Figure (II.8): Coup de foudre dans le fil de garde.

c) Impact dans un pylône mis à la terre : [2]

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

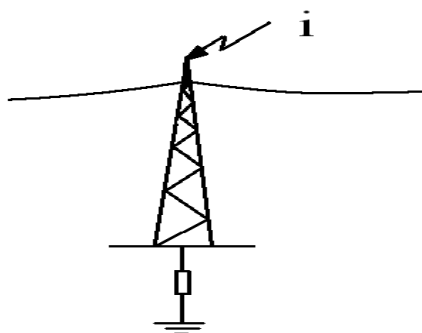


Figure (II.9): Coup de foudre dans le pylône d'une ligne aérienne.

II.2.2.5) Paramètres de la foudre : [1,2]

Etant donné que les ondes de chocs dues à la foudre sont toujours de courte durée, l'organisme de normalisation « CEI 60071-1 » a établi une onde de tension standard représentée à la figure (II.10), cette onde de foudre a une raideur en $1.2 \mu\text{s}$ (durée du front) et décroît à la moitié de l'amplitude en $50 \mu\text{s}$ (mi valeur) pour cette raison, l'onde habituellement désignée par l'appellation « $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ ».

La caractéristique de la foudre est déterminée par les quatre paramètres donnés dans la figure (II.11), la valeur de crête \hat{i} est responsable des surtensions directes et le gradient maximum $(\frac{di}{dt})_{\text{max}}$ des surtensions indirectes ou induites. La charge $q = \int i dt$ détermine l'énergie libérée au point d'impact de la foudre lorsque le courant poursuit son chemin sous forme d'arc en traversant un isolateur. L'intégrale du carré $\int i^2 dt$ détermine la contrainte thermique des conducteurs et la force entre les conducteurs parcourus par le courant de foudre.

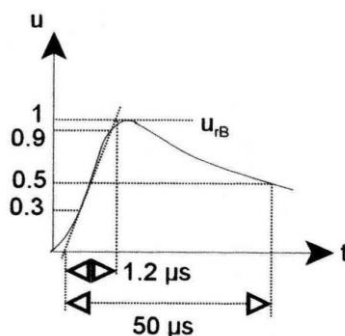


Figure (II.10): allure de l'onde de tension due aux chocs de foudre.

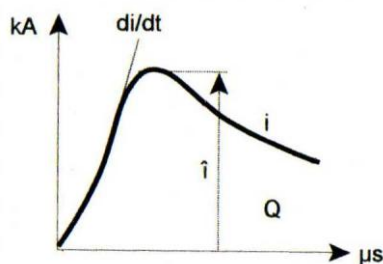


Figure (II.11): Allure du courant de foudre et les paramètres de la foudre.

II.2.2.6) Effets de la foudre : [21]

Ils sont de deux ordres : mécanique et électrique.

II.2.2.6.a) Les effets mécaniques :

- D'une part, l'onde de choc résultant de la détente brusque de l'air porté à 30000 K dans le canal ionisé.
- D'autre part, la force électromagnétique due au champ électromagnétique créé par la circulation du courant de foudre dans le canal ionisé.

II.2.2.6.b) Les effets électriques :

Proviennent des très fortes différences de potentiel dues à causes de la circulation du courant de foudre, de loin la plus importante et de l'induction électrique correspondant au champ électrique ; elle est, par exemple, responsable de l'apparition de surtensions entre un équipement mis à la masse et son boîtier qui ne l'est pas. Les conséquences des effets électriques de la foudre sur les équipements et l'homme. Les effets électriques de la foudre sur les câbles enterrés ou conducteurs aériens sont aussi à prendre en compte, de fait, ces derniers sont de très bons capteurs de la foudre figure (II.12) et transmettent une partie du courant de foudre aux équipements électriques et industriels. Notons enfin que la décharge se comporte comme un émetteur de fréquence dont le spectre s'étale des très basses fréquences jusqu'à plus de 5KHz.

II.3) Conclusion :

Les surtensions apparaissent dans une ligne électrique sous la forme des ondes qui se propagent le long de cette dernière. Les importantes pertes par effet Joule et par effet couronne aplatissent la forme de cette onde et diminuent sa valeur crête. Cette onde continue à se propager plus loin pour aboutir finalement un poste de transformation, c'est là que son arrivé peut produire des ravages.

Les surtensions dans les transformateurs peuvent endommager leurs enroulements et les mettre hors service, pour cette raison il faut prévoir des dispositifs de protection contre ces dernières.

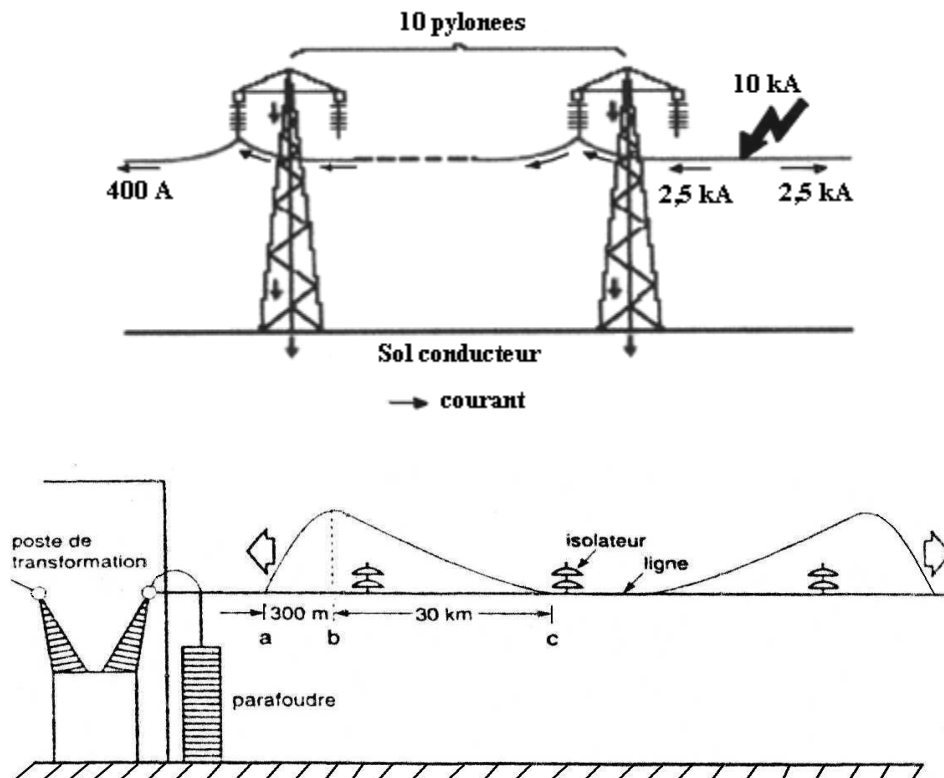


Figure (II.12) : Exemple de la transmission d'un courant de foudre sur une ligne aérienne. [1]

Chapitre III :

Protection des réseaux électriques contre
les surtensions.

III.1) Introduction: [3]

Tout réseau de distribution électrique englobe une grande quantité de matériel supplémentaire pour la protection des générateurs, des transformateurs et des lignes de transport elles-mêmes.

La protection des réseaux électrique contre les surtensions est devenue aujourd'hui un problème préoccupant par suite de nombreuse sources de ces surtensions auxquelles le réseau peut être exposé, cette protection pour être efficace nécessite d'être prise en compte dès le début de leurs conception, cela suppose donc que le concepteur ait une bonne connaissance de ces sources et des moyennes de protection.

Les dispositifs de protection des réseaux électriques contre les surtensions sont généralement de deux types: l'éclateur et le parafoudre. L'éclateur est encore utilisé sur les réseaux de distribution et de transport d'énergie, partout où l'isolation des matériels à protéger est compatible avec la protection fournie par les éclateurs, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit d'isolation dans l'air ou de matériels pour lesquels il n'est pas économiquement intéressant de rechercher de très bas niveaux d'isolement : matériels à haute tension HTA ou moyenne tension 30 KV [3], et certains matériels à haute tension HTB 90 KV et plus [3], tels que, par exemple les réducteurs de mesure (transformateurs de mesure). Il est nécessaire, en revanche, d'utiliser des parafoudres dès que l'on veut réduire l'isolement des matériels. Ces dispositifs présentent de meilleures caractéristiques de protection, moyennant toutefois un coût plus élevé.

III.2) Rappels sur les éclateurs: [3]

L'éclateur est le plus simple, le plus ancien, le plus robuste et le moins cher des moyens de protection. Il est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre. L'intervalle d'air entre les deux électrodes constitue un point faible dans l'installation du réseau, évitant ainsi qu'un amorçage n'ait lieu en un point du réseau où il pourrait avoir des conséquences graves. La distance entre ces deux électrodes est réglable et détermine la tension d'amorçage. La forme et la nature des électrodes sont très variables.

III.2.1) Avantages et inconvénients : [3]

Le principal avantage de l'éclateur est son prix faible. Il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction. Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans de nombreux inconvénients :

➤ Une fois amorcé entre les deux électrodes, l'arc ne se désamorce pas spontanément. Le défaut artificiel ainsi créé doit être éliminé par l'action des protections et du ou des disjoncteurs associés. De ce fait, l'éclateur ne doit surtout pas fonctionner lors de surtensions de manœuvres. Il est, par ailleurs, à l'origine de coupures brèves très gênantes pour la qualité de service, spécialement en haute tension.

➤ Le fonctionnement de l'éclateur conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité, il dépend de nombreux paramètres tels que l'état d'ionisation de l'air, les conditions atmosphériques : les éclateurs sont sensibles aux agressions extérieures (Neige, paille, animaux, etc.) pour les plus basses tensions (En particulier pour le réseau à 30 KV) où les distances entre les électrodes des éclateurs sont faibles, mais surtout de la vitesse de montée de la surtension appliquée. En particulier, lors des surtensions à front raide, la tension réellement atteinte sur l'appareil à protéger peut dépasser le niveau dit de protection de l'éclateur. De ce point de vue, il est préférable de traduire les caractéristiques de protection des éclateurs par des réseaux de courbes plutôt que par une simple valeur.

III.3) Parafoudres : [3]**III.3-1) Définition : [3]**

Les parafoudres sont des dispositifs statiques chargés de limiter, en un point donné du réseau, l'amplitude des surtensions qui peuvent se produire. Aussi constitué de deux parties, la partie supérieure ou active est reliée à un conducteur de ligne, la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance. La limitation de surtension est faite en écoulant l'énergie à la terre, ces surtensions peuvent être soit d'origine atmosphérique (externes), soit consécutives à des manœuvres de l'appareillage ou à des phénomènes de résonance, auquel cas elles sont dites (internes).

Les appareils les plus perfectionnés, tels les para-surtenseurs à oxyde de zinc (ZnO), sont constamment connectés au réseau car ils sont pratiquement isolants à la tension nominale en cas de surtension, leurs résistances deviennent temporairement très faibles, mais ils redeviennent automatiquement isolants dès que la tension retrouve sa valeur normale. Ce sont des appareils très précieux car ils jouent ainsi leur rôle d'écarter sans entraîner d'interruption de service.

III.3.2) Types des parafoudres : [3]

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

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

Ce dernier, apparu au début des années soixante-dix, est devenu très séduisant, dans un premier temps, en haute tension, puis, assez rapidement, en moyenne tension. Les parafoudres à oxyde de zinc sont, en effet, plus compacts, de conception plus simple et offrent des caractéristiques techniques supérieures. Leur coût est maintenant très compétitif. Enfin, signalons que les progrès technologiques dans le domaine des isolations externes, associés aux nouvelles perspectives de mise en œuvre des varistances ZnO, ont permis, dès le début des années quatre-vingt, le développement d'une nouvelle génération de parafoudres, visant à mieux exploiter les avantages de la technologie ZnO. Il s'agit des parafoudres à oxyde de zinc à enveloppe en matériau synthétique.

III.3.2.1) Parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs : [3]

Moyennant un coût beaucoup plus élevé, le parafoudre permet d'éviter la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur. Ses avantages sur l'éclateur sont:

- Une dispersion moins grande de la tension d'amorçage.
- Une extinction spontanée de l'arc.

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

III.3.2.1.a) Parafoudre moyenne tension (HTA) : [3]

- **Constitution : [3]**

Ce parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances, ou résistances non linéaires, au carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs, figure (II.1). L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote), l'étanchéité est primordiale pour éviter la corrosion des éclateurs.

En subdivisant l'intervalle d'amorçage en plusieurs éclateurs élémentaires, on stabilise les caractéristiques d'amorçage du parafoudre. Les éclateurs sont constitués de disques de laiton emboutis, empilés et séparés par de petites pièces isolantes en céramique. Les résistances variables sont constituées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disques dont les faces parallèles sont métallisées et le pourtour recouvert d'un revêtement isolant destiné à éliminer les contournements.

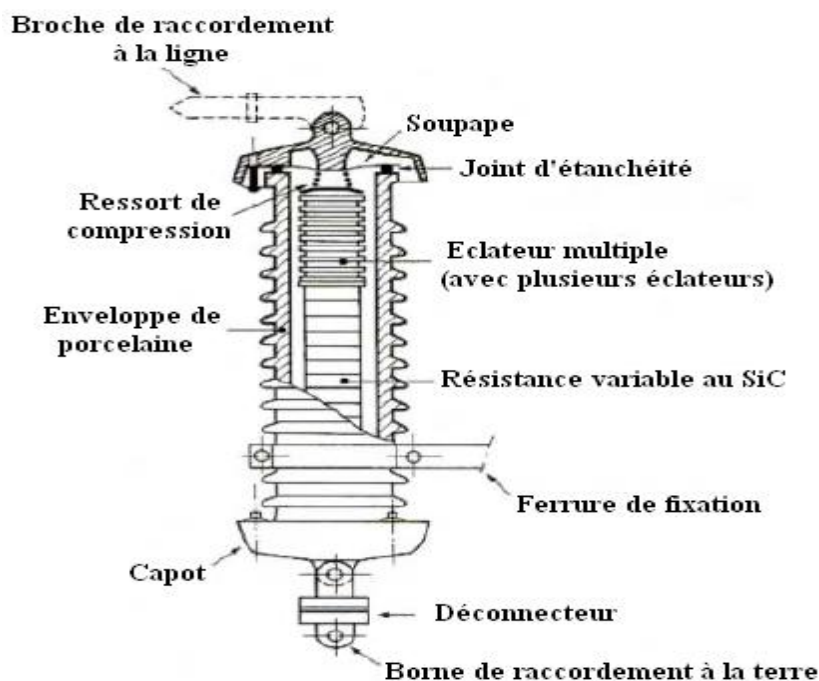


Figure (III.1) : Parafoudre HTA au carbure de silicium et à éclateurs. « Constitution »

- **Principe de fonctionnement :**

En fonctionnement normal, les éclateurs ne sont pas conducteurs. Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage, figure (III.2), les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers des résistances dont la valeur est d'autant plus faible que le courant est élevé (caractéristique non linéaire), ce qui permet de limiter la surtension. Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la tension à ses bornes diminue et la non linéarité des résistances entraîne une décroissance plus rapide du courant qui peut alors être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro. Ainsi, la surtension est écrêtée sans provoquer ni de défaut artificiel ni d'onde coupée, puisque la présence des résistances en série avec les éclateurs évite l'effondrement de la tension après l'amorçage

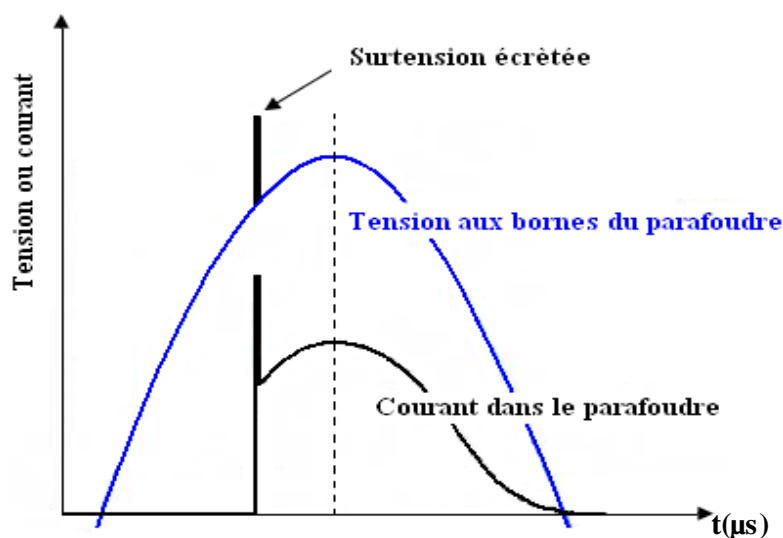


Figure (III.2) : Parafoudre HTA au carbure de Silicium et à éclateurs.

« Principe de fonctionnement »

III.3.2.1.b) Parafoudre haute tension (HTB) : [3]

- **Constitution : [3]**

Le coût de l'isolement étant d'autant plus important que la tension de service est élevée, on cherche à améliorer en haute tension HTB et très haute tension le niveau de protection des parafoudres. Cela veut dire qu'il faut réduire, d'une part, les tensions d'amorçage et, d'autre part, la tension résiduelle au courant nominal de décharge.

Pour diminuer, en toute sécurité, les tensions d'amorçage, il faut les stabiliser davantage. Pour ce faire, on adjoint au montage utilisé en HTA des systèmes de répartition de tensions composées de résistances non linéaires et de condensateurs, figure (III.3). Ces systèmes permettent de maîtriser la tension appliquée à chaque éclateur individuel. Afin de diminuer les tensions d'amorçage, les éclateurs sont modifiés et sont ici constitués de deux électrodes de cuivre en regard, placés dans une chambre en céramique de forme cylindrique pour faciliter leur empilage avec les résistances non linéaires. La diminution de la tension résiduelle au courant nominal de décharge est obtenue par l'emploi d'éclateurs à soufflage magnétique. Les arcs, une fois allumés, sont étirés dans la chambre en céramique sous l'effet d'un champ magnétique créé par une bobine parcourue par le courant traversant le parafoudre. Le profil cannelé de la chambre en céramique favorise l'allongement de l'arc. Ainsi, la tension d'arc étant considérablement augmentée, le parafoudre se désamorce spontanément bien avant le passage par zéro de la tension de service, limitant ainsi l'énergie à dissiper par les résistances non linéaires et facilitant la d'ionisation de l'air dans les chambres en céramique.

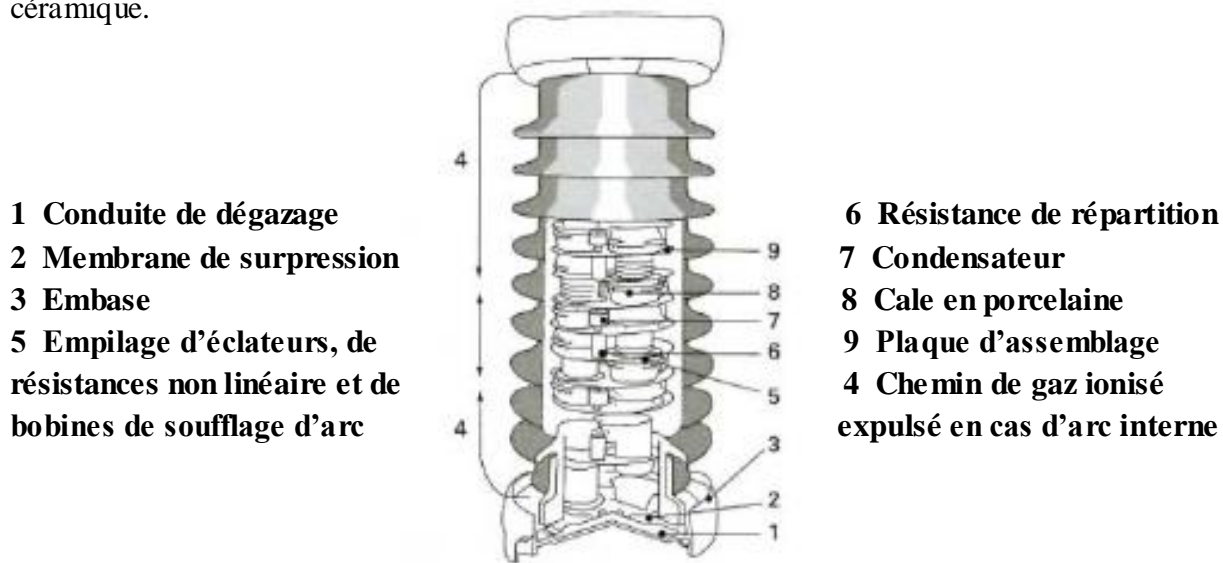


Figure (III.3) : Parafoudre HTB au carbure de Silicium et à éclateurs. « Constitution »

• **Principe de fonctionnement : [3]**

La figure (III.4) illustre le fonctionnement d'un parafoudre HTB au carbure de silicium et à éclateurs.

➤ En régime permanent figure (III.4.a), le parafoudre est parcouru par le très faible courant (de l'ordre du milliampère) drainé par le système de répartition de tension.

➤ Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage figure (III.4.b), les éclateurs s'amorcent et le courant augmente alors rapidement. La bobine présente vis-à-vis de ce courant une impédance élevée et le courant s'écoule par l'intermédiaire des résistances non linéaires placées en parallèle sur la bobine de soufflage.

➤ Après le passage de la surtension figure (III.4.c), les éclateurs fortement ionisés ne se désamorcent pas. Le courant traversant le parafoudre est alors issu du réseau. Son amplitude et ses variations sont beaucoup plus faibles, si bien que l'impédance de la bobine diminue considérablement et celle-ci va être, à son tour, parcourue par le courant. Sous l'effet du champ magnétique créé par cette bobine, l'arc est étiré dans la chambre en céramique. La tension d'arc augmente.

➤ Lorsque la tension d'arc atteint la tension appliquée au parafoudre, celui-ci se désamorce et retrouve le régime permanent figure (III.4.d).

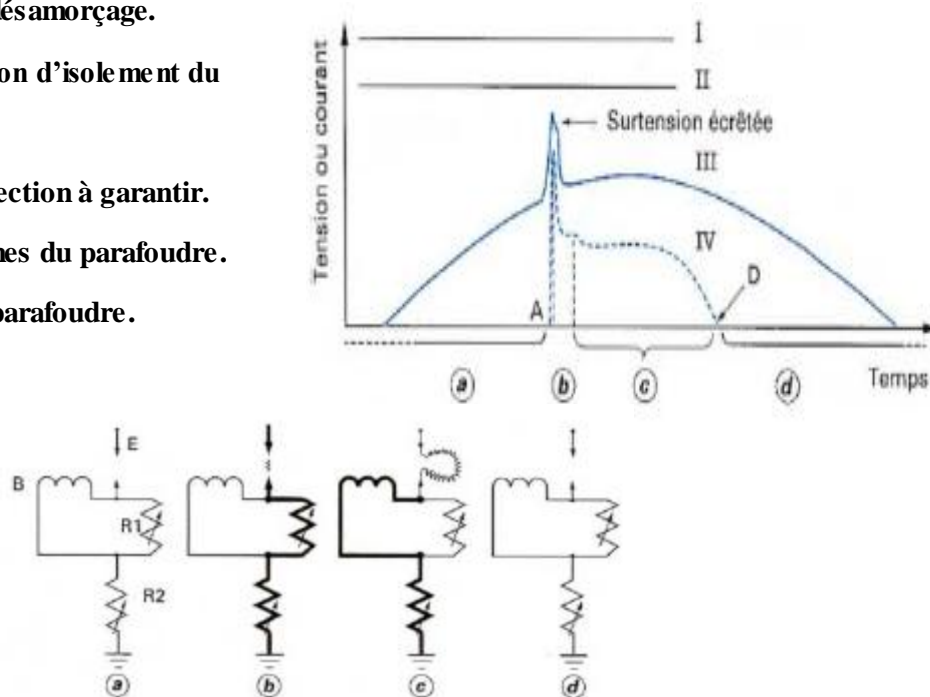
A amorçage. D désamorçage.

I niveau de la tension d'isolement du matériel à protéger.

II niveau de la protection à garantir.

III tension aux bornes du parafoudre.

IV courant dans le parafoudre.



R1, R2 résistances non linéaires.

Figure (III.4) : Parafoudre HTB au carbure de Silicium et à éclateurs.

« Principe de fonctionnement »

III.3.2.2) Parafoudres à Oxyde de Zinc :

C'est au cours des années soixante que des varistances constituées d'une céramique à base d'Oxyde de Zinc sont apparues sur le marché pour la protection des réseaux électriques. Dès 1970, des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces céramiques.

Pour l'électrotechnicien, ces composants présentent deux avantages essentiels :

- D'une part, ils ont un coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs.
- D'autre part, leur capacité d'absorption d'énergie est élevée et on peut les utiliser sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'au transport d'énergie à très haute tension (225 ou 400 KV).

- **Constitution : [3]**

Alors que la technologie des parafoudres à éclateurs dépend fortement du niveau de tension considéré, ces nouveaux composants sont utilisés de la moyenne tension aux plus hautes tensions, constitués simplement d'un empilage de résistances non linéaires à Oxyde de Zinc. Parfois, mais uniquement pour les très hautes tensions, ils comportent quelques capacités additionnelles placées en parallèle sur les varistances à la partie supérieure des parafoudres et destinées à améliorer la répartition de tension le long de la colonne de varistance. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou en matériau synthétique.

Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonyme de facilité de construction. La fabrication des céramiques requiert, en effet, beaucoup de soin et de savoir-faire, car leurs caractéristiques et leur stabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible. Les céramiques sont constituées principalement d'Oxyde de Zinc (pour 90 % en masse) et d'un mélange d'autres oxydes (Oxydes de Bismuth, de Cobalt, de Manganèse, de Chrome, d'Etain, etc.). Ces différents oxydes, de pureté et granulométrie soigneusement contrôlées, sont mélangés en phase aqueuse. Le mélange obtenu est ensuite séché, traité thermiquement (vers 700 C°), puis broyé. Après y avoir introduit des liants organiques, la poudre est compactée sous forme de disques.

Les pièces ainsi réalisées sont traitées thermiquement à une température de l'ordre de 600 C° afin d'éliminer les liants organiques, puis elles sont frittées à très haute température (vers 1200 C°) de façon à densifier l'ensemble et à obtenir l'effet de non-linéarité recherché. Les pastilles sont ensuite revêtues, sur leur pourtour, d'une couche généralement de nature vitreuse, qui favorise la tenue à long terme, puis d'une couche de résine, assurant la tenue diélectrique de la varistance. Elles sont également métallisées, sur chacune des faces parallèles, par projection d'aluminium en fusion

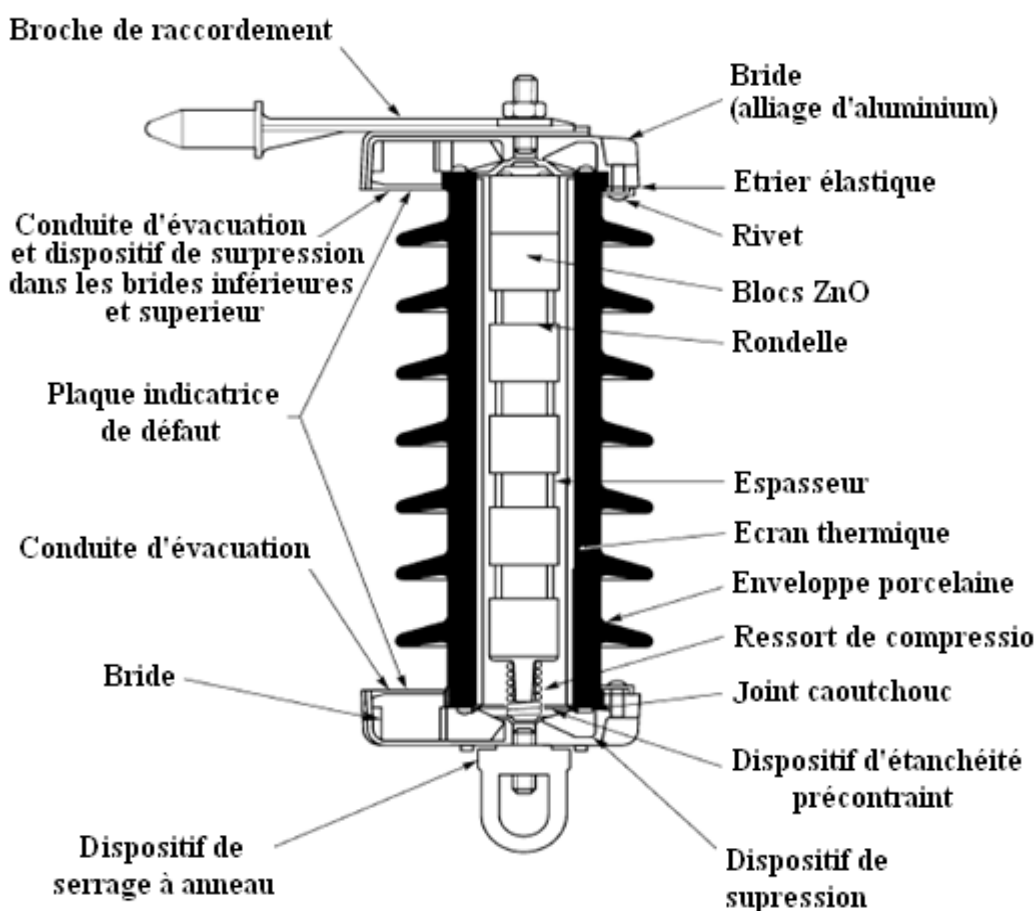
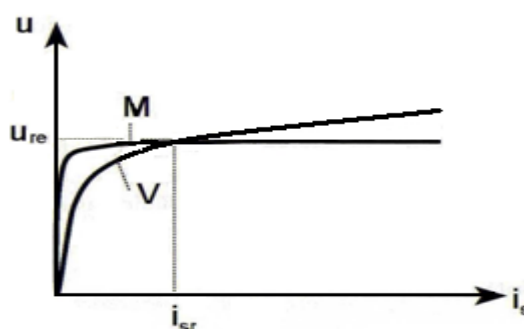


Figure (III.5) : Parafoudre à Oxyde de Zinc. « Constitution » [11]

- **Principe de fonctionnement :** [3]

Tout l'intérêt de la varistance à base d'Oxyde de Zinc réside dans sa caractéristique courant-tension figure (III.6). Cette caractéristique idéale presque rectangulaire sous la tension de service permanent, son impédance est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible (inférieur à 1 mA).

Lorsqu'une surtension apparaît, la résistance diminue rapidement ; la varistance écrête la surtension en lui livrant un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0,1 mA à 10 KA, la tension est limitée à l'instant où le courant s'instaure, à des valeurs proches de la tension d'amorçage.



V parafoudre classique. M parafoudre à Oxyde de Zinc.

Figure (III.6) : Caractéristique courant-tension d'un parafoudre. [2]

« Principe de fonctionnement »

- **Dimensionnement :**

À partir des caractéristiques élémentaires d'une céramique, dimensionner un parafoudre consiste à définir le nombre de varistances élémentaires à associer en série **et/ou** éventuellement en parallèle. Deux exigences contradictoires limitent le choix du nombre de pastilles à placer en série :

- D'une part, à toute onde de courant correspond une tension résiduelle directement proportionnelle au nombre de céramiques en série, la recherche d'un bas niveau de protection limite donc le nombre de varistances à associer en série.

- D'autre part, les phénomènes de vieillissement évoqués précédemment sont d'autant plus sensibles que la tension appliquée à chaque élément est importante, à tension de service donnée, cela impose un nombre minimal de pastilles à placer en série.

Par ailleurs, le parafoudre doit être capable, en toutes circonstances, de dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie qui apparaît entre ses bornes. Si l'on représente sur une même courbe figure (III.7) en fonction de la température T , d'une part, la puissance PV

dissipée par les varistances (donc à dissiper par le parafoudre) et, d'autre part, la puissance P_P que peut dissiper ce parafoudre, on en déduit qu'à l'équilibre le point de fonctionnement se situe en A. Lors de l'écrêtage d'une surtension, l'échauffement des varistances est adiabatique. Le point de fonctionnement se déplace sur la courbe $P_V = f(T)$. Si le nouveau point de fonctionnement est en A', la puissance à dissiper est inférieure à la puissance dissipable. Le parafoudre peut donc se refroidir et le point de fonctionnement revenir en A. En revanche, si l'échauffement des varistances est tel que le point de fonctionnement est en A'', la puissance à dissiper est supérieure à la puissance dissipable par le parafoudre et c'est l'emballement thermique.

L'échauffement des varistances doit donc être limité à ΔT_{\max} . Pour respecter cet impératif, on peut agir de deux façons :

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

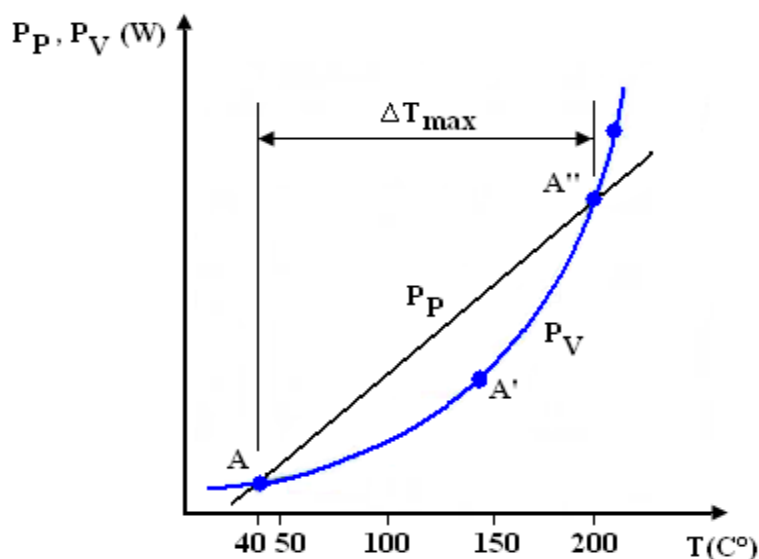


Figure (III.7) : Fonctionnement et équilibre thermique d'un parafoudre à Oxyde de Zinc.

P_V puissance dissipée par les varistances.

P_P puissance que peut dissiper le parafoudre.

III.3.2.3) Nouveaux parafoudres, (parafoudres à enveloppe synthétique) : [3]

L'architecture interne particulièrement simple et, surtout, la suppression des éclateurs a ouvert la voie à des nouvelles applications pour les parafoudres. Depuis le début des années quatre-vingt, un nouveau palier technologique a été franchi avec l'émergence des parafoudres à oxyde de zinc à enveloppe synthétique figure (III.8). L'enveloppe de porcelaine a été remplacée par une enveloppe synthétique, soit directement moulée sur la colonne de varistances, soit ménageant une couche d'air entre l'enveloppe et la colonne de varistances. La tenue mécanique du parafoudre est parfois assurée par un enrobage de fibres de verre autour des varistances.

Les avantages principaux du parafoudre à enveloppe synthétique par rapport au parafoudre à enveloppe de porcelaine sont une conception plus simple, une plus grande légèreté, une meilleure étanchéité et un comportement plus favorable en cas de défaillance interne (court-circuit) lors de laquelle les manifestations externes sont très limitées colonne de varistances réduit considérablement les phénomènes de décharges partielles sous l'effet de la pollution externe.

En contrepartie, l'enveloppe en matériau synthétique est plus sujette au vieillissement sous l'action combinée des courants de fuite, de la pollution et du rayonnement solaire. Des essais appropriés de vieillissement accéléré dans des enceintes climatiques spéciales ont dû être mis au point pour garantir le bon comportement à long terme de l'enveloppe. En outre, l'autoextinguibilité des matériaux synthétiques doit être garantie pour éviter de présenter des risques d'incendie.

Les parafoudres à Oxyde de Zinc à enveloppe synthétique sont largement utilisés sur les réseaux de distribution d'énergie. La légèreté de l'enveloppe facilite la pose sous tension et autorise des modes de montage variés (montages inclinés, horizontaux...), ce qui assure une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure efficacité de protection



Figure (III.8) : Parafoudre HTA à Oxyde de Zinc et enveloppe synthétique protégeant un transformateur MT/BT.

« Les parafoudres sont montés en position horizontale au plus près du transformateur ».

III.3.2.4) Parafoudres pour applications spéciales : [3]

Après avoir vérifié qu'il n'y avait pas d'inconvénients à placer directement les varistances à oxyde de zinc dans l'hexafluorure de soufre, on a pu construire des parafoudres sous enveloppe métallique à oxyde de zinc bien moins chers que les parafoudres au carbure de silicium et à éclateurs sous enveloppe métallique, mais encore un peu plus coûteux que des parafoudres de mêmes caractéristiques sous enveloppe de porcelaine. De plus, on peut imaginer d'intégrer les parafoudres à l'appareillage. Comme il n'y a pas d'incompatibilité majeure entre l'huile de transformateur et l'oxyde de zinc, on peut envisager de placer les ainsi les problèmes de vieillissement sous l'effet de la pollution externe et on améliorerait l'efficacité de la protection en réduisant les distances de câblage. En revanche, les avaries de parafoudres se traduiraient par une défaillance du transformateur. D'autres idées ont été proposées, notamment d'intégrer des varistances dans les chaînes d'isolateurs, ce qui présenterait un avantage certain en termes de qualité de service. La difficulté de réalisation technologique ainsi que le coût élevés de cette solution l'ont, pour le moment, écartée de l'industrialisation à grande échelle. Enfin, les avantages procurés par le parafoudre à enveloppe synthétique en termes de légèreté et de sécurité ont permis de trouver un nouveau champ d'application aux parafoudres à haute tension.

Il s'agit de celui des parafoudres de ligne, qui sont installés en parallèle des chaînes d'isolateurs ; leur but est d'éviter le contournement et l'amorçage des isolateurs. Ces parafoudres présentent généralement un grand intervalle d'air, en série avec la partie active, qui s'amorce en cas de surtension, permettant ainsi aux éléments non linéaires du parafoudre d'évacuer à la terre la surintensité, puis de bloquer le courant de suite (c'est-à-dire le courant qui suit l'amorçage) à fréquence industrielle. La principale raison de la présence de cet éclateur série est de réduire la hauteur de l'empilage de varistances qui, si le parafoudre était connecté en permanence au réseau, serait plus important et pourrait, dans certains cas, être géométriquement incompatible avec la chaîne d'isolateurs.

III.3.3) Mise en œuvre et installation des parafoudres : [3]

III.3.3.1) Choix des parafoudres :

Le choix du dispositif de protection, éclateur ou parafoudre, peut être effectué sur la base des critères suivants:

- ✓ **Economique**, car l'éclateur est moins cher que le parafoudre.
- ✓ **Technique**, car l'éclateur provoque une interruption de service et présente une dispersion importante des conditions d'amorçage (assurant donc une moins bonne protection).

Tout dépend ensuite du type de réseau et du niveau d'isolement des différents matériels à protéger. Le problème du choix d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs ou d'un parafoudre à oxyde de zinc se pose à peine car, très rapidement, les parafoudres à oxyde de zinc ont remplacé leurs homologues au carbure de silicium et à éclateurs, surtout pour les hautes et très hautes tensions. Les parafoudres à oxyde de zinc sont, en effet, usuellement considérés comme plus fiables et plus économiques.

Enfin, le choix d'un parafoudre à oxyde de zinc avec une enveloppe de porcelaine ou avec une enveloppe en matériau synthétique ou avec une enveloppe métallique ou intégré dans l'appareillage (dans le transformateur, par exemple) est relativement clair. Le parafoudre à enveloppe métallique ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique à isolation gazeuse généralement en zones très polluées.

Le parafoudre intégré, rare en haute et très haute tensions, présente les mêmes possibilités d'utilisation que les parafoudres à enveloppe métallique pour un coût qui devrait être moindre. Toutefois, en cas de défaillance du parafoudre, il faut intervenir aussi sur l'appareil à protéger.

Le parafoudre à oxyde de zinc à enveloppe synthétique fait maintenant pleinement partie de l'offre industrielle, tout du moins en ce qui concerne les parafoudres pour réseaux de distribution, son coût est très compétitif par rapport à un parafoudre à enveloppe de porcelaine. Il faut noter que le marché « moyenne tension » a été positivement dynamisé par les actions d'accroissement de la qualité de service des distributeurs d'électricité. Pour la haute et la très haute tension, l'offre industrielle s'étoffe progressivement, d'une part, à cause d'un transfert naturel des technologies synthétiques issues de la moyenne tension, pour laquelle le retour d'expérience commence à être significatif, et, d'autre part, parce que la solution synthétique est quelquefois la seule réponse aux besoins particuliers exprimés par les exploitants.

III.3.3.2) Distance de protection : [3]

En cas de chocs de foudre ou de manœuvre, du fait des phénomènes de propagation, deux points d'un même conducteur peuvent ne pas être au même potentiel. Il est donc illusoire d'imaginer une protection globale d'un réseau uniquement en installant des parafoudres. La protection offerte par un parafoudre est très locale, ainsi, il ne suffit pas de connaître le niveau de protection pour connaître la surtension effectivement appliquée au matériel à protéger.

L'onde incidente, limitée par le parafoudre dès qu'elle l'a atteint, se propage à l'intérieur du poste électrique, s'amplifie sur les extrémités ouvertes et provoque des résonances entre les matériels présentant de fortes capacités localisées (transformateur, par exemple) et les inductances des connexions et des jeux de barres. Ce phénomène est tout particulièrement marqué pour les parafoudres à oxyde de zinc, en raison de leurs caractéristiques électriques. En effet, lorsqu'ils fonctionnent, ils transforment la surtension incidente en une onde assimilable à un échelon de tension qui vient directement exciter les circuits résonnants formés, par exemple, par le transformateur à protéger et l'inductance de la liaison entre ce dernier et le parafoudre.

Pour limiter ces phénomènes, il faut réduire l'inductance, donc réduire la longueur de cette connexion.

La protection des transformateurs contre les surtensions n'est pleinement efficace que si le parafoudre se trouve à proximité de ce dernier, on peut se poser la question, a quelle distance maximale «a» de transformateur à protéger, le parafoudre doit être posé ?

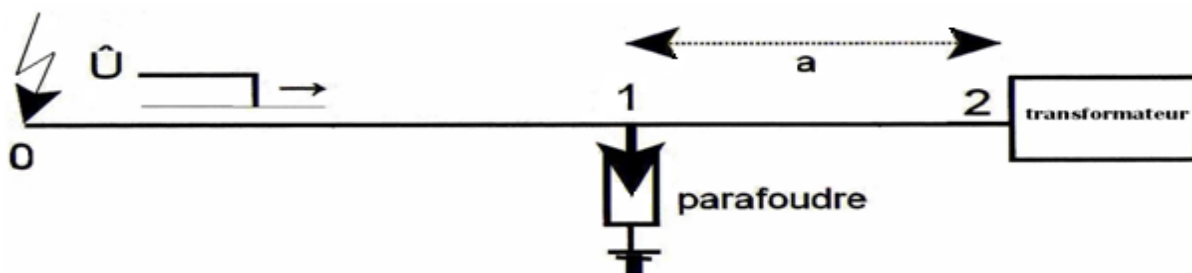


Figure (III.9) : Distance de protection d'un parafoudre .

La distance maximale admissible entre le transformateur et le parafoudre est directement liée au rapport entre le niveau de protection du parafoudre et le niveau d'isolement du transformateur. À titre d'exemple, on trouve, dans le tableau suivant, les valeurs retenues sur les réseaux de transport d'électricité français à hautes et très hautes tensions pour les parafoudres à Oxyde de Zinc.

Caractéristiques d'installation	Tension efficace nominale du réseau					
	63KV	90 KV	225 KV		400 KV	
Niveau d'isolement du transformateur (1) (KV)	325	450	650	900	1175	1425
Niveau de protection des parafoudres (KV)	180	235	475	475	850	850
Distance maximale entre le parafoudre et le transformateur (m)	30	30	(2)	40	20	40

Tableau : Distances d'installation des parafoudres à Oxyde de Zinc sur le réseau français.

(1) Valeur de crête donnée en choc de foudre.

(2) Le parafoudre est placé directement sur le transformateur.

Chapitre IV :

Régime transitoire dans un transformateur soumis aux surtensions.

Les phénomènes transitoires dans les transformateurs sont très complexes et sont étudiés par voie de la modélisation mathématique et physique et par des expériences immédiates.

La nature de ces phénomènes qui se produisent pendant l'action des surtensions dépend de la forme de l'onde électromagnétique appliquée, pour cela on distingue :

- Les ondes apériodiques simples, figure (IV.1-a).
- Les ondes apériodiques complexes, figure (IV.1-b).
- Les ondes périodiques qui apparaissent pendant le phénomène de commutation et de la ferro-résonance, figure (IV.1-c).

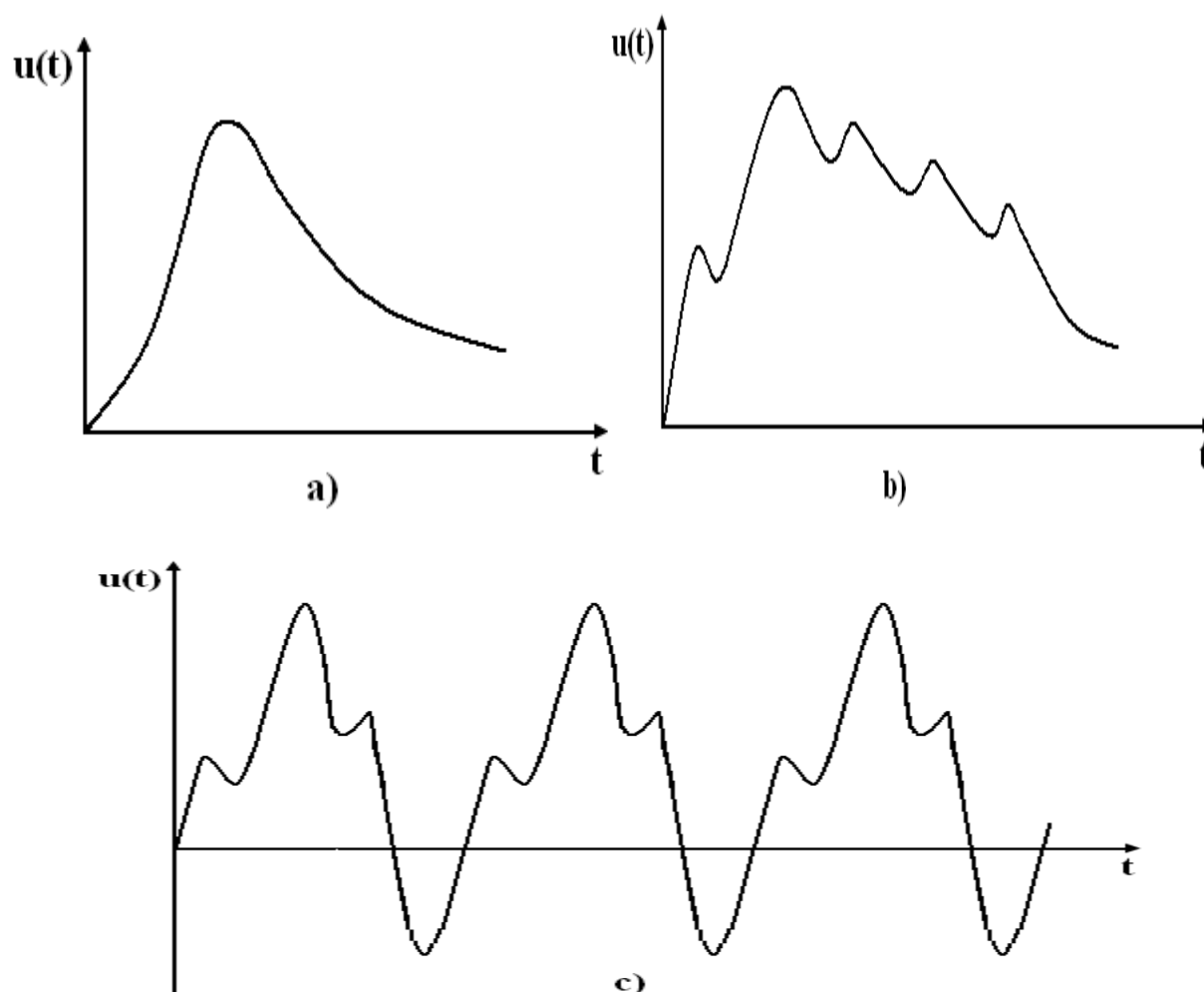


Figure (IV.1) : Ondes de surtensions.

IV.1) Schéma équivalent d'un transformateur soumis aux surtensions :

Etant donnée que les phénomènes qui se produisent dans les trois phases d'un transformateur traversées par les mêmes ondes de surtensions sont identiques, donc on se limite au long de cette analyse à un schéma équivalent monophasé de l'enroulement HT du transformateur illustré sur la figure (IV.2) suivante :

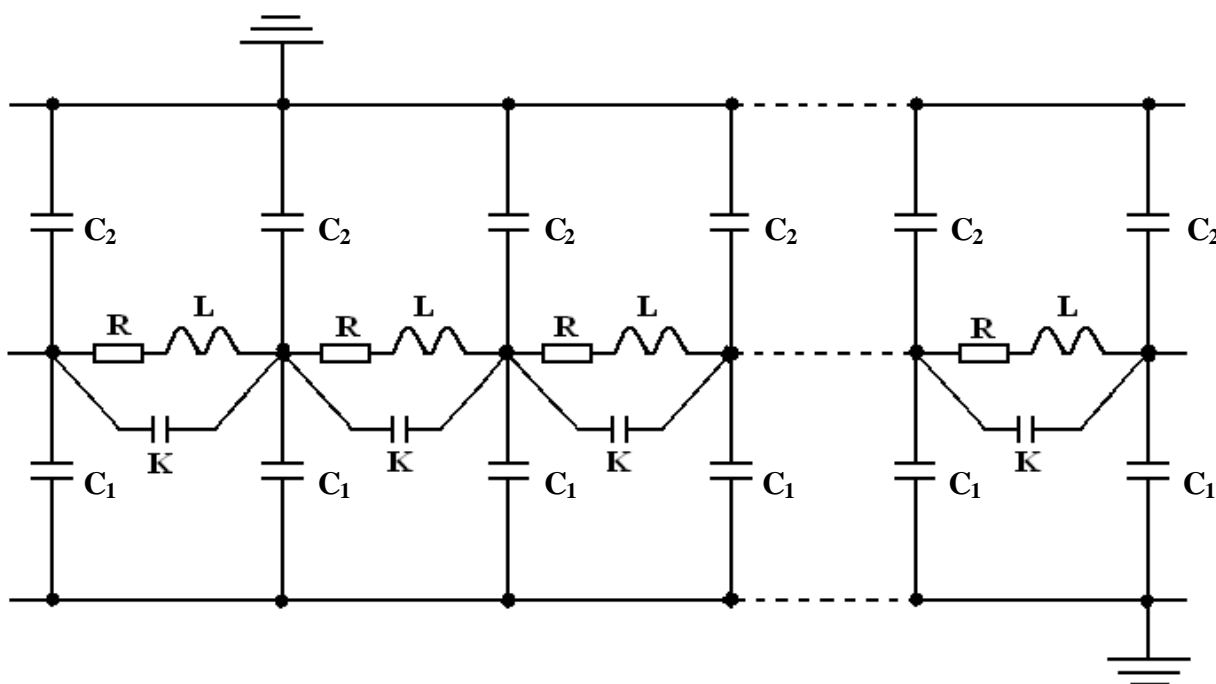


Figure (IV.2) : Schéma électrique équivalent complet de l'enroulement HT.

IV.2) Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT :

Durant notre étude nous supposons que dans les transformateurs de grandes puissances il existe toujours un enroulement connecté en triangle jouant le rôle d'un écran magnétique, nous assurerons aussi que les ondes agissant sur les transformateurs sont de fréquences suffisamment importantes pour pouvoir négliger l'influence du noyau sur l'enroulement, on néglige également la résistance des enroulements et la transmission des phénomènes transitoires entre eux. Le schéma représenté sur la figure (IV.3) correspond à cette simplification.

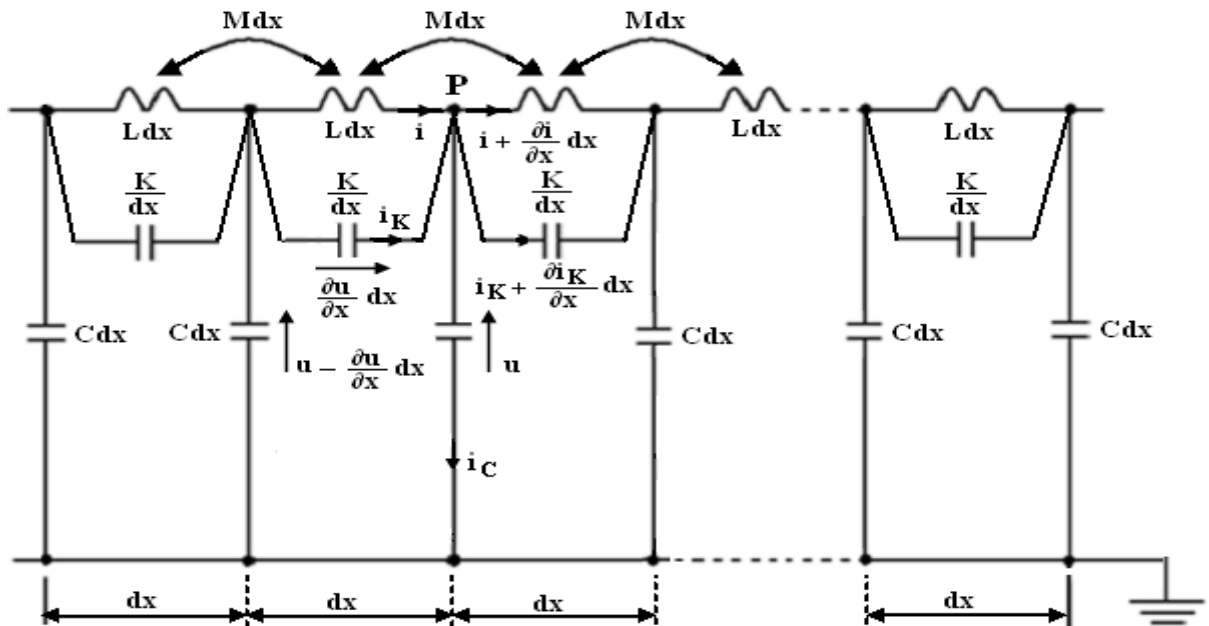


Figure (IV.3) : Schéma équivalent de l'enroulement sans l'influence du noyau.

IV.3) Equations du circuit :

En appliquant la loi de KIRCHOFF au nœud (P) de la figure (IV-3) situé sur la longueur de l'enroulement nous aurons :

$$i + i_K = i_C + (i + \frac{\partial i}{\partial x} dx) + (i_K + \frac{\partial i_K}{\partial x} dx).$$

$$\Rightarrow - i_C = \frac{\partial i}{\partial x} dx + \frac{\partial i_K}{\partial x} dx.$$

$$\Rightarrow i_C = - \frac{\partial (i + i_K)}{\partial x} dx. \tag{IV- 1}$$

$$\text{Et comme : } i_C = C dx \frac{\partial u}{\partial t} \tag{IV- 2}$$

En égalant les équations (IV-1) et (IV-2) on aura :

$$- \frac{\partial (i + i_K)}{\partial x} dx = C dx \frac{\partial u}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial (i + i_K)}{\partial x} = - C \frac{\partial u}{\partial t}. \tag{IV- 3}$$

A travers la capacité K on a la relation suivante :

$$i_K = - \frac{K}{dx} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} dx \right)$$

$$i_K = - \frac{K}{dx} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} dx.$$

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

$$\Rightarrow \frac{\partial i_K}{\partial x} = - K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (IV- 4)$$

Aux bornes de l'inductance L dx on a :

$$\begin{aligned} \frac{\partial i}{\partial t} dx &= - L dx \frac{\partial i}{\partial t} \\ \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} &= - L \frac{\partial i}{\partial t} \quad \Rightarrow \frac{\partial i}{\partial t} = - \frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial x} \frac{\partial i}{\partial t} &= \frac{\partial t}{\partial x} \left(- \frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \Rightarrow \frac{\partial i}{\partial x} &= - \frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} \quad (IV- 5) \end{aligned}$$

En sommant les équations (IV-4) et (IV-5), on aura :

$$\begin{aligned} \frac{\partial i_K}{\partial x} + \frac{\partial i}{\partial x} &= - \frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} - K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \\ \Rightarrow \frac{\partial (i+i_K)}{\partial x} &= - \left(\frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} + K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \right) \quad (IV- 6) \end{aligned}$$

En égalant les équations (IV- 3) et (IV- 6) ; on aura :

$$- C \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = - \frac{1}{L} \frac{\partial u \partial t}{\partial x^2} - K \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (IV- 7)$$

En multipliant l'équation (IV- 7) par $(L \frac{\partial u}{\partial t})$, on aura :

$$\begin{aligned} - L C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - L K \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - L C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + L K \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} &= 0. \quad (IV- 8) \end{aligned}$$

On obtient une équation de la même forme pour le courant.

La solution de l'équation (IV- 8) est de la forme suivante :

$u(x,t) = U \cos \omega t \sin \beta x.$ Où :

ω : La pulsation, tel que $\omega = 2\pi f.$

f : Etant la fréquence.

β : La constante de propagation ; tel que $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

λ : La longueur d'onde.

Cette solution a la même forme que celle d'une onde stationnaire.

IV.4) Répartition de la tension le long de l'enroulement :

Durant le phénomène de la surtension, l'enroulement présente une combinaison complexe des capacités et des inductances, afin de faciliter notre étude, il est impératif de simplifier encore le schéma équivalent précédent.

IV.4.1) Hypothèses simplificatrices : [13]

Les phénomènes liés aux surtensions se déroulent à une très grande vitesse et agissent sur les transformateurs comme des régimes apériodiques de très haute-fréquence (pulsation ω très élevée).

Dans ce cas les réactances inductives ωL de l'enroulement deviennent très grandes tandis-que les réactances capacitatives longitudinales $\frac{1}{\omega K}$ et transversales $\frac{1}{\omega C}$ diminuent, donc on pourra admettre que le courant ne circule qu'à travers les réactances longitudinales et transversales. Dans ces conditions le schéma équivalent de l'enroulement simplifié prend la forme indiquée sur la figure (IV.4) suivante :

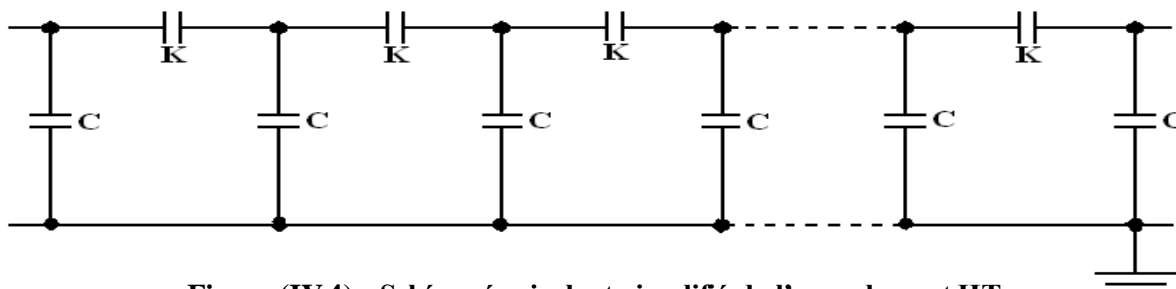


Figure (IV.4) : Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors d'un phénomène ondulatoire.

IV.4.2) Répartition initiale de la tension :

IV.4.2.1) Répartition initiale de la tension sur l'enroulement dont le neutre est mis à la terre :

Examinons le schéma de la figure (IV.4) et admettons que le neutre de l'enroulement est mis à la terre. [18]

a) Si $C = 0$:

Toutes les capacités longitudinales K seraient en série et ce circuit serait parcouru par un courant de même valeur. Avec les capacités K identiques nous obtiendrions une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement, c'est-à-dire la même répartition qu'en régime permanent, une telle répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les points M et N de la figure (IV.5) qui correspond respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement U_0 et sa fin dont le potentiel est nul.

b) Si $K = 0$:

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

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

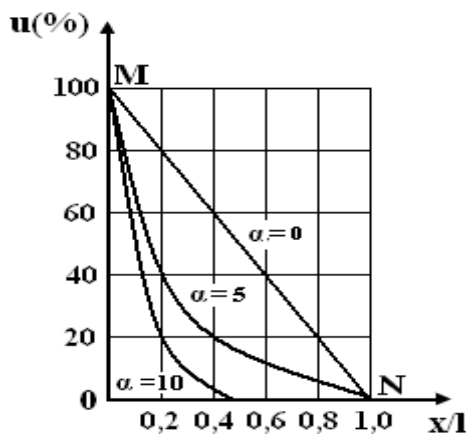


Figure (IV.5) : Répartition de la tension le long de l'enroulement à l'instant initial avec neutre mis à la terre.

Pour le calcul de la répartition initiale de la tension, dans l'hypothèse où ($L \rightarrow \infty$), l'équation (IV- 8) devienne :

$$\Rightarrow -C \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + K \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^2 \partial t^2} = 0. \quad (\text{IV- 9})$$

Pour ($t = 0$): l'équation (IV- 9) s'écrit :

$$-C u_0(x) + K \frac{\partial^2 u_0(x)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{IV- 10})$$

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

$$\frac{\partial^2 u_0(x)}{\partial x^2} - \frac{C}{K} u_0(x) = 0. \quad (\text{IV- 11})$$

L'équation (IV- 11) est une équation différentielle de 2^{ème} degré, tel que sa solution est de

$$\text{type : } u_0(x) = A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x} \quad (\text{IV- 12})$$

Avec : $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$, est le facteur de la répartition initiale. [18]

➤ **Détermination des constantes A et B :**

Les conditions aux extrémités et aux limites d'après la figure (IV.5) nous donnent :

❖ Pour $x = 0$: (Entrée de l'enroulement) ;

$$u(x,0) = u(0,0) = U \quad (\text{IV-13})$$

❖ Pour $x = 1$: (Point où le neutre mis à la terre) ;

$$u(x,0) = u(1,0) = 0 \quad (\text{IV-14})$$

En introduisant les équations (IV-13) et (IV-14) dans l'expression (IV- 12) on aura :

❖ Pour $x = 0$:

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

❖ Pour $x = 1$:

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

Après les calculs, on trouve :

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

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

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

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

$$u_0(x) = U \left(\frac{e^{\alpha(l-x)} - e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \right) \quad (\text{IV-15})$$

Où :

$$u_0(x) = U \frac{\text{Sh}[\alpha(l-x)]}{\text{Sh}(\alpha l)} \quad (\text{IV- A})$$

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

IV.4.2.2) : Répartition initiale de la tension sur l'enroulement dont le neutre est isolé de la terre :

Examinons le schéma de la figure (IV.4) et admettons que le neutre de l'enroulement est isolé de la terre.

a) Si C = 0 :

Nous aurons une répartition uniforme de la tension représentée par la droite horizontale (M'N') de la figure (IV.6).

b) Si K = 0 :

Nous aurons la répartition initiale de la tension représentée par la droite verticale (M'O) de la figure (IV.6).

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

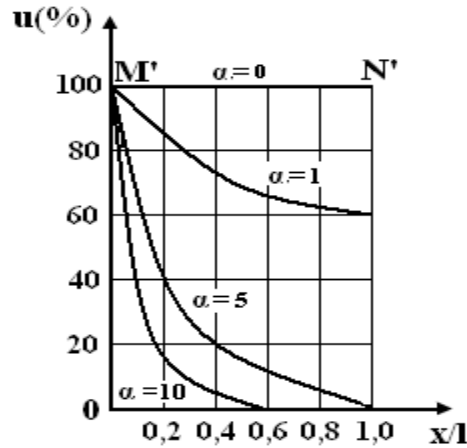


Figure (IV.6) : Répartition de la tension le long de l'enroulement à l'instant initial avec neutre isolé de la terre.

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

❖ Pour $x = 0$:

$$u(x,0) = u(0,0) = U \tag{IV-16}$$

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

$$i + i_k = 0$$

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

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

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

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=1} = 0 \tag{IV-17}$$

On introduisant (IV-16) et (IV- 17) dans (IV- 12) on aura :

❖ Pour $x = 0$:

$$U = A + B$$

❖ Pour $x = 1$:

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

En calculant, on détermine que :

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

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

En injectant A et B dans (IV- 12), on aura :

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

Où :

$$u_0(x) = U \frac{\text{Ch} [\alpha(1-x)]}{\text{Ch} (\alpha l)} \quad (\text{IV- B})$$

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

IV.4.3) Répartition finale de la tension :

Les courbes de répartition de la tension le long de l'enroulement représentées sur les figures (IV.5) et (IV.6) correspondent aux régimes transitoires, après un certain intervalle de temps suffisant les capacités seront chargées l'onde de surtension se répartie le long de l'enroulement, c'est l'apparition du régime permanent.

❖ Pour le cas où le neutre est mis à la terre, la répartition finale de la tension est représentée par une droite inclinée dans la figure (IV.7-a), de fonction $u(x) = U (-\frac{1}{l} x + 1)$ correspondante à $\alpha = 0$ de la figure (IV.5)

❖ Pour le cas où le neutre est isolé de la terre la tension se répartie uniformément le long de l'enroulement, elle est représentée par une droite parallèle à l'axe des abscisses dans la figure (IV.7.b) de fonction $u(x) = U = c^{ste}$ correspondante à $\alpha = 0$ de la figure (IV.6)

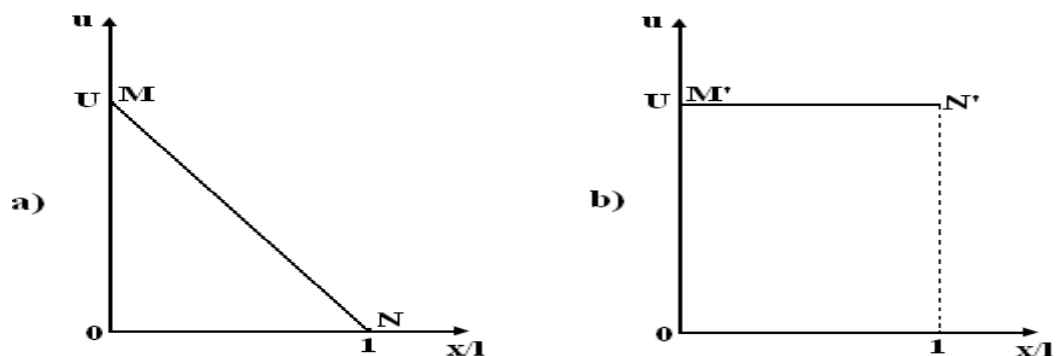


Figure (IV.7) : Répartition finale de la tension le long de l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre. b) Neutre isolé la terre.

IV.4.4) Gradient de la tension :

Il faut connaître d'abord le gradient de la tension entre deux éléments voisins (bobines-spire) pour pouvoir calculer la rigidité diélectrique longitudinale de l'enroulement. D'après les figures on voit bien qu'aux premiers instants le plus grand gradient de la tension a lieu au début de l'enroulement ($x = 0$). La valeur de ce gradient est déterminée par la dérivée première $\frac{\partial u_0(x)}{\partial x}$ qui sera calculée en utilisant les expressions (IV- A), (IV- B) et en tenant compte du fait que ($\alpha \geq 3$), nous aurons :

$\text{th}(\alpha l) \approx \text{arth}(\alpha l) \approx 1$ (tel que l longueur de l'enroulement HT, n'est pas grande)

D'après l'équation (IV- A), on aura :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(U \frac{e^{\alpha(1-x)} - e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} \right) \\ &= U \left(\frac{-\alpha e^{\alpha(1-x)} - \alpha e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \right) \\ &= -\alpha U \left(\frac{e^{\alpha(1-x)} + e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \right) \\ &= -\alpha U \left(\frac{\text{ch}[\alpha(1-x)]}{\text{sh}(\alpha l)} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u_0(x)}{\partial x} \text{ (pour } x = 0) = -\alpha U \left(\frac{\text{ch}(\alpha l)}{\text{sh}(\alpha l)} \right) = -\alpha U \text{cth}(\alpha l)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} \text{ (pour } x = 0) = -\alpha U$$

D'après l'équation (IV- B), on aura :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(U \frac{e^{\alpha(1-x)} + e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} \right) = U \left(\frac{-\alpha e^{\alpha(1-x)} + \alpha e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} \right) \\ \Rightarrow \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} &= -\alpha U \left(\frac{e^{\alpha(1-x)} - e^{-\alpha(1-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}} \right) = -\alpha U \left(\frac{\text{sh}[\alpha(1-x)]}{\text{ch}(\alpha l)} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Donc } \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} \text{ (pour } x = 0) = -\alpha U \left(\frac{\text{sh}(\alpha l)}{\text{ch}(\alpha l)} \right) = -\alpha U \text{th}(\alpha l)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} \text{ (pour } x = 0) = -\alpha U$$

Le premier facteur de ces formules donne la valeur du gradient de la tension pour une répartition uniforme de la tension le long de l'enroulement et le second montre qu'à l'instant initial les éléments de l'enroulement les plus proches de l'entrée ($x = 0$) se trouvent sous une tension de 10 à 15 fois plus grande que pour une répartition uniforme de la tension.

D'où la nécessité de prendre des précautions pour protéger les isolants contre le claquage.

IV.5) Régime transitoire de la tension : [18]

Si on tient compte de la résistance de l'enroulement, le passage de la répartition initiale à la répartition finale le long de l'enroulement est un phénomène de nature oscillatoire amortie.

La propagation et la réflexion de l'onde amortie se traduisent par des oscillations ayant lieu dans le temps et dans l'espace, pour les hypothèses les plus simples, l'expression cherchée est obtenue comme intégrale d'une équation différentielle à dérivée partielles de quatrième ordre au moins. Notre analyse nous a amené aux résultats suivants :

- Le phénomène ayant lieu dans l'enroulement est périodique et s'amortie suivant une fonction exponentielle.
- Les répartitions finales de la tension sur la figure (IV.7) constituent les axes aux tours desquels s'effectue les phénomènes oscillatoires, les limites des oscillations se trouvent dans les airs hachurés représentés sur la figure (IV.8).

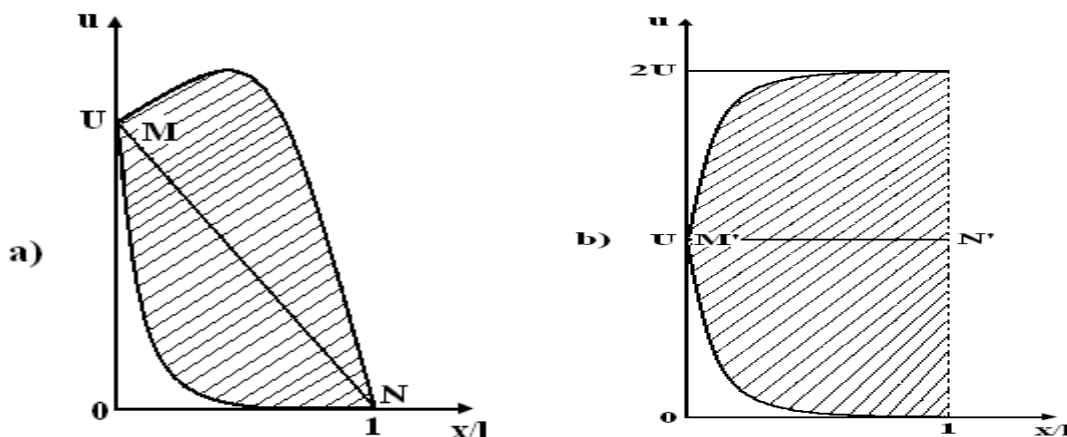


Figure (IV.8) : Limites des oscillations de l'onde de surtension dans l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre. b) Neutre isolé la terre.

La décomposition en série de Fourier de la différence entre la répartition initial et finale, nous donne :

Pour un enroulement a neutre mis à la terre on obtient une série d'harmoniques comprenant (1, 2, 3, ...etc.) en demi-onde. Figure (IV.9.a).

Pour un neutre isolé de la terre on obtient une série d'harmoniques comprenant (1, 3, 5, ...etc.) en quart d'onde figure (IV.9.b).

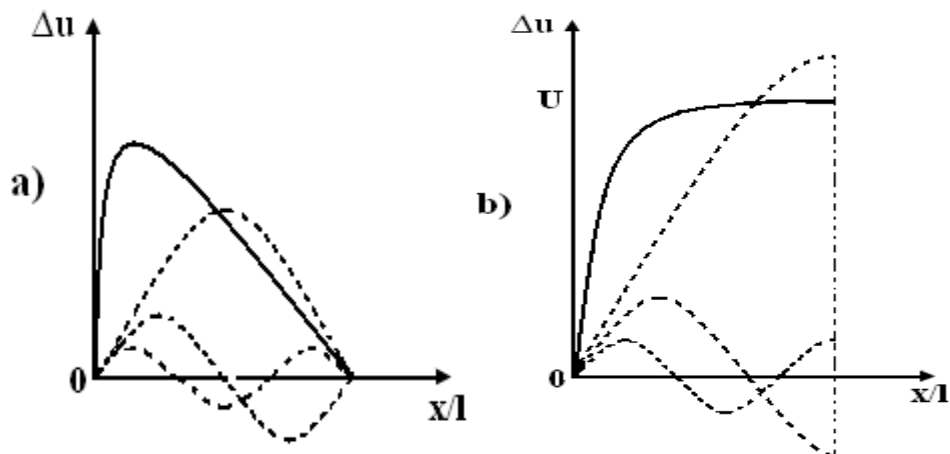


Figure (IV.9) : Phénomène transitoire dans l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre. b) Neutre isolé la terre.

L'onde qui pénètre dans l'enroulement se déforme continuellement, la figure (IV.10) représente la répartition de la tension le long de l'enroulement pour différents instants.

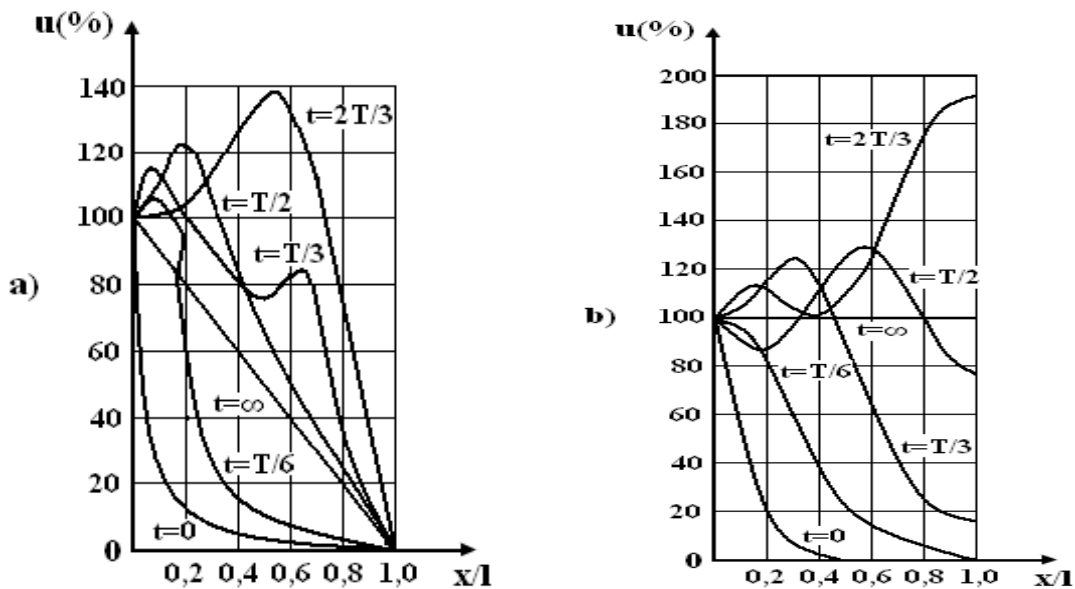


Figure (IV.10) : Phénomène transitoire dans l'enroulement.

a) Neutre mis à la terre. b) Neutre isolé la terre.

Le potentiel variant dans l'espace suivant l'abscisse x et dans le temps. Un point quelconque de l'enroulement peut être soumis à un gradient élevé, ce qui rend assez illusoire le renforcement des isolations des spires d'entrée, autrefois adopté par le constructeur. Dans ce cas le transformateur peut subir une avarie qui aura pour résultat sa mise hors service.

Chapitre V :



Calcul des paramètres.

Une ligne triphasée de structure symétrique à charge équilibrée peut-être représentée par une ligne monophasée.

Un élément dx de cette ligne peut être décrit en partant de la théorie des champs par un schéma équivalent qui contient les paramètres suivant :

- L_0 : qui tient compte du champ magnétique induit par le courant dans la ligne.
- C_0 : qui tient compte du champ électrique entre les conducteurs.
- R_0 et G_0 : qui tient compte des pertes dans les lignes et dans les diélectriques.

L'ordre des valeurs linéiques de ces paramètres est :

- ❖ L_0 : enivrent 1,33 mH/Km pour les lignes aériennes, enivrent 2 à 3 fois moins pour les câbles.
- ❖ C_0 : enivrent 8,33 nF/km pour les lignes, enivrent 2 à 3 fois moins pour les câbles.
- ❖ G_0 : enivrent $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\Omega\text{Km}$ pour les lignes aériennes en présence de l'effet couronne (Pour une tension de service $> 220 \text{ KV}$).

Etant donné que les conducteurs constituant les enroulements du transformateur possèdent une longueur importante. Plusieurs expériences ont été faites sur les transformateurs soumis aux différentes formes d'ondes impulsionnelles, ce qui a permis d'établir des relations empiriques pour un calcul des paramètres de son schéma équivalent.

On notera bien sûr que le schéma équivalent de l'enroulement à la différence de celui de la ligne, possède en plus des inductances mutuelles M_{ij} et des capacités longitudinales K_{Tr} .

V.1) Caractéristiques :

V.1.1) Caractéristiques des lignes et des câbles : [9]

Les caractéristiques des lignes et des câbles pour les différentes tensions sont représentées dans le tableau (V.1) suivant :

Tableau (V.1)

	Ligne			Câble		
	110 (KV)	220 (KV)	330 (KV)	110 (KV)	220 (KV)	330 (KV)
Type	AA-400	AA-300	-----	-----	-----	-----
l (m)	10	10	10	3	3	3
Ø (mm)	26	24	-----	-----	-----	-----
S (mm ²)	400	300	-----	500	270	-----
D _m (m)	6	8,5	11	-----	-----	-----
R ₀ (Ω/Km)	0,0775	0,09747	0,12	0,06	0,092	0,032
X ₀ (Ω/Km)	-----	-----	0,331	0,16	0,147	0,075
B ₀ (1/ ΩKm)	-----	-----	3,38. 10 ⁻⁶	-----	-----	-----
Q ₀ (Kvar/Km)	37,5	141	406	1420	3850	9000
I _{adm} (A)	830	610	-----	-----	-----	-----
ΔP _{couronne} (KW/Km)	-----	-----	4,5	-----	-----	-----
n	1	1	2	-----	-----	-----

V.1.2) Caractéristiques des transformateurs : [9]

Notre étude sera portée sur des transformateurs de types TDII - 80000/110, TD - 80000/220 et TDII - 125000/330 dont les caractéristiques électriques et géométriques pour les différentes tensions sont représentées dans le tableau (V.2) suivant :

La figure (V.1) donnera un aperçu général sur les dimensions géométriques des enroulements du transformateur.

Tableau (V.2)

Tension (KV)		110	220	330	Tension (KV)		110	220	330
E l e c t	S_n (MVA)	80	80	125	G é o m	d_{extHT} (mm)	1360	1640	1890
	U_{nHT} (KV)	121	242	347		d_{intHT} (mm)	1190	1330	1350
	U_{nBT} (KV)	10,5	10,5	10,5		d_{extBT} (mm)	1120	1120	1150
	U_{cc} (%)	11	11	11		d_{intBT} (mm)	890	890	930
	ΔP_0 (KW)	0,85	79	125		d_{noy} (mm)	860	860	900
	ΔP_{cc} (KW)	310	315	380		l_{enroul} (mm)	1900	1940	2040
	I_0 (%)	6	0,45	0,55					
	f (Hz)	50	50	50					

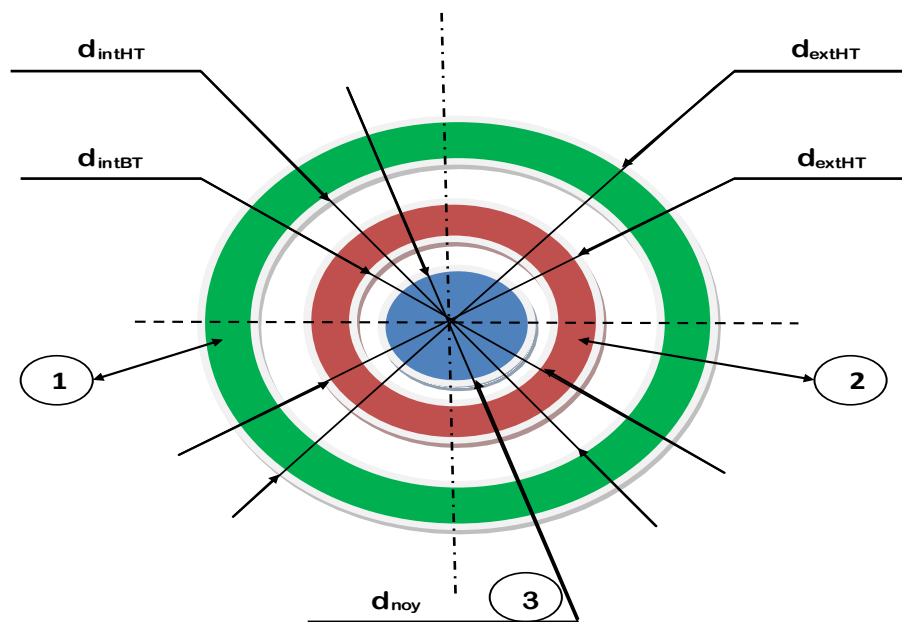


Figure (V.1) : Disposition géométrique des enroulements du transformateur.

1 Enroulement HT, 2 Enroulement BT, 3 Le noyau.

V.2) Schémas équivalents :

Les figures (V.2) et (V.3) suivantes illustrent les schémas équivalents de la ligne, du câble et du transformateur pour les tensions (110, 220 KV) et 330 KV respectivement.

V.3) Calcul des paramètres :

Calculons les paramètres des schémas équivalents représentés sur les figures (V.2) et (V.3) précédents pour les tensions (110, 220 KV) et 330 KV respectivement.

V.3.1) Pour une tension 110 KV :**V.3.1.1) Calcul des paramètres de la ligne :****V.3.1.1.1) Calcul de la résistance :**

La résistance de la ligne est donnée par la formule suivante :

$$R_l = R_0 \cdot l \quad [19]$$

Pour la longueur de la ligne donnée $l = 10 \text{ Km}$, on aura :

$$R_l = 0,0775 \times 10 \quad \Rightarrow \quad R_l = 0,775 \Omega$$

V3.1.1.2) Calcul de l'inductance :

L'inductance de la ligne est donnée par la formule suivante :

$$L_l = \frac{X_l}{\omega} = \frac{X_l}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } X_l = X_0 \cdot l \quad [19]$$

Tel que la réactance kilométrique X_0 se calcule comme suit :

$$X_0 = 0,144 \log \frac{2D_m}{\emptyset} + 0,016 \quad [19]$$

$$\Rightarrow X_0 = 0,144 \log \frac{2 \cdot 6}{26 \cdot 10^{-3}} + 0,016 \quad \Rightarrow \quad X_0 = 0,3996 \Omega/\text{Km}$$

Pour la longueur de la ligne donnée $l = 10 \text{ Km}$, on aura :

$$X_l = 0,3996 \cdot 10 \quad \Rightarrow \quad X_l = 3,996 \Omega$$

$$L_l = \frac{3,996}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \quad \Rightarrow \quad L_l = 12726 \mu\text{H}$$

V.3.1.1.3) Calcul de la capacité :

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

$$C_l = \frac{B_l}{\omega} = \frac{B_l}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad [19] \quad \text{avec: } B_l = B_0 \cdot l$$

Tel que la conductibilité réactive kilométrique B_0 se calcule comme suit :

$$B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{2D_m}{\phi}} \quad [19] \Rightarrow B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{2 \cdot 6}{26 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow B_0 = 2,845 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}\Omega\text{Km.}$$

Pour la longueur de la ligne donnée $l_1 = 10 \text{ Km}$, on aura :

$$B_1 = 2,845 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \Rightarrow B_1 = 2,845 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}\Omega.$$

$$\text{Donc: } C_1 = \frac{2,845 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow C_1 = 0,0906 \mu\text{F.}$$

On divise la ligne par 20 éléments équivalents de longueur $l_{11} = 0,5 \text{ Km}$, on aura :

$$R_{11} = \frac{R_l}{20} = \frac{0,775}{20} \Rightarrow R_{11} = 0,0387 \Omega.$$

$$L_{11} = \frac{L_l}{20} = \frac{12726}{20} \Rightarrow L_{11} = 636,3 \mu\text{H.}$$

$$C_{11} = \frac{C_l}{20} = \frac{0,0906}{20} \Rightarrow C_{11} = 0,00453 \mu\text{F.}$$

V.3.1.2) Calcul des paramètres du câble :

Pour la longueur du câble donnée $l_c = 3 \text{ Km}$.

V.3.1.2.1) Calcul de la résistance :

La résistance du câble est donnée par la formule suivante :

$$R_c = R_0 \cdot l_c = 0,06 \cdot 3 \Rightarrow R_c = 0,18 \Omega$$

V.3.1.2.2) Calcul de l'inductance :

L'inductance du câble est donnée par la formule suivante :

$$L_c = \frac{X_c}{W} = \frac{X_c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } X_c = X_0 \cdot l_c = 0,16 \cdot 3 \Rightarrow X_c = 0,48 \Omega.$$

$$\text{Donc : } L_c = \frac{0,48}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow L_c = 1530 \mu\text{H.}$$

V.3.1.2.3) Calcul de la capacité :

La capacité du câble est donnée par la formule suivante :

$$C_c = \frac{B_c}{W} = \frac{B_c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } B_c = B_0 \cdot l_c$$

$$\text{Tel que } B_0 = \frac{Q_0}{U_n^2} \Rightarrow B_0 = \frac{1420 \cdot 10^3}{110^2 \cdot 10^6} \Rightarrow B_0 = 1,1735 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}\Omega\text{Km.}$$

$$\text{Donc : } B_c = 1,1735 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \Rightarrow B_c = 3,5205 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}\Omega\text{.}$$

$$\text{Ce qui donne : } C_c = \frac{3,5205 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow C_c = 1,1212 \mu\text{F.}$$

On divise le câble par trente éléments équivalant de longueur $l_{c1} = 100 \text{ m}$. On aura :

$$R_{c1} = \frac{R_c}{30} = \frac{0,18}{30} \Rightarrow R_{c1} = 0,006 \Omega.$$

$$L_{c1} = \frac{L_c}{30} = \frac{1530}{30} \Rightarrow L_{c1} = 51 \mu\text{H.}$$

$$C_{c1} = \frac{C_c}{30} = \frac{1,1212}{30} \Rightarrow C_{c1} = 0,03737 \mu\text{F.}$$

V.3.1.3) Calcul des paramètres du transformateur :

V.3.1.3.1) Calcul de la résistance :

La résistance de l'enroulement du transformateur dépend de la forme de l'onde appliquée, comme le montre la formule qui suit :

$$R_{Tr} = K_1 \cdot R_{cc} \quad [14]$$

$$\text{Tel que : } K_1 = \frac{1,0575}{\sqrt{W \cdot t_h}} \text{ est le facteur de précision de la résistance.}$$

w : la pulsation correspondante à la fréquence de réseau, $w = 2 \cdot \pi \cdot f$.

f : la fréquence de service de réseau, $f = 50 \text{ Hz}$.

$t_h = 50 \mu\text{s}$.

$$\text{Donc : } K_1 = \frac{1,0575}{\sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}} \Rightarrow K_1 = 8,4398.$$

R_{cc} : la résistance de l'enroulement HT du transformateur en court-circuit correspondante à la fréquence 50 Hz, elle est exprimée par la relation qui suit :

$$R_{cc} = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_n^2}{S_n^2} \quad [14] \quad \Rightarrow \quad R_{cc} = \frac{310 \cdot 10^3 \cdot (121 \cdot 10^3)^2}{(80 \cdot 10^6)^2} \quad \Rightarrow \quad R_{cc} = 0,7092 \, \Omega.$$

$$\text{Donc: } R_{Tr} = 8,4398 \cdot 0,7092 \quad \Rightarrow \quad R_{Tr} = 6 \, \Omega.$$

L'enroulement du transformateur est divisé par dix (10) éléments équivalents ayant une résistance : $R_{Tr1} = \frac{6}{10} \Rightarrow R_{Tr1} = 0,6 \, \Omega.$

V.3.1.3.2) Calcul de l'inductance propre d'un élément de l'enroulement : [15]

L'inductance d'un élément de l'enroulement contient sa propre inductance et les inductances mutuelles avec les autres éléments de cet enroulement.

a) Calcul de l'inductance d'un élément :

Pour pouvoir calculer l'inductance d'un élément, il faut d'abord calculer l'inductance totale de l'enroulement qui est donnée par l'expression suivante :

$$L_{tot} = K_2 \cdot L_{cc} \quad [14] \quad \text{avec : } K_2 = 0,65$$

K_2 : le facteur de précision de l'inductance qui tient compte de la forme de l'onde appliquée à l'enroulement.

L_{cc} : l'inductance de l'enroulement du transformateur en court-circuit, tel que :

$$L_{cc} = \frac{X_{cc}}{W} = \frac{X_{cc}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec : } X_{cc} = \frac{U_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{100 \cdot S_n}$$

$$\Rightarrow L_{cc} = \frac{U_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 100 \cdot S_n} = \frac{11 \cdot (121 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 100 \cdot (80 \cdot 10^6)} \quad \Rightarrow \quad L_{cc} = 0,0641 \, \text{H}$$

$$\text{Donc : } L_{tot} = 0,65 \cdot 0,0641 \quad \Rightarrow \quad L_{tot} = 0,0417 \, \text{H}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents, donc :

$$L_{\text{élé}} = \frac{L_{tot}}{10} = \frac{0,0417}{10} \quad \Rightarrow \quad L_{\text{élé}} = 4170 \, \mu\text{H}$$

Tel que : $L_{\text{élé}}$ est l'inductance d'un élément de cet enroulement.

b) Calcul des inductances mutuelles M_{ij} :

Pour pouvoir calculer les inductances mutuelles M_{ij} il faut calculer d'abord les coefficients de mutualités $\frac{M_{ij}}{L_{pro}}$ avec la fonction empirique suivante :

$\frac{M_{ij}}{L_{pro}} = f\left(\frac{a}{b}\right)$, qui est représentée sur la figure (V.5).

Tel que : L_{pro} est l'inductance propre d'un élément.

a : Distance entre les éléments de l'enroulement

Tel que : $a = \frac{\text{la longueur de l'enroulement}}{\text{le nombre d'éléments}} = \frac{l_{enroul}}{n} \Rightarrow a = \frac{1900}{10} = 190 \Rightarrow a = 190 \text{ mm}$.

b : Distance entre l'enroulement haute-tension et le noyau.

Tel que : $b = \frac{d_{moyHT} - d_{noy}}{2}$

Avec : $d_{moyHT} = \frac{d_{extHT} + d_{intHT}}{2} = \frac{1360 + 1190}{2} = 1275 \Rightarrow d_{moyHT} = 1275 \text{ mm}$.

Donc : $b = \frac{1275 - 860}{2} = 207,5 \Rightarrow b = 207,5 \text{ mm}$.

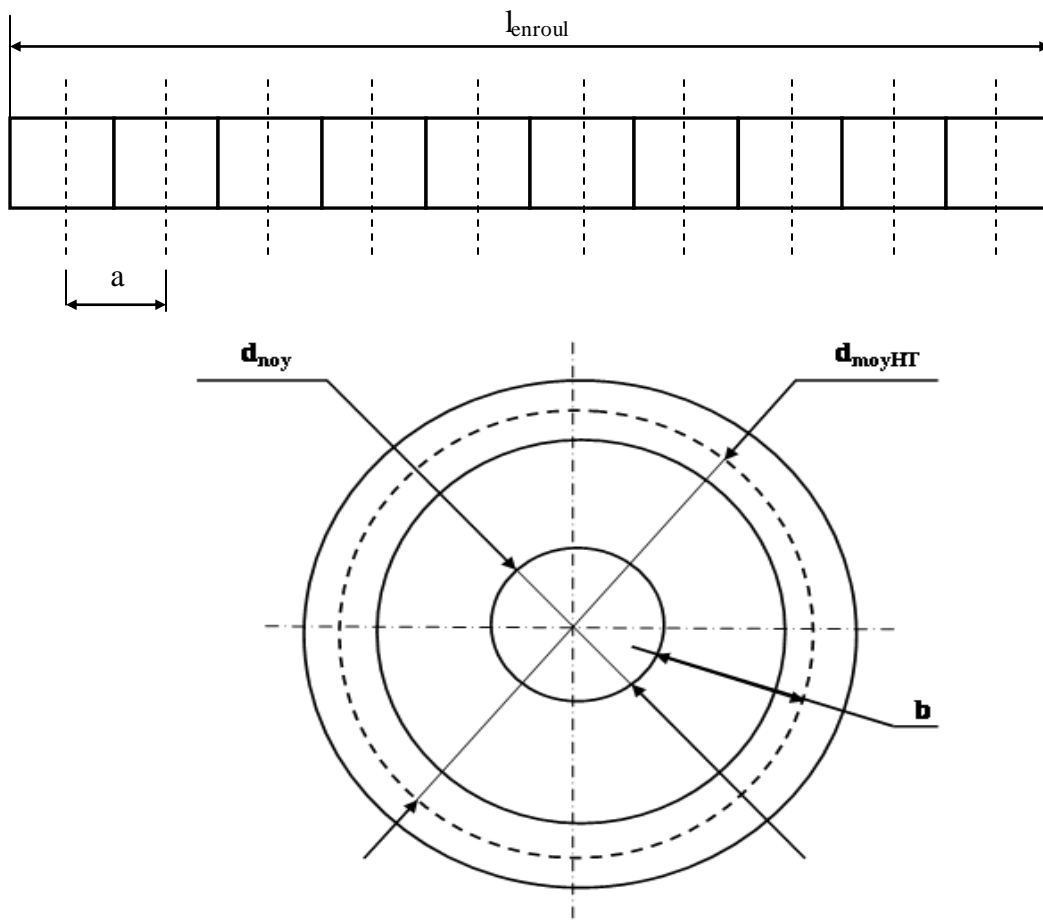


Figure (V.4) : Représentation des distances a et b sur la disposition schématique des éléments de l'enroulements.

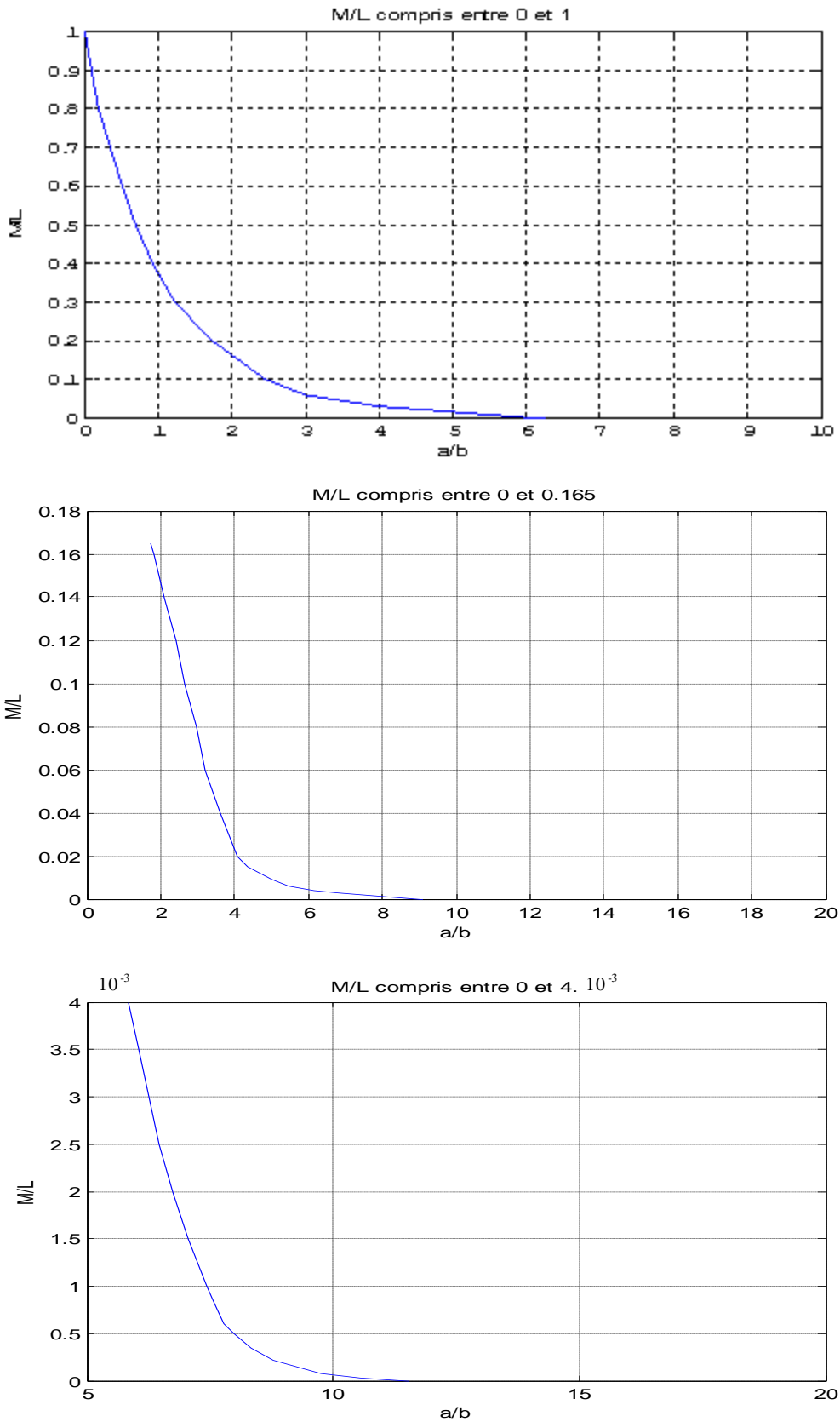


Figure (V.5) : Représentation de la fonction $\frac{M_{ij}}{L_{pro}} = f\left(\frac{a}{b}\right)$.

Le tableau (V.3) illustre toutes les valeurs des coefficients de mutualité déduites de la courbe figure (V.5).

Tableau (V.3)

N ⁰ de la mutuelle	a (mm)	b (mm)	$\frac{a}{b}$	$\sigma = \frac{M_{ij}}{L_{pro}}$	M _{ij} (μH)
1	190	207,5	0,91566	0,4	988
2	380		1,8313	0,1715	423,605
3	570		2,7469	0,0686	169,442
4	760		3,6626	0,0259	63,973
5	950		4,5783	0,0137	33,839
6	1140		5,4939	0,00366	9,0402
7	1330		6,4096	0,00278	6,8666
8	1520		7,3253	0,00102	2,5194
9	1710		8,2409	0,0002712	0,669864

$$\sum \sigma = 0,68817685$$

Donc l'inductance propre d'un élément est donnée par :

$$L_{pro} = \frac{L_{élé}}{1 + \sum \frac{M_{ij}}{L_{pro}}} = \frac{L_{élé}}{1 + \sum \sigma} = \frac{4170}{1,68817685} \Rightarrow L_{pro} = 2470 \mu\text{H}$$

V.3.1.3.3) Calcul de la capacité transversale :

La capacité transversale du transformateur C_{Tr} est la capacité entre l'enroulement haute tension et basse tension qui se calcul par l'expression suivante :

$$C_{Tr} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{intHT} + d_{extBT}}{d_{intHT} - d_{extBT}} \quad [16]$$

ε_0 : Permittivité absolue de l'air, tel que : ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

ε_r : Permittivité relative de l'huile d'isolation, avec : ($\varepsilon_r = 3,9$).

l : La longueur totale de l'enroulement haute tension (l = 1900 mm).

$$\text{Donc : } C_{Tr} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 1,9 \cdot \frac{1,19 + 1,12}{1,19 - 1,12} \Rightarrow C_{Tr} = 0,006795 \mu\text{F}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité $C_{Tr1} = \frac{0,006795}{10} \Rightarrow C_{Tr1} = 0,0006795 \mu\text{F}$

V.3.1.3.4) Calcul de la capacité longitudinale :

La connaissance de la valeur de la capacité transversale C_{Tr} nous permet facilement de calculer la valeur de la capacité longitudinale K d'après la formule suivante :

$$K = \frac{C_{Tr}}{\alpha^2}, \text{ tel que :}$$

La valeur du facteur α se détermine d'après la courbe caractéristique de la répartition initiale de la tension figure (V.6) dressée à partir du tableau (V.4) donnée par le constructeur.

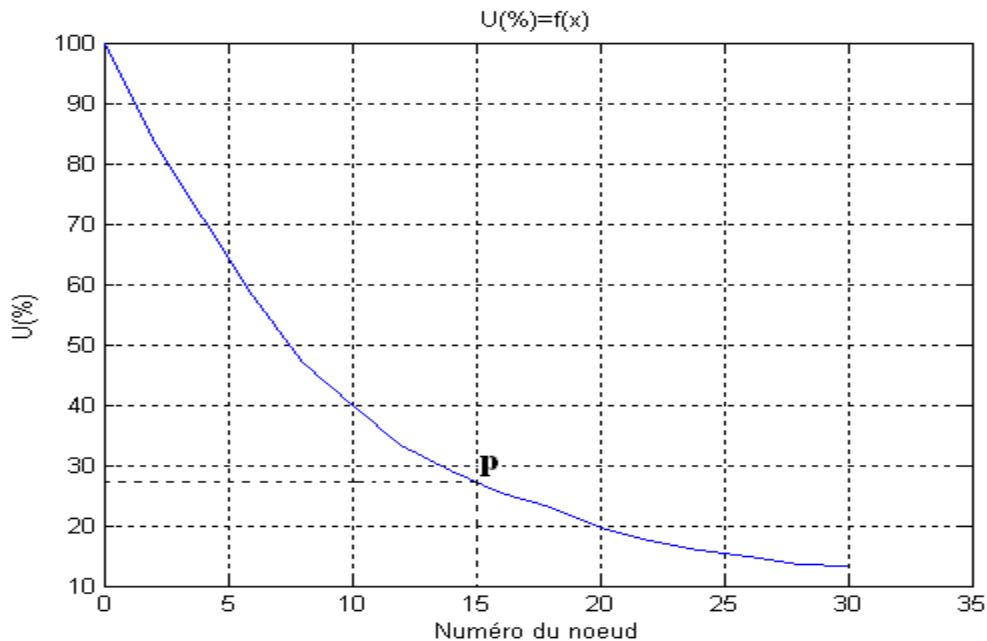


Figure (V.6) : Répartition initiale de la tension fournie par le constructeur.

Tableau (V.4)

Numéro de nœud	U(%)
A-0	100
2-0	84
4-0	71
6-0	58
8-0	47
10-0	40
12-0	33,2
14-0	29
16-0	25,3
18-0	23
20-0	19,7
22-0	17,6
24-0	15,8
26-0	15
28-0	13,5
30-0	13,4

➤ **Détermination de facteur α :**

Les valeurs de α sont obtenus à partir de la fonction suivante :

$$F(\alpha) = \frac{\text{Sh}[\alpha(1-x)]}{\text{Sh}(\alpha l)} - u(x)$$

On prend un point P (0,5 ; 0,275) dans la courbe figure (V.6) et on cherche la valeur de α pour avoir $F(\alpha) = 0$, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

α	2,3	2,38	2,4095	2,5	2,6
F(α)	0,0352	0,0120	0	- 0,0097	- 0,0492

$F(\alpha) = 0$ pour $\alpha = 2,4095$

$$\text{Donc : } K = \frac{0,006795}{2,4095^2} \Rightarrow K = 0,00117 \mu\text{F.}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité longitudinale : $K_1 = 0,00117 \cdot 10 \Rightarrow K_1 = 0,0117 \mu\text{F}$

V.3.2) Pour une tension 220 KV :

V.3.2.1) Calcul des paramètres de la ligne :

V.3.2.1.1) Calcul de la résistance :

$$R_1 = R_0 \cdot l_1 \Rightarrow R_1 = 0,09747 \times 10$$

$$\Rightarrow R_1 = 0,9747 \Omega$$

V.3.2.1.2) Calcul de l'inductance :

$$L_1 = \frac{X_l}{\omega} = \frac{X_l}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } X_l = X_0 \cdot l_1$$

$$\text{Tel que : } X_0 = 0,144 \log \frac{2 \cdot 8,5}{24 \cdot 10^{-3}} + 0,016 \Rightarrow X_0 = 0,4264 \Omega/\text{Km.}$$

$$\Rightarrow X_l = 0,4264 \cdot 10 \Rightarrow X_l = 4,264 \Omega$$

$$\text{Ce qui donne : } L_1 = \frac{4,264}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow L_1 = 13580 \mu\text{H}$$

V.3.2.1.3) Calcul de la capacité :

$$C_1 = \frac{B_l}{\omega} = \frac{B_l}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } B_l = B_0 \cdot l_1$$

$$\text{Tel que : } B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{2 \cdot 8,5}{24 \cdot 10^{-3}}} \Rightarrow B_0 = 2,6594 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\Omega\text{Km.}$$

$$\Rightarrow B_l = 2,6594 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \Rightarrow B_l = 2,6594 \cdot 10^{-5} \text{ 1}/\Omega.$$

$$\text{Ce qui donne : } C_1 = \frac{2,6594 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow C_1 = 0,084694 \mu\text{F.}$$

On divise la ligne par vingt éléments équivalents de longueur $l_{11} = 0,5 \text{ Km}$, on aura :

$$R_{11} = \frac{R_l}{20} = \frac{0,9747}{20} \Rightarrow R_{11} = 0,048735 \Omega.$$

$$L_{11} = \frac{L_l}{20} = \frac{13580}{20} \Rightarrow L_{11} = 679 \mu\text{H}.$$

$$C_{11} = \frac{C_l}{20} = \frac{0,084694}{20} \Rightarrow C_{11} = 0,0042347 \mu\text{F}.$$

V.3.2.2) Calcul des paramètres du câble :

V.3.2.2.1) Calcul de la résistance :

$$R_c = R_0 \cdot l_c = 0,092 \cdot 3 \Rightarrow R_c = 0,276 \Omega$$

V.3.2.2.2) Calcul de l'inductance :

$$L_c = \frac{X_c}{W} = \frac{X_c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } X_c = X_0 \cdot l_c = 0,147 \cdot 3 \Rightarrow X_c = 0,441 \Omega.$$

$$\text{Donc : } L_c = \frac{0,441}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow L_c = 1404,458 \mu\text{H}.$$

V.3.2.2.3) Calcul de la capacité :

$$C_c = \frac{B_c}{W} = \frac{B_c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } B_c = B_0 \cdot l_c$$

$$\text{Tel que : } B_0 = \frac{3850 \cdot 10^3}{220^2 \cdot 10^6} \Rightarrow B_0 = 7,9545 \cdot 10^{-5} \text{ 1}/\Omega\text{Km}.$$

$$\text{Donc : } B_c = 7,9545 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \Rightarrow B_c = 23,8636 \cdot 10^{-5} \text{ 1}/\Omega.$$

$$\text{Ce qui donne : } C_c = \frac{23,8636 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow C_c = 0,759988 \mu\text{F}.$$

On divise le câble par trente éléments équivalant de longueur $l_{c1} = 100 \text{ m}$. On aura :

$$R_{c1} = \frac{R_c}{30} = \frac{0,276}{30} \Rightarrow R_{c1} = 0,0092 \Omega.$$

$$L_{c1} = \frac{L_c}{30} = \frac{1404,458}{30} \Rightarrow L_{c1} = 46,81526 \mu\text{H}.$$

$$C_{c1} = \frac{C_c}{30} = \frac{0,759988}{30} \Rightarrow C_{c1} = 0,025333 \mu\text{F}$$

V.3.2.3) Calcul des paramètres du transformateur :**V.3.2.3.1) Calcul de la résistance :**

$$R_{Tr} = K_1 \cdot R_{cc} \quad \text{avec : } K_1 = 8,4398$$

$$R_{cc} = \frac{315 \cdot 10^3 \cdot (242 \cdot 10^3)^2}{(80 \cdot 10^6)^2} \quad \Rightarrow \quad R_{cc} = 2,88245 \, \Omega.$$

$$\text{Donc : } R_{Tr} = 8,4398 \cdot 2,88245 \quad \Rightarrow \quad R_{Tr} = 24,3273 \, \Omega.$$

L'enroulement du transformateur est divisé par dix (10) éléments équivalents ayant une résistance : $R_{Tr1} = \frac{24,3273}{10} \quad \Rightarrow \quad R_{Tr1} = 2,43273 \, \Omega.$

V.3.2.3.2) Calcul de l'inductance propre d'un élément de l'enroulement :

L'inductance d'un élément de l'enroulement contient sa propre inductance et les inductances mutuelles avec les autres éléments de cet enroulement.

a) Calcul de l'inductance d'un élément :

$$L_{tot} = K_2 \cdot L_{cc} \quad \text{avec : } K_2 = 0,65$$

$$L_{cc} = \frac{U_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 100 \cdot S_n} = \frac{11 \cdot (242 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 100 \cdot (80 \cdot 10^6)} \quad \Rightarrow \quad L_{cc} = 0,25645 \, \text{H}$$

$$\text{Donc : } L_{tot} = 0,65 \cdot 0,25645 \quad \Rightarrow \quad L_{tot} = 0,166692 \, \text{H}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents, donc :

$$L_{\text{élé}} = \frac{L_{tot}}{10} = \frac{0,166692}{10} \quad \Rightarrow \quad L_{\text{élé}} = 16669 \, \mu\text{H}$$

b) Calcul des inductances mutuelles M_{ij} :

Calculons d'abord les coefficients de mutualités $\frac{M_{ij}}{L_{pro}}$ en utilisant la fonction

$\frac{M_{ij}}{L_{pro}} = f\left(\frac{a}{b}\right)$ représentée sur la figure (V.5).

$$a = \frac{1940}{10} \quad \Rightarrow \quad a = 194 \, \text{mm}.$$

$$b = \frac{d_{moyHT} - d_{noy}}{2} \quad \text{avec : } d_{moyHT} = \frac{1640 + 1330}{2} = 1485 \Rightarrow d_{moyHT} = 1485 \text{ mm.}$$

$$\text{Donc : } b = \frac{1485 - 860}{2} = 312,5 \quad \Rightarrow b = 312,5 \text{ mm.}$$

Le tableau (V.5) suivant illustre toutes les valeurs des coefficients de mutualité déduites de la courbe figure (V.5).

Tableau (V.5)

N ⁰ de la mutuelle	a (mm)	b (mm)	$\frac{a}{b}$	$\sigma = \frac{M_{ij}}{L_{pro}}$	M _{ij} (μH)
1	194	312,5	0,6208	0,5488	4183
2	388		1,2416	0,29155	2222,2
3	582		1,8624	0,15606	1189,5
4	776		2,4832	0,083875	639,3
5	970		3,104	0,05063	385,9
6	1164		3,7248	0,02562	165,27
7	1358		4,3456	0,01525	116,23
8	1552		4,9664	0,00915	69,74
9	1746		5,5872	0,0061	46,5

$$\sum \sigma = 1,187035$$

Donc l'inductance propre d'un élément sera :

$$L_{pro} = \frac{L_{élé}}{1 + \sum \sigma} = \frac{0,0166692}{2,187035} \Rightarrow L_{pro} = 7622 \text{ } \mu\text{H}$$

V.3.2.3.3) Calcul de la capacité transversale :

$$C_{Tr} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{intHT} + d_{extBT}}{d_{intHT} - d_{extBT}}$$

$$\Rightarrow C_{Tr} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 1,94 \cdot \frac{1,33 + 1,12}{1,33 - 1,12} \Rightarrow C_{Tr} = 0,002453 \text{ } \mu\text{F}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité $C_{Tr1} = \frac{0,002453}{10} \Rightarrow C_{Tr1} = 0,0002453 \mu\text{F}$.

V.3.2.3.4) Calcul de la capacité longitudinale :

$K = \frac{C_{Tr}}{\alpha^2}$, tel que :

La valeur du facteur α sera déterminée d'après la courbe caractéristique de la répartition initiale de la tension figure (V.7), qui est dressée à partir du tableau (V.6) donnée par le constructeur.

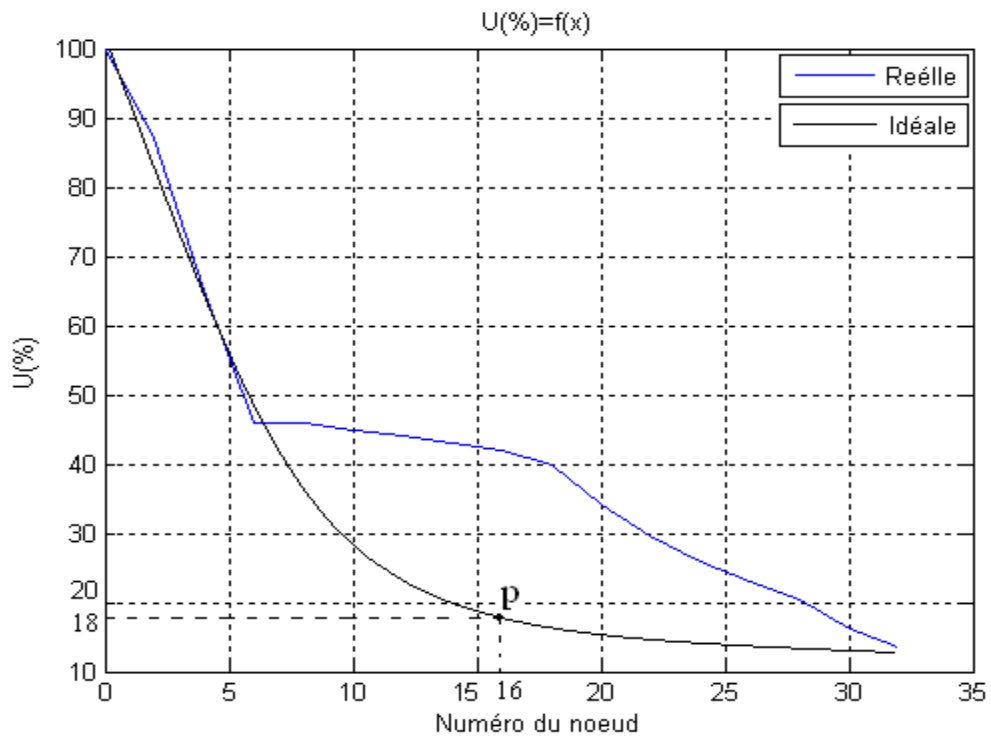


Figure (V.7) : Répartition initiale de la tension fournie par le constructeur.

Idéale : courbe interpolée.

Tableau (V.6)

Numéro de nœud	U(%)
A-0	100
2-0	87
4-0	65
6-0	46
8-0	46
10-0	45
12-0	44
14-0	43
16-0	42
18-0	40
20-0	34,2
22-0	29,5
24-0	26
26-0	23
28-0	20,4
30-0	16,2
32-0	13,5

➤ **Détermination de facteur α :**

On fixe un point P (0,5 ; 0,18) sur la courbe figure (V.7) et on cherche la valeur de α

pour avoir $F(\alpha) = \frac{Sh[\alpha(1-x)]}{Sh(\alpha l)} - u(x) = 0$, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

α	3	3,2	3,495	3,55	3,6
F(α)	0,0537	0,0298	0	- 0,0058	- 0,0103

$F(\alpha) = 0$ pour $\alpha = 3,495$

$$\text{Donc : } K = \frac{0,002453}{3,495^2} \Rightarrow K = 0,0002 \mu\text{F.}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité longitudinale $K_1 = 0,0002 \cdot 10 \Rightarrow K_1 = 0,002 \mu\text{F.}$

V.3.3) Pour une tension 330 KV :

V.3.3.1) Calcul des paramètres de la ligne :

V.3.3.1.1) Calcul de la résistance :

$$R_l = R_0 \cdot l \Rightarrow R_l = 0,12 \times 10 \Rightarrow R_l = 1,2 \Omega$$

V.3.3.1.2) Calcul de l'inductance :

$$L_l = \frac{X_l}{W} = \frac{X_l}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } X_l = X_0 \cdot l \Rightarrow X_l = 0,331 \cdot 10 \Rightarrow X_l = 3,31 \Omega$$

$$\text{Ce qui donne : } L_l = \frac{3,31}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow L_l = 10541,4 \mu\text{H}$$

V.3.3.1.3) Calcul de la capacité :

$$C_l = \frac{B_l}{W} = \frac{B_l}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } B_l = B_0 \cdot l \Rightarrow B_l = 3,38 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \Rightarrow B_l = 3,38 \cdot 10^{-5} \text{ 1}/\Omega.$$

$$\text{Ce qui donne : } C_l = \frac{3,38 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow C_l = 0,107643 \mu\text{F.}$$

V.3.3.1.4) Calcul de la conductibilité :

$$G_l = G_0 \cdot l \quad \text{Tel que : } G_0 = \frac{\Delta P_{\text{couronne}}}{U_n^2} \Rightarrow G_0 = \frac{4,5 \cdot 10^3}{(330 \cdot 10^3)^2} \Rightarrow G_0 = \frac{4,5 \cdot 10^3}{330^2 \cdot 10^6}$$

$$\Rightarrow G_0 = 4,13223 \cdot 10^{-8} \text{ 1}/\Omega\text{Km.}$$

$$\text{Ce qui donne : } G_l = 4,13223 \cdot 10^{-8} \cdot 10 \Rightarrow G_l = 4,13223 \cdot 10^{-7} \text{ 1}/\Omega.$$

On divise la ligne par 20 éléments équivalents de longueur $l_{11} = 0,5 \text{ Km}$, on aura :

$$R_{11} = \frac{R_l}{20} = \frac{1,2}{20} \Rightarrow R_{11} = 0,06 \Omega.$$

$$L_{11} = \frac{L_l}{20} = \frac{13579,62}{20} \Rightarrow L_{11} = 678,981 \mu\text{H.}$$

$$C_{11} = \frac{C_l}{20} = \frac{0,107643}{20} \Rightarrow C_{11} = 0,005382 \mu\text{F.}$$

$$G_{11} = \frac{G_l}{20} = \frac{4,13223 \cdot 10^{-7}}{20} \Rightarrow G_{11} = 0,2066 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}\Omega.$$

V.3.3.2) Calcul des paramètres du câble :

V.3.3.2.1) Calcul de la résistance :

$$R_c = R_0 \cdot l_c \Rightarrow R_c = 0,032 \cdot 3 \Rightarrow R_c = 0,096 \Omega$$

V.3.3.2.2) Calcul de l'inductance :

$$L_c = \frac{X_c}{W} = \frac{X_c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } X_c = X_0 \cdot l_c = 0,075 \cdot 3 \Rightarrow X_c = 0,225 \Omega.$$

$$\text{Donc : } L_c = \frac{0,225}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow L_c = 716,560 \mu\text{H}.$$

V.3.3.2.3) Calcul de la capacité :

$$C_c = \frac{B_c}{W} = \frac{B_c}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{avec: } B_c = B_0 \cdot l_c$$

$$\text{Tel que } B_0 = \frac{Q_0}{U_n^2} \Rightarrow B_0 = \frac{9000 \cdot 10^3}{330^2 \cdot 10^6} \Rightarrow B_0 = 8,26446 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}\Omega\text{Km}.$$

$$\text{Donc : } B_c = 8,26446 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \Rightarrow B_c = 24,79338 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}\Omega.$$

$$\text{Ce qui donne : } C_c = \frac{24,79338 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \Rightarrow C_c = 0,7896 \mu\text{F}.$$

On divise le câble par trente éléments équivalant de longueur $l_{c1} = 100 \text{ m}$. On aura :

$$R_{c1} = \frac{R_c}{30} = \frac{0,096}{30} \Rightarrow R_{c1} = 0,0032 \Omega.$$

$$L_{c1} = \frac{L_c}{30} = \frac{716,560}{30} \Rightarrow L_{c1} = 23,88533 \mu\text{H}.$$

$$C_{c1} = \frac{C_c}{30} = \frac{0,7896}{30} \Rightarrow C_{c1} = 0,02632 \mu\text{F}.$$

V.3.3.3) Calcul des paramètres du transformateur :

V.3.3.3.1) Calcul de la résistance :

$$R_{Tr} = K_1 \cdot R_{cc} \quad \text{avec : } K_1 = 8,4398$$

$$R_{cc} = \frac{380 \cdot 10^3 \cdot (347 \cdot 10^3)^2}{(125 \cdot 10^6)^2} \Rightarrow R_{cc} = 2,928346 \Omega.$$

$$\text{Donc: } R_{Tr} = 8,4398 \cdot 2,928346 \Rightarrow R_{Tr} = 24,71465 \Omega.$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une résistance : $R_{Tr1} = \frac{24,71465}{10} \Rightarrow R_{Tr1} = 2,471465 \Omega.$

V.3.3.3.2) Calcul de l'inductance propre d'un élément de l'enroulement :

L'inductance d'un élément de l'enroulement contient sa propre inductance et les inductances mutuelles avec les autres éléments de cet enroulement.

a) Calcul de l'inductance d'un élément :

$$L_{tot} = K_2 \cdot L_{cc} \quad \text{avec : } K_2 = 0,65$$

$$L_{cc} = \frac{U_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 100 \cdot S_n} = \frac{11 \cdot (347 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 100 \cdot (125 \cdot 10^6)} \Rightarrow L_{cc} = 0,322476 \text{ H}$$

$$\text{Donc : } L_{tot} = 0,65 \cdot 0,322476 \Rightarrow L_{tot} = 0,209961 \text{ H}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents, donc :

$$L_{\text{élé}} = \frac{L_{tot}}{10} = \frac{0,209961}{10} \Rightarrow L_{\text{élé}} = 20996 \mu\text{H}$$

b) Calcul des inductances mutuelles M_{ij} :

Calculons d'abord les coefficients de mutualités $\frac{M_{ij}}{L_{pro}}$ en utilisant la fonction

$$\frac{M_{ij}}{L_{pro}} = f\left(\frac{a}{b}\right) \text{ représentée sur la figure (V.5).}$$

$$a = \frac{2040}{10} = 204 \Rightarrow a = 204 \text{ mm.}$$

$$b = \frac{d_{moyHT} - d_{noy}}{2} \quad \text{avec : } d_{moyHT} = \frac{1890 + 1350}{2} = 1620 \Rightarrow d_{moyHT} = 1620 \text{ mm.}$$

$$\text{Donc : } b = \frac{1620 - 900}{2} = 360 \Rightarrow b = 360 \text{ mm.}$$

Le tableau (V.7) suivant illustre toutes les valeurs des coefficients de mutualité déduites de la courbe figure (V.5).

Tableau (V.7)

N ^o de la mutuelle	a (mm)	b (mm)	$\frac{a}{b}$	$\sigma = \frac{M_{ij}}{L_{pro}}$	M _{ij} (μH)
1	204	360	0,5666	0,5659	5388,5
2	408		1,1333	0,3344	3184,2
3	612		1,7000	0,1509	1436,8698
4	816		2,2667	0,1037	987,4314
5	1020		2,8333	0,0595	566,56
6	1224		3,4000	0,0457	435,1554
7	1428		3,9667	0,0250	238,05
8	1632		4,5333	0,0122	116,1684
9	1836		5,1000	0,0061	58,0842

$$\Sigma \sigma = 1,3034$$

Donc l'inductance propre d'un élément est donnée par :

$$L_{pro} = \frac{L_{élé}}{1 + \Sigma \frac{M_{ij}}{L_{pro}}} = \frac{L_{élé}}{1 + \Sigma \sigma} = \frac{20996}{1 + 1,3034} \Rightarrow L_{pro} = 9115 \mu\text{H}$$

V.3.3.3) Calcul de la capacité transversale :

$$C_{Tr} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{d_{intHT} + d_{extBT}}{d_{intHT} - d_{extBT}}$$

$$\Rightarrow C_{Tr} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2,04 \cdot \frac{1,35 + 1,15}{1,35 - 1,15} \Rightarrow C_{Tr} = 0,0028 \mu\text{F}$$

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité $C_{Tr1} = \frac{0,0028}{10} \Rightarrow C_{Tr1} = 0,00028 \mu\text{F}$.

V.3.3.4) Calcul de la capacité longitudinale :

$$K = \frac{C_{Tr}}{a^2}, \text{ tel que :}$$

La valeur du facteur α sera déterminée d'après la courbe caractéristique de la répartition initiale de la tension figure (V.8), qui est dressée à partir du tableau (V.8) donnée par le constructeur.

Tableau (V. 8)

Numéro de nœud	U(%)
A-0	100
2-0	95,5
4-0	75,4
6-0	71,5
8-0	70,1
10-0	64,6
12-0	60,2
14-0	52,5
16-0	35,5
18-0	28,9
20-0	24,3
22-0	18,1
24-0	16,4
26-0	13,2
28-0	11,6
30-0	10,6
32-0	9,9
34-0	9,3
36-0	8,5
38-0	7,9
40-0	7,3
42-0	6,2
44-0	5,8

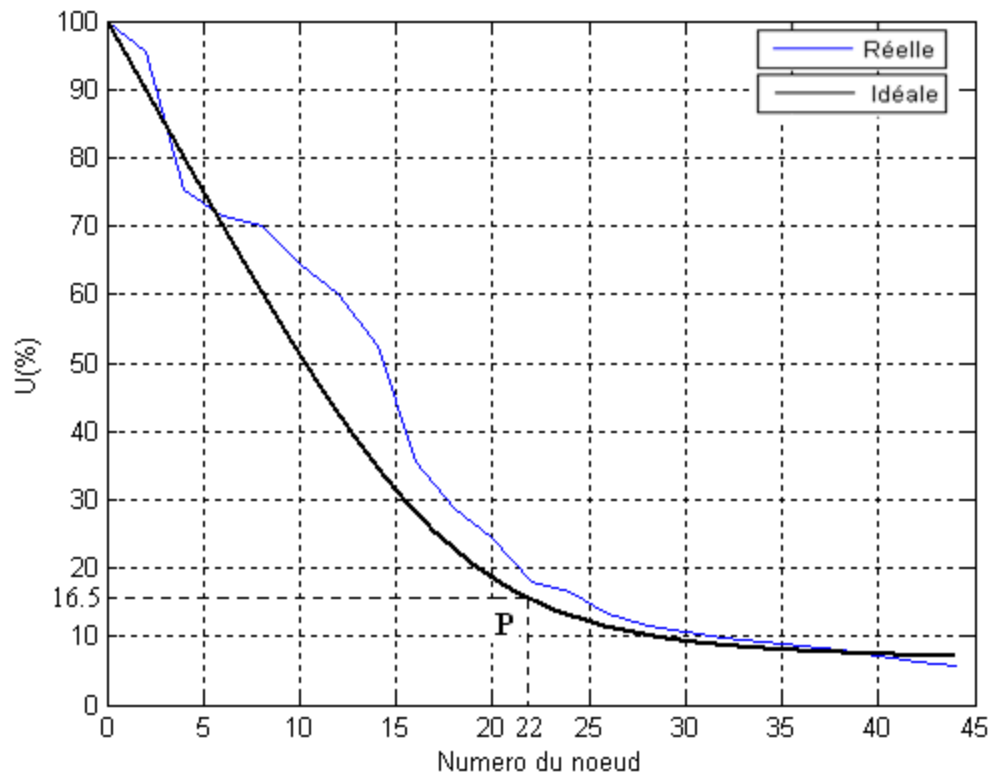


Figure (V.8) : Répartition initiale de la tension fournie par le constructeur.

Courbe idéale : courbe interpolée.

➤ **Détermination de facteur α :**

On fixe un point P (0,5 ; 0,165) sur la courbe figure (V.8) et on cherche la valeur de α pour avoir $F(\alpha) = \frac{\text{Sh}[\alpha(1-x)]}{\text{Sh}(\alpha)} - u(x) = 0$, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

α	2	3	3,6502	4	5
$F(\alpha)$	0,2452	0,0687	0	- 0,0272	- 0,0824

$F(\alpha) = 0$ pour $\alpha = 3,6502$

Donc : $K = \frac{0,0028}{3,6502^2} \Rightarrow K = 0,00021 \mu\text{F}$.

L'enroulement du transformateur est divisé par 10 éléments équivalents ayant une capacité longitudinale $K_1 = 0,00021 \cdot 10 \Rightarrow K_1 = 0,0021 \mu\text{F}$.

Chapitre VI :



Modélisation et analyse des résultats.

VI.1) Mise en équations du schéma électrique équivalent :

Notre résonnement se base sur le schéma de la figure (V.3), en utilisant une onde complète d'essai 1,2/50 μ s qui est exprimée par l'expression: $u_1 = U_1 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$.

Où : i_1 et u_1 sont respectivement le courant et la tension appliqués.

L'application des deux lois de KIRCHOFF nous conduit aux systèmes d'équations :

VI.1.1) Ecriture linéaire des équations du schéma équivalent :

VI.1.1.1) Pour la ligne :

VI.1.1.1.a) Equations des tensions :

Les équations différentielles des tensions dans la ligne sont :

$$u_1 - u_2 = R_{l1} i_2 + L_{l1} \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 - u_3 = R_{l1} i_3 + L_{l1} \frac{di_3}{dt}$$

⋮

$$u_{12} - u_{13} = R_{l1} i_{13} + L_{l1} \frac{di_{13}}{dt}$$

⋮

$$u_{20} - u_{21} = R_{l1} i_{21} + L_{l1} \frac{di_{21}}{dt}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$u_n - u_{(n+1)} = R_{l1} i_{(n+1)} + L_{l1} \frac{di_{(n+1)}}{dt} \quad \text{Pour } 1 \leq n < 21$$

VI.1.1.1.b) Equations des courants :

Au nœud (1) à l'entrée de la ligne on a : $i_1 = i_2 + i_2'$

Avec : $i_2' = i_{G11} + i_{C11} = G_{11} u_1 + C_{11} \frac{du_1}{dt}$ ce qui donne :

$$\dot{i}_1 - \dot{i}_2 = G_{11} u_1 + C_{11} \frac{du_1}{dt}$$

$$\dot{i}_2 - \dot{i}_3 = G_{11} u_2 + C_{11} \frac{du_2}{dt}$$

⋮

$$\dot{i}_{12} - \dot{i}_{13} = G_{11} u_{12} + C_{11} \frac{du_{12}}{dt}$$

⋮

$$\dot{i}_{20} - \dot{i}_{21} = G_{11} u_{20} + C_{11} \frac{du_{20}}{dt}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$\dot{i}_n - \dot{i}_{(n+1)} = G_{11} u_n + C_{11} \frac{du_n}{dt} \quad \text{Pour } 1 \leq n < 21$$

VI.1.1.2) Pour le câble :

VI.1.1.2.a) Equations des tensions :

Les équations différentielles des tensions dans le câble sont :

$$u_{21} - u_{22} = R_{c1} \dot{i}_{22} + L_{c1} \frac{di_{22}}{dt}$$

$$u_{22} - u_{23} = R_{c1} \dot{i}_{23} + L_{c1} \frac{di_{23}}{dt}$$

⋮

$$u_{40} - u_{41} = R_{c1} \dot{i}_{41} + L_{c1} \frac{di_{41}}{dt}$$

⋮

$$u_{50} - u_{51} = R_{c1} \dot{i}_{51} + L_{c1} \frac{di_{51}}{dt}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$u_n - u_{(n+1)} = R_{c1} \dot{i}_{(n+1)} + L_{c1} \frac{di_{(n+1)}}{dt} \quad \text{Pour } 21 \leq n < 51$$

VI.1.1.2.b) Equations des courants :

Au nœud (21) à l'entrée du câble on a :

$$i_{j1} = i_p + i_{22} + i_{22}' \Rightarrow i_{j1} - i_{22} = i_p + i_{22}'$$

Tel que : i_p : le courant dans le parafoudre.

i_{j1} : le courant de jonction (ligne, câble).

L'expression de la tension en fonction du courant au niveau du parafoudre s'écrit :

$$u_p = A \cdot i_p^{\alpha_p} \quad [17] \quad \text{tel que : } \alpha_p \text{ est le facteur de non linearité du parafoudre.}$$

$$\Rightarrow \ln(u_p) = \ln(A) + \alpha_p \ln(i_p) \Rightarrow i_p = e^{\frac{\ln(u_p) - \ln(A)}{\alpha_p}}$$

$$i_{22}' = C_{c1} \frac{du_{21}}{dt}$$

$$\text{donc : } i_{j1} - i_{22} = e^{\frac{\ln(u_p) - \ln(A)}{\alpha_p}} + C_{c1} \frac{du_{21}}{dt}$$

$$i_{22} - i_{23} = C_{c1} \frac{du_{22}}{dt}$$

$$i_{23} - i_{24} = C_{c1} \frac{du_{23}}{dt}$$

⋮

$$i_{40} - i_{41} = C_{c1} \frac{du_{40}}{dt}$$

⋮

$$i_{50} - i_{51} = C_{c1} \frac{du_{50}}{dt}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$i_n - i_{(n+1)} = C_{c1} \frac{du_n}{dt} \quad \text{Pour } 22 \leq n < 51$$

VI.1.1.3) Pour le transformateur :

u_{51} et i_{j2} sont respectivement la tension et le courant qui arrivent à l'entrée du transformateur.

VI.1.1.3.a) Equations des tensions :

Les équations différentielles des tensions dans l'enroulement HT du transformateur sont :

$$\begin{aligned}
 u_{51} - u_{52} &= R_{Tr1} i_{52} + L_{Tr1} \frac{di_{52}}{dt} + M_{12} \frac{di_{53}}{dt} + M_{13} \frac{di_{54}}{dt} + \dots + M_{110} \frac{di_{61}}{dt} \\
 u_{52} - u_{53} &= R_{Tr1} i_{53} + L_{Tr1} \frac{di_{53}}{dt} + M_{21} \frac{di_{52}}{dt} + M_{23} \frac{di_{54}}{dt} + \dots + M_{210} \frac{di_{61}}{dt} \\
 &\vdots \\
 u_{60} - u_{61} &= R_{Tr1} i_{61} + L_{Tr1} \frac{di_{61}}{dt} + M_{101} \frac{di_{52}}{dt} + M_{102} \frac{di_{53}}{dt} + \dots + M_{109} \frac{di_{60}}{dt}
 \end{aligned}$$

Vu que les inductances mutuelles M_{ij} ($i = 1 \dots 10, j = 1 \dots 10, i \neq j$) sont réciproques, on aura :

$$M_{ij} = M_{ji}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$u_n - u_{(n+1)} = R_{Tr1} i_{(n+1)} + L_{Tr1} \frac{di_{(n+1)}}{dt} + \sum_{j=1}^{10} M_{ij} \frac{di_{(j+51)}}{dt} \text{ avec : } i = n - 51 \text{ et } i \neq j$$

VI.1.1.3.b) Equations des courants :

Au nœud (51) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_{j2} = i_{52} + i_{K1} + i_{52}' \implies i_{j2} - i_{52} = i_{K1} + i_{52}' \text{ avec: } i_{52}' = C_{Tr1} \frac{du_{51}}{dt} \text{ et } i_{K1} = K_1 \frac{d(u_{51} - u_{52})}{dt}$$

Tel que : i_{j2} : le courant de jonction (câble, transformateur).

$$\text{Ce qui donne : } i_{j2} - i_{52} = - K_1 \frac{d u_{52}}{dt} + (C_{Tr1} + K_1) \frac{du_{51}}{dt}$$

Au nœud (52) qui correspond à la tension u_{52} on a :

$$i_{52} + i_{K1} = i_{53} + i_{53}' + i_{K2} \Rightarrow i_{52} - i_{53} = i_{53}' + i_{K2} - i_{K1}$$

$$\text{Avec : } i_{K2} = K_1 \frac{d(u_{52} - u_{53})}{dt} \text{ et } i_{53}' = C_{Tr1} \frac{du_{52}}{dt}$$

$$\text{Ce qui donne : } i_{52} - i_{53} = C_{Tr1} \frac{du_{52}}{dt} + K_1 \frac{d(u_{52} - u_{53})}{dt} - K_1 \frac{d(u_{51} - u_{52})}{dt}$$

$$i_{j2} - i_{52} = -K_1 \frac{d u_{52}}{dt} + (C_{Tr1} + K_1) \frac{du_{51}}{dt}$$

$$i_{52} - i_{53} = -K_1 \frac{du_{51}}{dt} + (2 K_1 + C_{Tr1}) \frac{du_{52}}{dt} - K_1 \frac{du_{53}}{dt}$$

$$i_{53} - i_{54} = -K_1 \frac{du_{52}}{dt} + (2 K_1 + C_{Tr1}) \frac{du_{53}}{dt} - K_1 \frac{du_{54}}{dt}$$

⋮

$$i_{60} - i_{61} = -K_1 \frac{du_{59}}{dt} + (2 K_1 + C_{Tr1}) \frac{du_{60}}{dt} - K_1 \frac{du_{61}}{dt}$$

$$i_{61} - i_{62} = -K_1 \frac{d u_{60}}{dt} + (C_{Tr1} + K_1) \frac{du_{61}}{dt}$$

Tel que : i_{62} est le courant traversant la résistance de la mise à la terre R_N . Avec $i_{62} = \frac{u_{61}}{R_N}$.

➤ **La forme généralisée :**

$$i_n - i_{(n+1)} = -K_1 \frac{du_{(n-1)}}{dt} (2 K_1 + C_{Tr1}) \frac{du_n}{dt} - K_1 \frac{du_{(n+1)}}{dt} \quad \text{Pour } 52 \leq n < 61$$

$$i_{52} \text{ se calcul comme suit : } i_{j2} - i_{52} = -K_1 \frac{d u_{52}}{dt} + (C_{Tr1} + K_1) \frac{du_{51}}{dt}$$

$$\text{Pour } n = 61 : i_{61} - i_{62} = -K_1 \frac{d u_{60}}{dt} + (C_{Tr1} + K_1) \frac{du_{61}}{dt}$$

VI.1.2) Ecriture matricielle des équations du schéma équivalent :

VI.1.2.1) Pour la ligne :

VI.1.2.1.a) Matrice des tensions :

$$\begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \\ \vdots \\ u_{12} - u_{13} \\ \vdots \\ u_{20} - u_{21} \end{bmatrix} = R_{l1} \begin{bmatrix} i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_{13} \\ \vdots \\ i_{21} \end{bmatrix} + L_{l1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_{13} \\ \vdots \\ i_{21} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_{13} \\ \vdots \\ i_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{l1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & L_{l1} & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & L_{l1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & L_{l1} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_1 - u_2 - R_{l1} \cdot i_2 \\ u_2 - u_3 - R_{l1} \cdot i_3 \\ \vdots \\ u_{12} - u_{13} - R_{l1} \cdot i_{13} \\ \vdots \\ u_{20} - u_{21} - R_{l1} \cdot i_{21} \end{bmatrix}$$

VI.1.2.1.b) Matrice des courants :

$$\begin{bmatrix} i_1 - i_2 \\ i_2 - i_3 \\ \vdots \\ i_{12} - i_{13} \\ \vdots \\ i_{20} - i_{21} \end{bmatrix} = G_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{12} \\ \vdots \\ u_{20} \end{bmatrix} + C_{c1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{12} \\ \vdots \\ u_{20} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{12} \\ \vdots \\ u_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{c1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & C_{c1} & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & C_{c1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & C_{c1} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} i_1 - i_2 - G_{c1} \cdot u_1 \\ i_2 - i_3 - G_{c1} \cdot u_2 \\ \vdots \\ i_{12} - i_{13} - G_{c1} \cdot u_{12} \\ \vdots \\ i_{20} - i_{21} - G_{c1} \cdot u_{20} \end{bmatrix}$$

VI.1.2.2) Pour le câble :

VI.1.2.2.a) Matrice des tensions :

$$\begin{bmatrix} u_{21} - u_{22} \\ u_{22} - u_{23} \\ \vdots \\ u_{40} - u_{41} \\ \vdots \\ u_{50} - u_{51} \end{bmatrix} = R_{c1} \begin{bmatrix} i_{22} \\ i_{23} \\ \vdots \\ i_{41} \\ \vdots \\ i_{51} \end{bmatrix} + L_{c1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{22} \\ i_{23} \\ \vdots \\ i_{41} \\ \vdots \\ i_{51} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{22} \\ i_{23} \\ \vdots \\ i_{41} \\ \vdots \\ i_{51} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{c1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & L_{c1} & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & & L_{c1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & L_{c1} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_{21} - u_{22} - R_{c1} \cdot i_{22} \\ u_{22} - u_{23} - R_{c1} \cdot i_{23} \\ \vdots \\ u_{40} - u_{41} - R_{c1} \cdot i_{41} \\ \vdots \\ u_{50} - u_{51} - R_{c1} \cdot i_{51} \end{bmatrix}$$

VI.1.2.2.b) Matrice des courants :

$$\begin{bmatrix} i_{22} - i_{23} \\ i_{23} - i_{24} \\ \vdots \\ i_{40} - i_{41} \\ \vdots \\ i_{50} - i_{51} \end{bmatrix} = C_{c1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{22} \\ u_{23} \\ \vdots \\ u_{40} \\ \vdots \\ u_{50} \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{22} \\ u_{23} \\ \vdots \\ u_{40} \\ \vdots \\ u_{50} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{c1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & C_{c1} & & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & & C_{c1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & C_{c1} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} i_{22} - i_{23} \\ i_{23} - i_{24} \\ \vdots \\ i_{40} - i_{41} \\ \vdots \\ i_{50} - i_{51} \end{bmatrix}$$

VI.1.2.3) Pour le transformateur :

VI.1.2.3.a) Matrice des tensions :

$$\begin{bmatrix} u_{51} - u_{52} \\ u_{52} - u_{53} \\ \vdots \\ u_{56} - u_{57} \\ \vdots \\ u_{60} - u_{61} \end{bmatrix} = R_{Tr1} \begin{bmatrix} i_{52} \\ i_{53} \\ \vdots \\ i_{57} \\ \vdots \\ i_{61} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{Tr} & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{18} & M_{19} & M_{110} \\ M_{21} & L_{Tr} & M_{23} & \dots & M_{28} & M_{29} & M_{210} \\ M_{31} & M_{32} & L_{Tr} & & M_{38} & M_{39} & M_{310} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & & L_{Tr} & M_{89} & M_{810} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & \dots & M_{98} & L_{Tr} & M_{910} \\ M_{101} & M_{102} & M_{103} & & M_{108} & M_{109} & L_{Tr} \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{52} \\ i_{53} \\ \vdots \\ i_{57} \\ \vdots \\ i_{61} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{52} \\ i_{53} \\ \vdots \\ i_{57} \\ \vdots \\ i_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Tr} & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{18} & M_{19} & M_{110} \\ M_{21} & L_{Tr} & M_{23} & \dots & M_{28} & M_{29} & M_{210} \\ M_{31} & M_{32} & L_{Tr} & & M_{38} & M_{39} & M_{310} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & & L_{Tr} & M_{89} & M_{810} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & \dots & M_{98} & L_{Tr} & M_{910} \\ M_{101} & M_{102} & M_{103} & & M_{108} & M_{109} & L_{Tr} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_{51} - u_{52} - R_{Tr1} \cdot i_{52} \\ u_{52} - u_{53} - R_{Tr1} \cdot i_{53} \\ \vdots \\ u_{56} - u_{57} - R_{Tr1} \cdot i_{57} \\ \vdots \\ u_{60} - u_{61} - R_{Tr1} \cdot i_{61} \end{bmatrix}$$

VI.1.2.3.b) Matrice des courants :

$$\begin{bmatrix} i_{j2} - i_{52} \\ i_{52} - i_{53} \\ \vdots \\ i_{56} - i_{57} \\ \vdots \\ i_{60} - i_{61} \\ i_{61} - i_{62} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{Tr1} + K_1 & -K_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & -K_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_1 & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & -K_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -K_1 & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & -K_1 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & -K_1 & C_{Tr1} + K_1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{51} \\ u_{52} \\ \vdots \\ u_{56} \\ \vdots \\ u_{59} \\ u_{61} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{51} \\ u_{52} \\ \vdots \\ u_{56} \\ \vdots \\ u_{59} \\ u_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{Tr1} + K_1 & -K_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & -K_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_1 & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & -K_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -K_1 & C_{Tr1} + 2 \cdot K_1 & -K_1 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & -K_1 & C_{Tr1} + K_1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} i_{j2} - i_{52} \\ i_{52} - i_{53} \\ \vdots \\ i_{56} - i_{57} \\ \vdots \\ i_{60} - i_{61} \\ i_{61} - i_{62} \end{bmatrix}$$

Le développement de l'informatique a permis d'avoir une meilleure connaissance des contraintes éclectiques dues aux surtensions et de remplacer les modèles électromagnétiques par des simulations sur ordinateur qui ont apportées une connaissance plus précise de la distribution des tensions le long des circuits électriques quand ils sont soumis à des impulsions de foudre ou de manœuvre.

Dans notre étude, on a utilisé le logiciel **PSpice** ; la première version de **Spice** l'acronyme de *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* qui est conçu spécialement pour l'étude des phénomènes transitoires dans les circuits électriques.

VI.2) Principe de la simulation :

Le principe de la simulation du schéma équivalent de la ligne, du câble et de transformateur figure (V.3) consiste à :

- Numéroté chaque point de connexion des paramètres du schéma équivalent comme l'indique la figure (VI.1).

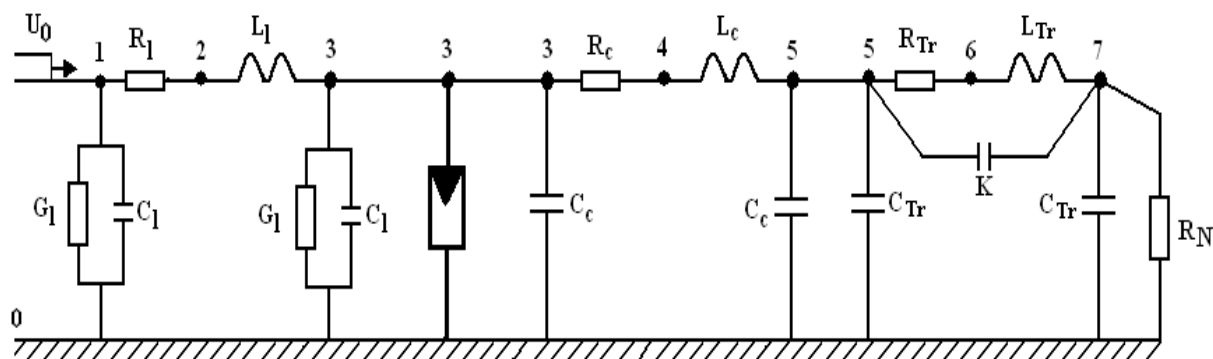


Figure (VI.1) : Disposition des tensions sur le schéma équivalent sur PSpice.

- Introduire les valeurs de ces paramètres dans les programmes de simulation en respectant la numérotation.
- La ligne de longueur $l_1 = 10$ Km est représentée par 20 éléments de 0,5 Km.
- Le câble de longueur $l_c = 3$ Km est représenté par 30 éléments de 100 m.
- Le transformateur est représenté ainsi par 10 éléments.

- En utilisant une onde complète d'essai 1,2/50 μ s, les surtensions appliquées pour les différentes tensions nominales à savoir 110, 220 et 330 KV sont les amplitudes de tensions égales à la tension de décharge des isolateurs des lignes correspondantes, ces valeurs sont comme suit :

U_n (KV)	110	220	330
U_{surt} (KV)	690	1100	1450

- Les parafoudres utilisés sont du type Z_nO pour les trois niveaux de tension ont les caractéristiques tensions-courants suivantes :

I_p (A)	0	1	10	100	1000	3000	5000	10000
U_p (KV)								
110	0	160	175	180	190	230	250	280
220	0	330	340	370	390	430	460	500
330	0	400	460	500	580	620	650	700

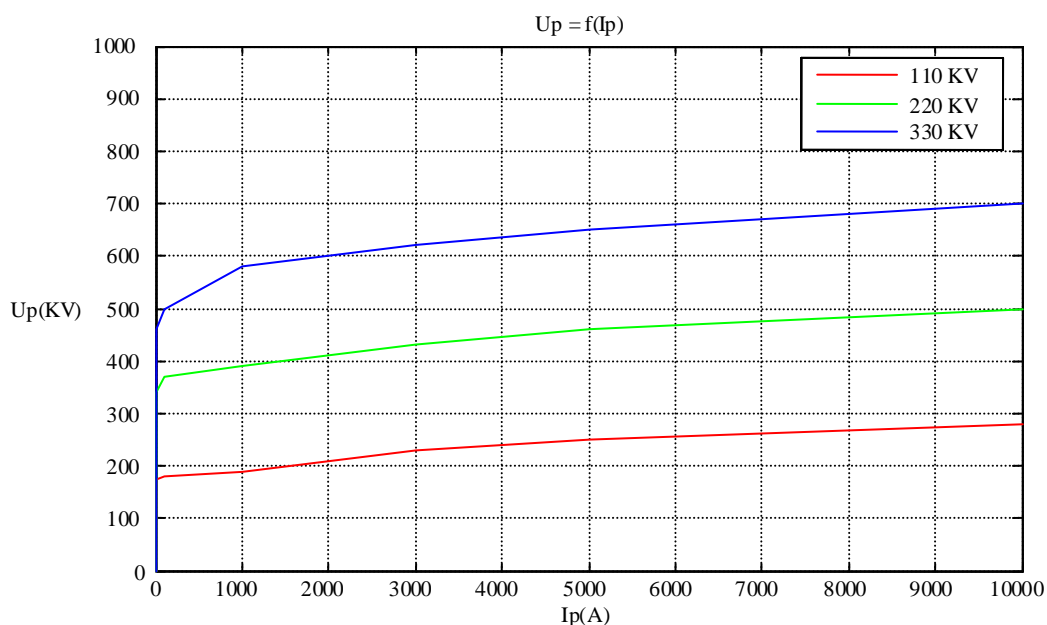


Figure (VI.2) : Caractéristiques tensions-courants des parafoudres.

VI.2.1) Détermination des impédances caractéristiques :

En incérant une résistance R_N à la fin de la ligne on fait varier sa valeur jusqu'en s'approchant du régime de concordance des valeurs des tensions de crêtes à l'entrée et à la sortie de la ligne ($U_{1max} = U_{41max}$), nous aurons égalité entre la résistance et l'impédance caractéristique de la ligne Z_{cl} . On suit la même procédure pour déterminer les impédances caractéristiques du câble Z_{cc} et du transformateur Z_{ctr} .

Pour les différentes tensions, on a pu obtenir les résultats suivants :

Tensions (KV)	110	220	330
Z_{cl} (Ω)	311	334	295
Z_{cc} (Ω)	31	35,5	23,1
Z_{tr} (Ω)	5150	9200	13200

La figure (VI.3) suivantes comme exemple, montre le régime de concordance dans la ligne pour la tension 110 KV.

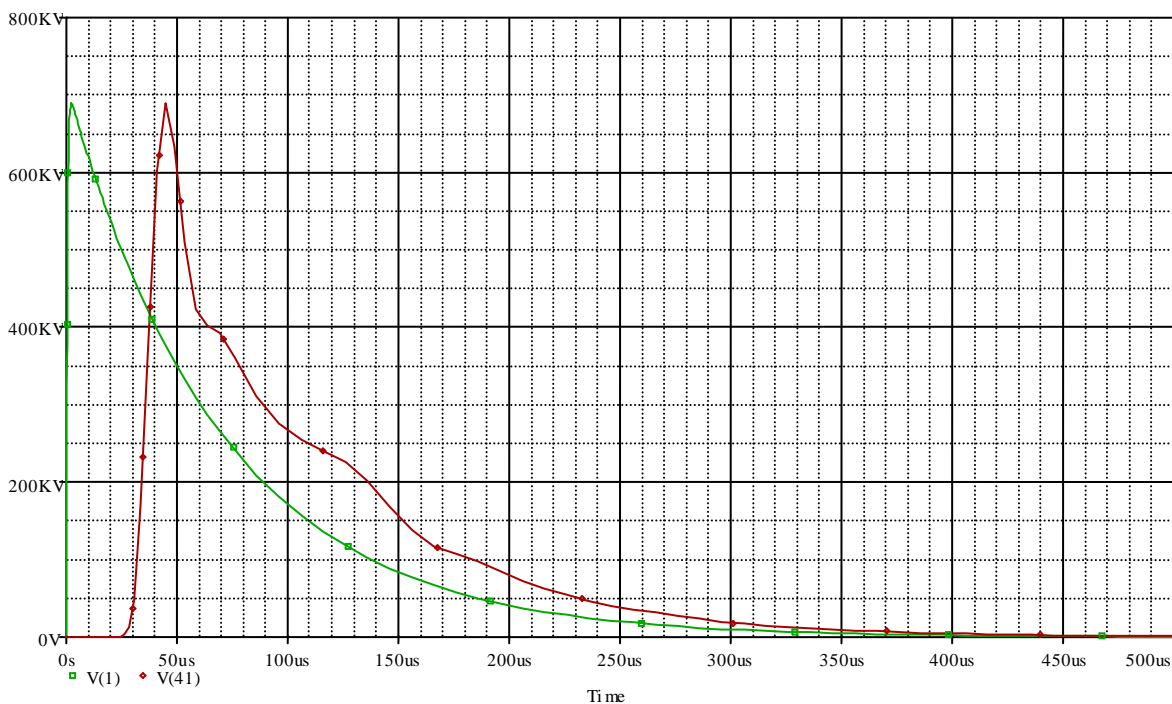
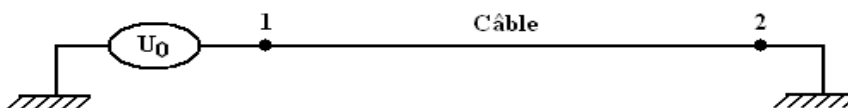


Figure (VI.3) : Régime de concordance dans la ligne pour 110 KV.

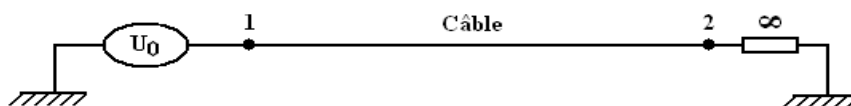
VI.2.2) Evaluation de la tension dans le câble :

Dans cette partie de notre travail on étudie le comportement du câble seul contre la surtension appliquée, pour cela on considère différents cas de sa connexion et dans chaque cas on évalue la tension dans différents points ainsi que la répartition de la tension le long du câble.

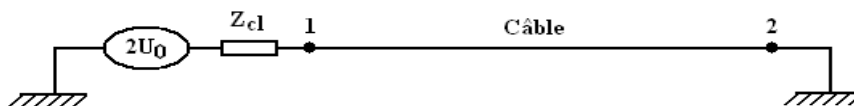
1^{er} cas : Câble soumis à une surtension dont l'autre extrémité mise à la terre.



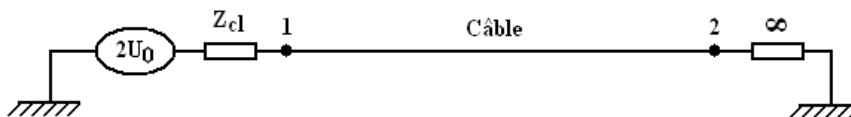
2^{ém} cas : Câble soumis à une surtension dont l'autre extrémité isolée de la terre.



3^{ém} cas : Câble soumis à une surtension à travers une ligne d'impédance caractéristique Z_{cl} et l'autre extrémité mise à la terre.



4^{ém} cas : Câble soumis à une surtension à travers une ligne d'impédance caractéristique Z_{cl} et l'autre extrémité isolée de la terre.



5^{ém} cas : Câble soumis à une surtension à travers une ligne d'impédance caractéristique Z_{cl} et l'autre extrémité connectée à un transformateur d'impédance caractéristique Z_{ctr} dont le neutre mis à la terre.

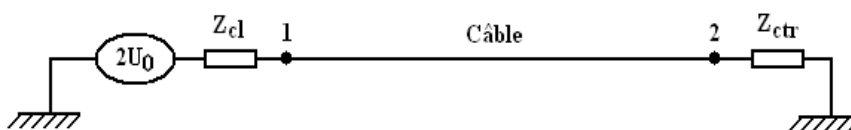


Figure (VI.4) : Schémas de principe pour les différents cas de connexion du câble.

Les résultats de simulation obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tensions (KV)		1 ^{er} cas	2 ^{em} cas	3 ^{em} cas	4 ^{em} cas	5 ^{em} cas
110	U _{surtension}	690	690	1380	1380	1380
	U _{entrée}	688,668	688,668	244,187	317,195	322,946
	U _{milieu}	826,714	1064,900	179,643	230,686	231,378
	U _{fin}	0	1522,400	0	331,106	328,688
	U _{max}	832,271	1522,400	244,187	331,106	328,688
220	U _{surtension}	1100	1100	2200	2200	2200
	U _{entrée}	1097,900	1097,900	392,053	571,798	565,755
	U _{milieu}	1317,100	1820,700	286,317	438,003	429,212
	U _{fin}	0	2468,500	0	581,817	573,150
	U _{max}	1331,300	2468,500	392,053	581,817	573,150
330	U _{surtension}	1450	1450	2890	2890	2890
	U _{entrée}	1447,200	1447,200	428,894	703,389	692,408
	U _{milieu}	1748,000	2594,700	330,780	576,803	573,463
	U _{fin}	0	3335,600	0	726,354	724,138
	U _{max}	1762,000	3335,600	428,894	726,354	724,138

Les figures (VI.5) ÷ (VI.19) suivantes représentent les surtensions à l'entrée, au milieu, à la fin et la surtension maximale dans le câble et les figures (VI.20) ÷ (VI.24) représentent la répartition de la tension le long du câble et cela pour les différents cas et pour les différentes tensions nominales.

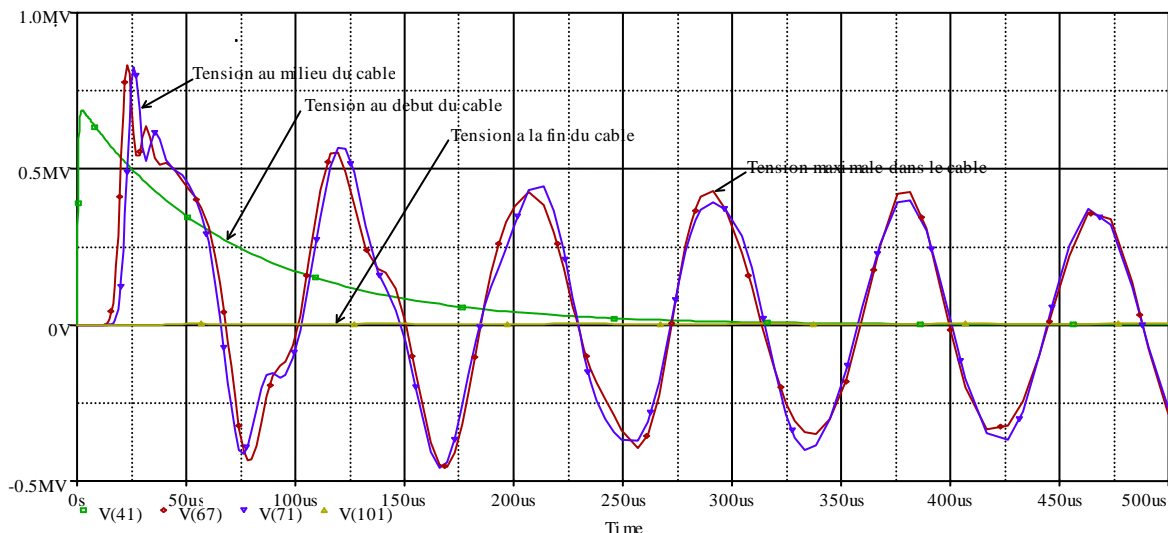


Figure (VI.5) : 1^{er} cas pour 110 KV.

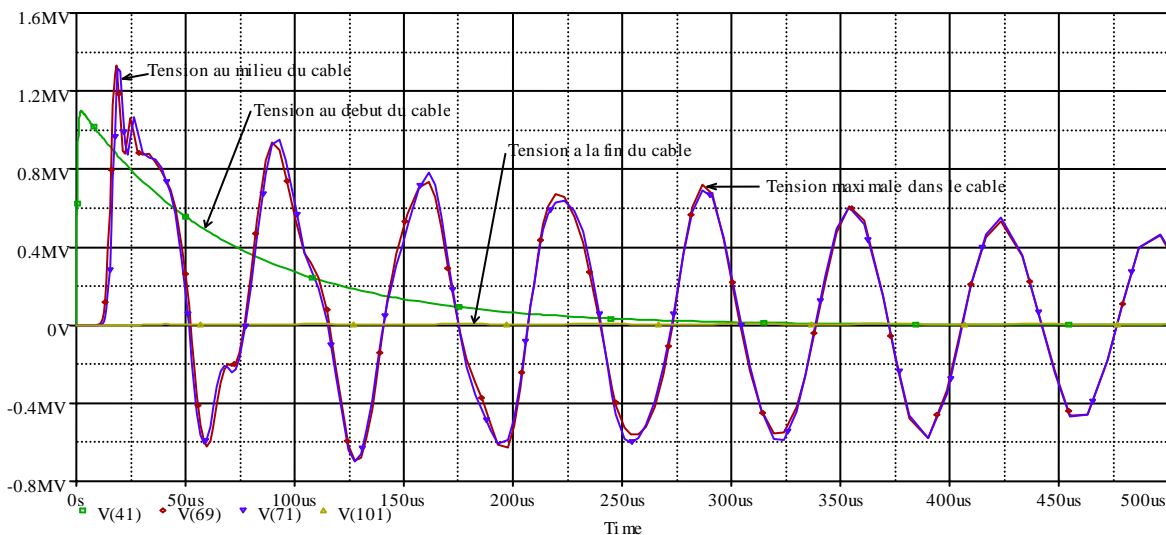


Figure (VI.6) : 1^{er} cas pour 220 KV.

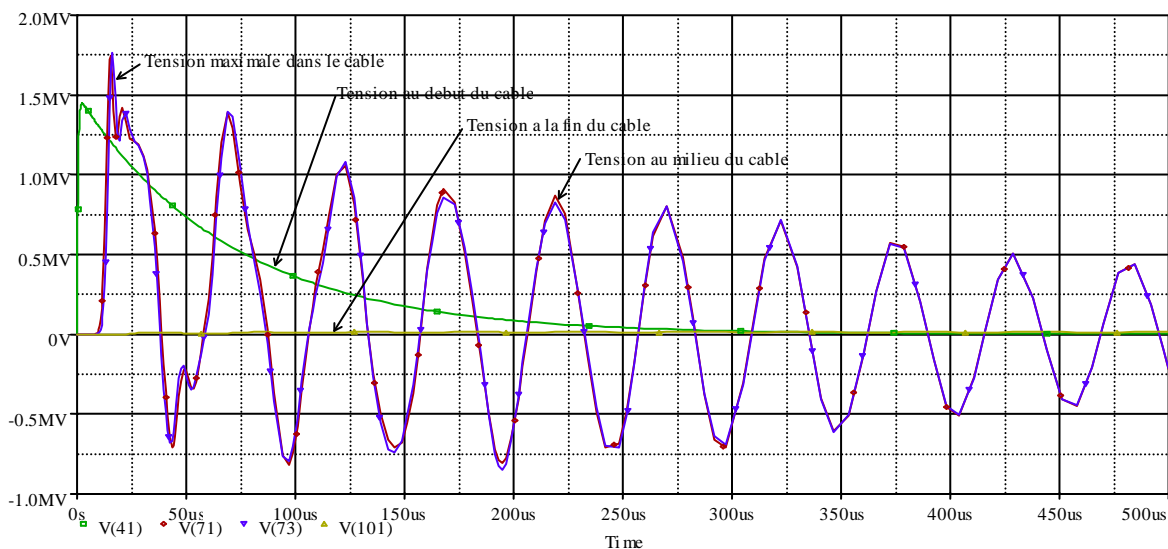


Figure (VI.7) : 1^{er} cas pour 330 KV.

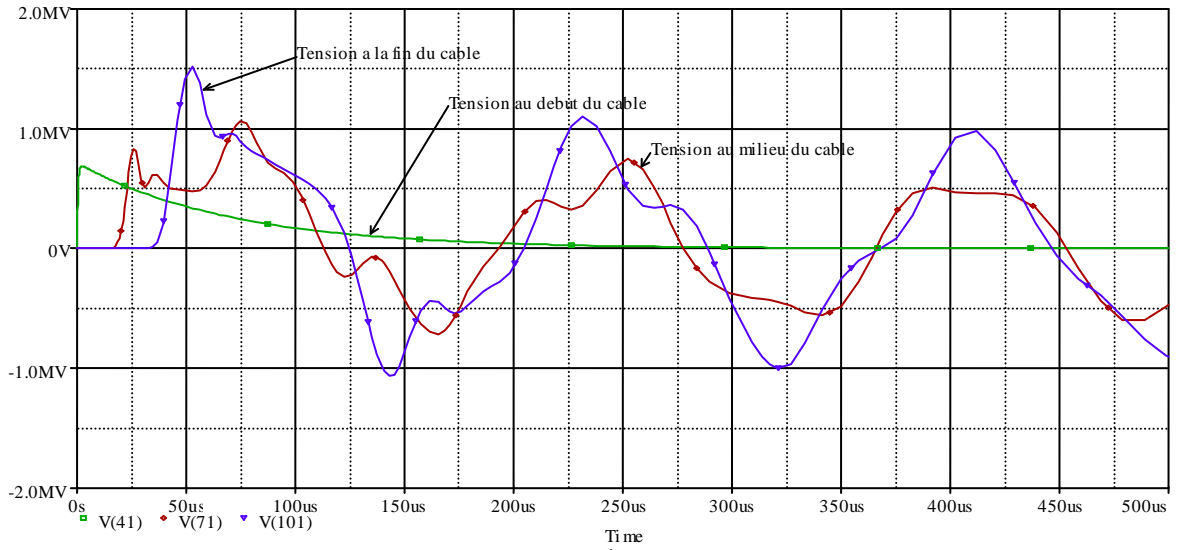


Figure (VI.8) : 2^{ème} cas pour 110 KV.

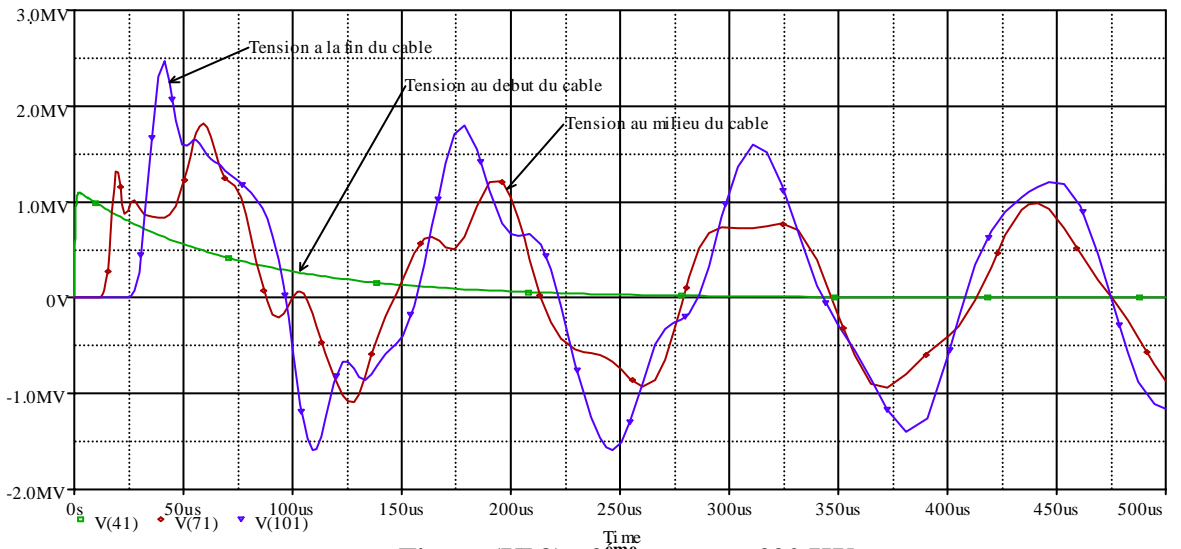


Figure (VI.9) : 2^{ème} cas pour 220 KV.

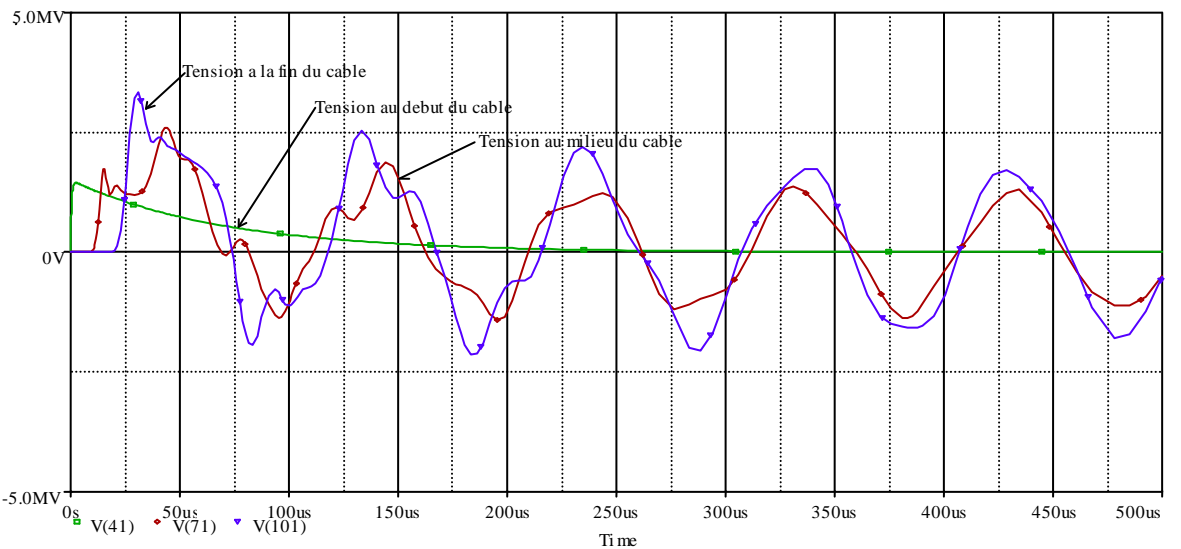


Figure (VI.10) : 2^{ème} cas pour 330 KV.

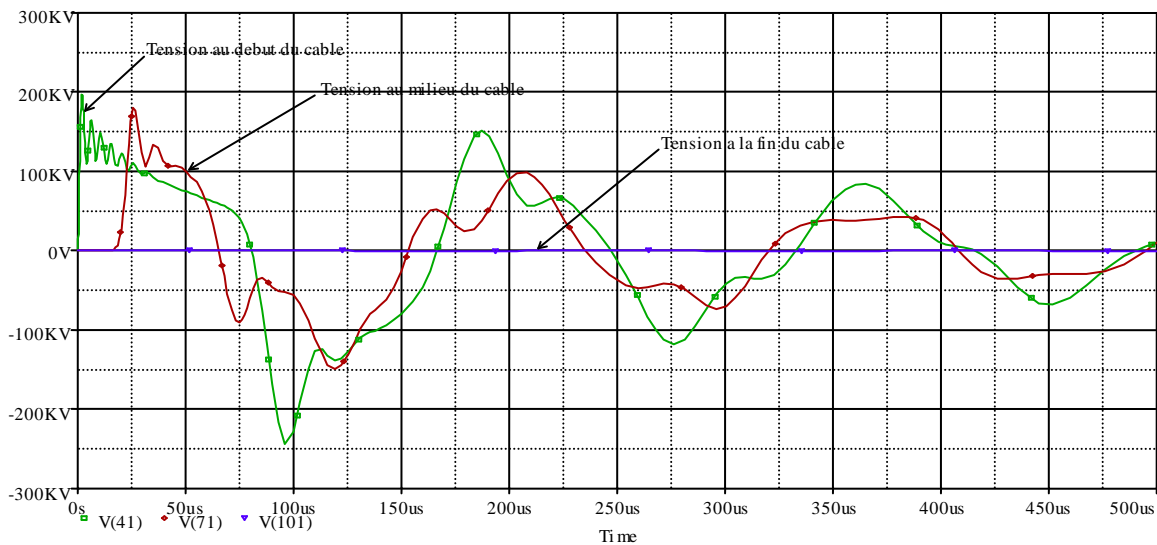


Figure (VI.11) : 3^{ème} cas pour 110 KV.

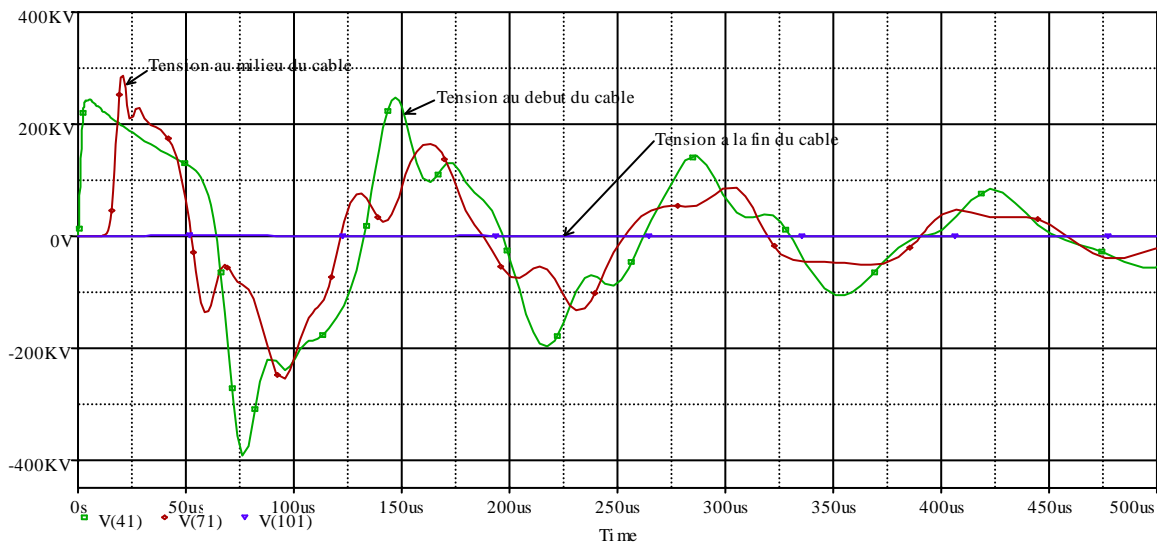


Figure (VI.12) : 3^{ème} cas pour 220 KV.

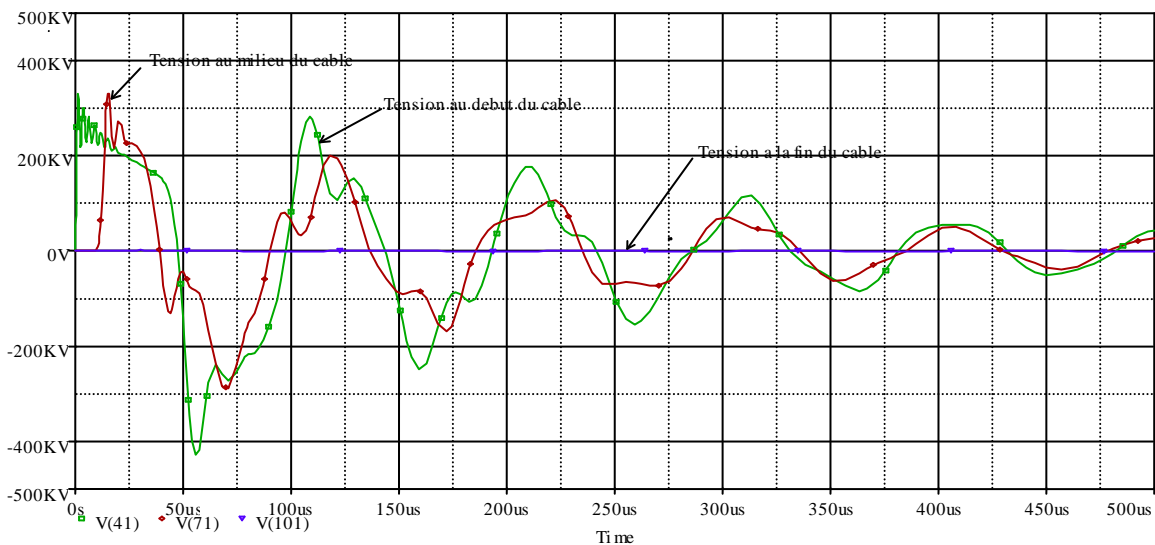


Figure (VI.13) : 3^{ème} cas pour 330 KV.

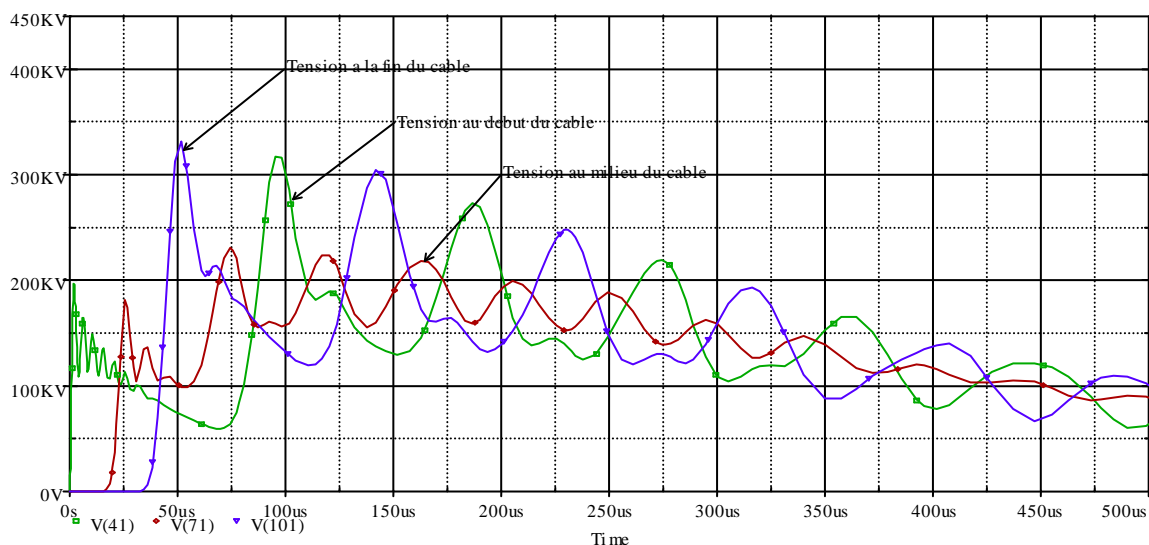


Figure (VI.14) : 4^{ème} cas pour 110 KV.

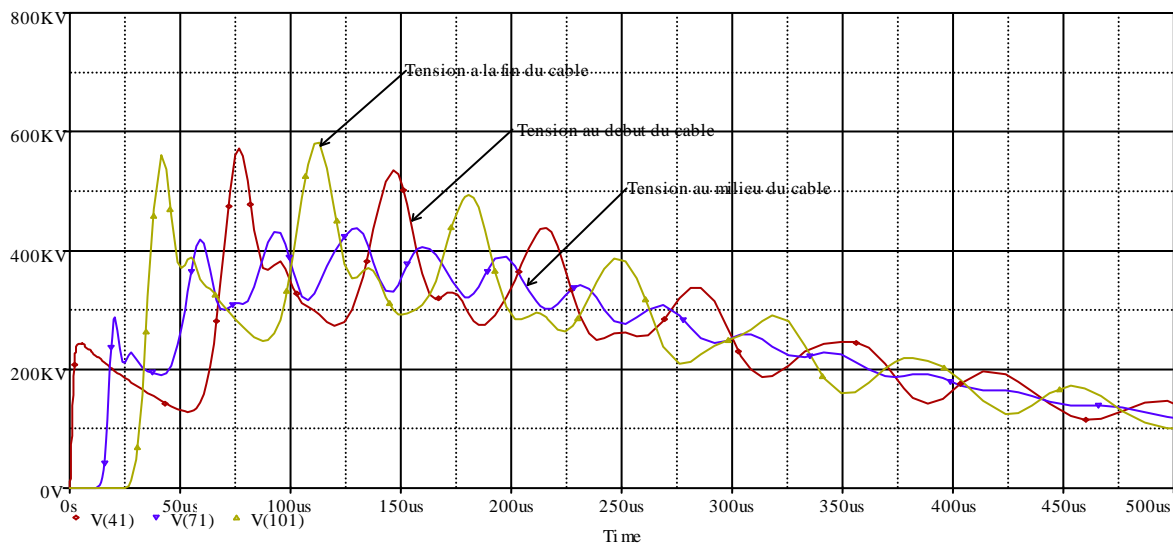


Figure (VI.15) : 4^{ème} cas pour 220 KV.

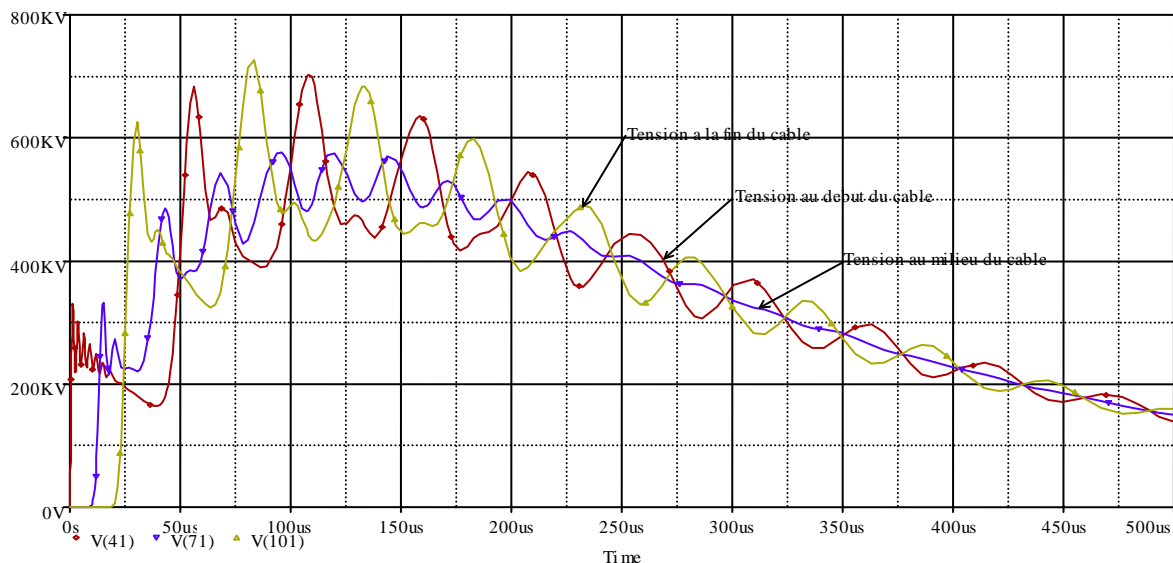


Figure (VI.16) : 4^{ème} cas pour 330 KV.

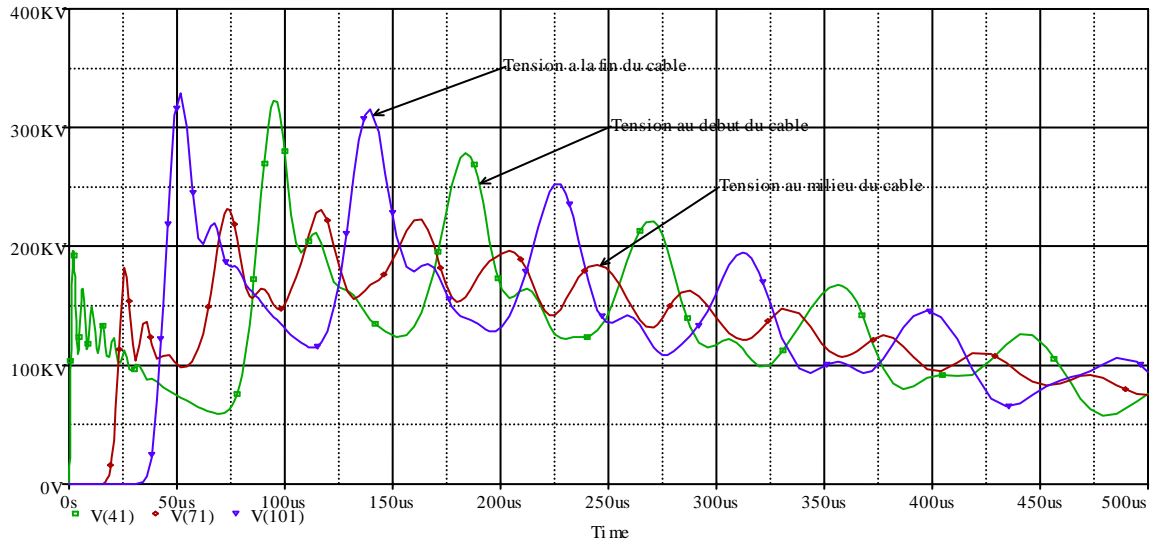


Figure (VI.17) : 5^{ème} cas pour 110 KV.

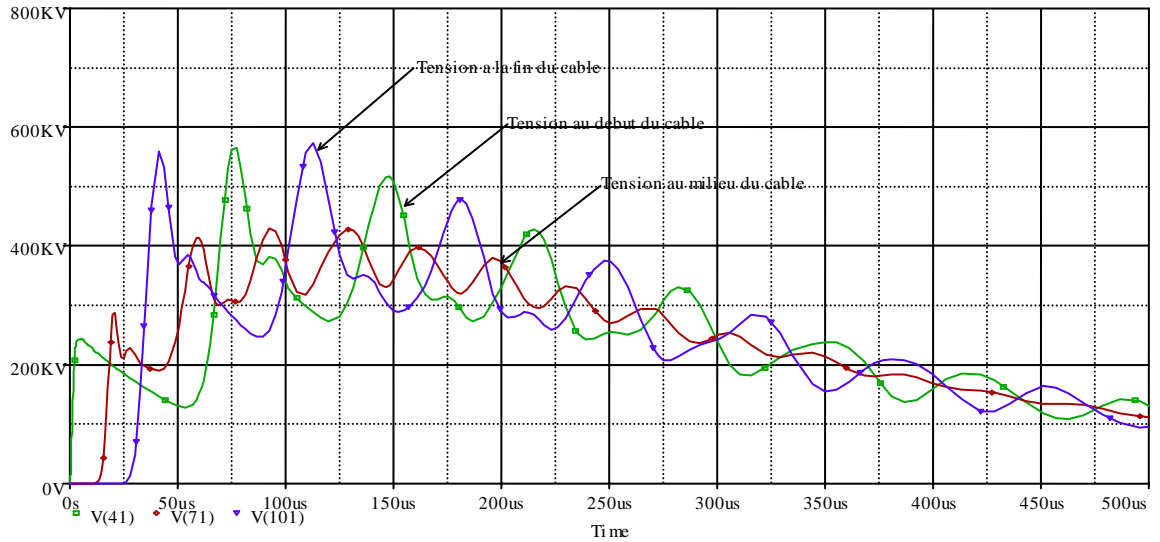


Figure (VI.18) : 5^{ème} cas pour 220 KV.

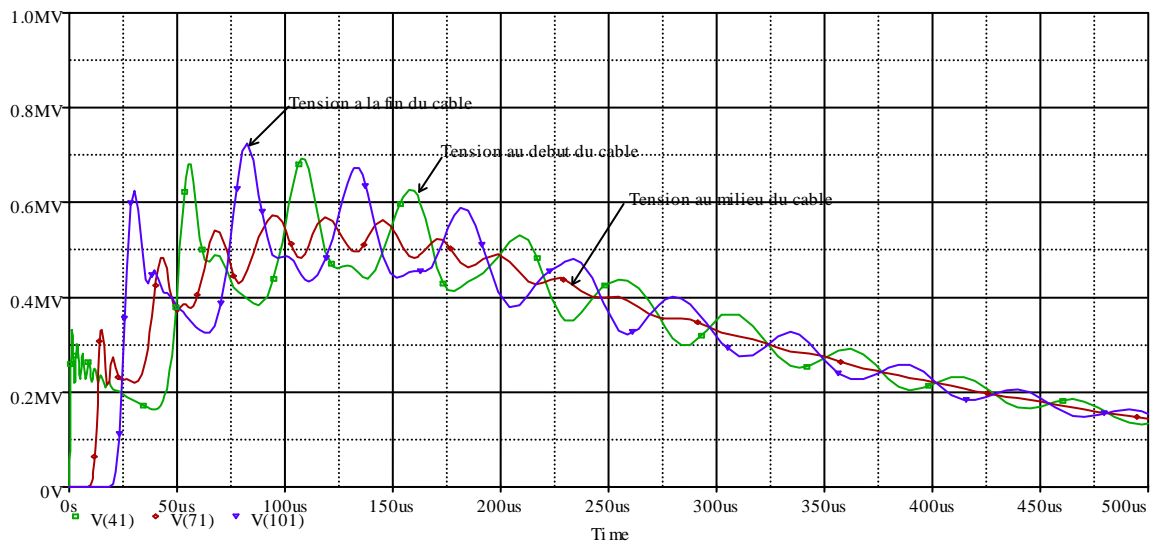


Figure (VI.19) : 5^{ème} cas pour 330 KV.

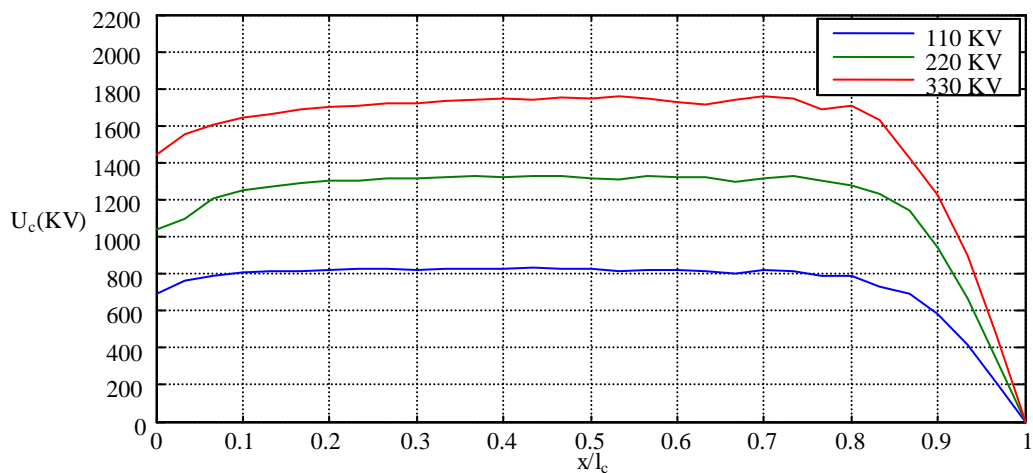


Figure (VI.20) : Répartition de la tension le long du câble, 1^{er} cas.

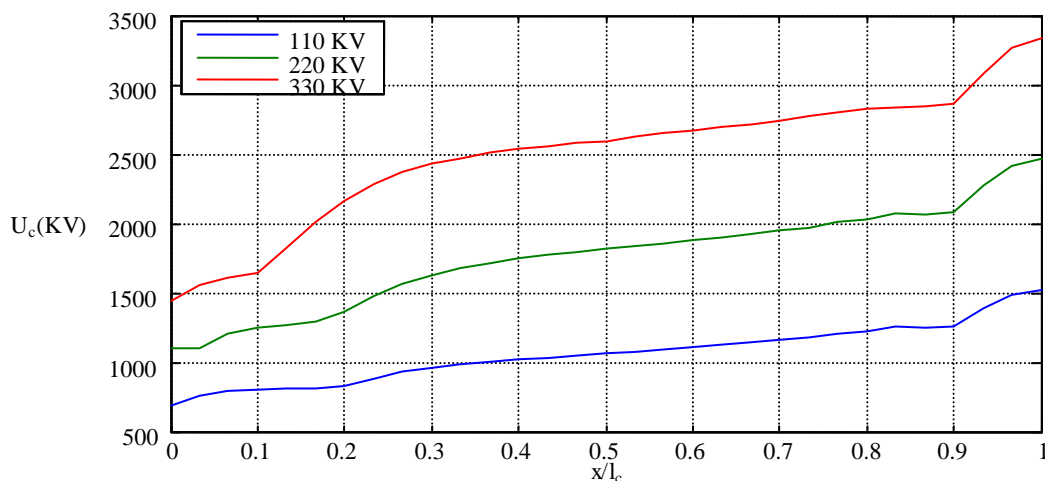


Figure (VI.21) : Répartition de la tension le long du câble, 2^{ème} cas.

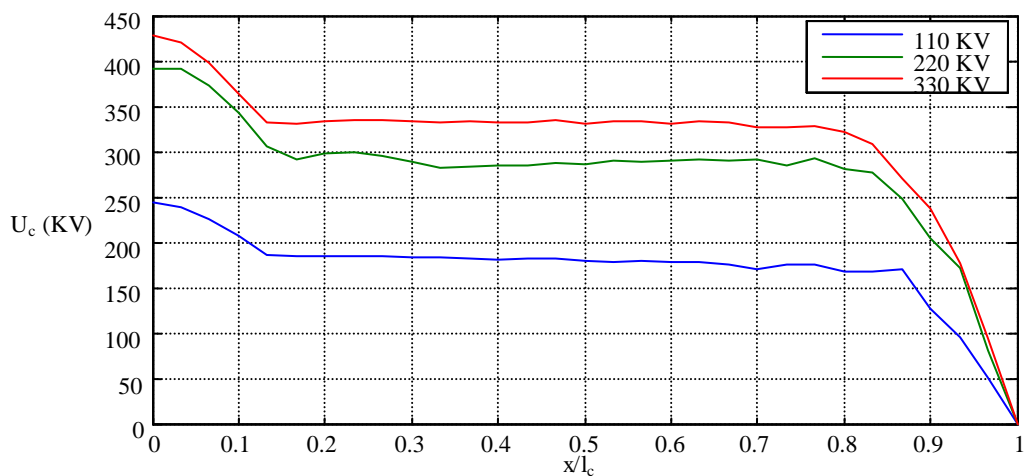


Figure (VI.22) : Répartition de la tension le long du câble, 3^{ème} cas.

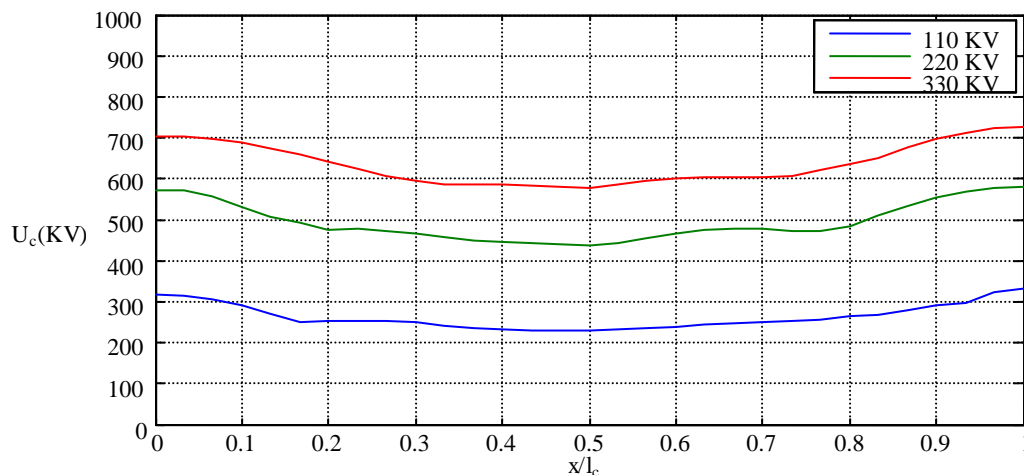


Figure (VI.23) : Répartition de la tension le long du câble, 4^{ème} cas.

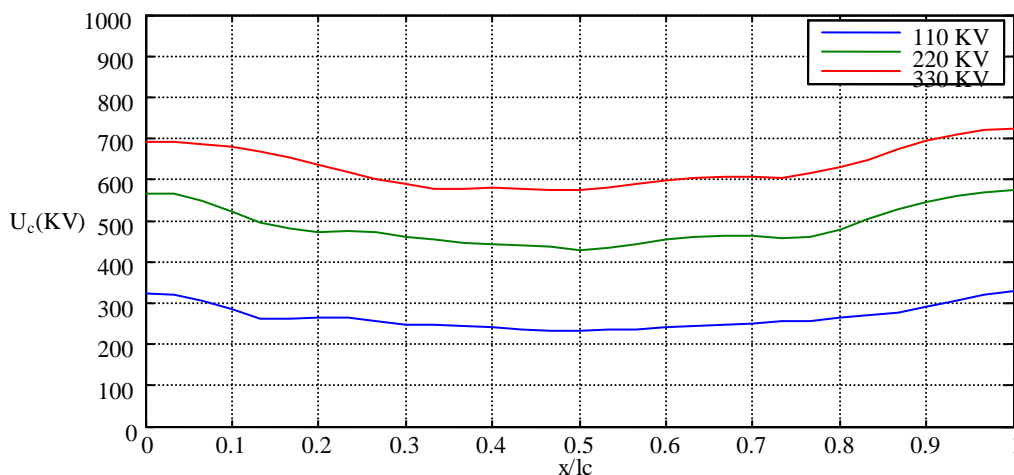


Figure (VI.24) : Répartition de la tension le long du câble, 5^{ème} cas.

➤ **Interprétations des résultats :**

La théorie de la propagation permet d'établir que, lorsqu'une onde se propageant le long d'un conducteur arrive sur un point de changement d'impédance, on observe une réflexion et une transmission partielles. Si Z_{c1} est l'impédance caractéristique du premier conducteur et Z_{c2} celle du second, les coefficients de réfraction (transmission) et de réflexion sont donnés par : $N_{refr} = \frac{2 \cdot Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1}}$ et $N_{ref} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}}$. [11] Les valeurs limites de ces coefficients correspondent à des cas physiques simples :

- $Z_{c2} = 0$ (conducteur fermé à la masse) : la tension au point concerné est donc nulle à tout instant ce qui correspond à une onde transmise nulle et une onde réfléchie avec un facteur -1.

- $Z_{c2} = Z_{c1}$ (régime de concordance) : la transmission vaut 1 et la réflexion zéro.
- $Z_{c2} = \text{infini}$ (conducteur ouvert) : la tension au point de réflexion est donnée par la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie avec un facteur +1. Sa valeur maximale va alors être égale à deux fois la crête de l'onde incidente.

L'expression «doublement de l'onde de tension», souvent employée, c'est seulement au point de réflexion que la valeur maximale observée vaut le double de celle de l'onde incidente car c'est le seul endroit où l'onde incidente et l'onde réfléchie additionnent leurs crêtes.

D'après les courbes représentées sur les figures (VI.20), (VI.21),... et (VI.24) on remarque, que la surtension se répartie presque uniformément le long du câble sauf que au voisinage de ses extrémités la tension varie selon le mode de leurs connexions pour cela on distingue :

- Dans le premier cas la surtension maximale se trouve presque au milieu du câble sa valeur $U_{\max} \approx 1,21 \cdot U_{\text{entr}}$, la tension à la fin est nulle car on a un coefficient de réflexion en ce point $N_{\text{ref}} = \frac{0 - Z_{cc}}{0 + Z_{cc}} = -1$, donc toute la tension qui se propage le long du câble se reflète avec un signe négatif, et voila pourquoi la période de cette tension est égale à : $T_c = \frac{2 \cdot l_c}{v_c}$

- Dans le deuxième cas la surtension augmente le long du câble jusqu'à atteindre sa valeur maximale à sa fin tel que : $U_{\max} \approx 2,25 \cdot U_{\text{entr}}$, car le coefficient de réflexion en ce point $N_{\text{ref}} = \frac{\infty - Z_{cc}}{\infty + Z_{cc}} = 1$, donc toute la tension qui se propage le long du câble se reflète avec un signe positif et $T_c = \frac{4 \cdot l_c}{v_c}$.

- Dans le troisième cas la surtension maximale se situe au début du câble sa valeur $U_{\max} = U_{\text{surt}} \frac{2 \cdot Z_{cc}}{Z_{cl} + Z_{cc}}$, elle diminue pour se stabiliser à 0,73. U_{\max} au voisinage du milieu puis s'annule à la fin car ce point est mis à la terre, aussi avec une période $T_c = \frac{4 \cdot l_c}{v_c}$ (a cause de $Z_{cl} \gg Z_{cc}$).

- Dans le quatrième et le cinquième cas, aux bouts du câble les surtensions sont plus grandes que celles du milieu car les impédances caractéristiques connectées à ses extrémités dépassent sa propre impédance donc les processus ont un caractère apériodique.

VI.2.3) Régime transitoire dans le câble : [12]

Pour trouver l'influence de l'impédance caractéristique de la ligne Z_{cl} sur

le régime transitoire dans le câble, on considère le schéma du 5^{ém} cas de la figure (VI.4) où $Z_{cc} = 31 \Omega$, $Z_{ctr} = 5150 \Omega$ et Z_{cl} variable pour lequel on applique une tension rectangulaire d'amplitude $U_0 = 690 \text{ KV}$. Dans cette partie de notre travail on s'intéresse à l'étude du régime transitoire de la tension à la fin du câble pour les deux cas suivants :

VI.2.3.1) $Z_{cl} = 311 \Omega$, $Z_{cc} = 31 \Omega$ et $Z_{ctr} = 5150 \Omega$:

Le calcul des coefficients de réflexions N_{ref1} , N_{ref2} et le coefficient de réfraction N_{refr1} pour la tension se trouvant dans le câble est comme suit :

$$N_{ref1} = \frac{Z_{cl} - Z_{cc}}{Z_{cl} + Z_{cc}} = \frac{311 - 31}{311 + 31} \Rightarrow N_{ref1} = 0,82$$

$$N_{ref2} = \frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{Z_{ctr} + Z_{cc}} = \frac{5150 - 31}{5150 + 31} \Rightarrow N_{ref2} = 0,99$$

$$N_{refr1} = \frac{2Z_{cc}}{Z_{cl} + Z_{cc}} = \frac{2 \cdot 31}{311 + 31} \Rightarrow N_{refr1} = 0,18$$

Le temps que met l'onde de tension pour atteindre la fin du câble t_{lc} est :

$$t_{lc} = \frac{l_c}{v_c} = \frac{3}{1,5 \cdot 10^5} \Rightarrow t_{lc} = 20 \mu\text{s}$$

La tension incidente et les tensions réfléchies se calculent comme suit :

$$V_1 = U_0 \cdot N_{refr1} = 690 \cdot 0,18 = 124,2 \text{ KV}$$

$$V_2 = V_1 \cdot N_{ref2} = 124,2 \cdot 0,99 = 122,958 \text{ KV}$$

$$V_3 = V_2 \cdot N_{ref1} = 122,958 \cdot 0,82 = 100,825 \text{ KV}$$

⋮

$$V_{30} = V_{29} \cdot N_{ref2} = 6,705 \cdot 0,99 = 6,638 \text{ KV}$$

⋮

$$V_{72} = V_{71} \cdot N_{ref2} = 0,084 \cdot 0,99 = 0,083 \text{ KV}$$

L'évolution de la tension à la fin du câble en fonction du temps se calcule comme suit :

$$U_2(t_{1c}) = V_1 + V_2 = 124,2 + 122,958 = 247,158 \text{ KV}$$

$$U_2(3. t_{1c}) = U_2(t_{1c}) + V_3 + V_4 = 247,158 + 100,825 + 99,817 = 447,800 \text{ KV}$$

⋮

$$U_2(31. t_{1c}) = U_2(29. t_{1c}) + V_{31} + V_{32} = 1255,709 + 5,443 + 5,388 = 1266,54 \text{ KV}$$

⋮

$$U_2(71. t_{1c}) = U_2(69. t_{1c}) + V_{71} + V_{72} = 1312,366 + 0,084 + 0,083 = 1312,533 \text{ KV}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$U_2(n. t_{1c}) = U_2[(n-2). t_{1c}] + V_n + V_{n+1} \quad \text{avec : } n \text{ nombre entier tel que } 1 \leq n \leq 71$$

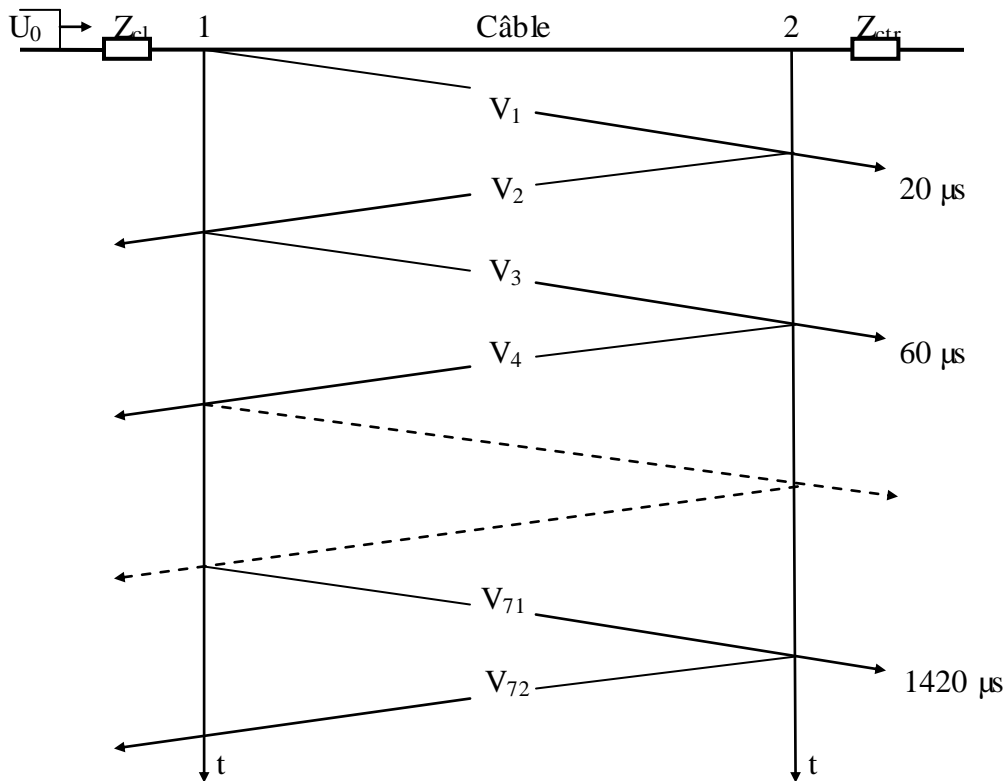


Figure (VI.25) : Diagramme des tensions dans le câble.

Pour $Z_{cl} > Z_{cc}$

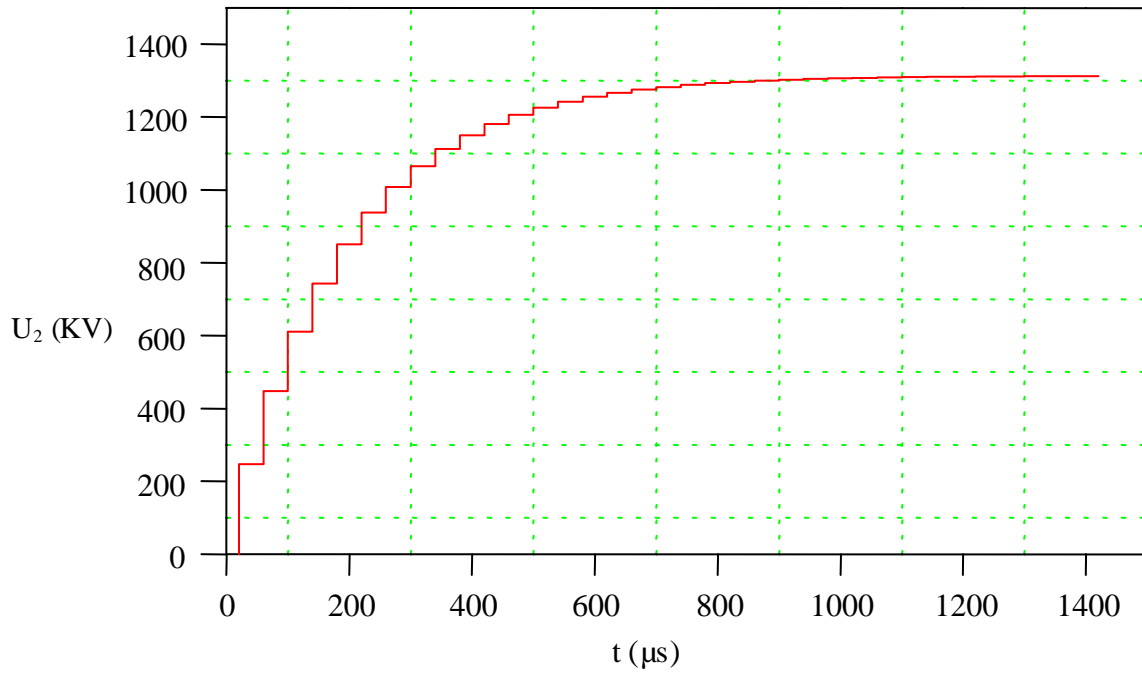


Figure (VI.26) : Variation de la tension à la fin du câble pour $Z_{cl} > Z_{cc}$.

VI.2.3.2) $Z_{cl} = 15 \Omega$, $Z_{cc} = 31 \Omega$ et $Z_{ctr} = 5150 \Omega$:

$$N_{ref1} = \frac{Z_{cl} - Z_{cc}}{Z_{cl} + Z_{cc}} = \frac{15 - 31}{15 + 31} \Rightarrow N_{ref1} = -0,35$$

$$N_{ref2} = \frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{Z_{ctr} + Z_{cc}} = \frac{5150 - 31}{5150 + 31} \Rightarrow N_{ref2} = 0,99$$

$$N_{refr1} = \frac{2 \cdot Z_{cc}}{Z_{cl} + Z_{cc}} = \frac{2 \cdot 31}{15 + 31} \Rightarrow N_{refr1} = 1,35$$

La tension incidente et les tensions réfléchies dans le câble :

$$V_1 = U_0 \cdot N_{refr1} = 690 \cdot 1,35 = 931,5 \text{ KV}$$

$$V_2 = V_1 \cdot N_{ref2} = 931,5 \cdot 0,99 = 922,185 \text{ KV}$$

$$V_3 = V_2 \cdot N_{ref1} = 922 \cdot (-0,35) = -322,765 \text{ KV}$$

⋮

$$V_9 = V_8 \cdot N_{ref1} = -38,364 \cdot (-0,35) = 13,427 \text{ KV}$$

⋮

$$V_{20} = V_{19} \cdot N_{ref2} = -0,067 \cdot 0,99 = -0,066 \text{ KV}$$

Les tensions à la fin du câble :

$$U_2(t_{1c}) = V_1 + V_2 = 931,5 + 922,185 = 1853,185 \text{ KV}$$

$$U_2(3 \cdot t_{1c}) = U_2(t_{1c}) + V_3 + V_4 = 1853,185 - 322,765 - 319,537 = 1210,883 \text{ KV}$$

⋮

$$U_2(11 \cdot t_{1c}) = U_2(9 \cdot t_{1c}) + V_{11} + V_{12} = 1383,045 - 4,653 - 4,606 = 1373,786 \text{ KV}$$

⋮

$$U_2(19 \cdot t_{1c}) = U_2(17 \cdot t_{1c}) + V_{19} + V_{20} = 1376,267 - 0,067 - 0,066 = 1376,134 \text{ KV}$$

➤ **La forme généralisée :**

$$U_2(n \cdot t_{1c}) = U_2[(n-2) \cdot t_{1c}] + V_n + V_{n+1} \quad \text{avec : } n \text{ nombre entier tel que } 1 \leq n \leq 19$$

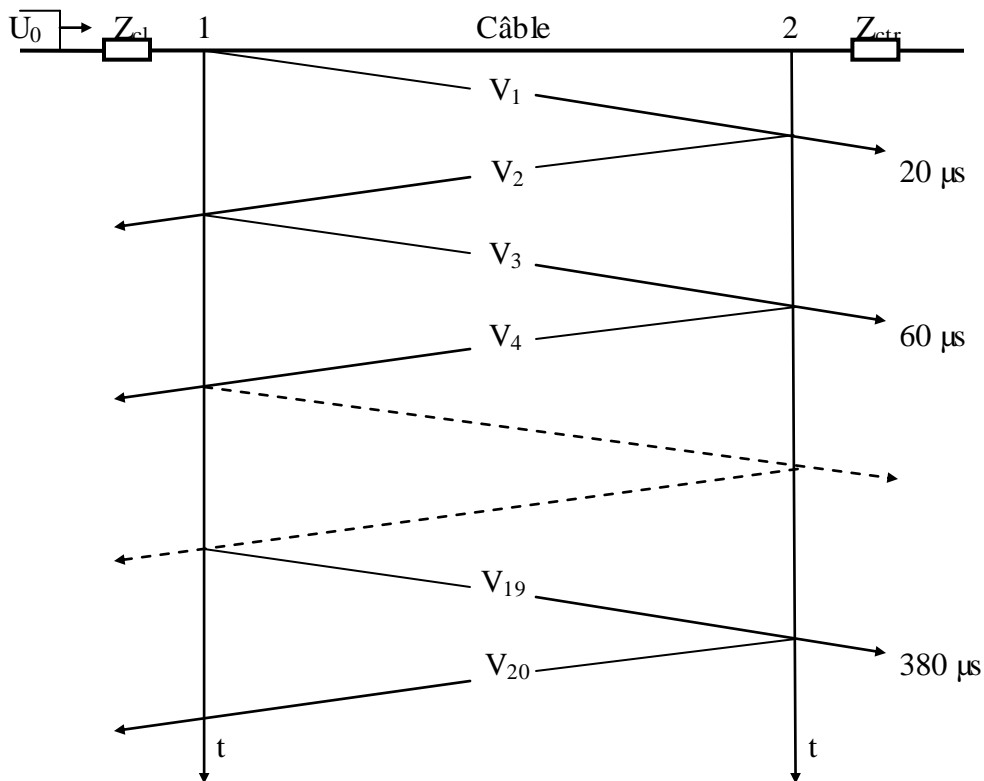


Figure (VI.27) : Diagramme des tensions dans le câble.

Pour $Z_{cl} < Z_{cc}$

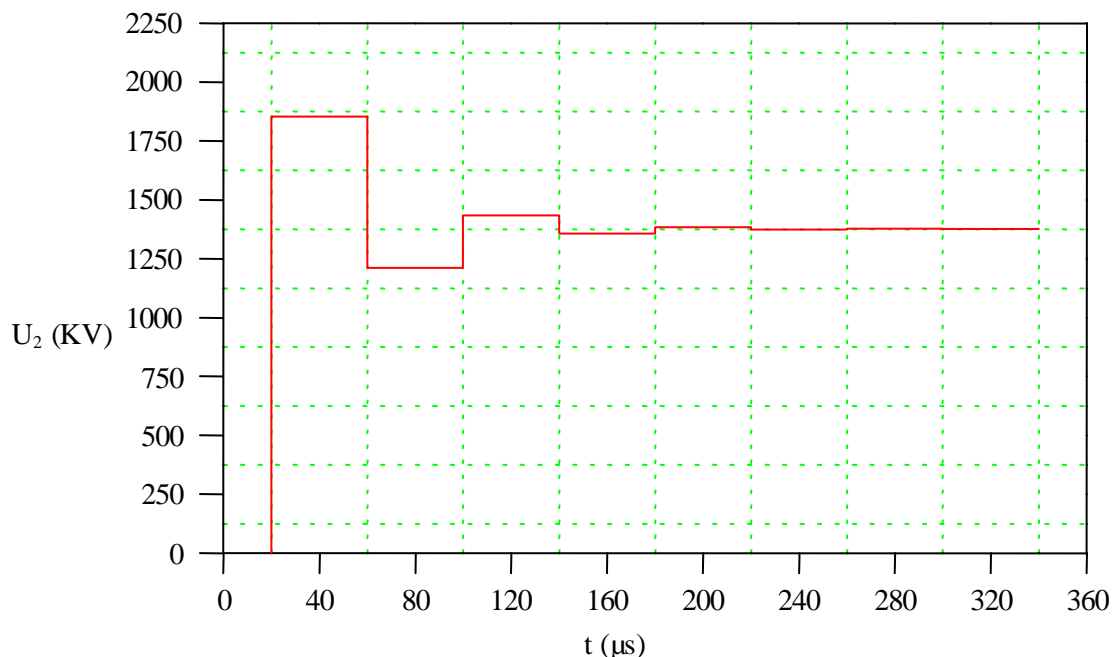


Figure (VI.28) : Variation de la tension à la fin du câble pour $Z_{cl} < Z_{cc}$.

➤ **Interprétation des résultats :**

Le régime transitoire dans le câble est une multi réflexion des ondes à ses extrémités. L'onde qui se propage le long du câble se reflète à sa fin puis elle se dirige vers le début, aussi en ce point se reflète c'est la troisième onde qui se crée, c'est celle-ci a son tour se reflète à la fin du câble c'est la création de la quatrième onde ... etc

D'après notre étude on constate que la variation de la tension à la fin du câble dépend aussi de la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne Z_{cl} , pour cela on distingue :

- **Si $Z_{cl} \geq Z_{cc}$:** D'après la courbe de la figure (VI.26) on constate que le processus dans le câble ayant à ses extrémités des impédances qui dépassent sa propre impédance à un caractère apériodique non amortie qui se caractérise par l'équation de premier ordre suivante :

$$U_2(t) = U_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{avec : } U_{\max} = 1,9 U_{\text{surt}} \quad \text{et } \tau = 225 \mu\text{s} \text{ qui est le temps que met la tension pour atteindre 63 \% de sa valeur maximale.}$$

- **Si $0 \leq Z_{cl} < Z_{cc}$:** D'après la courbe de la figure (VI.28) on constate que si dans un bout du câble une impédance inférieure à sa propre impédance caractéristique le processus à un caractère périodique oscillatoire amorti régit par l'équation de deuxième ordre suivante :

$$U_2(t) = U_{\infty} \left[1 + \frac{e^{-A \cdot \omega_n \cdot t}}{\sqrt{1-A^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-A^2} t - \phi) \right] \quad \text{tel que :}$$

✓ A est le coefficient ou le facteur d'amortissement :

$$U_{\max} = U_{\infty} \left[1 + e^{\frac{-\pi A}{\sqrt{1-A^2}}} \right] \Rightarrow Z = \frac{\ln \frac{U_{\infty}}{U_{\max} - U_{\infty}}}{\sqrt{\pi^2 + \left[\ln \frac{U_{\infty}}{U_{\max} - U_{\infty}} \right]^2}}$$

$$\text{A.N : } A = \frac{\ln \frac{1376,134}{1853,185 - 1376,134}}{\sqrt{3,14^2 + \left[\ln \frac{1376,134}{1853,185 - 1376,134} \right]^2}} \Rightarrow A = 0,32.$$

✓ ω_n est la pulsation propre non amortie :

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-A^2}} \Rightarrow \omega_n = \frac{\pi}{t_1 \sqrt{1-A^2}} \text{ avec } t_1 = 40 \mu\text{s qui est le temps du premier dépassement.}$$

$$\text{A.N : } \omega_n = \frac{3,14}{40 \cdot 10^{-6} \sqrt{1-0,32^2}} \Rightarrow \omega_n = 82856,8 \text{ rd/s.}$$

✓ T est la période de la tension.

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi}{T} \Rightarrow T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_n}$$

$$\text{A.N : } T = \frac{2 \cdot 3,14}{82856,8} \Rightarrow T = 75,79 \mu\text{s}$$

$$\phi = \arctg \frac{\sqrt{1-A^2}}{-A} \Rightarrow \phi = \arctg \frac{\sqrt{1-0,32^2}}{-0,32} \Rightarrow \phi = -71,34^\circ$$

La figure (VI.29) qui suit illustre la variation du temps que met la tension pour établir sa valeur du régime permanent t_r en fonction de l'impédance caractéristique de la ligne, on remarque que t_r diminue avec l'augmentation de Z_{cl} jusqu'à atteindre sa valeur minimale pour $Z_{cl} = Z_{cc}$ (régime de concordance), puis t_r augmente avec l'augmentation de Z_{cl} .

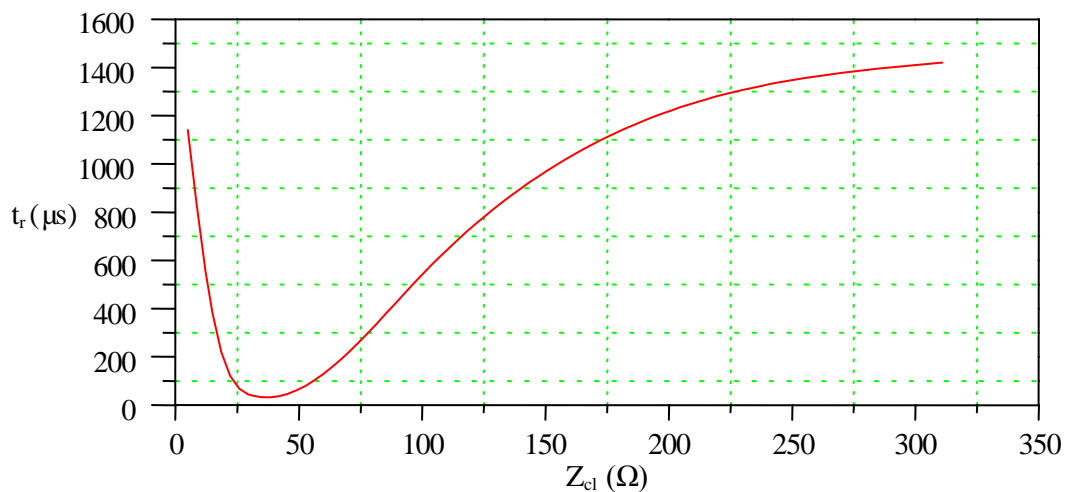


Figure (VI.29) : Caractéristique $t_r = f(Z_{cl})$

VI.2.4) Variation de la surtension et de la période dans le câble :

Dans cette partie de notre travail on s'intéresse à la variation de la période dans le câble et cela pour les trois différentes considérations du schéma équivalent suivantes :

VI.2.4.1) Pour la tension nominale 110 KV, la ligne et le transformateur remplacés par deux impédances variables Z_{cl} et Z_{ctr} respectivement :

On considère le schéma de la figure (VI.30) suivante où on a remplacé la ligne et le transformateur par des impédances caractéristiques variables Z_{cl} et Z_{ctr} respectivement, pour chaque valeur de Z_{cl} fixée, on fait varier Z_{ctr} et à chaque fois on mesure la période et la tension dans le câble et cela pour différentes longueur du câble, les résultats obtenus pour $l_c = 3$ Km sont donnés dans les tableaux (VI.1) à (VI.8).

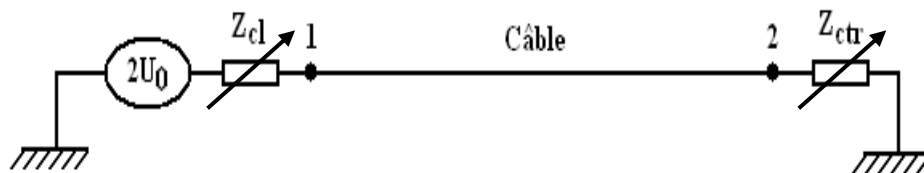


Figure (VI.30) : Schéma du principe.

Tableau (IV.1) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
0	0	92,649	688,668	814,420	827,419	826,714	801,398	790,192	0
	10	95,510	688,668	814,420	827,230	829,609	809,988	779,681	319,836
	20	92,649	688,668	814,420	827,436	829,307	823,699	790,192	527,727
	31	0	688,668	814,420	793,479	829,437	825,271	793,479	690,157
	100	56,944	688,668	814,420	827,513	828,905	820,526	842,184	1124,3
	500	161,11	688,668	814,420	893,501	985,904	1041,6	1141,4	1415,7
	600	168,00	688,668	814,420	916,625	984,083	1054,7	1158,6	1432,6
	700	172,44	688,668	814,420	935,532	1001,4	1071,2	1182,6	1444,8
	1000	175,58	688,668	814,420	958,176	1025,7	1098,0	1204,5	1467,5
	2000	177,08	688,668	814,420	970,143	1041,0	1111,9	1215,6	1494,6
	3000	179,19	688,668	814,420	988,815	1057,8	1130,7	1225,5	1503,8
	6000	180,56	688,668	814,420	1003,5	1070,4	1144,1	1240,6	1513,1
	∞	183,33	688,668	814,420	986,617	1064,9	1144,6	1254,6	1522,4

Tableau (IV.2) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
15	0	87,931	1075,2	1183,4	1191,2	1182,7	1174,2	1058,5	0
	10	89,081	1075,2	1183,4	1191,5	1189,1	1161,7	1092,8	452,752
	20	51,705	1075,2	1183,4	1191,5	1184,1	1174,3	1111,0	762,133
	31	0	1075,2	1183,4	1191,5	1183,7	1174,6	1118,6	987,942
	100	60,227	1075,2	1183,4	1191,6	1182,6	1175,0	1182,3	1587,6
	500	106,17	1075,2	1183,4	1294,5	1383,2	1484,8	1640,0	2032,7
	600	110,05	1075,2	1183,4	1323,9	1414,0	1514,7	1674,2	2056,5
	700	113,79	1075,2	1193,7	1342,4	1430,5	1534,7	1681,8	2073,9
	1000	117,82	1075,2	1220,4	1375,5	1465,2	1568,7	1720,0	2106,0
	2000	129,90	1075,2	1232,2	1396,3	1487,6	1590,0	1747,1	2144,6
	3000	124,14	1075,2	1242,7	1408,0	1497,9	1599,2	1758,6	2157,8
	6000	127,01	1075,2	1245,0	1416,0	1509,6	1611,4	1768,6	2171,1
	∞	127,58	1075,2	1258,2	1437,1	1527,5	1638,7	1789,1	2184,7

Tableau (IV.3) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
31	0	88,372	886,417	911,464	921,478	911,878	898,490	814,330	0
	10	54,978	886,417	911,464	921,564	909,627	888,404	833,235	344,895
	20	37,872	886,417	911,464	921,608	911,482	886,489	848,097	567,009
	31	0	886,417	911,464	921,640	911,903	885,224	862,368	755,753
	100	25,287	886,417	911,464	921,704	912,820	895,738	908,729	1189,6
	500	84,483	886,417	934,663	1001,3	1068,3	1146,4	1253,8	1542,3
	600	85,058	886,417	946,757	1017,5	1084,9	1165,2	1284,8	1562,5
	700	85,632	886,417	962,014	1031,9	1098,9	1178,1	1299,3	1575,7
	1000	86,207	887,571	987,818	1055,1	1122,4	1202,3	1323,7	1600,2
	2000	86,782	903,873	1004,4	1075,9	1143,7	1220,1	1342,8	1637,2
	3000	87,356	926,541	1028,5	1096,4	1163,7	1240,4	1354,7	1648,0
	6000	88,506	909,825	1018,5	1092,0	1156,9	1239,4	1348,4	1658,9
	∞	89,655	896,405	1005,4	1089,0	1153,2	1243,3	1354,0	1669,9

Tableau (IV.4) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
60	0	88,506	656,849	651,031	647,804	647,661	628,516	585,739	0
	10	85,632	656,849	651,031	647,808	647,552	626,468	595,355	245,041
	20	52,841	656,849	651,031	647,810	647,509	627,487	601,005	406,597
	31	0	656,849	651,031	647,812	647,475	628,166	605,639	527,881
	100	0	656,849	651,031	648,020	647,295	635,083	644,713	862,218
	500	0	746,988	689,462	700,319	744,688	802,111	879,128	1076,0
	600	0	761,707	704,522	714,892	759,004	815,056	899,875	1088,9
	700	0	773,346	710,689	723,295	766,999	824,500	910,272	1105,6
	1000	0	793,009	730,148	741,539	787,204	843,643	929,086	1124,2
	2000	0	817,835	752,731	759,191	805,948	862,626	945,765	1147,2
	3000	0	824,384	760,077	765,700	812,000	867,498	944,422	1154,48
	6000	0	822,118	761,632	764,124	810,552	866,046	939,870	1162,5
	∞	0	837,057	774,985	776,805	818,200	879,391	948,462	1170,4

Tableau (IV.5) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
100	0	45,217	480,947	465,498	462,610	457,659	452,015	409,236	0
	10	41,600	480,947	465,498	462,611	460,086	451,176	431,646	178,237
	20	33,481	480,947	465,498	462,611	460,090	443,584	420,563	290,756
	31	0	480,947	465,498	462,612	460,088	444,410	420,859	383,427
	100	0	480,947	465,498	462,612	458,481	441,999	461,686	612,948
	500	0	607,243	510,648	498,460	529,823	566,831	626,042	769,937
	600	0	623,267	519,346	509,490	540,912	580,660	642,459	785,842
	700	0	630,154	525,933	515,258	547,511	586,519	649,273	792,369
	1000	0	647,787	540,371	526,698	558,420	598,653	659,865	804,368
	2000	0	672,741	556,200	542,533	574,800	613,426	668,459	818,829
	3000	0	680,274	562,679	547,849	580,889	619,661	682,792	823,759
	6000	0	685,507	568,814	552,933	585,266	624,486	689,147	828,745
	∞	0	674,406	576,197	547,037	579,811	619,185	674,029	831,368

Tableau (IV.6) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
200	0	37,356	342,951	270,754	268,432	267,206	263,998	252,112	0
	10	22,989	285,877	270,754	268,430	266,943	259,678	248,318	104,068
	20	18,560	285,877	270,754	268,429	264,970	259,961	240,994	169,390
	31	0	285,877	270,754	268,429	264,535	259,810	243,435	220,176
	100	0	285,877	270,754	268,428	263,820	261,551	260,087	349,097
	500	0	396,513	318,839	298,457	305,376	328,450	359,917	443,772
	600	0	402,829	317,902	301,549	311,103	333,363	366,822	450,369
	700	0	410,894	326,036	306,872	315,475	337,965	372,699	450,610
	1000	0	422,051	333,743	315,482	323,022	345,735	380,003	458,509
	2000	0	436,911	346,163	324,683	332,089	353,510	387,355	467,089
	3000	0	443,964	353,675	330,223	334,957	356,711	389,354	472,532
	6000	0	446,524	355,143	332,844	336,784	360,183	389,206	475,464
	∞	0	437,998	358,198	331,912	333,885	358,953	393,646	478,438

Tableau (IV.7) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
300	0	38,954	202,956	190,116	188,639	187,707	184,031	174,702	0
	10	28,488	202,956	190,116	188,641	185,315	185,257	167,755	70,671
	20	25,132	202,956	190,116	188,641	185,442	185,271	170,501	116,597
	31	0	202,956	190,116	188,642	186,215	183,909	180,257	156,510
	100	0	202,956	190,116	188,696	185,011	185,472	187,126	244,596
	500	0	298,403	246,922	230,395	219,605	235,481	263,484	318,488
	600	0	303,412	248,337	232,902	222,435	238,412	264,842	322,664
	700	0	307,331	251,268	233,918	224,650	240,489	267,416	325,357
	1000	0	315,410	252,502	235,822	228,782	245,241	272,432	330,332
	2000	0	319,575	252,453	239,848	230,968	247,502	270,208	331,265
	3000	0	324,534	260,076	245,163	233,209	249,235	272,863	333,259
	6000	0	226,134	257,713	246,552	234,652	250,456	275,213	335,287
	∞	0	225,584	258,144	245,012	234,824	250,961	277,480	337,326

Tableau (IV.8) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 3$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
400	0	41,615	157,460	147,194	146,350	142,075	138,866	134,173	0
	10	27,326	157,460	147,194	146,350	141,572	141,326	134,025	55,324
	20	21,374	157,460	147,194	146,350	141,212	141,443	134,196	91,345
	31	0	157,460	147,194	146,350	141,141	140,658	139,170	121,460
	100	0	157,460	147,194	146,350	143,637	140,919	142,811	190,337
	500	0	192,250	158,211	148,329	145,242	158,115	178,468	223,549
	600	0	241,072	197,968	184,504	173,720	185,644	204,970	249,710
	700	0	243,559	200,046	186,321	175,870	186,635	208,148	251,825
	1000	0	251,195	204,770	189,978	178,375	190,699	210,668	255,712
	2000	0	257,603	206,567	194,580	182,931	194,359	215,342	260,389
	3000	0	261,585	217,777	202,494	188,567	201,511	217,350	261,981
	6000	0	262,690	216,816	203,590	189,218	198,377	219,284	263,592
	∞	0	265,770	216,391	200,725	189,754	205,315	221,121	265,217

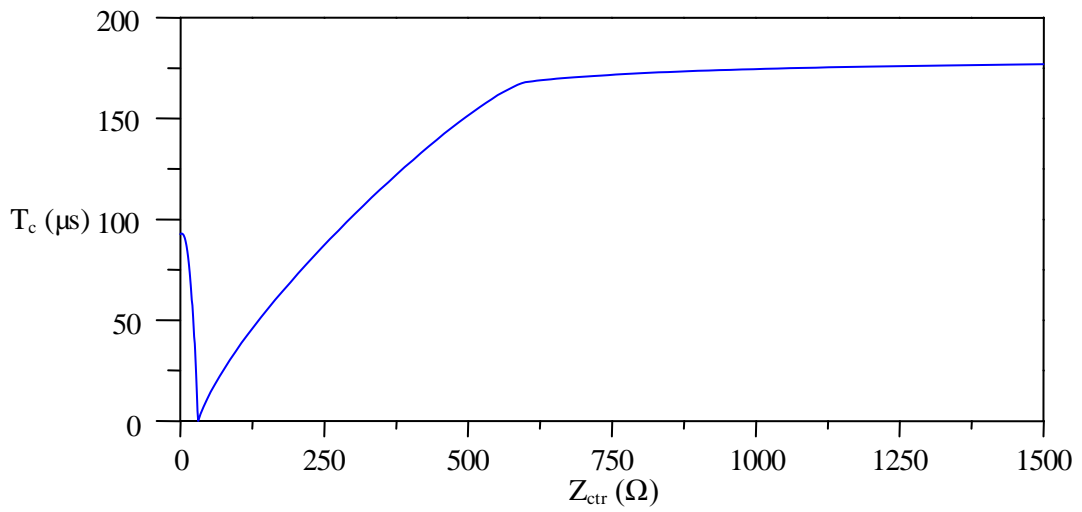


Figure (VI.31) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 0 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

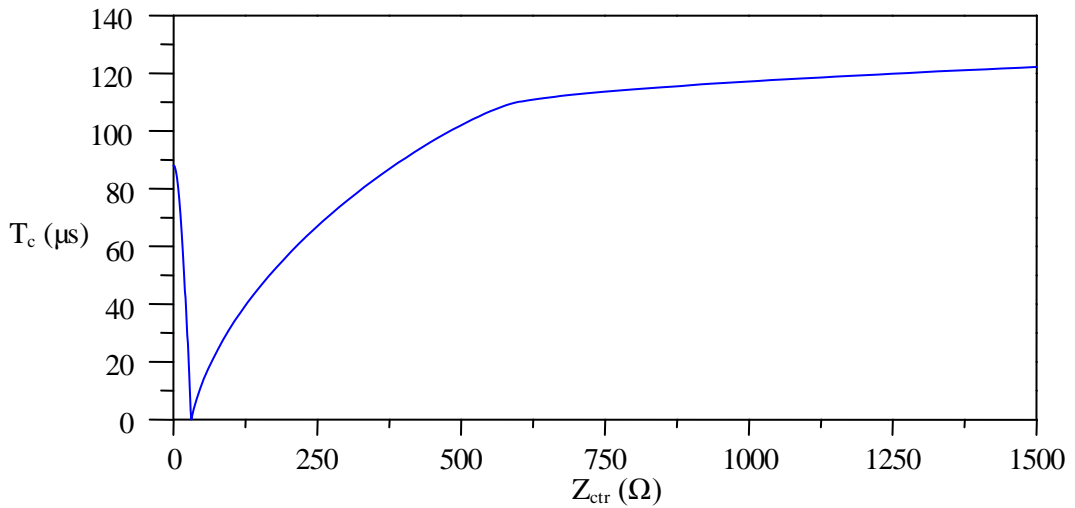


Figure (VI.32) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 15 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

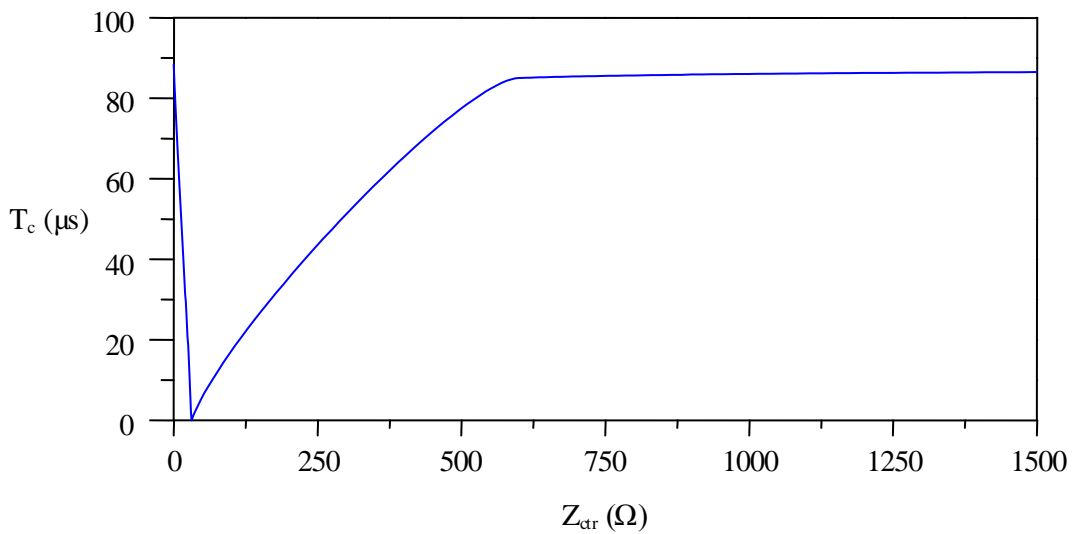


Figure (VI.33) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 31 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

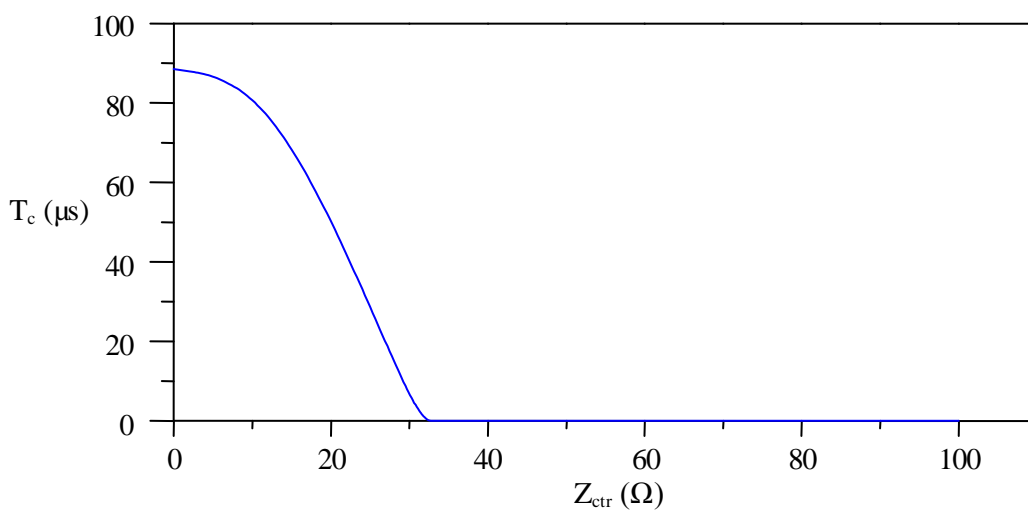


Figure (VI.34) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 60 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

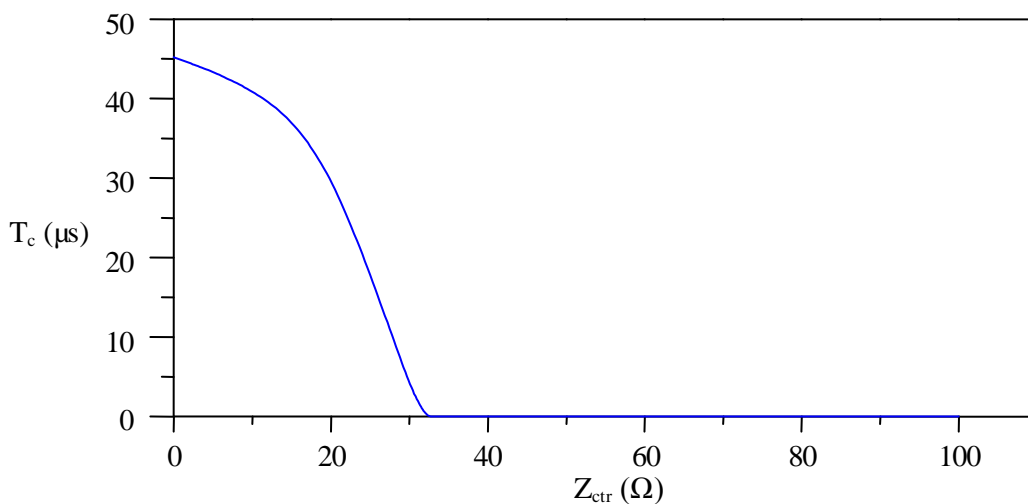


Figure (VI.35) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 100 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

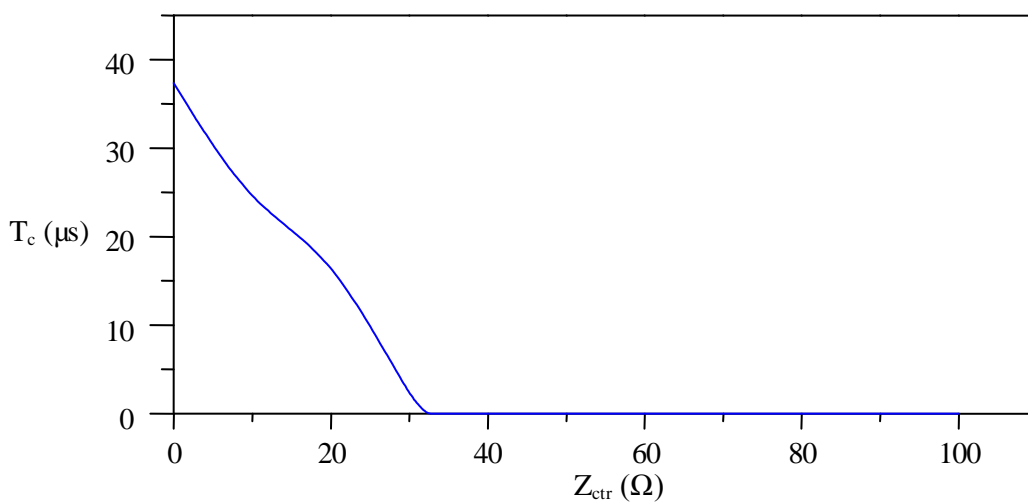


Figure (VI.36) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 200 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

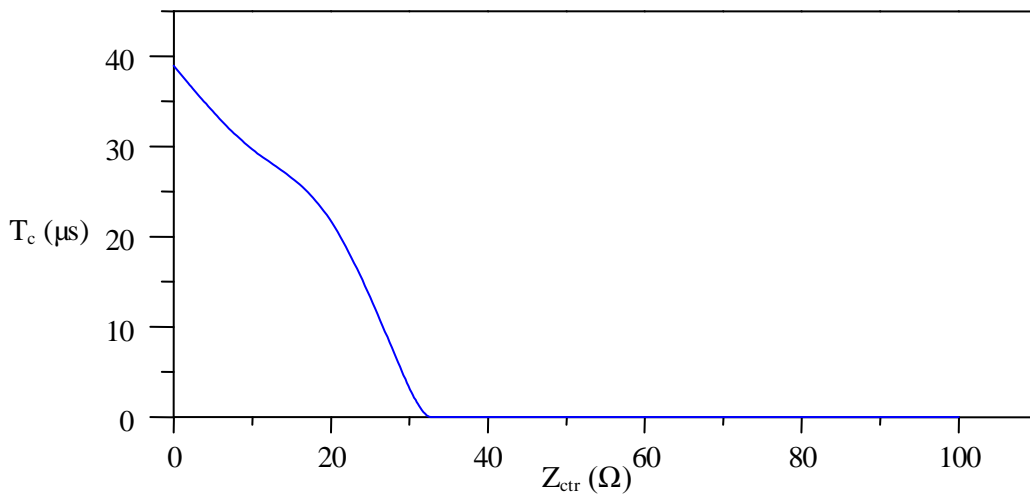


Figure (VI.37) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 300 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

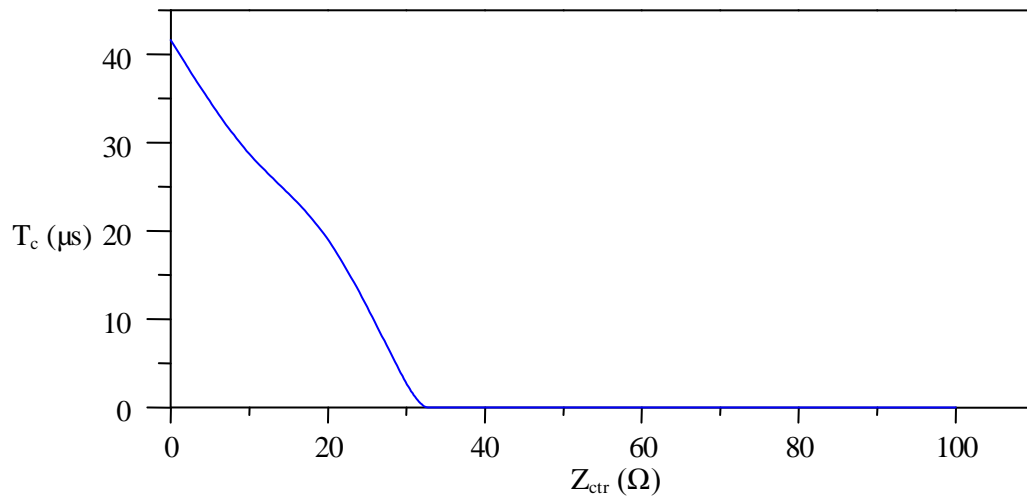


Figure (VI.38) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 400 \Omega$ et $l_c = 3 \text{ Km}$

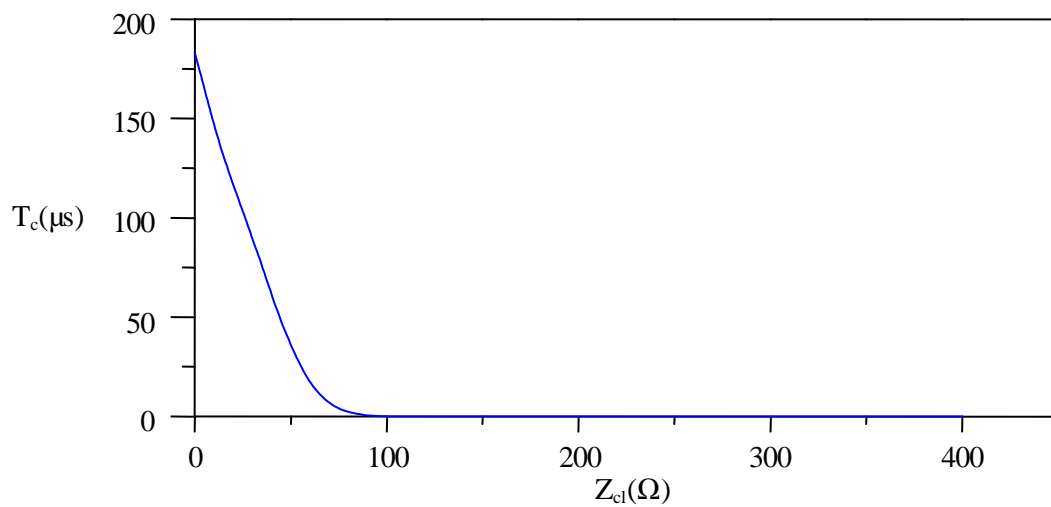


Figure (VI.39) : $T_c = f(Z_{cl})$ pour $Z_{ctr} = \infty$ et $l_c = 3 \text{ Km}$.

D'après les résultats mentionnés dans les tableaux précédant on a pu tracer les répartitions de la tension le long du câble avec $Z_{cl} = 400 \Omega$ et $Z_{ctr} = \infty$.

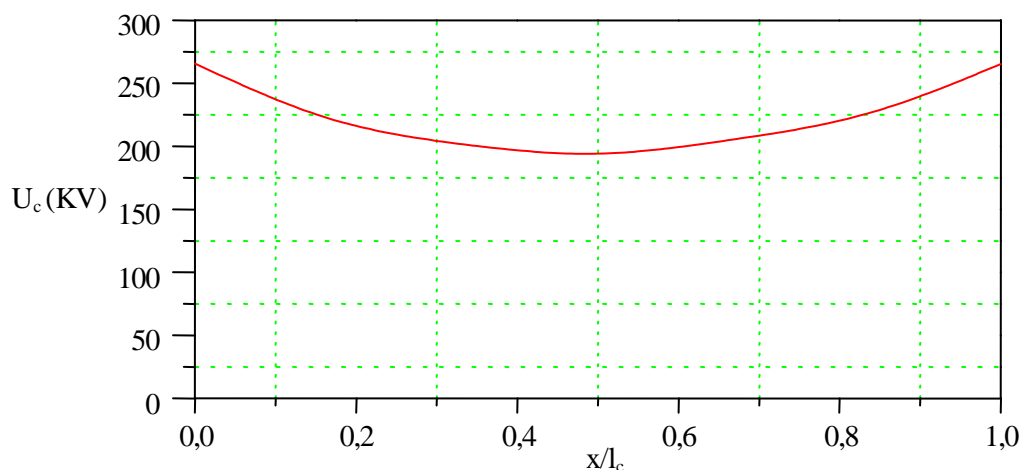


Figure (VI.40) : Répartition de la tension le long du câble pour $l_c = 3 \text{ Km}$.

Le même travail est fait pour les longueurs du câble $l_c = 2 \text{ Km}$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$, les tableaux de 1 à 16 et les figures de 1 à 18 de l'annexe sont les résultats obtenus.

➤ Interprétation des résultats :

✓ La période T_c est le temps que met une onde qui se propage le long du câble pour parcourir une distance bien précise. Pour cela on distingue :

- Si l'onde se propage directement dans un câble dont sa fin est mise à la terre ($Z_{cl} = 0, Z_{ctr} = 0$) dans ce cas la période T_c dépend de la longueur ainsi que de la vitesse de propagation dans le câble $T_c = \frac{2 \cdot l_c}{v_c}$, ce que veut dire que l'onde parcourt deux fois la longueur du câble pour faire une période.

- Si l'onde se propage directement dans un câble dont sa fin est isolée de la terre ($Z_{cl} = 0, Z_{ctr} = \infty$) aussi dans ce cas la période T_c dépend de la longueur ainsi que de la vitesse de propagation dans le câble $T_c = \frac{4 \cdot l_c}{v_c}$, ce que veut dire que l'onde parcourt quatre fois la longueur du câble pour faire une période.

- Mais si le câble est connecté à travers deux impédances Z_{cl}, Z_{ctr} bien précises, dans ce cas les formules précédentes seront plus valables. D'après les figures (VI.31) ÷ (VI.39) ainsi que les figures de 1 à 18 de l'annexe on remarque que la variation de la période T_c dans le câble dépend :

- De la longueur l_c du câble, tel que : on voit que quand l_c diminue T_c diminue aussi.
- Des deux impédances caractéristiques connectées à ses extrémités Z_{cl} et Z_{ctr} , tel que :

- La variation de T_c dépend de Z_{ctr} pour cela on distingue trois cas : 1) Si $0 \leq Z_{ctr} \leq Z_{cc}$ et quelque soit la valeur de Z_{cl} , on aura la période dans le câble qui diminue avec l'augmentation de Z_{ctr} donc le processus a un caractère périodique. 2) Si $0 \leq Z_{cl} \leq Z_{cc}$ et $Z_{ctr} \geq Z_{cc}$ on voit que la variation de la période suit une loi exponentielle comme l'indique la figure (VI.39) le processus a un caractère périodique. 3) Si $Z_{cl} > Z_{cc}$ et $Z_{ctr} > Z_{cc}$ on aura la période dans le câble qui est nulle donc le processus a un caractère apériodique.

- La variation de Z_{cl} influence sur la période maximale T_{cmax} (celle qui correspond à $Z_{ctr} = \infty$) tel que la fonction $T_{cmax} = f(Z_{cl})$ suit aussi une loi exponentielle comme l'indique la figure (VI.42).

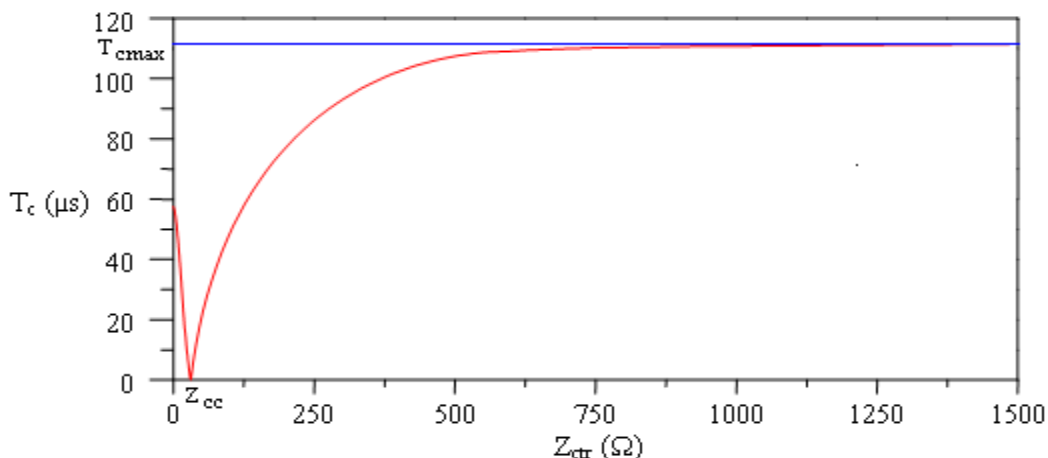


Figure (VI.41) : La courbe $T_c = f(Z_{ctr})$.

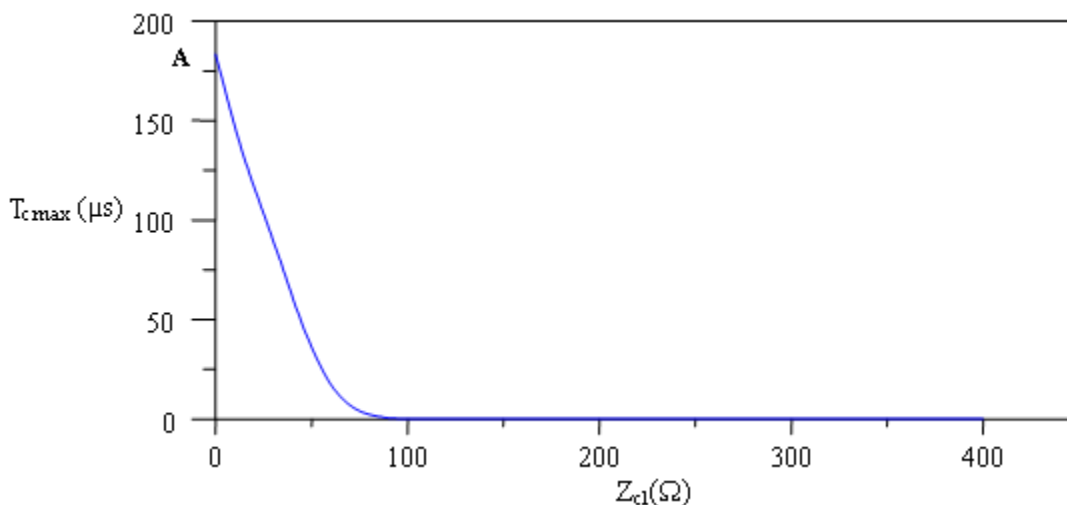


Figure (VI.42) : La courbe $T_{cmax} = f(Z_{cl})$.

Expressions de la période quand $Z_{cl} \leq Z_{cc}$ et $Z_{ctr} \geq Z_{cc}$:

D'après la courbe de la figure (VI.41), pour $Z_{ctr} \geq Z_{cc}$ on a :

$$T_c = T_{cmax} [1 - e^{-\left(\frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{\tau}\right)}] \quad (VI.1)$$

Détermination de T_{cmax} :

On a de l'équation (VI.1) $T_c = T_{cmax}$ pour $Z_{ctr} \rightarrow \infty$, et d'après les courbes (VI.31) ÷ (VI.33) on remarque que T_{cmax} dépend de la valeur de Z_{cl} comme le montre la figure (VI.40).

D'après les trois études qu'on a fait pour différentes longueurs du câble on a, $T_{cmax}(Z_{cl} = 400 \Omega) = 0$ et $A = 4,45 \frac{2 \cdot l_c}{V_c}$

Ce qui donne :

$$T_{cmax} = A \cdot e^{-\frac{Z_{cl}}{\tau'}}$$

$$\Rightarrow T_{cmax} = \left(4,45 \frac{2 \cdot l_c}{V_c} \right) e^{-\frac{Z_{cl}}{\tau'}}$$

$$\text{Donc : } T_c = \left[\left(4,45 \frac{2 \cdot l_c}{V_c} \right) e^{-\frac{Z_{cl}}{\tau'}} \right] \left[1 - e^{-\left(\frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{\tau}\right)} \right] \quad (VI.2)$$

Avec : $\tau = 144 \Omega$ et $\tau' = 50 \Omega$

✓ D'après la figure (VI.40) on remarque que la tension diminue jusqu'au milieu du câble en passant par sa valeur minimale en ce point, puis elle augmente pour atteindre sa valeur maximale à la fin.

VI.2.4.2) Pour la tension nominale 110 KV, le transformateur remplacé par une impédance variable Z_{ctr} :

On considéré le même schéma que celui de la figure (VI.30) sauf qu'on remplace l'impédance caractéristique de la ligne par son schéma équivalent.

Pour chaque longueur de la ligne a savoir $l_1 = 10 \text{ Km}$, $l_1 = 6 \text{ Km}$ et $l_1 = 2 \text{ Km}$ on fait varier l'impédance caractéristique du transformateur Z_{ctr} de $0 \rightarrow \infty$, et pour chaque valeur

de Z_{ctr} on mesure la période dans le câble, les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux (VI.9), (VI.10) et (VI.11) suivants :

Tableau (IV.9) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{ctr} pour $l_1 = 10$ Km.

$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
0	168,023	144,781	143,977	142,325	141,948	141,664	131,301	0
10	77,744	144,790	144,495	143,420	142,975	142,575	137,634	60,294
20	75,165	144,921	144,991	143,730	142,495	142,861	140,397	92,202
31	0	144,976	145,020	143,660	143,813	143,657	142,584	129,882
100	84,731	207,826	227,739	220,197	204,252	199,920	215,196	239,414
300	781,609	309,827	319,480	310,391	284,361	296,937	309,813	319,344
500	787,356	347,411	342,074	337,509	309,557	333,197	339,885	344,429
600	788,991	354,415	352,389	343,886	317,780	338,653	345,719	354,634
700	790,607	363,748	355,069	349,836	323,867	349,184	351,994	359,262
1000	793,103	374,755	367,327	359,066	336,173	360,980	366,355	372,368
3000	793,578	400,363	378,733	376,722	369,242	390,174	391,025	397,652
6000	798,165	406,735	384,729	381,044	379,011	396,274	397,909	408,766
∞	798,165	412,349	389,855	385,316	380,927	401,124	403,936	411,285

Tableau (IV.10) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{ctr} pour $l_1 = 6$ Km.

$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
0	167,816	177,043	175,571	160,568	146,639	147,816	139,226	0
10	90,698	179,212	175,858	166,630	146,059	145,472	139,645	70,731
20	46,512	179,214	176,005	169,920	146,059	145,474	140,463	113,949
31	0	178,132	176,035	173,201	160,714	163,755	158,350	147,884
100	102,358	277,537	251,810	264,924	288,011	270,189	282,396	296,916
300	613,793	389,290	377,433	362,684	391,363	383,663	386,215	427,173
500	616,092	435,307	420,369	399,895	436,262	423,291	412,147	471,783
600	616,092	447,458	430,363	411,859	448,671	432,943	417,702	487,170
700	618,391	455,729	438,892	419,168	448,897	438,925	427,387	485,126
1000	618,391	479,161	456,953	443,294	475,676	453,816	441,401	512,839
3000	620,690	500,133	479,461	460,806	491,551	474,277	461,898	531,604
6000	620,690	520,690	484,438	472,422	506,876	478,117	471,939	545,626
∞	620,690	512,138	489,049	472,217	500,551	480,033	475,024	543,617

Tableau (IV.11) : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{ctr} pour $l_1 = 2$ Km.

$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$	$U_{91}(KV)$	$U_{101}(KV)$
0	168,048	276,921	273,412	258,776	243,549	212,417	141,689	0
10	76,136	280,525	277,103	264,830	257,349	218,866	147,438	112,910
20	32,955	279,440	274,202	263,629	254,597	216,408	190,357	184,748
31	0	276,674	271,625	263,997	254,640	243,455	240,790	240,972
100	98,563	364,752	397,247	407,578	406,267	404,835	403,585	401,725
300	390,805	486,718	514,343	532,383	537,818	540,072	550,350	561,440
500	391,103	512,204	548,276	561,991	569,575	478,903	604,496	618,612
600	391,103	513,347	557,005	570,256	578,538	585,849	622,873	643,591
700	393,103	532,105	564,578	588,080	589,574	588,893	633,594	663,621
1000	395,402	538,596	571,833	595,413	598,906	599,808	647,778	681,265
3000	395,402	564,153	591,825	619,270	627,139	641,217	673,843	714,776
6000	397,701	568,516	594,621	623,992	631,981	646,816	681,713	722,788
∞	397,701	576,197	603,762	631,938	640,486	652,968	693,587	732,344

Les figures (VI.43), (VI.44) et (VI.45) suivantes représentent la variation de la période dans le câble en fonction de Z_{ctr} pour les différentes longueurs de la ligne.

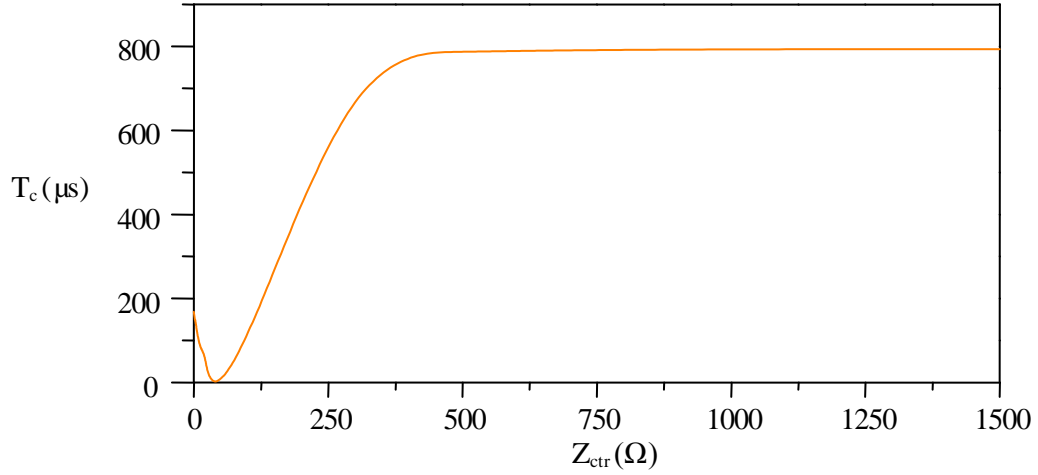


Figure (VI.43) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $l_1 = 10$ Km.

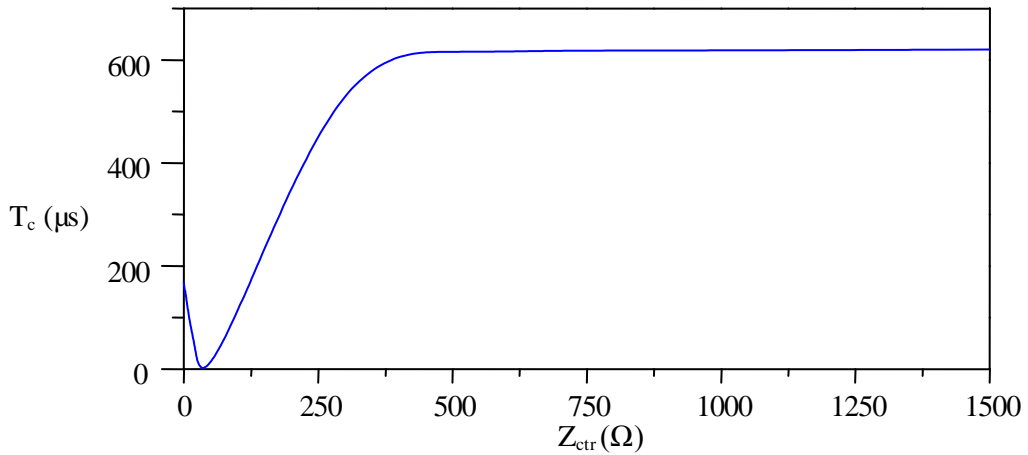


Figure (VI.44) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $l_1 = 6$ Km.

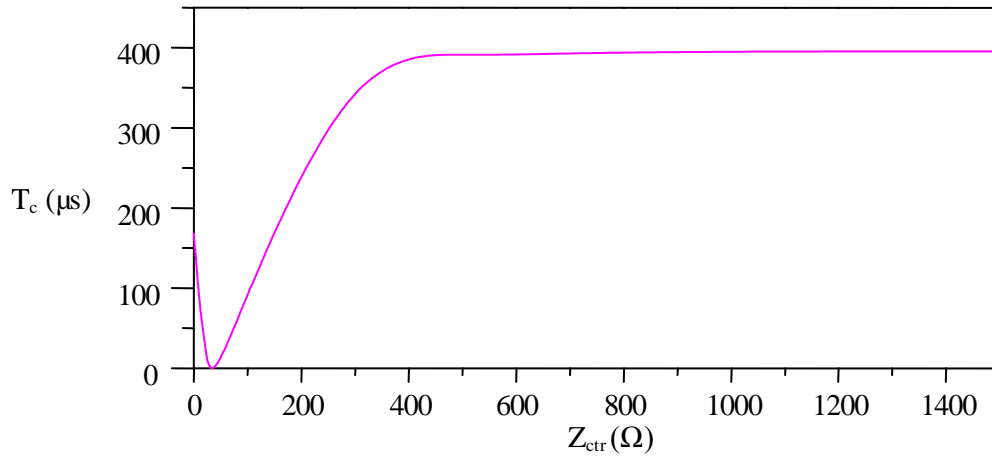


Figure (VI.45) : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $l_1 = 2$ Km.

➤ **Interprétation du résultat :**

D'après les figures (VI.43), (VI.44) et (VI.45) on remarque que la période dans le câble suit la même variation que la première considération où la ligne et le transformateur sont représentés par les impédances variables Z_{cl} et Z_{ctr} respectivement, tel que :

$T_c = T_{cmax} [1 - e^{-\left(\frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{\tau}\right)}$]. Sauf que dans cette considération sa valeur maximale T_{cmax} est beaucoup plus élevée, ça est dû à l'influence de la longueur de la ligne.

La figure (VI.46) suivante montre la variation de T_{cmax} en fonction de la longueur de la ligne l_1 , pour $Z_{ctr} = \infty$.

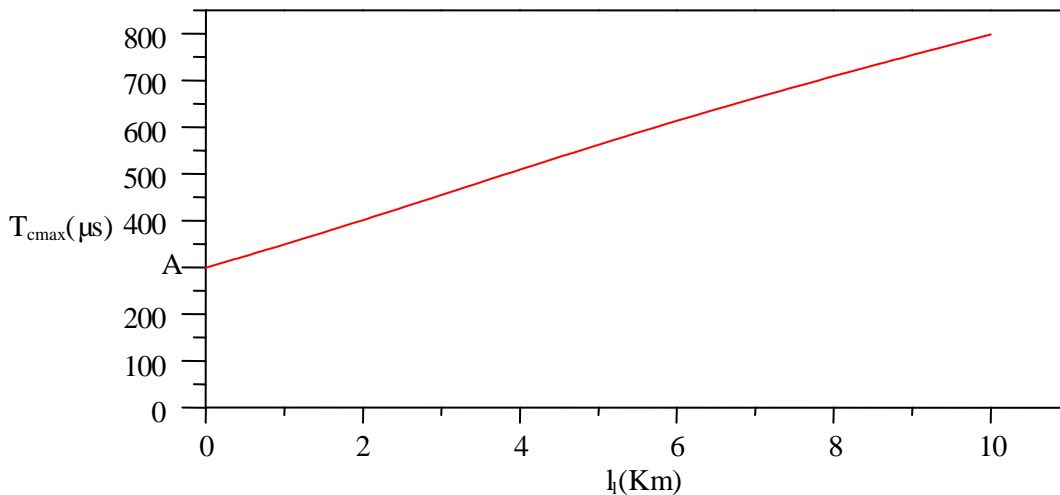


Figure (VI.46) : La variation de T_{cmax} en fonction de la longueur de la ligne l_1 .

La figure (VI.46) montre que la fonction $T_{cmax} = f(l_1)$ est une droite qui ne passe pas par l'origine qui est caractérisée par l'équation suivante :

$T_{cmax} = A + B \cdot l_1$ tel que :

○ B est la pente de la droite, $B = \frac{798,165 - 397,701}{10 - 2} = 50 \mu\text{s/Km}$.

○ A est déterminé à partir de la courbe $A = 290 \mu\text{s}$

Donc : $T_{cmax} = 290 + 50 \cdot l_1$

Donc : $T_c = [290 + 50 \cdot l_1] \cdot [1 - e^{-\left(\frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{\tau}\right)}$]. (VI.3)

Avec : $\tau = 281 \Omega$

VI.2.4.3) La surtension dans le câble en dépendance des longueurs de la ligne et du câble l_l et l_c respectivement pour les tensions 110, 220 et 330 KV :

Dans cette partie on a considéré le schéma équivalent du système ligne, câble et transformateur pour les différentes tensions nominales, pour chaque longueur du câble fixe on fait varier la longueur de la ligne et à chaque fois on mesure la période de la tension dans le câble, les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux 19, 20, 21 et 22 de l'annexe.

Les figures (VI.47), ... et (VI.50) suivantes montrent la variation de la période dans le câble.

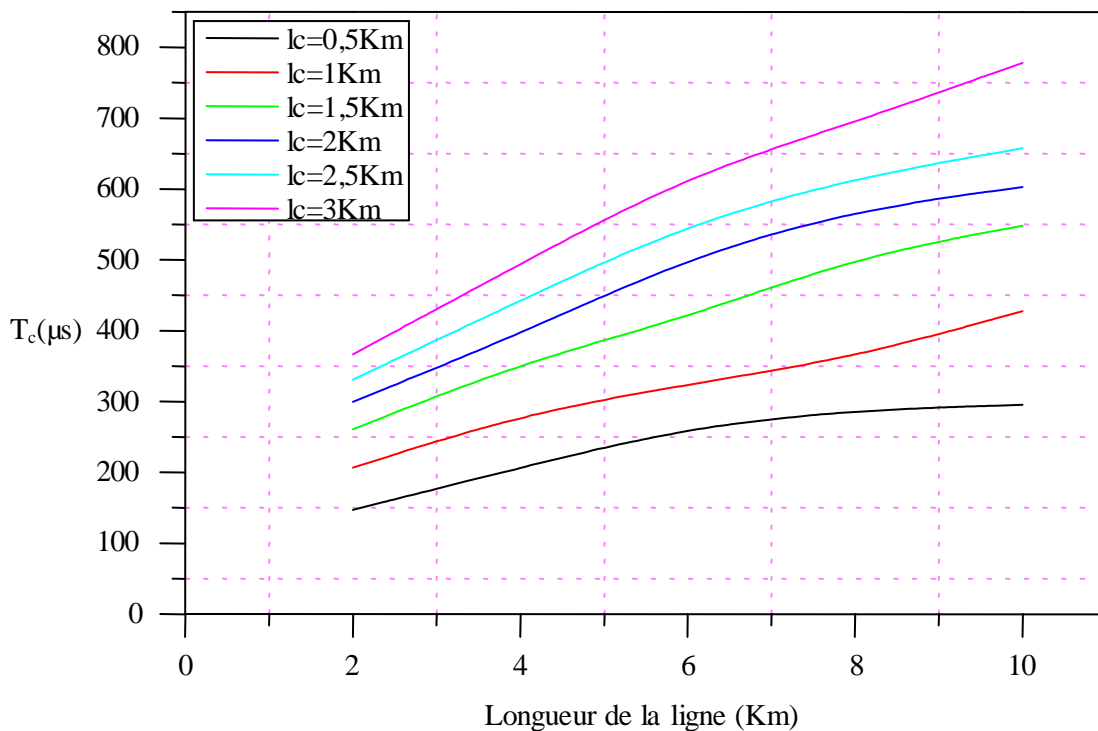


Figure (VI.47) : Les courbes $T_c = f(l_l)$ pour 110 KV avec neutre isolé de la terre

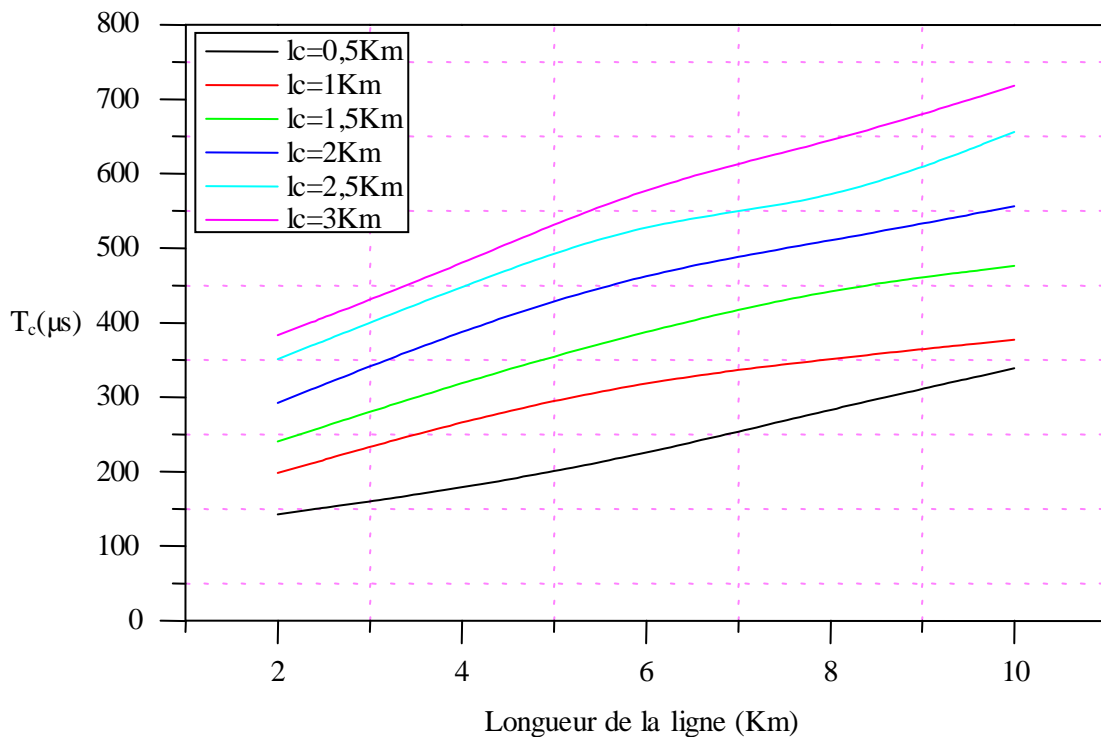


Figure (VI.48) : Les courbes $T_c = f(l_1)$ pour 110 KV avec neutre mis à la terre.

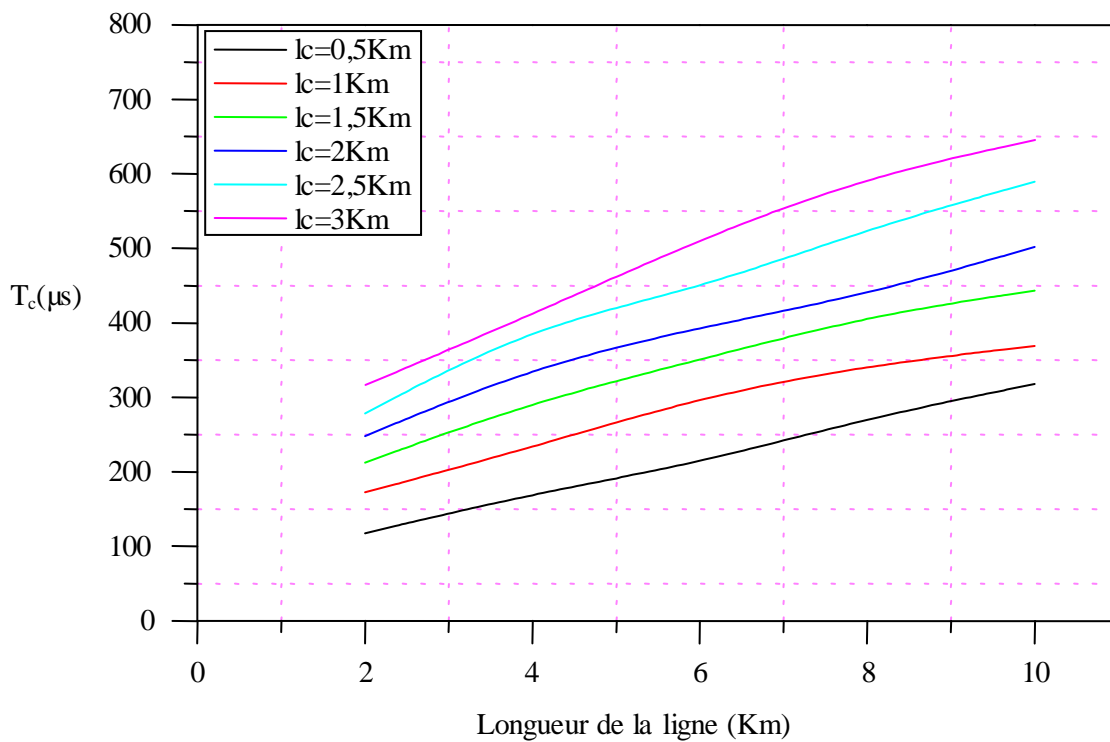


Figure (VI.49) : Les courbes $T_c = f(l_1)$ pour 220 KV.

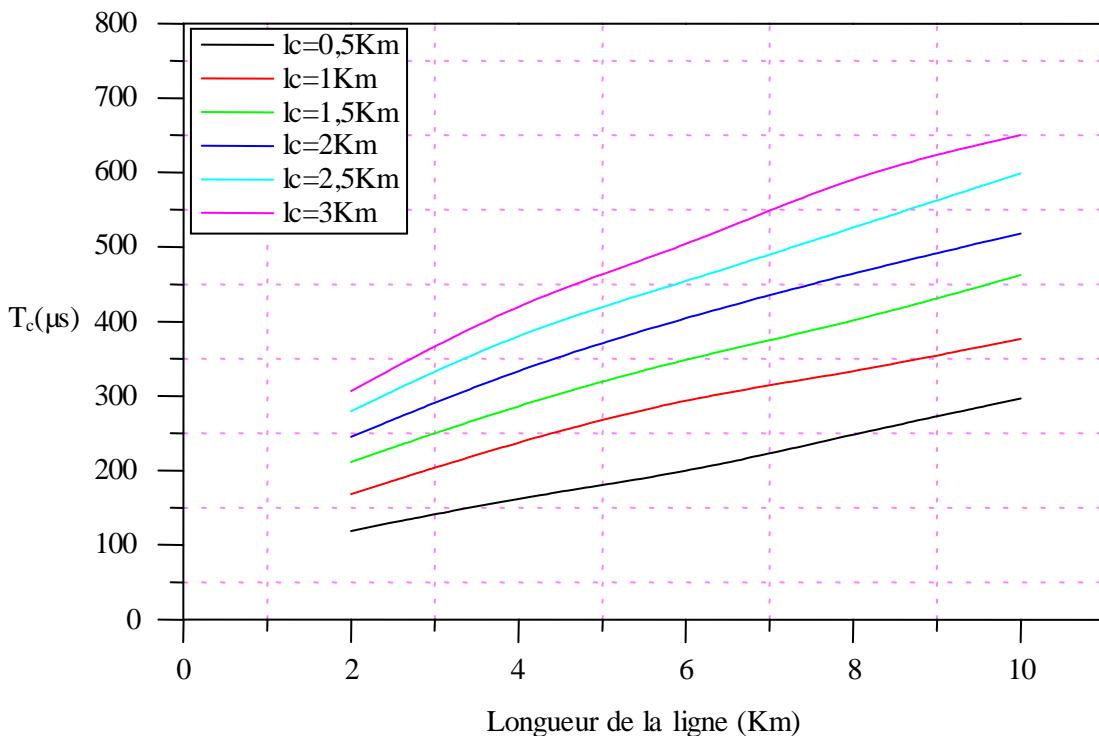


Figure (VI.50) : Les courbes $T_c = f(l_1)$ pour 330 KV.

➤ **Interprétation des courbes :**

D’après les figures (VI.47), (VI.48), et (VI.50) obtenues on constate que la période dans le câble varie proportionnellement avec les longueurs de la ligne et du câble, les courbes sont considérées comme des droites qui ne passent pas par l’origine, le développement mathématique des équations régissant ces familles des courbes nous permet de synthétiser les résultats suivants :

$$T_c = a \cdot l_1 + T_{c0} \quad \text{tel que : } T_{c0} = T_c(l_1 = 0), T_{c0} = b \cdot l_c \quad \text{c.à.d. : } T_c = a \cdot l_1 + b \cdot l_c$$

a =	{	$\frac{548,030 - 260,302}{10 - 2} = 35,97 \mu\text{s/Km}$	{	$\frac{225}{2,25} = 100 \mu\text{s/Km}$ 110 isolé de la terre
		$\frac{475,948 - 240,015}{10 - 2} = 29,49 \mu\text{s/Km}$		$\frac{275}{2,25} = 122,22 \mu\text{s/Km}$ 110 mis à la terre
		$\frac{443,105 - 212,241}{10 - 2} = 28,86 \mu\text{s/Km}$		$\frac{175}{1,75} = 100 \mu\text{s/Km}$ 220 mis à la terre
		$\frac{462,428 - 211,596}{10 - 2} = 31,35 \mu\text{s/Km}$		$\frac{170}{1,75} = 97,14 \mu\text{s/Km}$ 330 mis à la terre



Conclusion générale.

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

Par ailleurs, cette étude présente une analyse bien détaillée sur le comportement du câble dans un système ligne - câble - transformateur soumis à une surtension atmosphérique, à savoir le phénomène de propagation de la tension dans le câble et sa période par influence des impédances connectées à ses extrémités ainsi que sa longueur et celle de la ligne. Le problème considéré est réalisé à l'aide de la modélisation mathématique en utilisant le logiciel P-Spice.

Les résultats obtenus montrent que :

➤ La répartition de la surtension le long du câble est considérée uniforme, sauf qu'au voisinage de ses extrémités elle varie selon la variation des impédances connectées à ses dernières.

➤ Le régime transitoire de la tension à la fin du câble dépend de la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne Z_{cl} .

○ Si $Z_{cl} \geq Z_{cc}$: Nous avons affaire à un régime aperiodique qui se caractérise par l'équation de premier ordre : $U_2(t) = U_{max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$.

○ Si $0 \leq Z_{cl} < Z_{cc}$: Nous avons affaire à un régime périodique oscillatoire amorti régi par l'équation de deuxième ordre : $U_2(t) = U_{\infty} [1 + \frac{e^{-A \cdot \omega_n \cdot t}}{\sqrt{1-A^2}} \sin (\omega_n \sqrt{1-A^2} t - \phi)]$.

➤ La variation de la période dans le câble T_c dépend de sa longueur l_c ainsi des impédances Z_{cl} et Z_{ctr} connectées à ses extrémités. Durant notre analyse et quand le régime est périodique on peut représenter cette variation par une expression mathématique suivie de sa démonstration.

$$T_c = \left[\left(4,45 \frac{Z_{cl} \cdot l_c}{V_c} \right) e^{-\frac{Z_{cl}}{\tau'}} \right] \left[1 - e^{-\left(\frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{\tau} \right)} \right]$$

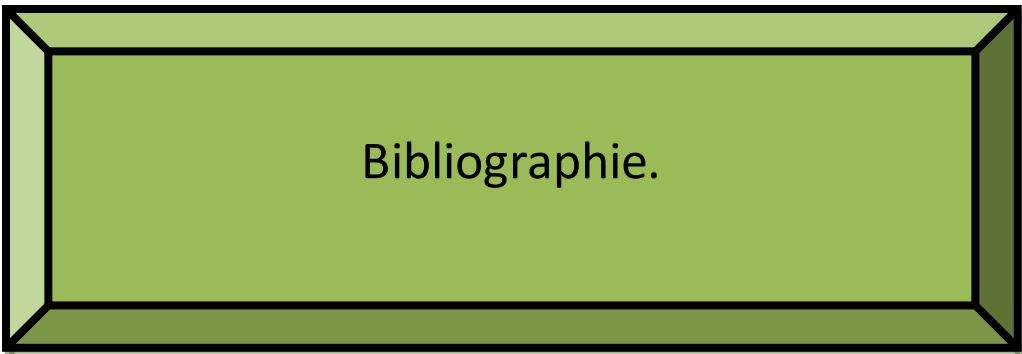
➤ Lorsqu'on représente la ligne par son schéma équivalent, la variation de la période dans le câble T_c dépend de sa longueur l_c et de la longueur de la ligne l_l ainsi que de

l'impédance Z_{ctr} connectée à son autre extrémité. Où on peut l'exprimer mathématiquement par une loi exponentielle qui a été développée au cours de notre analyse.

$$T_c = [290 + 50. l_l]. [1 - e^{-\left(\frac{Z_{ctr} - Z_{cc}}{\tau}\right)}].$$

➤ Lorsqu'on considère le schéma équivalent du système ligne, câble et transformateur, la période dans le câble varie proportionnellement avec les longueurs de la ligne l_l et du câble l_c , un développement mathématique des équations régissant ces familles des courbes synthétisé comme suite : $T_c = a. l_l + b. l_c$

Nous espérons que ce présent travail puisse être un outil de base et une analyse complémentaire pour les futures études concernant la propagation des surtensions dans les réseaux électriques.



- [1] : THEODORE WILDI « Électrotechnique ». 3^{ème} édition.
- [2] : VALENTIN CRASTAN « Les réseaux d'énergie électrique ». Tome 1.
- [3] : FREDERIC MACIELA « Parafoudres ».
Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique. Doc - D 4 755.
- [4] : Michel PAYS « Câbles de transport d'énergie ».
Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique Doc. D 4 522
- [5] : ROLAND CHOQUET « La sécurité électrique, techniques de prévention ».
Bordas, Paris, 1984.
- [6] : Michel GRACIET & Joseph PINEL « Protection contre les perturbations ».
Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique Doc. D 5 170
- [7] : HENRI NEY « Equipements de puissance ».
Paris, 1988.
- [8] : HANDELLA. « Cours de 4^{ème} année de haute tension, électrotechnique ».
- [9] : NEKLZEPAYEV B.N & KRYUTCHKOV I.P « Partie électrique des centrales et des postes électrique ».
Moscou, Energeatomizdat, 1989.
- [10] : FRANÇOIS GIRARD « Généralités sur la foudre et les surtensions ».
ADEE Electronic. Édition octobre 2008.
- [11] : D. FULCHIRON « Surtensions et coordination de l'isole ment ».
CT 151. Édition décembre 1992.
- [12] : LOU VAN DER SLUIS « Transients in Power Systems ».
Édition 2001 John Wiley & Sons Ltd.
- [13] : M.KOSTENKO & L.PIOTROVSKI « Machines électriques ». (Volume 1).
Édition MIR, Moscou, 1969.
- [14] : B.GUELLER & A.VEVERKA « Les processus impulsionnels dans les machines électriques ».
Energuiya, Moscou, 1973.
- [15] : A.K.LOKHANINE « Détermination des inductances des transformateurs HT ».
Electrichestvo, Moscou, 1976.

[16] : A.K.LOKHANINE & V.I.POGOSTINE « Calcul des capacités des enroulements de transformateur HT ».

Electrotechnica, Lvov, 1973

[17] : D.V.RAZEVIK « Technique de haute tension ».

Moscou, Energiya, 1976.

[18] : M.KOSTENKO & L.PIOTROVSKI « Machines à courant continu – transformateur ».

3^{ème} édition, édition MIR, Moscou, 1979.

[19] : BLOK V.M « Réseaux électriques ».

Moscou, Vischaya shkola, 1986.

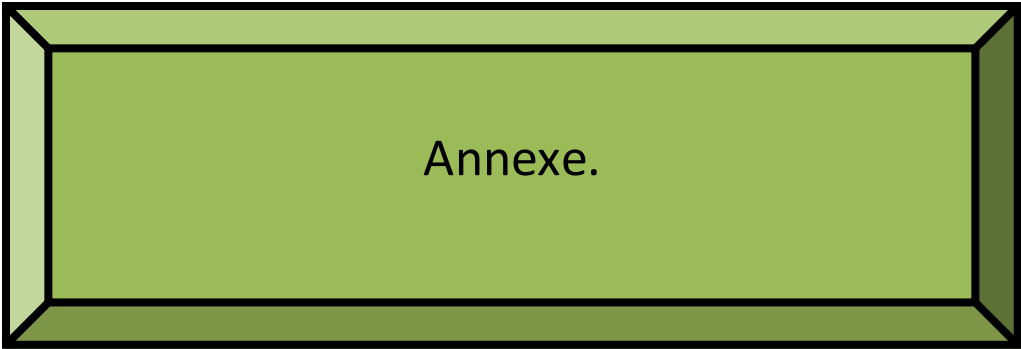


Tableau -1- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
0	0	58,433	688,668	814,403	826,454	801,565	0
	10	58,046	688,668	814,395	830,227	828,195	329,640
	20	57,955	688,668	814,072	831,591	818,735	539,429
	31	0	688,668	813,753	833,078	816,593	705,726
	100	88,506	688,668	813,893	833,737	858,338	1140,3
	500	113,79	688,668	925,911	1073,6	1178,0	1461,3
	600	113,79	688,668	952,812	1096,4	1193,6	1478,1
	700	113,79	688,668	964,449	1109,1	1205,2	1490,4
	1000	114,37	688,668	970,480	1125,7	1229,3	1512,9
	2000	114,94	688,668	1007,9	1158,2	1259,1	1537,5
	3000	115,52	688,668	997,30	1157,5	1256,8	1546,3
	6000	116,67	688,668	1005,9	1169,0	1273,7	1558,2
	∞	119,54	688,668	1010,2	1180,1	1276,1	1552,3

Tableau -2- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
15	0	57,484	1075,2	1182,3	1184,3	1170,3	0
	10	54,023	1075,2	1174,5	1191,9	1170,5	471,087
	20	9,0909	1075,2	1174,5	1193,1	1173,1	765,439
	31	0	1075,2	1174,5	1194,0	1197,9	1005,9
	100	103,742	1075,2	1174,6	1195,5	1238,4	1616,2
	500	109,091	1075,2	1397,4	1538,9	1684,8	2060,0
	600	109,091	1075,2	1412,0	1564,3	1703,2	2086,3
	700	110,724	1075,2	1425,3	1581,8	1720,8	2105,4
	1000	110,724	1075,2	1460,1	1613,6	1756,0	2140,6
	2000	111,494	1075,2	1513,7	1663,6	1812,0	2233,2
	3000	112,096	1075,2	1543,5	1691,2	1829,3	2246,6
	6000	112,242	1075,2	1534,9	1688,8	1839,3	2260,1
	∞	112,644	1075,2	1545,6	1702,8	1851,3	2272,9

Tableau -3- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
31	0	46,188	886,417	910,587	910,589	905,975	0
	10	41,096	886,417	910,918	911,320	869,102	359,039
	20	8,843	886,417	910,856	916,520	891,874	594,750
	31	0	886,417	910,881	915,709	891,669	775,555
	100	48,980	886,417	910,923	918,663	940,149	1217,6
	500	48,980	968,322	1097,8	1184,5	1286,5	1604,1
	600	49,320	986,231	1117,6	1205,5	1301,8	1623,1
	700	49,320	1000,9	1135,1	1224,1	1314,7	1637,0
	1000	49,320	1012,7	1148,4	1237,8	1339,6	1354,0
	2000	49,330	1046,4	1183,8	1272,5	1369,3	1690,4
	3000	49,660	1050,6	1186,2	1273,1	1381,9	1694,7
	6000	49,660	1046,3	1178,2	1273,4	1387,9	1705,1
∞	49,660	1050,3	1181,5	1279,6	1392,3	1715,6	

Tableau -4- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
60	0	43,951	656,849	651,029	644,207	647,513	0
	10	43,208	656,849	651,030	651,975	643,092	260,981
	20	27,551	656,849	651,031	649,983	636,702	433,720
	31	0	656,849	651,031	650,394	641,275	538,923
	100	0	656,849	651,031	649,576	663,889	863,636
	500	0	840,673	781,996	825,899	900,787	1124,7
	600	0	855,528	794,818	839,146	912,483	1130,8
	700	0	881,798	813,573	864,902	927,429	1162,1
	1000	0	900,113	831,548	877,528	945,404	1179,9
	2000	0	920,289	847,678	893,127	964,852	1201,4
	3000	0	933,236	858,254	903,284	974,681	1208,7
	6000	0	942,174	865,635	912,533	981,576	1216,1
∞	0	949,904	872,086	918,581	990,971	1215,3	

Tableau -5- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
100	0	44,094	480,947	465,498	460,282	452,671	0
	10	42,466	480,947	4965,498	463,972	438,486	184,521
	20	29,592	480,947	465,498	463,937	452,899	303,195
	31	0	480,947	465,498	463,876	438,646	394,516
	100	0	480,947	465,498	463,677	473,416	618,537
	500	0	680,057	570,629	589,542	638,874	796,049
	600	0	695,496	583,821	601,348	647,968	802,252
	700	0	707,604	589,909	610,157	656,160	811,116
	1000	0	726,517	607,506	624,068	669,582	824,903
	2000	0	747,419	624,718	637,959	684,748	840,763
	3000	0	756,476	632,656	644,533	689,595	846,098
	6000	0	763,101	636,290	647,848	696,210	851,455
	∞	0	770,048	641,691	651,967	701,912	856,916

Tableau -6- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
200	0	30,564	285,877	270,757	265,760	264,132	0
	10	29,669	285,877	270,755	268,459	262,978	107,823
	20	9,932	285,877	270,754	268,068	263,806	179,645
	31	0	285,877	270,754	268,204	263,437	231,975
	100	0	285,877	270,751	269,345	275,329	372,062
	500	0	446,028	381,671	344,485	370,561	462,933
	600	0	452,250	385,911	348,957	375,763	468,361
	700	0	459,462	391,833	353,113	380,133	472,425
	1000	0	471,484	403,949	360,649	388,928	479,951
	2000	0	448,430	414,721	374,665	403,183	489,024
	3000	0	489,650	417,564	373,629	401,612	492,117
	6000	0	494,978	421,694	385,458	416,963	495,254
	∞	0	498,566	423,188	385,976	409,163	501,353

Tableau -7- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
300	0	28,082	240,905	190,116	190,056	184,796	0
	10	21,233	202,956	190,116	189,706	185,433	74,056
	20	15,510	202,956	190,116	189,570	185,709	122,455
	31	0	202,956	190,116	189,039	183,438	162,743
	100	0	202,956	190,116	189,528	193,755	261,287
	500	0	324,152	277,130	251,842	260,360	320,079
	600	0	330,805	284,124	247,849	265,420	324,379
	700	0	334,690	286,041	261,642	275,699	336,422
	1000	0	343,946	294,616	268,161	286,434	346,660
	2000	0	354,440	303,741	279,295	297,227	362,175
	3000	0	361,703	310,841	284,932	305,208	367,618
	6000	0	364,108	312,025	289,974	313,120	377,189
	∞	0	368,354	315,214	295,695	320,228	385,134

Tableau -8- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 2$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{51}(KV)$	$U_{61}(KV)$	$U_{71}(KV)$	$U_{81}(KV)$
400	0	29,452	157,460	147,143	146,673	139,593	0
	10	17,808	157,460	147,181	146,922	141,627	58,294
	20	12,312	157,460	147,174	146,939	142,046	96,197
	31	0	157,460	147,187	147,198	140,930	124,723
	100	0	157,460	147,192	146,930	149,081	200,805
	500	0	261,323	226,031	204,026	213,198	261,516
	600	0	263,084	227,035	204,980	214,347	261,976
	700	0	267,527	231,260	209,038	222,609	269,478
	1000	0	274,831	236,872	219,270	236,236	284,171
	2000	0	281,034	242,029	227,101	243,121	292,361
	3000	0	286,503	246,674	229,932	247,958	300,652
	6000	0	288,403	248,075	231,615	246,339	300,912
	∞	0	291,460	250,659	234,899	249,843	305,917

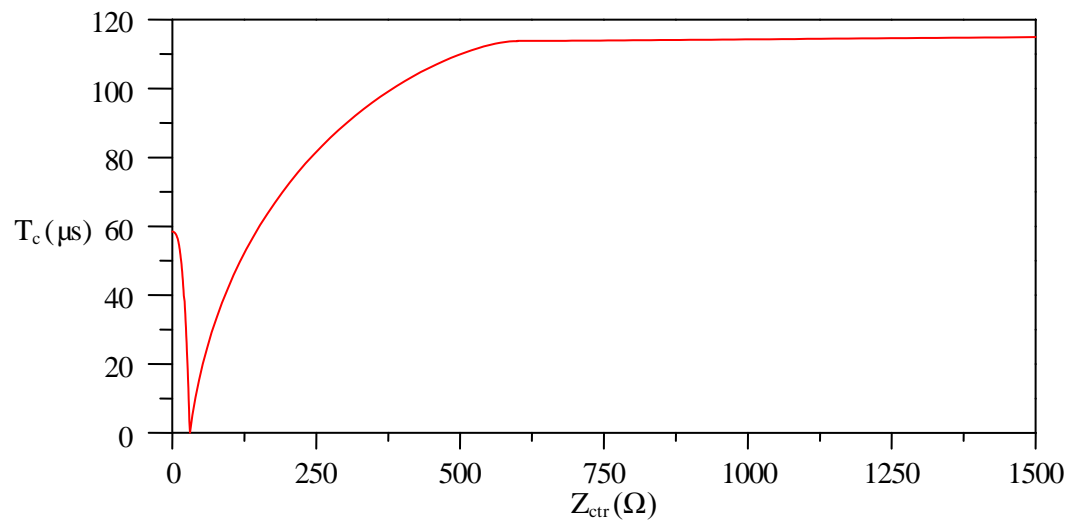


Figure -1- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 0 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

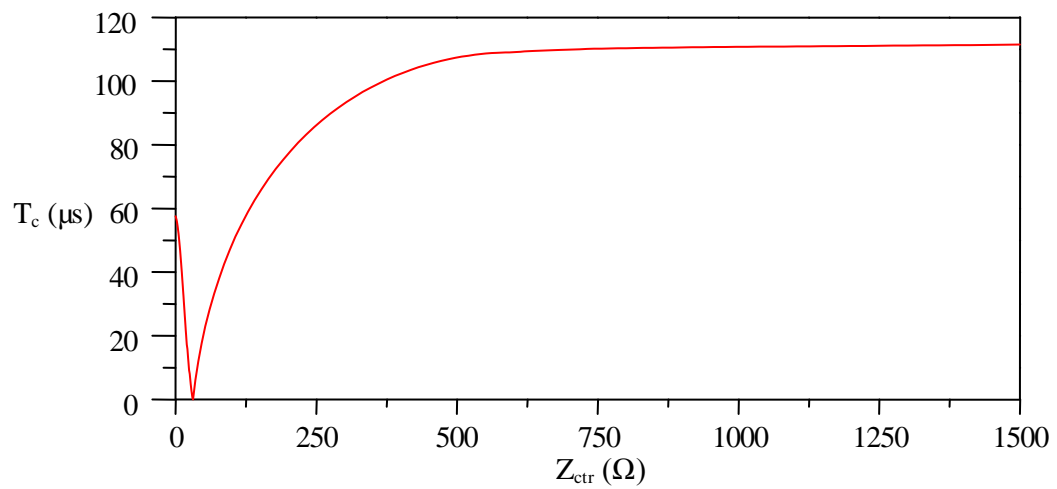


Figure -2- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 15 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

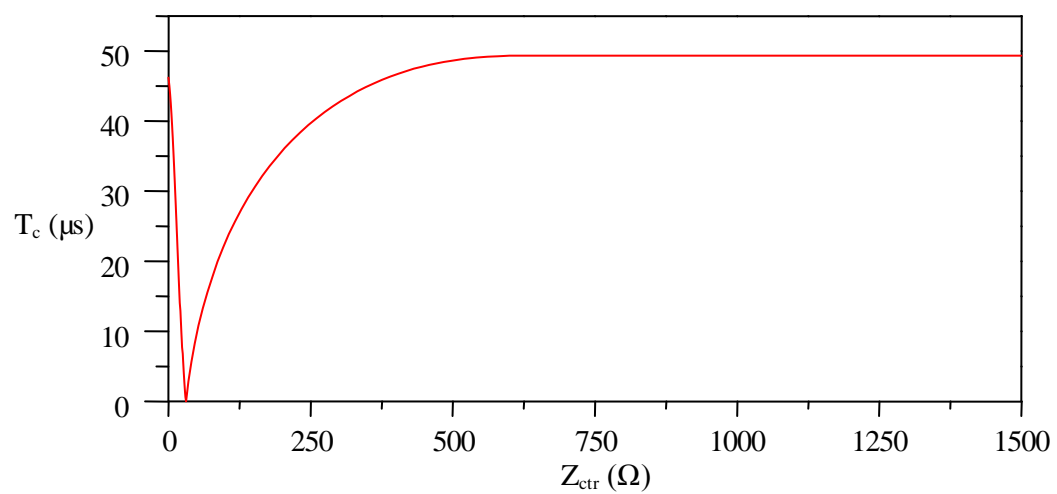


Figure -3- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 31 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

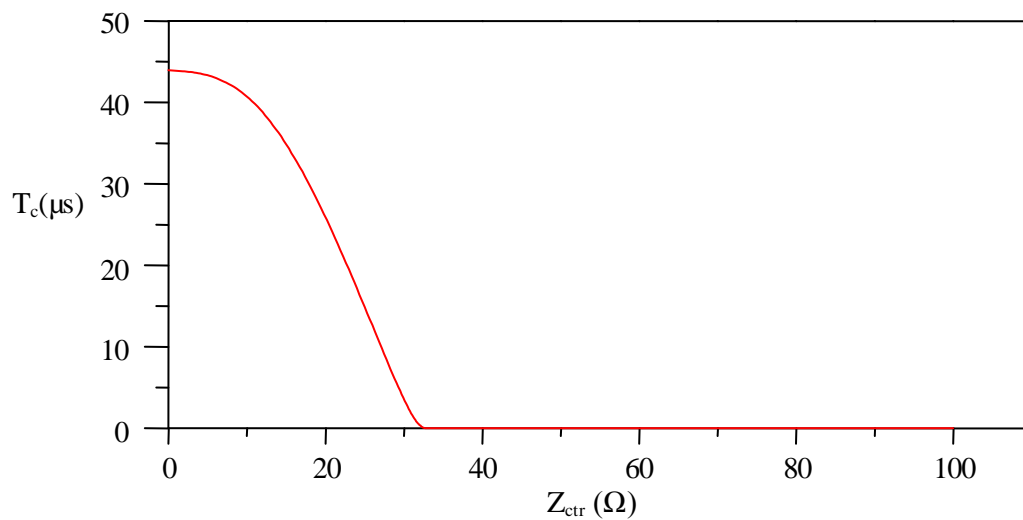


Figure -4- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 60 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

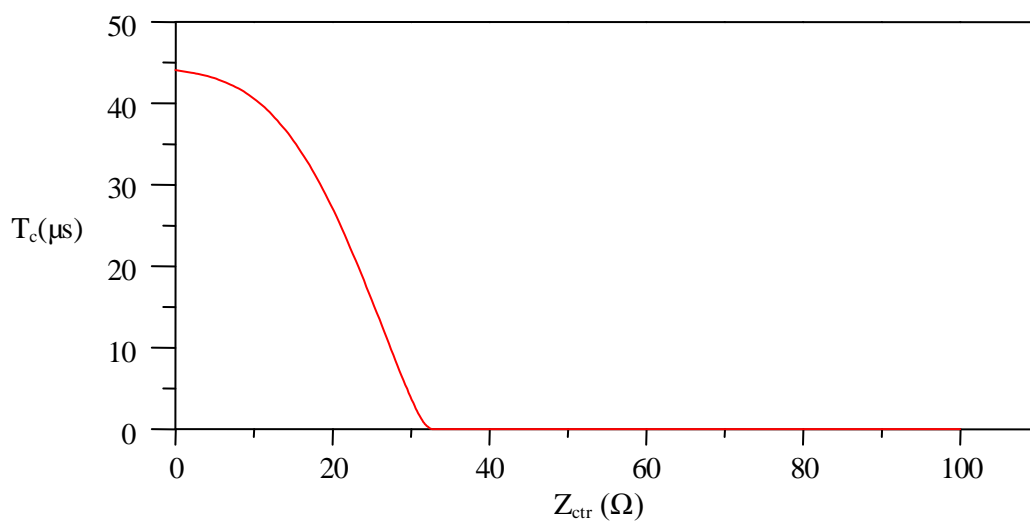


Figure -5- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 100 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

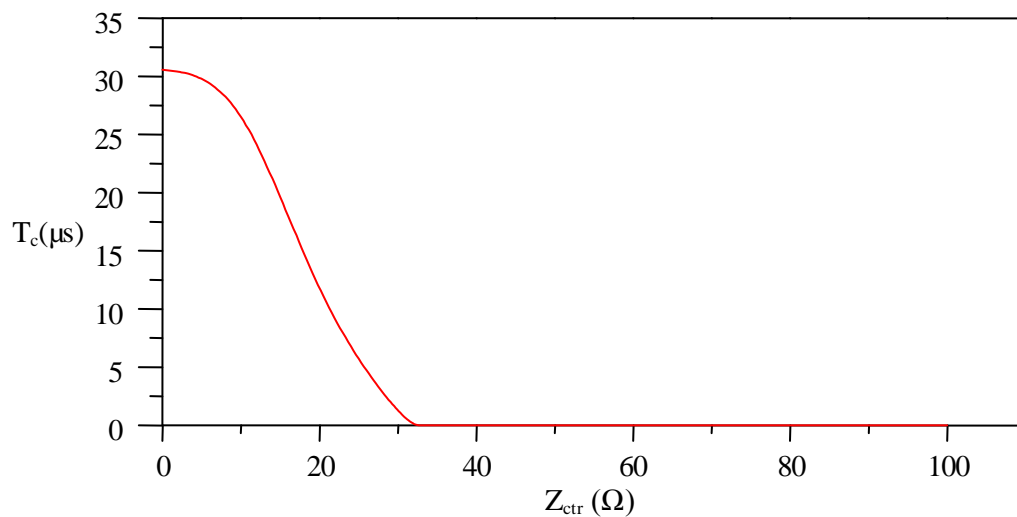


Figure -6- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 200 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

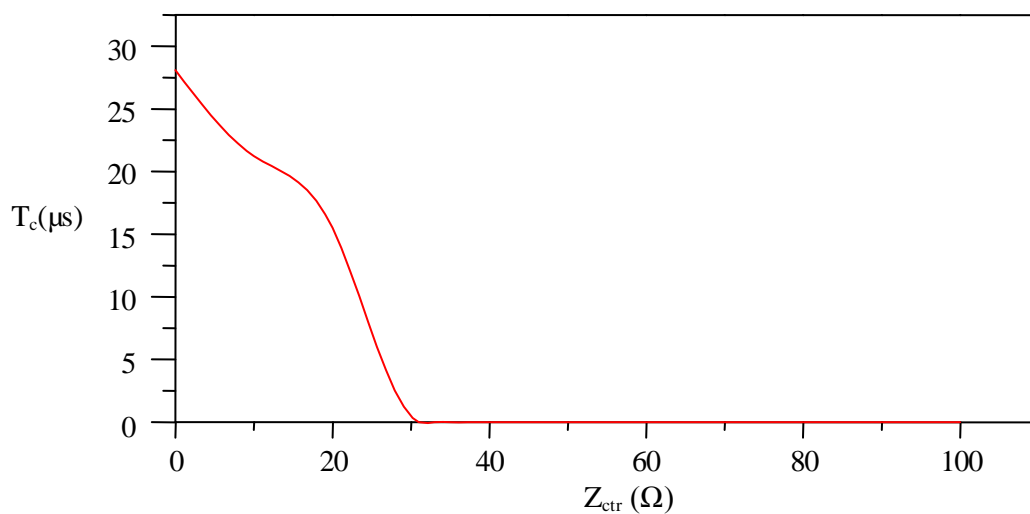


Figure -7- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 300 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

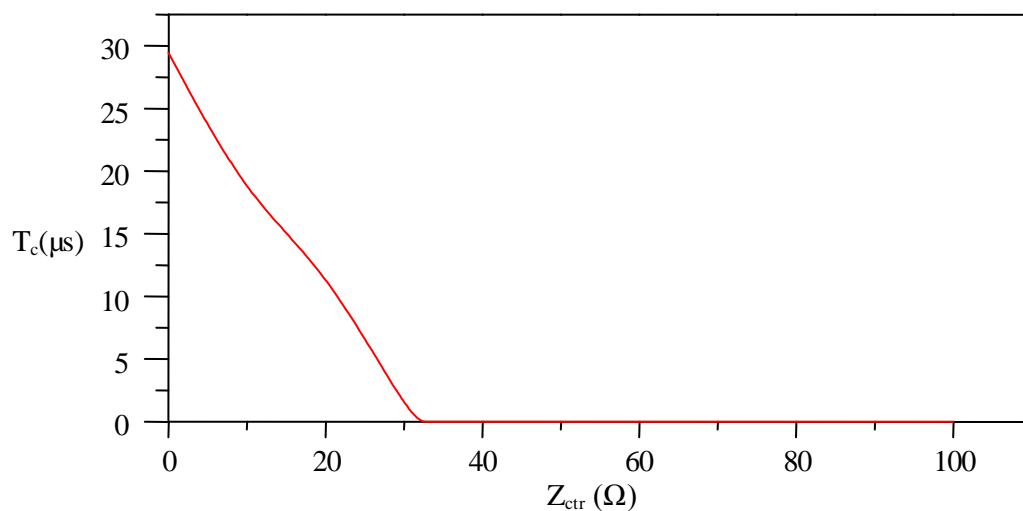


Figure -8- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 400 \Omega$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

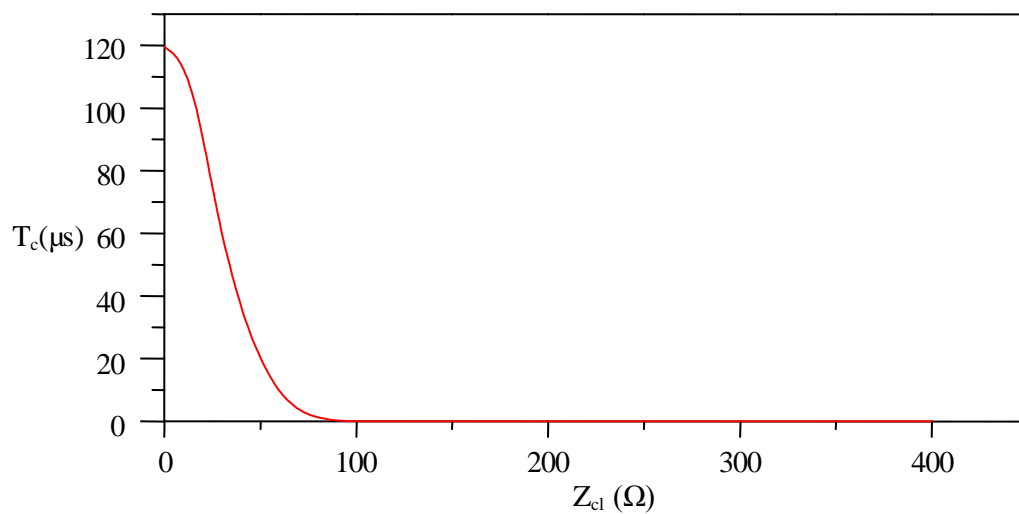


Figure -9- : $T_c = f(Z_{cl})$ pour $Z_{ctr} = \infty$ et $l_c = 2 \text{ Km}$

Tableau -9- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
0	0	15,001	688,668	799,261	0
	10	13,068	688,668	799,171	425,590
	20	9,124	688,668	786,842	566,405
	31	0	688,668	784,279	750,301
	100	14,205	688,668	878,111	1179,4
	500	27,586	688,668	1138,9	1534,5
	600	28,161	688,668	1166,8	1521,5
	700	28,736	688,668	1171,0	1565,7
	1000	28,736	688,668	1185,2	1589,8
	2000	28,736	688,668	1208,2	1618,7
	3000	29,310	688,668	1227,8	1608,7
	6000	29,310	688,668	1225,8	1638,6
	∞	30,460	688,668	1230,5	1633,1

Tableau -10- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
15	0	14,384	1075,8	1165,3	0
	10	12,310	1075,2	1161,7	495,705
	20	5,442	1075,2	1148,3	824,978
	31	0	1073,9	1153,8	1070,8
	100	8,843	1074,2	1293,2	1716,9
	500	8,843	1349,6	1773,6	2211,0
	600	8,843	1359,8	1779,0	2221,8
	700	8,843	1372,4	1812,3	2259,3
	1000	8,843	1393,1	1842,9	2295,4
	2000	9,184	1422,8	1905,4	2366,9
	3000	9,864	1431,9	1922,2	2382,8
	6000	9,864	1436,5	1923,1	2395,9
	∞	9,524	1446,0	1938,6	2414,7

Tableau -11- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
31	0	14,384	886,212	906,839	0
	10	8,6133	886,432	900,473	380,055
	20	5,7823	885,749	896,731	636,092
	31	0	886,323	906,829	820,684
	100	5,7823	955,453	1020,9	1286,3
	500	6,1225	1290,8	1403,0	1704,5
	600	6,4626	1311,6	1429,5	1749,8
	700	6,4226	1320,6	1440,1	1740,6
	1000	6,1225	1344,9	1473,0	1768,6
	2000	6,4626	1372,0	1501,8	1802,5
	3000	6,8027	1380,0	1519,8	1810,8
	6000	6,4626	1393,1	1511,4	1825,8
∞	6,8027	1394,6	1512,6	1827,4	

Tableau -12- Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
60	0	14,726	656,872	643,103	0
	10	9,5240	657,581	640,046	264,454
	20	5,1020	657,886	639,893	442,187
	31	0	657,986	631,836	577,693
	100	0	762,545	742,273	942,504
	500	0	1084,0	1035,0	1209,2
	600	0	1101,6	1047,5	1223,9
	700	0	1118,2	1063,8	1248,0
	1000	0	1136,6	1074,1	1254,3
	2000	0	1166,2	1100,3	1278,1
	3000	0	1179,1	1112,5	1302,5
	6000	0	1180,3	1116,4	1294,5
∞	0	1193,2	1124,0	1302,8	

Tableau -13- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
100	0	7,3560	480,557	464,557	0
	10	6,6667	480,687	461,926	187,688
	20	4,7727	480,326	457,729	307,269
	31	0	480,137	454,729	404,616
	100	0	597,010	454,934	673,902
	500	0	859,337	559,328	871,644
	600	0	873,464	823,433	882,445
	700	0	884,867	843,141	890,330
	1000	0	913,771	854,658	928,890
	2000	0	948,596	886,599	957,664
	3000	0	965,011	915,639	949,124
	6000	0	974,434	919,628	966,052
∞	0	980,824	932,083	988,708	

Tableau -14- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
200	0	28,442	286,103	267,019	0
	10	25,630	285,250	273,227	109,121
	20	10,682	285,066	274,535	185,513
	31	0	284,718	267,741	238,035
	100	0	370,818	329,625	377,961
	500	0	612,632	573,911	600,560
	600	0	633,544	598,430	630,789
	700	0	655,824	611,722	644,146
	1000	0	682,480	648,999	683,741
	2000	0	714,005	689,609	720,284
	3000	0	718,771	699,103	730,815
	6000	0	734,349	720,019	749,203
∞	0	747,301	733,544	760,396	

Tableau -15- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
300	0	27,816	218,995	193,195	0
	10	15,402	202,337	188,791	77,482
	20	6,5909	202,277	193,137	125,902
	31	0	202,438	189,242	169,536
	100	0	275,138	250,486	272,856
	500	0	476,960	457,221	469,335
	600	0	488,623	476,607	489,786
	700	0	508,692	497,303	516,939
	1000	0	527,732	522,507	540,086
	2000	0	567,509	553,852	572,837
	3000	0	581,861	568,972	587,272
	6000	0	595,746	585,250	603,299
∞	0	611,047	601,650	621,555	

Tableau -16- : Surtension dans le câble en dépendance de Z_{cl} et Z_{ctr} pour $l_c = 0,5$ Km.

$Z_{cl}(\Omega)$	$Z_{ctr}(\Omega)$	$T_c(\mu s)$	$U_{41}(KV)$	$U_{45}(KV)$	$U_{51}(KV)$
400	0	22,989	157,617	150,743	0
	10	12,046	157,248	145,675	60,395
	20	5,9770	157,047	148,568	98,643
	31	0	156,713	150,130	130,713
	100	0	213,358	190,431	213,253
	500	0	387,442	377,600	394,534
	600	0	405,197	396,447	410,793
	700	0	421,763	408,717	424,432
	1000	0	450,309	429,641	450,839
	2000	0	488,237	473,984	492,546
	3000	0	504,220	488,762	509,790
	6000	0	523,552	504,852	528,954
∞	0	540,080	518,291	544,850	

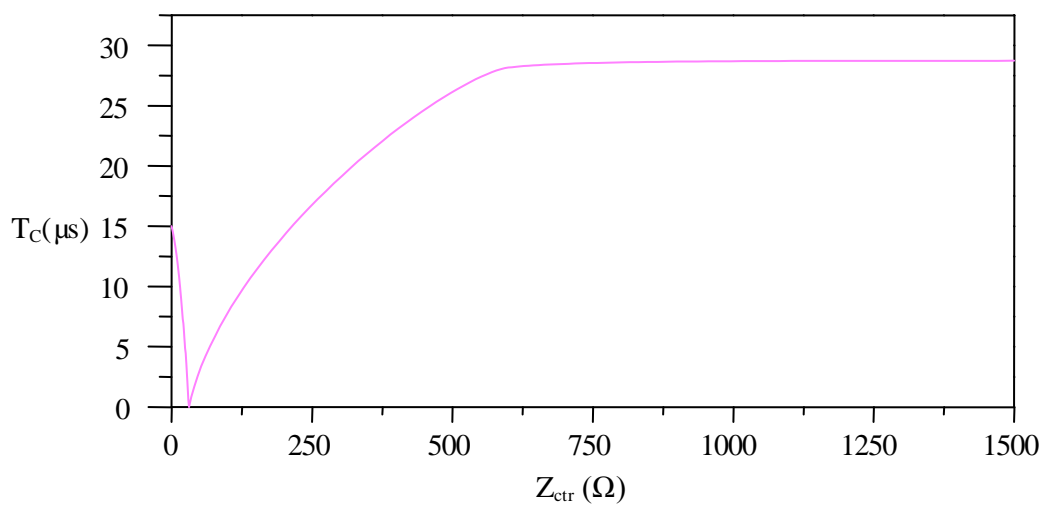


Figure -10- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 0 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

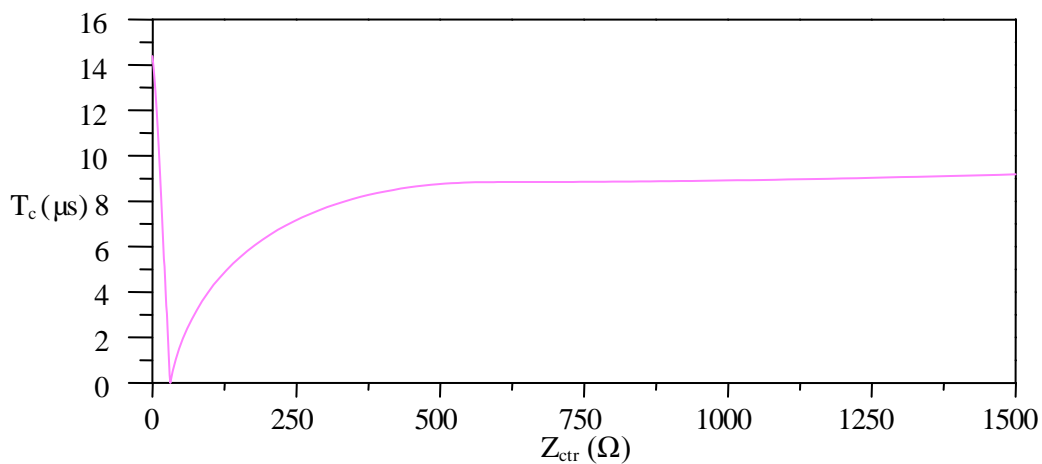


Figure -11- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 15 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

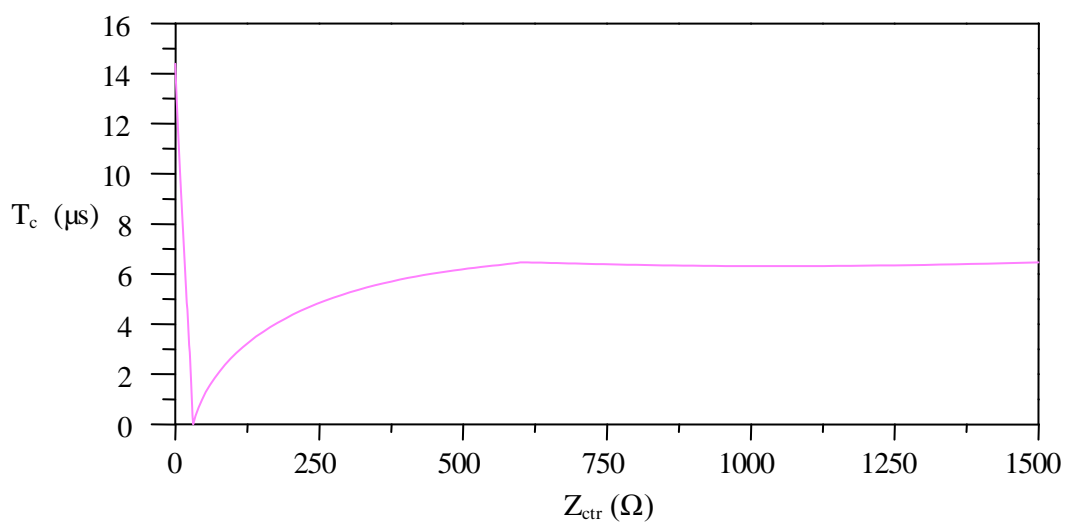


Figure -12- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 31 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

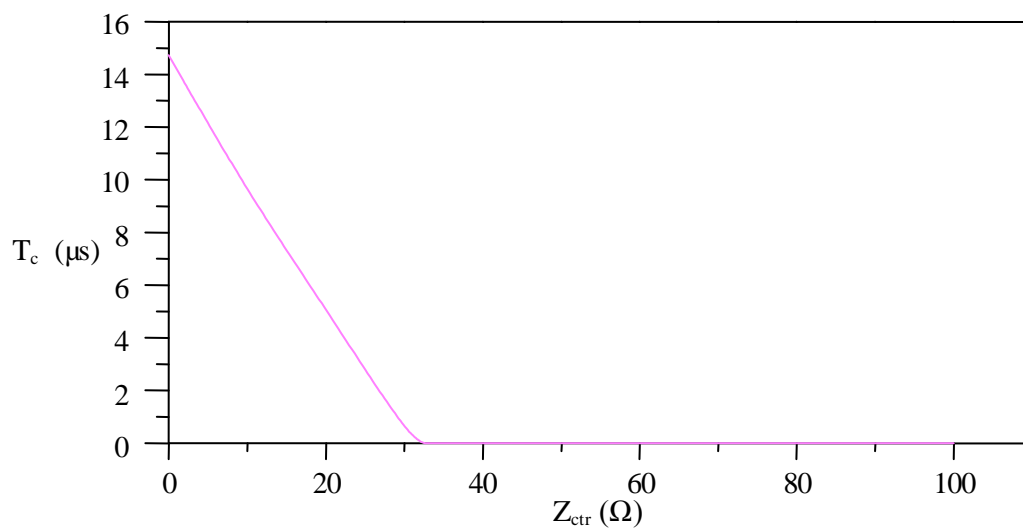


Figure -13- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 60 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

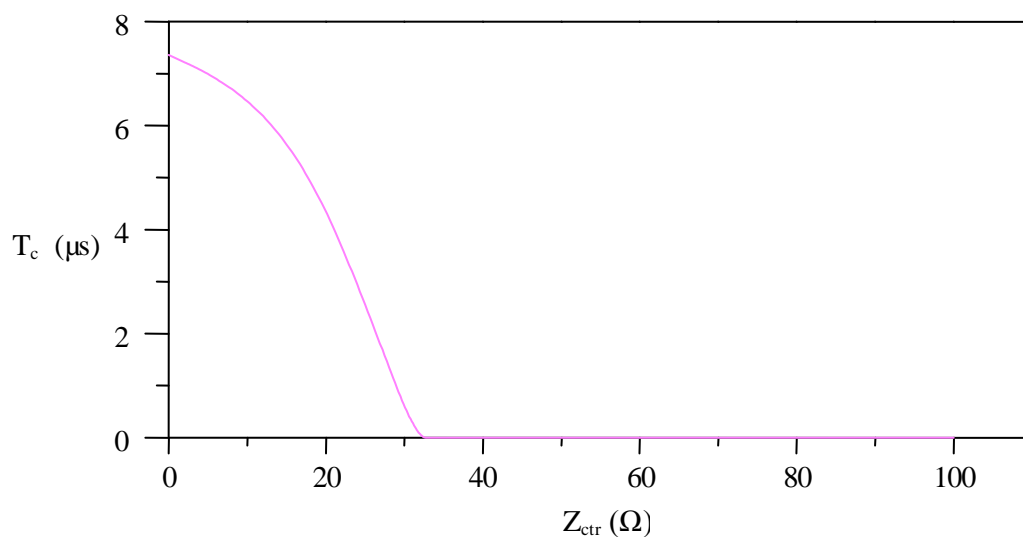


Figure -14- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 100 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

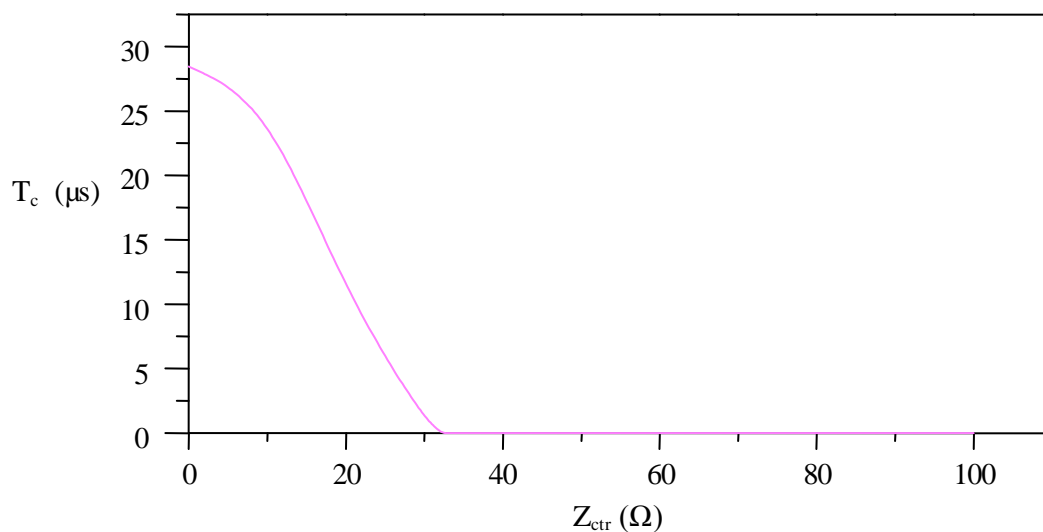


Figure -15- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 200 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

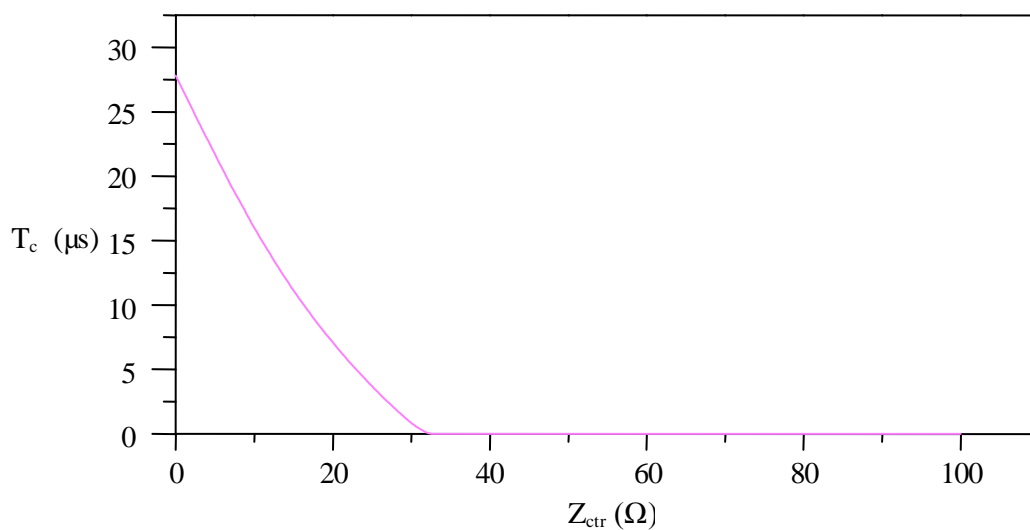


Figure -16-: $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 300 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

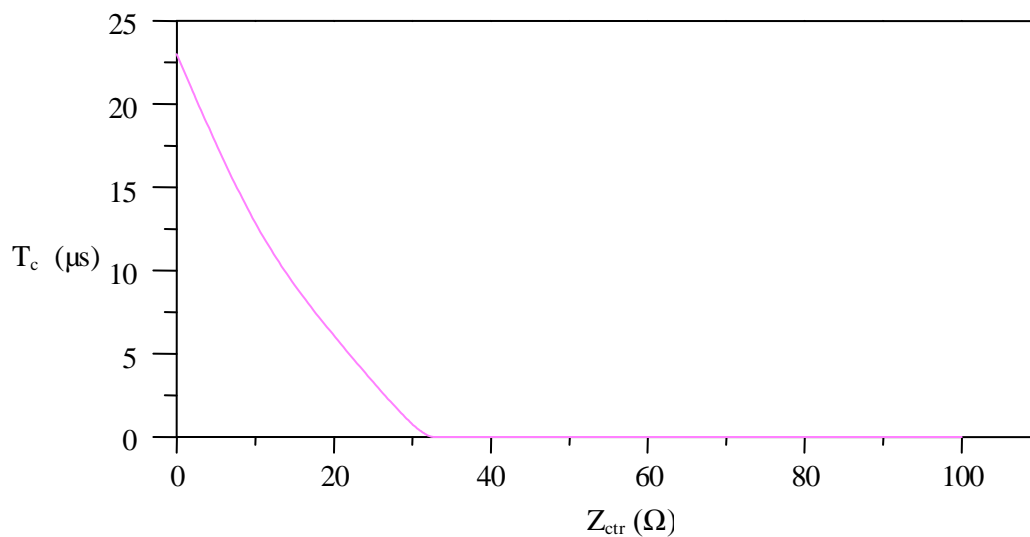


Figure -17- : $T_c = f(Z_{ctr})$ pour $Z_{cl} = 400 \Omega$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

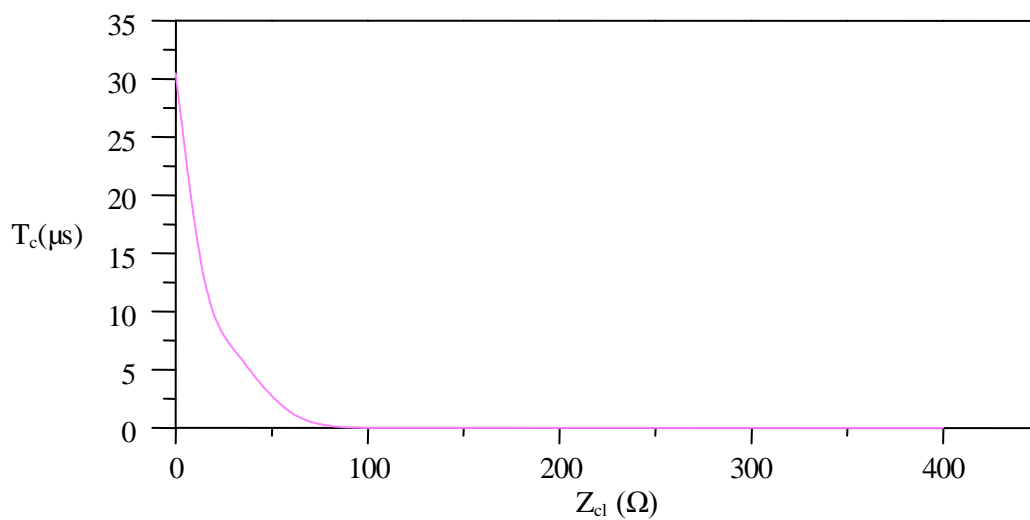


Figure -18- : $T_c = f(Z_{cl})$ pour $Z_{ctr} = \infty$ et $l_c = 0,5 \text{ Km}$

