

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



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

Mémoire

De fin d'étude

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

Option : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

*L'influence de l'effet couronne sur la déformation
de l'onde de surtension*

Proposé et Dirigé par :
M^r: H.Houassine

Etudié par
M^{elle} : Amel Sahraoui

PROMOTION 2008

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il ma donné durant toutes ces années d'études.

J'exprime mes remerciements en premier lieu mon promoteur Mr. H.HOUASSINE, pour avoir accepté de m'encadrer et m'avoir aidé et suivi constamment le progrès de ce travail

Mes vifs remerciements iront également à mon copromoteur Mr. N. MUFIDZADA pour sa disponibilité et son aide très précieuse qu'il nous a fourni.

Je ne remercierais jamais assez mon cher AZOUAOU pour son soutien et son aide inestimable et je le souhaite tous le bonheur du monde.

Je tiens également à remercier Melle S.ABDOUN pour tout le bien qu'elle m'a fait, et je lui souhaite toute la réussite dans sa vie.

Je tiens également à remercier les membres de jury qui me font l'honneur d'évaluer ce travail et tous les enseignants qui ont participé à ma formation du primaire jusqu'à aujourd'hui.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

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

- Me très chers sœur : Fatima, Karima, Nawel,

- Mes très chers frères : Karim, Kader,

- Ma très cher sœur Radia et son mari Ahmed ainsi que leur petit Younes.

- Mon très cher Azouaou,

- Toute ma famille.

- Tous mes amis.

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur le transport d'énergie électrique

I.1 Introduction.....	2
I.2 Réseau électrique.....	2
I.2.1 Lignes aériennes.....	2
I.2.1.1) Les conducteurs des lignes aériennes.....	2
I.2.1.2) Les isolateurs.....	3
I.2.1.3) Distances d'isolement légales.....	4
I.2.1.4) Catégories et types de support.....	5
I.2.1.5) Le câble de garde.....	6
I.2.2 Les Câbles.....	6
I.2.2.1) Mode de pose.....	7
I.2.2.2) Catégories de câbles.....	7
Conclusion.....	9

Chapitre II : Surtensions sur les lignes de transport d'énergie électrique

II.1 Introduction.....	10
II.2 Nature des surtensions.....	10
II.2.1 Surtensions temporaires (à fréquence industrielle).....	10
II.2.1.1) Surtension provoquée par un défaut d'isolement.....	10
II.2.1.2) Surtension par ferorésonnance.....	11
II.2.1.3) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti).....	11
II.2.2 Surtensions de manœuvres.....	11
II.2.2.1) Surtension de commutation en charge normale.....	11
II.2.2.2) Surtension provoquée par l'établissement l'interruption de petits courants Inductifs.....	11
II.2.2.3) Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs.....	11
II.2.3 Surtensions atmosphériques.....	12
II.2.3.1) Classification des coups de foudre.....	12

II.2.3.2) Les coups de foudre sur les réseaux aériens.....	13
a) Les coups de foudre directs.....	13
b) Les coups de foudre indirects.....	14
II.3 Propagation des ondes de surtensions dans les lignes à constantes réparties.....	16
III.3.1 Réflexion et réfraction de l'onde de surtension.....	17
Conclusion.....	20

Chapitre III : Phénomène de l'effet couronne sur les lignes de transport

III.1 Introduction.....	21
III.2 La décharge couronne dans la ligne à courant alternatif.....	21
III.2.1 Avalanche électronique.....	21
III.2.1.1) Polarité négative du conducteur.....	22
III.2.1.2) Polarité positive du conducteur.....	22
III.2.2 Modes d'émission des charges. Aigrettes.....	22
III.2.2.1) Petites aigrettes négatives (impulsion de Trichel).....	23
III.2.2.2) Zone de conductivité d'Hermstein.....	23
III.2.2.3) Grandes aigrettes positives.....	23
III.3 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs.....	24
III.4 Seuil critique de l'effet couronne.....	30
III.4.1 Champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne).....	30
III.4.2 Tension d'apparition de l'effet couronne.....	31
III.5 Effet couronne dans les conducteurs des lignes aériennes.....	31
III.6 Les facteurs influençant l'effet couronne.....	34
III.6.1 Influence de la densité de l'air.....	34
III.6.2 Influence de la température.....	34
III.6.3 Influence de l'humidité.....	35
III.6.4 Influence de l'état de la surface.....	35
III.7 Les avantages de l'effet couronne.....	35
III.8 Les inconvénients de l'effet couronne.....	36
III.8.1 Pertes par effet couronne.....	36
III.8.1.1) Mécanisme de formation des pertes.....	36
a) Pertes aux tensions inférieures à la tension critique (régime localisé).....	36

b) Pertes aux tensions supérieures à la tension critique (régime généralisé).....	37
III.8.1.2) Calcul des pertes par effet couronne.....	37
III.8.2 Interférence radio télévision.....	38
III.8.2.1) Mécanisme de formation des perturbations.....	38
III.8.3 Bruit audible.....	39
III.8.4 Vibrations mécaniques.....	39
Conclusion.....	39

Chapitre IV : Modélisation de l'effet couronne pour une ligne 330KV

IV.1 Introduction.....	40
IV.2 Modélisation de la ligne sans effet couronne.....	40
IV.2.1 Modélisation de la ligne sans effet couronne (avec un conducteur par phase.....	40
IV.2.1.1) Définition des paramètres.....	41
IV.2.1.2) Calcul des paramètres de la ligne.....	41
IV.2.2 Modélisation de la ligne sans effet couronne (avec deux conducteurs par phase).....	44
IV.2.2.1) Calcul des paramètres de la ligne.....	44
IV.3 Modélisation de la ligne avec effet couronne.....	46
IV.3.1 Modélisation de la ligne avec effet couronne (1000HZ).....	47
IV.3.1.1) Définition des paramètres.....	48
IV.3.1.2) Calcul des paramètres de la ligne.....	48
IV.3.2 Modélisation de la ligne avec effet couronne (2000HZ).....	50
IV.3.2.1) Définition des paramètres.....	51
IV.3.2.2) Calcul des paramètres de la ligne.....	51
IV.4 Les équations des modèles.....	53
IV.4.1 Les équations des tensions.....	53
IV.4.2 Les équations des courants.....	54
IV.4.2.1) Modèle sans effet couronne.....	54
IV.4.2.2) Modèle avec effet couronne (1000HZ).....	55
IV.4.2.3) Modèle avec effet couronne (2000HZ).....	55
Conclusion.....	56

Chapitre V : Simulation et analyse des résultats.

V Introduction.....	57
V.1 Simulation des schémas équivalent.....	57
V.2 Analyse et interprétation des résultats.....	70
Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	72

Introduction générale

L'énergie électrique joue un rôle très important dans notre vie, elle est employée à de très nombreux usages domestiques et industriels, le fournisseur s'engage donc à assurer son acheminement vers ses clients tout en respectant un certain nombre de critères, à savoir :

- ❖ La disponibilité (la continuité de service).
- ❖ La tension désirée.
- ❖ La fréquence.

Ces critères semblent suffisants, pour la plupart des opérants dans les milieux domestiques et industriels, et ceci, en n'ayant pas pris en compte un critère important ; les contraintes apparaissant dans les réseaux électriques (les surtensions) qui peuvent être d'origine interne (le réseau) ou d'origine externe (la foudre).

L'onde de surtension se transmet directement de la ligne vers les équipements du réseau électrique, ces surtensions sont moins dangereuses en présence de l'effet couronne.

L'effet couronne est un phénomène qui se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse bleuâtre apparaît sur le conducteur porté à une haute tension, la région ionisée constitue un prolongement de conducteur.

Notre travail est une étude de l'impact de l'effet couronne sur la déformation de l'onde de surtension de type externe, en adoptant différents modèles avec et sans la prise en compte du phénomène couronne.

Pour ce faire, nous avons scindé notre travail en cinq chapitres :

- Le premier chapitre nous donne un aperçu général sur le transport d'énergie électrique.
- La présentation des différents types de surtensions apparaissant dans les lignes de transport d'énergie électrique et leurs propagations le long de ces lignes est sujet de deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre, on présente le phénomène de l'effet couronne et ces différentes manifestations gênantes.
- La modélisation et les calculs numériques des paramètres de la ligne sont donnés dans le quatrième chapitre.
- Le dernier chapitre résume les résultats de la simulation effectuée avec le logiciel P-spice, ainsi que leurs interprétations.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où sont repris de façon générale l'ensemble des résultats obtenus.

I.1 Introduction :

Une centrale (de production d'énergie) électrique est un site industriel qui produit de l'électricité en grande quantité.

Les centrales électriques transforment des sources d'énergie naturelles en énergie électrique, afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointain. Le réseau électrique est utilisé pour transporter /distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Les réseaux électriques sont des ensembles complexes, fortement maillés, de lignes fonctionnant à des tensions de services diverses.

Le choix d'utiliser les lignes à haute tension s'impose, dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur les distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension et les pertes en lignes, et également d'améliorer la stabilité des réseaux.

L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée équivalente, de diminuer les pertes.

I.2 Réseau électrique : [1]

On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité.

Le réseau est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, elles peuvent être aussi bien aériennes que souterraines ou sous marines (câbles), quoique les professionnels réservent plutôt le terme aux liaisons aériennes.

1.2.1 Lignes aériennes : [2]

Une ligne aérienne se compose des conducteurs de phases (R, S, T) suspendus au moyen de chaînes d'isolateurs à des pylônes mis à la terre.

I.1.2.1) Les conducteurs des lignes aériennes : [3]

De façon générale, on appelle conducteur tout composant destiné à assurer le passage d'un courant par conduction.

Dans les installations électriques, un conducteur est un élément filiforme qui transforme l'énergie d'un point à un autre. On distingue :

- ❖ Le conducteur nu qui ne possède aucune isolation électrique ;
- ❖ Le conducteur isolé qui est constitué d'une âme et d'une enveloppe isolante.

L'enveloppe isolante : est une couche de matière isolante, d'épaisseur sensiblement constante, entourant l'âme.

Le conducteur nu et le conducteur isolé sont formés d'une âme qui est une partie métallique servant à conduire le courant, cette âme est constituée soit par un fil massif, soit par plusieurs brins câblés entre eux, le métal est soit du cuivre, soit de l'aluminium.

Le cuivre : [1]

Le cuivre est le métal le plus utilisé pour faire des fils et câbles électriques à cause de sa bonne conductivité.

L'aluminium :

L'aluminium est souvent utilisé dans le transport d'électricité de grande puissance lorsque la section de la ligne et sa longueur élimine le cuivre, à cause de sa masse spécifique plus élevée.

D'autres métaux utilisés pour fabriquer les conducteurs sont :

L'almelec :

L'almelec est un alliage d'aluminium, spécialement mis au point pour la fabrication des conducteurs électriques.

L'acier :

L'acier est un alliage à base de fer addionné d'un faible pourcentage de carbone (0,008 à environ 2,14% en masse), il est employé dans les conducteurs électriques.

I.2.1.2) Les isolateurs : [4]

Les conducteurs sous tension doivent être isolés de leurs supports, généralement mis à la terre, par l'intermédiaire d'isolateurs.

Les conducteurs des lignes aériennes doivent être fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs car les poteaux, même en bois ou en béton, sont insuffisamment isolants et donneraient lieu à des courants de dérivation exagérés.

Les isolateurs sont réalisés en verre ou en porcelaine, ils ont la forme d'une assiette. Ces derniers sont associés entre eux pour former une chaîne d'isolateurs.

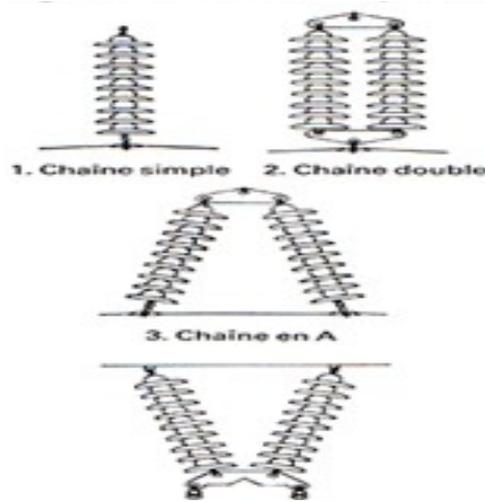


Figure I.1: Isolateurs des lignes aériennes. [1]

I.2.1.3) Distances d'isolement légales : [2]

Les paramètres essentiels de dimensionnement du point de vue de la haute tension sont propres à chaque pays mais ne diffèrent que peu.

- ❖ La hauteur minimale h_{min} des conducteurs par rapport au sol ;
- ❖ La distance minimale d_{ph} entre les conducteurs des phases ;
- ❖ La distance minimale d_t entre conducteur et pylône ;
- ❖ La distance minimale d_b entre conducteur et la phase la plus extérieure et les bâtiments voisins doit être de 5m.

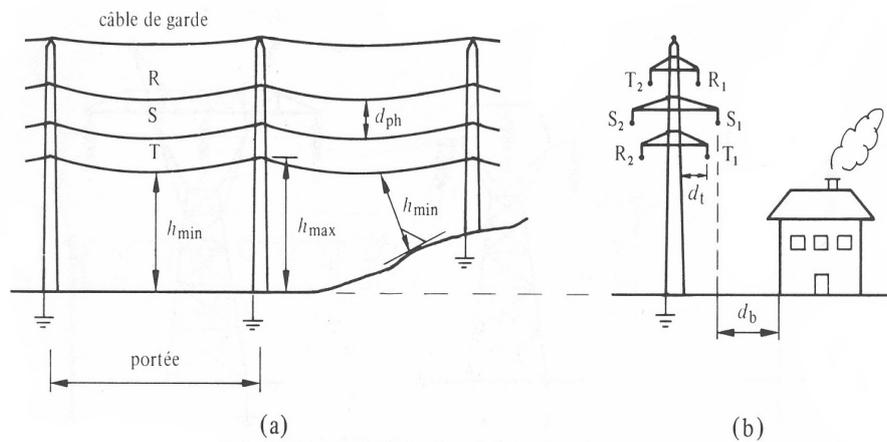


Figure I.2 : Ligne aérienne (a) profil en long ; (b) profil en travers.

I.2.1.4) Catégories et types de support :

Pylône : [1]

Un pylône supporte les conducteurs des lignes aériennes à haute tension, du poste de départ d'une centrale jusqu'aux postes sources, plus près des endroits habités.



Figure I.3 : Pylône nappe.

Les supports des lignes triphasées peuvent être classés selon le profil utilisé. [2]

On distingue deux catégories :

Dans la première catégorie on distingue les types de supports suivants :

- ❖ Poteau à armement nappe-voût (fig. I.4 (a))
- ❖ Pylône ou portique à nappe horizontale (fig. I.4 (b))
- ❖ Pylône de type chat (fig. I.4 (c))

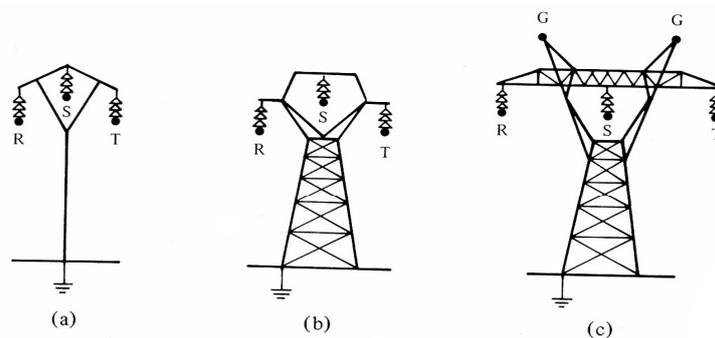


Figure I.4 : Pylône première catégorie.

Dans la seconde catégorie on rencontre les types suivants :

- ❖ Pylône triangle (fig. I.5 (a))
- ❖ Pylône drapeau (fig. I 5 (b))
- ❖ Pylône double drapeau (ou en tonneau) (fig. I 5 (c))
- ❖ Pylône double triangle (fig. I.5 (d))

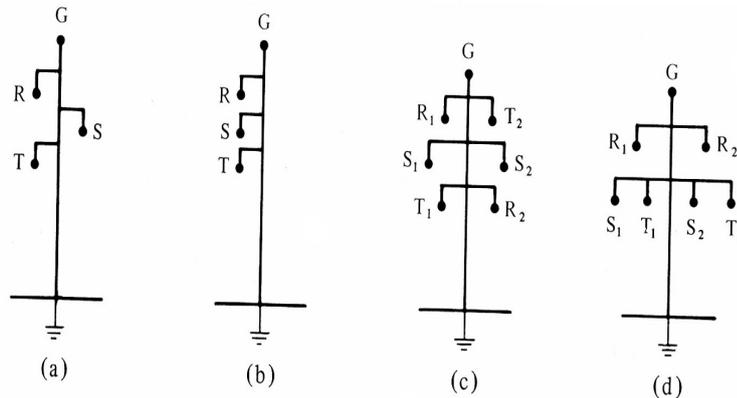


Figure I.5 : Pylône deuxième catégorie.

I.2.1.5) Le câble de garde : [2]

Le câble de garde (ou câble de protection) est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne, il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à un niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône, le câble de garde assure principalement la protection contre la chute de la foudre sur les conducteurs de phase.

I.2.2 Les câbles :

Le câble est un ensemble comportant plusieurs conducteurs isolés, électriquement distincts et mécaniquement solidaires, généralement sous un ou des revêtements protecteurs (gaine, tresse, armure, etc.) assurant leur protection les influences externes. [3]

Les câbles se distinguent des lignes aériennes par le fait qu'ils comportent une isolation interne dont on peut contrôler les paramètres. [2]

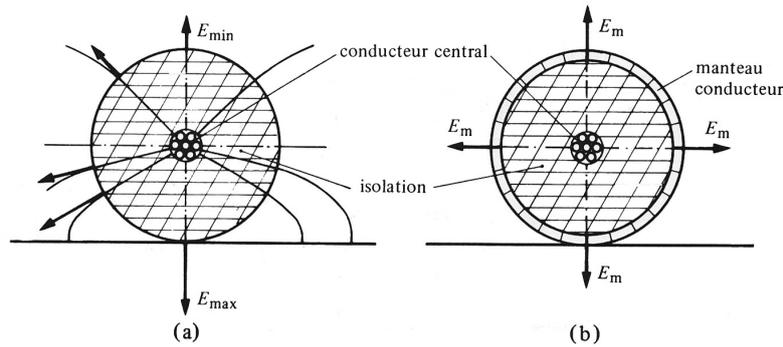


Figure I.6: Câble unipolaire.

a) : Sans manteau.

b) : Avec manteau

I.2.2.1) Mode de pose :

Les câbles sont posés :

- ❖ De façon souterraine ;
- ❖ De façon sous marines ;
- ❖ Sur le sol ;
- ❖ Suspendus à des câbles d'acier (traversée de rivière).

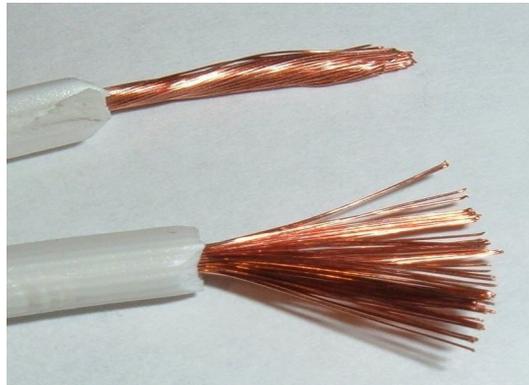
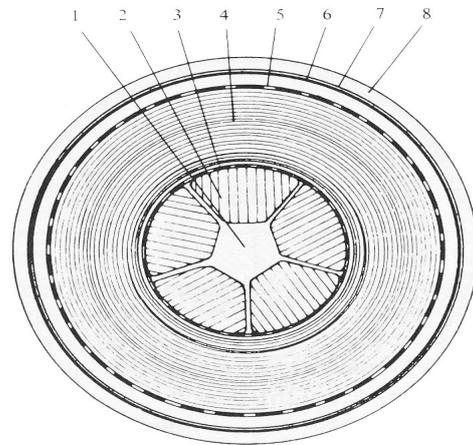


Figure I.7 : Un câble électrique. [1]

I.2.2.2) Catégories de câbles : [2]

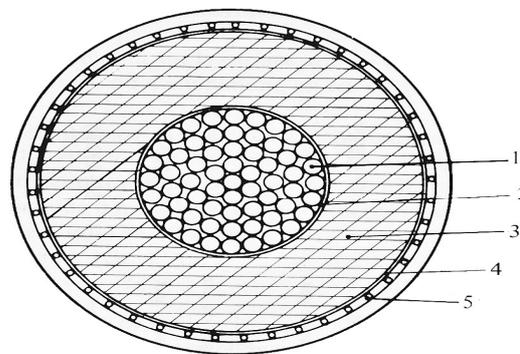
On rencontre actuellement trois catégories principales de câbles à haute tension :

- ❖ Les câbles isolés au papier et imprégnés ;
- ❖ Les câbles à isolation synthétique ;
- ❖ Les câbles à isolation gazeuse.



- | | |
|--------------------------|---|
| 1 conduit d'huile | 5 écran Hôchstâdter et papier semi conducteur |
| 2 conducteur sectoriel | 6 manteau de plomb |
| 3 papier semi conducteur | 7 armure de pression |
| 4 isolation | 8 manteau synthétique |

Figure I.8 : Coupe d'un câble unipolaire 220kV, à isolation papier-huile.



- | | |
|------------------------------------|--------------------------|
| 1 conducteur de cuivre | 4 semiconducteur |
| 2 semiconducteur | 5 bande de cuivre guipée |
| 3 isolation au polyéthylène ou EPR | |

Figure I.9 : Coupe d'un câble unipolaire 60kV, à isolation synthétique.

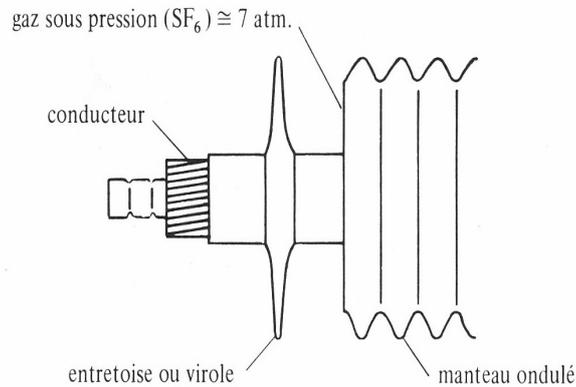


Figure I.10 : Câble monophasé, isolé au gaz, en version flexible

Conclusion :

Une étude théorique sur le transport d'énergie électrique est développée dans ce chapitre. Ce dernier est effectuée à l'aide des lignes électriques. L'élévation de la tension dans ces lignes (surtension) est une tension qui dépasse la tension de régime permanent fera l'objet du prochain chapitre.

II 1 Introduction : [5]

Toute tension appliquée aux lignes de transport d'énergie électrique dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension.

Les surtensions peuvent apparaître :

- ❖ En mode différentiel (entre conducteurs actifs : phase / phase – phase / neutre) ;
- ❖ En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

II 2 Nature des surtensions :

II 2.1 Surtensions temporaires (à fréquence industrielle) :

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50Hz ou 60Hz), elles ont plusieurs origines :

II 2.1.1) Surtension provoquée par un défaut d'isolement : [6]

La surtension due à un défaut d'isolement apparaît sur un réseau triphasé, lorsque le neutre est isolé ou impédent, en effet, lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre (blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement ...), la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport à la terre, à la tension composée $U = V\sqrt{3}$.

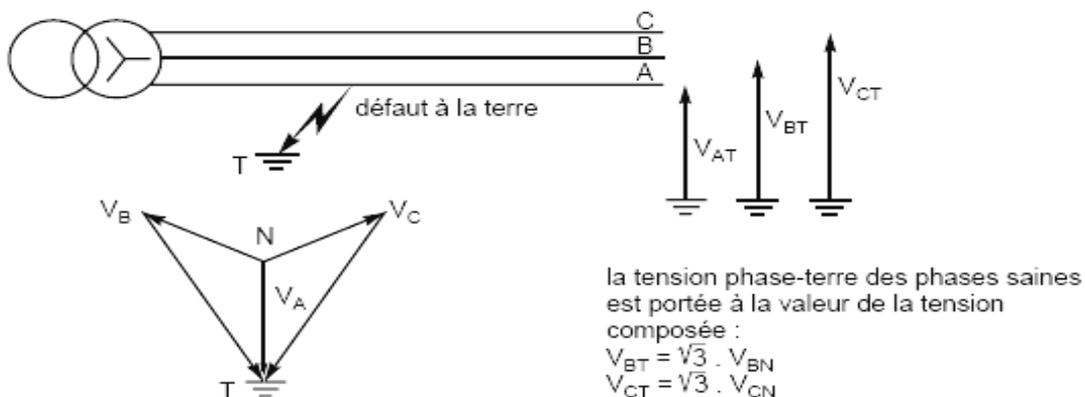


Figure II.1 : Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut.

II 2.1.2) Surtension par ferrorésonance :

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple). Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manœuvre (ouverture ou fermeture d'un circuit) est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané.

II 2.1.3) Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti) :

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.

II 2.2 Surtensions de manœuvre : [5]

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection ...).

On distingue :

II 2.2.1) Surtension de commutation en charge normale : [6]

Une charge « normale » est essentiellement résistive, c'est-à-dire que son facteur de puissance est supérieur à 0,7.

Dans ce cas, la coupure ou l'établissement des courants de charge ne posent pas de problème majeur. Le coefficient de surtension (rapport de l'amplitude de la tension transitoire et de la tension de service) varie entre 1,2 et 1,5.

II 2.2.2) Surtension provoquée par l'établissement et l'interruption des petits courants inductifs :

Lors de l'établissement ou de l'interruption de circuits inductifs, des impulsions de forte amplitude et de temps de montée très faible peuvent se produire. Ainsi une interruption d'un moteur électrique, d'un transformateur BT / MT, d'une charge...etc., génère une surtension de mode différentiel dont l'amplitude peut dépasser quelques dizaines de KV avec des fronts de montée de quelques dizaines de microsecondes.

II 2.2.3) Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs :

Alors que les réseaux électriques sont plutôt inductifs, la présence de capacités (batteries de condensateurs ou tout simplement ligne à vide) constitue un circuit LC.

Les manœuvres provoquent alors des surtensions de types oscillatoires.

II 2.3 Surtensions atmosphériques (surtensions de foudre) :

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage, elle résulte de la décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages.

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharge d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps.

II 2.3.1) Classification des coups de foudre :

Un coup de foudre entre nuage et terre, comprend deux grandes phases principales :

- a) Le développement d'une prédécharge de foudre (ou traceur) non visible ;
- b) L'amorçage d'un arc (éclair) empruntant le canal ionisé de la prédécharge. [2]

On distingue : [7]

- ❖ Un coup de foudre descendant : Développement du traceur depuis les nuages vers le sol (cas sur terrains assez plat) ;
- ❖ Un coup de foudre ascendant : Développement du traceur depuis le sol vers les nuages (cas de terrains montagneux) ;
- ❖ Un coup de foudre négatif : Lorsque la partie négative du nuage se décharge (80% des cas en pays tempérés) ;
- ❖ Un coup de foudre positif : Lorsque la partie positive du nuage se décharge.

Une particularité des coups de foudre et leur polarisation, ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif).

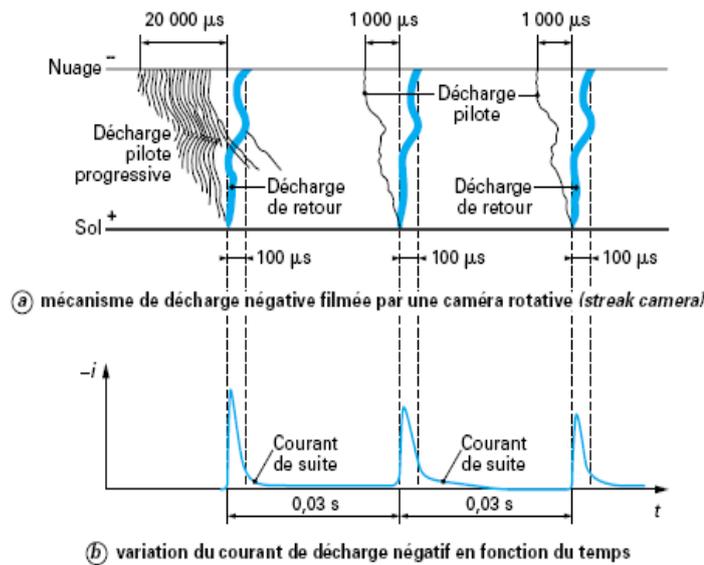


Figure II.3 : Mécanisme de coup de foudre. [8]

II 2.3.2) Les Coups de foudre sur les réseaux aériens : [6]

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions d'origine atmosphérique (la foudre).

Une distinction est souvent établie entre :

- ❖ Le coup de foudre « direct » touchant une ligne ;
- ❖ Le coup de foudre « indirect » tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône ou sur un câble de garde.

a) Le coup de foudre direct (sur conducteurs de phase) :

Lorsque la foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde $\frac{Z_c}{2}$.

Il s'en suit une onde de tension :
$$U(t) = Z_c \frac{i(t)}{4} \tag{II.1}$$

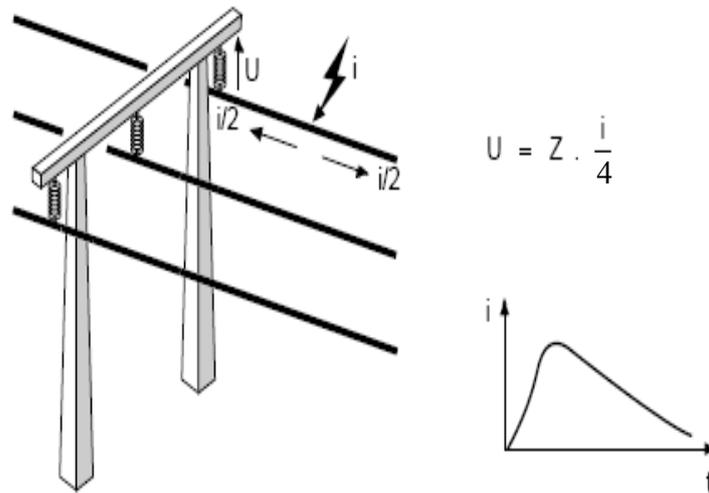


Figure II.4 : Coup de foudre sur un conducteur de phase. [7]

b) Le coup de foudre indirect (sur conducteurs de garde ou pylône) : [7]

Si la foudre tombe sur le pylône ou le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique par rapport à la terre.

La surtension U correspondante peut atteindre plusieurs centaines de KV.

$$U = R \frac{i}{2} + \frac{L}{2} \frac{di}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Avec R : Résistance en onde raide de la prise de terre.

L : L'inductance du pylône et / ou du conducteurs de mise à la terre.

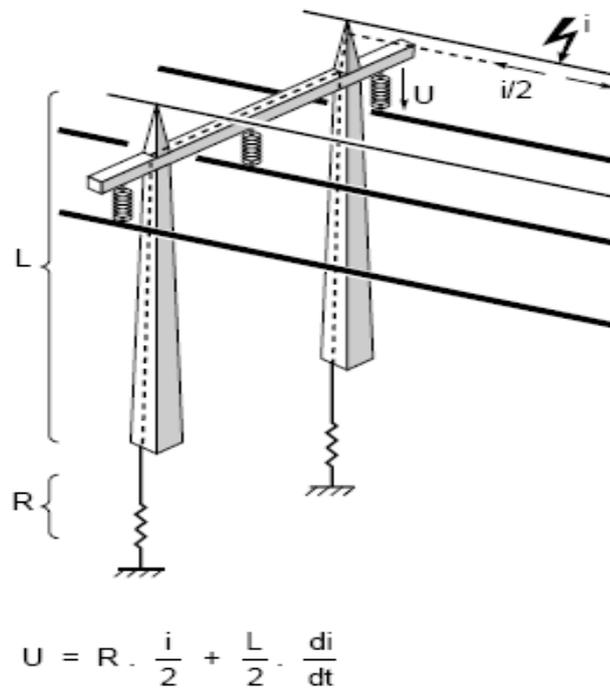


Figure II. 5 : Coup de foudre sur un pylône ou un câble de garde.

Lorsque cette tension atteint la tension d'amorçage d'un isolateur, il se produit un « amorçage en retour » entre la structure métallique et un ou des conducteurs actifs. Ce coup de foudre est moins redoutable que le coup de foudre direct.

II.3) Propagation des ondes de surtensions dans les lignes à constantes réparties : [9]

L'étude des surtensions peut être abordée de manière différente selon leur spectre de fréquence. Un phénomène électrique ou électromagnétique n'est jamais instantané : il doit se propager. Sa vitesse de propagation peut être grande, mais pas infinie.

En pratique, le phénomène pourra être considéré comme instantané si sa longueur d'onde est beaucoup plus grande que les dimensions du système considéré.

Le schéma équivalent de la ligne à constantes réparties est :

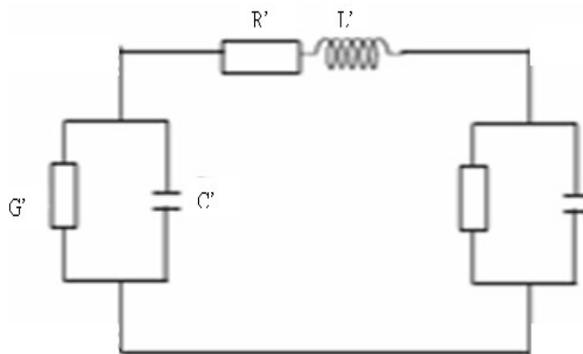


Figure II 6 : Le schéma équivalent de la ligne à constantes réparties.

Les équations différentielles de la tension et du courant sont (d'après la règle de Kirschoff et des nœuds).

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} = -R' i - L' \frac{di}{dt} \\ \frac{di}{dx} = -G' u - C' \frac{du}{dt} \end{cases} \quad (II.3)$$

- Où R' = résistance linéique [Ω/m] ;
- L' = inductance linéique [H/m] ;
- C' = capacité linéique [F/m] ;
- G' = conductibilité transversale linéique [$1/\Omega.m$].

D'où l'on déduit l'équation commune à u et i

$$-\frac{d^2U}{dx^2} = R'G'U + (R'C' + L'G')\frac{dU}{dt} + L'C' \frac{d^2U}{dt^2} \quad (II.4)$$

L'étude de la solution générale est assez complexe ; dans le cas où l'on a affaire à des ondes de haute fréquence, on peut admettre que les paramètres R' et G' ont peu d'influence, face à L' et C' .

En posant $R' = G' = 0$.

Ce qui revient à admettre que la ligne est sans pertes, l'équation précédente devient :

$$-\frac{d^2U}{dx^2} = L'C' \frac{d^2U}{dt^2} \quad (\text{II.5})$$

Dont la solution générale est de la forme :

$$U = f_1(x - vt) + f_2(x + vt). \quad (\text{II.6})$$

Avec $V = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ vitesse de propagation de l'onde de surtension.

Où $C_0 =$ vitesse de la lumière ($C_0 = 3.10^8 \text{ m/s}$);

$\mu_r =$ perméabilité ($\mu_r = 1$ dans le vide, dans l'air) ;

$\epsilon_r =$ constante diélectrique de l'isolant ;

f_1 et f_2 sont des fonctions arbitraires dépendent des conditions initiales.

$f_1(x - vt)$ est une onde progressive.

$f_2(x + vt)$ est une onde rétrograde.

$$Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \text{impédance d'onde (ligne aérienne } Z_w = 300 \dots 600 \Omega).$$

La résolution du système d'équation donne pour courant,

$$\text{en posant : } i = \frac{U}{Z} = \frac{f_1(x - vt)}{Z_w} - \frac{f_2(x + vt)}{Z_w} \quad (\text{II.7})$$

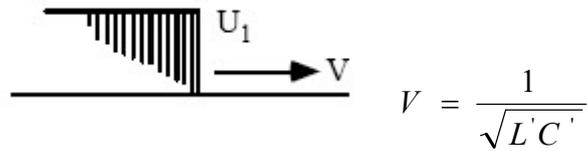
II.3.1) Réflexion et Réfraction de l'onde de surtension :

Lorsqu'une onde se propage dans un réseau, à chaque discontinuité, c'est-à-dire chaque fois que les paramètres changent de valeur, donc aussi l'impédance d'onde Z_w qui devient :

$$Z_{w_2} = \sqrt{\frac{L_2'}{C_2'}} \quad (\text{II.8})$$

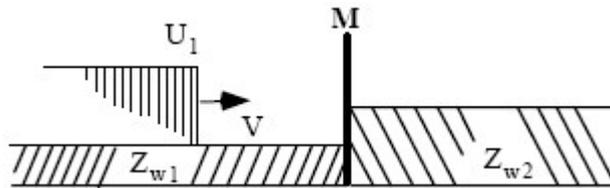
Une réflexion et une réfraction partielle vont se produire.

On considère une onde rectangulaire se propageant à la vitesse V , le long d'une ligne d'impédance Z_{w1} .



Il y circulera également un courant $i_1 = \frac{U_1}{Z_{w1}}$ (II.9)

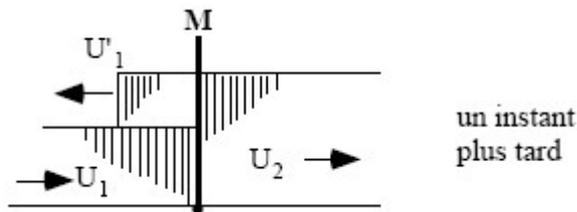
A l'extrémité de la ligne, se trouve (point M) un élément (ligne, câble, transformateur, par exemple) dont l'impédance d'onde est Z_{w2} .



U_1 est l'onde incidente

U_2 est l'onde réfractée (transmise)

U_1' est l'onde réfléchie



A tout instant : $U_1 + U_1' = U_2$ (II.10)

D'autre part : $i_1 - i_1' = i_2$ (II.11)

U_1, i_1, U_2, i_2 sont des ondes progressives.

U_1' et i_1' sont des ondes réfléchies.

Donc

$$U_1 = Z_{w_1} i_1 \quad , \quad i_1 = \frac{U_1}{Z_{w_1}}$$

$$U_2 = Z_{w_2} i_2 \quad , \quad i_2 = \frac{U_2}{Z_{w_2}}$$

$$U_1' = -Z_{w_1} i_1' \quad , \quad i_1' = -\frac{U_1'}{Z_{w_1}}$$

En introduisant la valeur des courants dans l'équation (II.11) et en combinant avec l'équation (II.10), on établit que :

$$U_1' = \frac{Z_{w_2} - Z_{w_1}}{Z_{w_2} + Z_{w_1}} U_1 \quad (\text{II.12})$$

$$U_2 = \frac{2Z_{w_2}}{Z_{w_2} + Z_{w_1}} U_1 \quad (\text{II.13})$$

$$r_u = \frac{Z_{w_2} - Z_{w_1}}{Z_{w_2} + Z_{w_1}} \quad \text{est le facteur de réflexion.} \quad (\text{II.14})$$

$$t_u = \frac{2Z_{w_2}}{Z_{w_2} + Z_{w_1}} \quad \text{est le facteur de transmission.} \quad (\text{II.15})$$

L'onde réfléchie sera positive si $Z_{w_2} > Z_{w_1}$; dans ce cas, il y aura augmentation de la surtension au point de transition ; par exemple, passage d'une ligne aérienne à un transformateur, ou d'un câble à une ligne aérienne. Dans une telle situation, c'est donc à l'endroit de la transition que l'on peut craindre une rupture de diélectrique.

Cas particuliers :

a) Ligne à vide : $Z_{w_2} = \infty$

$$r = +1 \quad t = 2$$

La tension est doublée à l'extrémité de la ligne, le courant est nul car :

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_{w_2}} = 0$$

$$i_1' = -i_1$$

L'onde réfléchie est de même phase et de même amplitude.

b) Ligne à terre ou en court-circuit : $Zw_2 = 0$
 $r = -1$ $t = 0$

La tension est nulle, mais le courant est doublé :

$$i_1' = i_1; i_2 = 2 i_1$$

L'onde réfléchie est déphasée de 180° et de même amplitude.

c) Ligne adaptée : $Zw_1 = Zw_2$

$$r = 0$$
 $t = 1$

Il n'y a pas de réflexion.

Dans notre travail, on s'intéresse sur l'onde de surtension dans une ligne à vide.

Conclusion :

Connaissant les causes et le développement des surtensions compte tenu de la propagation de ces phénomènes sur les lignes, il est possible de connaître les contraintes de surtensions réelles auxquelles sont soumis les matériels électriques. Afin d'assurer la fiabilité de ces matériels.

Ces surtensions provoquent une élévation des champs électriques, ce phénomène peut se traduire par des effets directs par exemple l'effet couronne qui sera présenté dans le chapitre suivant.

III.1 Introduction :

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité suite à l'ionisation d'un gaz entourant un conducteur porté à une haute tension.

L'appellation « effet couronne » vient du fait qu'autour d'un fil apparaît, à partir d'une certaine valeur du potentiel, une gaine lumineuse bleu-violet dont l'épaisseur augmente avec la tension. Il rappelle le halo lumineux visible à la périphérie du soleil, au moment des éclipses, et qui lui a donné son nom.

Ce phénomène est lié à l'apparition d'avalanche électronique localisée au voisinage immédiat des conducteurs soumis à une haute tension, au voisinage de fil plus épais, comme les câbles industriels, les avalanches prennent la forme « d'aigrette » dont la longueur peut atteindre une dizaine de centimètres. Ces avalanches sont toujours issues des diverses aspérités portées par les conducteurs, éraflures, pollution, insectes, gouttes d'eau, où il existe un renforcement local du champ électrique.

Lors de l'effet couronne, l'énergie dissipée est à l'origine de pertes électriques et les impulsions électriques associées aux aigrettes entraînent des perturbations radioélectriques.

III.2 La décharge couronne dans la ligne à courant alternatif : [10]

III.2.1 Avalanche électronique :

Il existe toujours dans l'air un certain nombre de paires ions positifs-électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par la radioactivité naturelle. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent, devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils ionisent par choc. Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite ; le processus prend une allure d'avalanche de Tomsend.

Au voisinage d'un conducteur d'une ligne électrique, les surfaces équipotentiellles ont une très fortes courbure, et le champ électrique décroît très rapidement en fonction de la distance au conducteur. L'avalanche électronique ne peut se produire que si le champ à la surface du conducteur est atteint une valeur supérieure à 30 KV/cm. Ce champ superficiel est appelé « champ critique ».

III.2.1.1) Polarité négative du conducteur :

L'avalanche électronique se développe depuis le conducteur vers l'extérieure, elle s'arrête à une certaine distance où le champ n'est plus suffisant pour assurer l'effet multiplicateur. Le phénomène d'ionisation est alors limité à une couronne d'une épaisseur bien définie.

III.2.1.2) Polarité positive du conducteur :

Au contraire, l'avalanche électronique prend naissance dans l'espace voisin, et se développe vers le conducteur.

Les électrons sont absorbés par celui-ci, laissant derrière eux un nuage d'ions positifs, beaucoup moins mobiles ; tout se passe comme si le conducteur était prolongé par une pointe positive, qui permet ensuite la formation d'une nouvelle avalanche un peu en avant de la précédente. Ce processus d'ionisation se propage autour du conducteur nettement plus loin que les avalanches de polarité négative, et est appelé Streamer.

III.2.2 Modes d'émission des charges. Aigrettes :

Les premières expériences sur l'effet couronne, qui datent du début du siècle, étaient faites à l'aide de fil mince, de quelques millimètres de diamètre. Portés à une tension suffisante, il se forme autour d'eux une gaine lumineuse.

Lorsque le diamètre du fil croît, pour atteindre les dimensions des câbles utilisés sur les lignes de transport d'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme : il se discrétise en lueurs localisées désignées sous le nom « aigrettes ».

La présence de certaines aspérités sur les conducteurs haute tension qui provoquent des irrégularités de surface telles que le toronage, les éraflures, les dépôts de poussière végétal, de pollution industrielle et même de petits insectes où il existe un renforcement local du champ électrique, et ont pour conséquence une réduction du niveau de tension d'apparition des aigrettes.

Il existe un grand nombre de modes d'émission de charges dus à l'ionisation des gaz, pouvant prendre l'aspect d'émission continue ou d'émission impulsionnelle, mais ce qui concerne l'étude des pertes et des perturbations, on se limite aux trois modes d'émission suivants:

III.2.2.1) Petites aigrettes négatives (impulsions de Trichel) :

Le champ critique est légèrement plus faible en polarité négative qu'en polarité positive. Lorsque ce champ critique négatif est atteint au sommet d'une aspérité du conducteur, il apparaît un courant impulsionnel avec une fréquence de relaxation pouvant aller de 1 KHZ à 100 KHZ.

Les impulsions sont d'autant plus petites et plus serrées que la pointe est fine ; leur amplitude est relativement faible (de l'ordre du milliampère) mais elles sont caractérisées par des fronts de montée très raides, de l'ordre de la dizaine de nanosecondes.

A ces impulsions, dites impulsions de Trichel, correspond visuellement un cône lumineux dont le sommet plus brillant est posé sur la pointe. Le mécanisme de ces impulsions est du type avalanche négative.

III.2.2.2) Zone de conductivité d'Hermstein :

C'est un mode d'émission en polarité positive qui a la propriété d'être continu, il a lieu généralement, en tension alternative, immédiatement au-dessus du seuil positif sa participation est importante dans la formation des perturbations radioélectriques.

III.2.2.3) Grandes aigrettes positives :

Le mode d'émission impulsionnel apparaît au-delà de la zone continue d'Hermstein, pour des champs positifs un peu supérieurs.

Le courant d'émission prend la forme d'une série irrégulière d'impulsions de grande amplitude ($\geq 100\text{mA}$). Visuellement, elle se présente comme des aigrettes très lumineuses, dont la base est attachée à une aspérité du câble, et qui se propagent de façon arborescente à des distances de plusieurs centimètres. Leur mécanisme de formation est du type Streamer. Ces aigrettes sont responsables du bruit radioélectrique « bruit d'abeilles » bien connu au voisinage des lignes à haute tension.

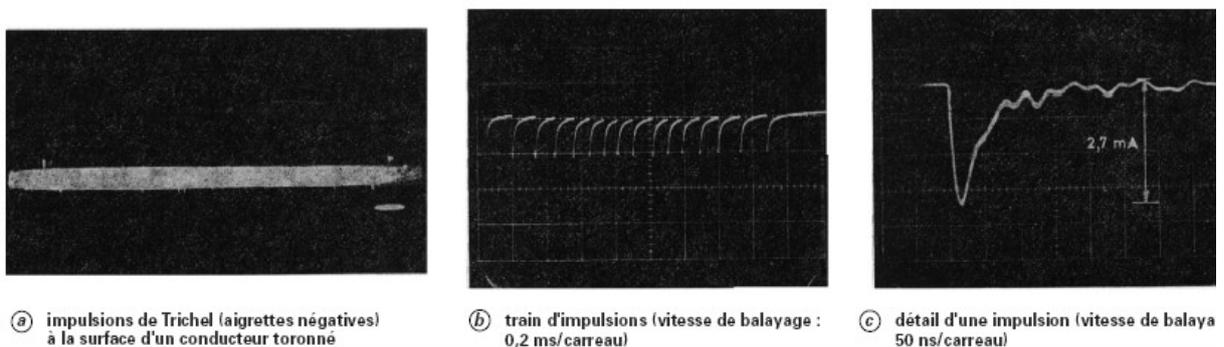


Figure III.1 : Effet couronne négatif.

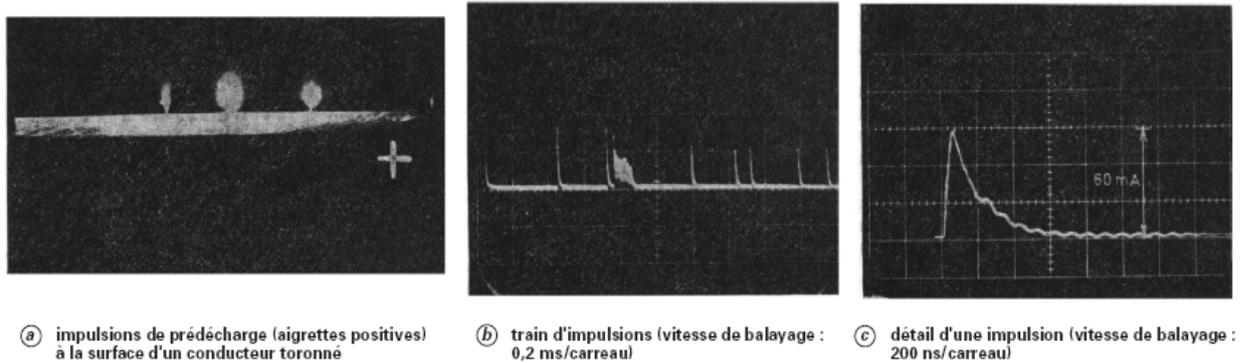


Figure III.2 : Effet couronne positif.

III.3 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs :

Le paramètre caractéristique le plus évident auquel on a coutume de rattacher l'intensité de l'effet couronne est le champ électrique à la surface du conducteur ou gradient de tension superficiel.

En raison de la grande sensibilité du phénomène couronne à la valeur de ce champ, il est nécessaire d'employer une méthode de calcul fournissant le champ avec une précision de l'ordre de 1 % , [10]

En particulier, la loi de la circulation du champ électrique indique :

$$\vec{E} \cdot d\vec{l} = -dU \quad (\text{III.1})$$

Où E = champ électrique [V /m] ;

U = potentiel [V] ;

l = distance entre deux électrodes parallèles [m].

Le champ E est donc égal à :

$$E = -\frac{U}{d} \quad (\text{III.2})$$

Où U = différence de potentiel entre les électrodes ;

d = distance entre les électrodes.

Chaque matériau admet un champ disruptif maximum dont le dépassement provoque un claquage.

On se souviendra aussi de la loi de la conservation des charges, ainsi que de celle du déplacement électrique D :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \tag{III.3}$$

Où ϵ_0 = permittivité du vide = $8,854.10^{-12} [F / m]$;

ϵ_r = permittivité relative du matériau.

Le théorème de Gauss est ainsi souvent nécessaire, il exprime le fait que le flux total du déplacement électrique à travers une surface fermée, est égal à la charge totale contenue à l'intérieur du volume considéré :

$$\iint_s \vec{D} \cdot \vec{ds} = \iiint_v \rho_c \cdot dV = \sum_v q \tag{III.4}$$

Où ρ_c = densité de charge dans le volume v [C / m^3].

Appliquées aux formes courantes en HT, ces lois aboutissent aux formules suivantes :

- Le champ superficiel d'un conducteur est :

$$E = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0 r} \tag{III.5}$$

Où E = champ superficiel [V/cm] ;

q = charge superficielle par unité de longueur [C/m] ;

r = rayon du conducteur lisse équivalent. [9]

Pour le calcul du champ maximum, considérons les systèmes d'électrodes suivantes : [11]

❖ **Système conducteur cylindrique concentrique :**

On applique le théorème de Gauss sur un conducteur, de rayon r placé au centre d'un cylindre métallique de rayon R.

En un point quelconque à une distance X de l'axe, le champ est :

$$E(x) = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0 X} \tag{III.6}$$

Le potentiel du conducteur est donné par :

$$V = \int_r^R E dx = q \cdot \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \ln \frac{R}{r} \tag{III.7}$$

d'où : $E(x) = \frac{V}{X \ln \frac{R}{r}}$ (III.8)

Avec r : rayon interne du conducteur [m] ;

R : rayon externe du conducteur [m].

Champ maximum pour $X=r$, on a :

$$E_{\max} = E(r) = \frac{V}{rLn \frac{R}{r}} \tag{III.9}$$

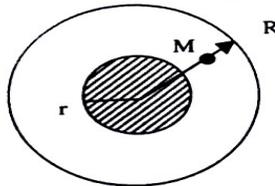


Figure III.3 : Système conducteur cylindrique concentrique.

❖ Système conducteur terre : [4]

U : potentiel du conducteur par rapport au sol et h : la distance entre le conducteur et le sol.

On suppose $h \gg r$ pour pouvoir considérer que la charge électrique se répartit uniformément sur le conducteur.

Champ dans le plan AB où il est maximum (plan passant par l'axe du conducteur est perpendiculaire au sol).

$$E(x) = \frac{U}{Ln \frac{2h-r}{r}} \left[\frac{1}{x} - \frac{1}{2h-x} \right] \tag{III.10}$$

Cette relation peut être établie en utilisant la méthode des images électriques.

Champ maximum pour $X = r$ dans le cas où $h \gg r$

$$E_{\max} = E(r) = \frac{U}{rLn \frac{2h}{r}} \tag{III.11}$$

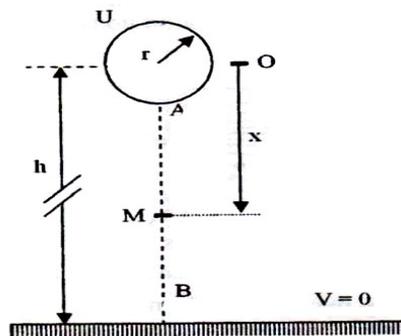


Figure III.4 : Système conducteur-terre.

❖ **Ligne bifilaire :**

On considère que la ligne est constituée de deux conducteurs cylindriques d'axes parallèles de même rayon r et isolée de tout corps. Nous supposons aussi que $d \gg r$. ceci pour pouvoir considérer que la charge se répartit uniformément à la surface de chacun des conducteurs.

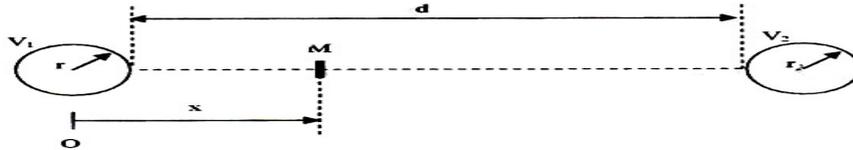


Figure III.5 : Ligne bifilaire.

— L'intensité du champ électrique E en un point quelconque x situé sur le plan des axes des deux conducteurs a pour expression, en notant $V_1 - V_2 = U$:

$$E(x) = \frac{U}{2Ln} \frac{d+r}{r} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{d+2r-x} \right] \tag{III.12}$$

Où r : rayon du conducteur ;

d : distance entre conducteurs.

Champ maximum pour $x = r$:

$$E_{\max} = E(r) = \frac{U}{2Ln} \frac{d+r}{r} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{d+r} \right] \tag{III.13}$$

Comme $d \gg r$, il vient $E_{\max} = \frac{U}{2rLn} \frac{d}{r}$ (III.14)

❖ **Conducteur-conducteur : [11]**

Soit deux conducteurs distants de d et éloignés d'une longueur h par rapport au sol représentés dans la figure (III.6).

Le potentiel au point m quelconque dans l'espace au voisinage des conducteurs est :

$$Vm = \sum_{i=1}^4 \int_{x1}^{R \infty} E_x dx \tag{III.15}$$

$$\text{Avec } E_{xi} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot Ln \frac{x_2 x_3}{x_1 x_4} \quad (\text{III.16})$$

A la surface du conducteur (1), on a :

$$x_1 = r, x_2 = d - r, x_3 = [(2h)^2 + r^2]^{\frac{1}{2}}, x_4 = [(d - r)^2 + (2h)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Pour $r \ll d$ et $r \leq 2h$, on aura.

$$x_1 = r, x_2 = 2h, x_3 = 2h, x_4 = [d^2 + (2h)^2]^{\frac{1}{2}}$$

V_1 Potentiel du premier conducteur.

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{d}{r[1 + (\frac{d}{2h})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{III.17})$$

Dans le cas où $d/2h \ll 1$, on aura :

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{d}{r} \quad (\text{III.18})$$

L'expression ci-dessus peut prendre la valeur :

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{2h}{r[1 + (\frac{2h}{d})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{III.19})$$

Ainsi lorsque $2h/d \ll 1$, on aura :

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} Ln \frac{2h}{r} \quad (\text{III.20})$$

La différence de potentiel entre les deux conducteurs (1) et (2) :

$$U = V_1 - V_2 \quad (\text{III.21})$$

$$V_1 = -V_2 \quad \text{d'où : } U = 2V_1$$

$$\bullet \quad 2h/d \ll 1 : q = \frac{2\pi\epsilon_0 U}{Ln \frac{d}{r}} \quad ; \quad E_{\max} = \frac{U}{2rLn \frac{d}{r}} \quad (\text{III.22})$$

$$\bullet \quad d/2h \gg 1 : q = \frac{2\pi\epsilon_0 \frac{U}{2}}{Ln \frac{2h}{r}} \quad ; \quad E_{\max} = \frac{U}{2rLn \frac{2h}{r}} \quad (\text{III.23})$$

Notons que le cas le plus fréquent est celui où $d/2h \ll 1$.

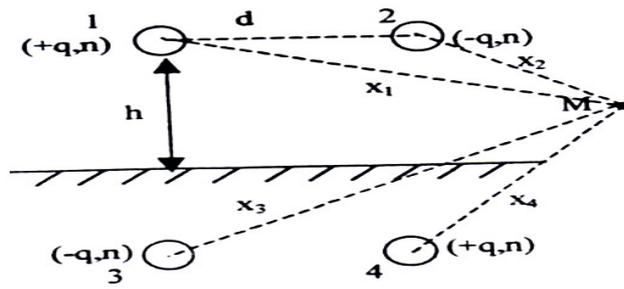


Figure III.6 : Conducteur-conducteur.

❖ **Système à trois conducteurs :**

La méthode de superposition nous permet de donner des calculs très délicats pour une ligne triphasée à cause de l'influence inter conducteurs.

Ainsi, nous donnons uniquement les formules dites semi-empiriques pour trois conducteurs disposés en triangle et en nappe.

• **Conducteur disposés en triangle :**

$$E_{\max} = 1,19 \frac{U}{2 rLn} \frac{d}{r} \tag{III.24}$$

• **Conducteur disposés en nappe horizontale :**

$$d/2h \ll 1 : E_{\max} = 1,19 \frac{U}{2rLn} \frac{d}{r} \tag{III.25}$$

$$d/2h \gg 1 : E_{\max} = 1,19 \frac{U}{2 rLn} \frac{2 \alpha h}{r} \tag{III.26}$$

α est donné par la figure suivante :

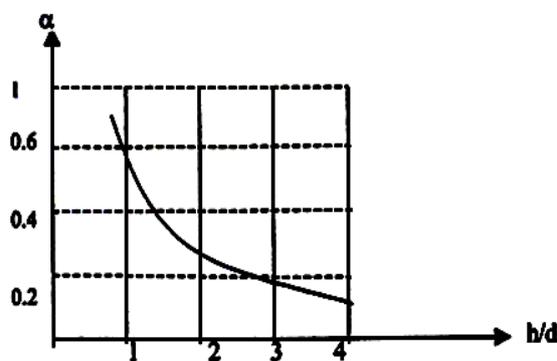


Figure III.7 : variation de $\alpha = f(h/d)$ par les formules du champ d'une ligne en nappe horizontale.



Figure III.7 : Conducteur disposé en triangle.

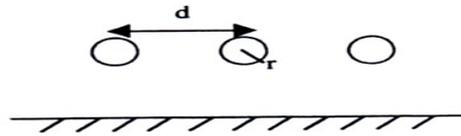


Figure III.8 : Conducteur disposé en nappe horizontale.

III.4 Seuil critique de l'effet couronne :

III.4.1 Champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) : [4]

Pour calculer le champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur cylindrique, on utilise généralement la formule de Peek qui est la plus connue.

Elle a pour expression :

$$E_C = E_0 \delta m_1 m_2 \left[1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right] \quad \text{en [KVeff/cm]}$$

Où $E_0 = 30\text{KV/cm}$: valeur de crête du champ électrique aux conditions normales ;

r : rayon du conducteur en cm ;

m_1 : coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (irrégularités géométriques du conducteur) ;

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

$m_1 = 0,9$ pour un conducteur normal

$m_1 = 0,8$ pour un conducteur présentant des arrêtes vives

m_2 = coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs ;

$m_2 = 0,9$ pour un conducteur de propriété technique

$m_2 = 0,3$ pour un conducteur fortement pollué.

Souvent le produit $m_1 m_2$ est remplacé par un seul coefficient m

δ : densité de l'air

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273 + T_0}{273 + T} \quad p_0 = 76 \text{ cmHg.P}$$

$$T_0 = 25^\circ \text{C.}$$

Où p_0 : pression atmosphérique de référence [1atm] ;

p : pression [atm];

T_0 : température ambiante [$^\circ\text{C}$] ;

T : température [$^\circ\text{C}$].

Le terme $\left[1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right]$ est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est plus petit. Il est difficile d'ioniser loin du conducteur.

III.4.2 Tension d'apparition de l'effet couronne :

Il est plus intéressant de connaître la tension d'apparition de l'effet couronne U_c que le champ critique d'apparition de l'effet couronne E_c , sa formule est :

$$U_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left[1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right] r L n \frac{2h}{r}$$

III.5 Effet couronne dans les conducteurs des lignes aériennes : [4]

Quand l'effet couronne apparaît sur un conducteur de ligne, la région ionisée constitue un prolongement de conducteur. Le rayon du conducteur est alors augmenté de l'épaisseur de la couronne, à la limite de cette couronne, le champ électrique va :

❖ Augmenté si $r > r_0$

❖ Diminuer si $r < r_0$

Avec $r_0 = \frac{d}{e}$ le rayon pour lequel le champ électrique est minimum à la surface du conducteur.

Où e : rapport entre d et r .

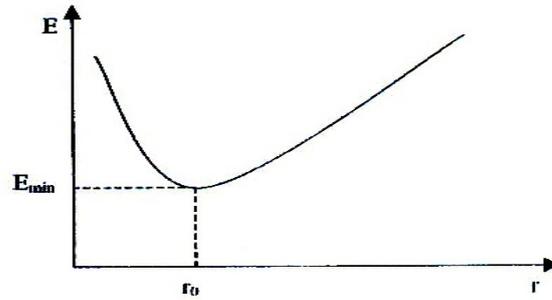


Figure III.9 : variation du champ électrique à la surface du conducteur en fonction du rayon du conducteur pour d constante.

Pour les lignes aériennes on a toujours $\frac{d}{r} > 15$ par conséquent on a toujours $r < r_0$ c'est pourquoi sur les lignes aériennes l'effet couronne constitue un phénomène réducteur du champ électrique rendant ainsi la décharge pratiquement impossible entre deux conducteurs.

La ligne aérienne est dimensionnée de telle sorte que le champ électrique sous la tension de service à la surface d'un conducteur soit inférieur au champ critique d'apparition de l'effet couronne.

Pour réduire le champ électrique à la surface du conducteur, on augmente le rayon du conducteur. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

- ❖ Conducteurs creux à grand rayon ;
- ❖ Câble central en acier entouré de brins de cuivre ;
- ❖ Emploi des faisceaux de conducteurs : [4,10]

Les lignes à très haute tension, supérieures à 300KV, sont équipées presque exclusivement de faisceaux de plusieurs conducteurs par phase. Cette disposition permet de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles

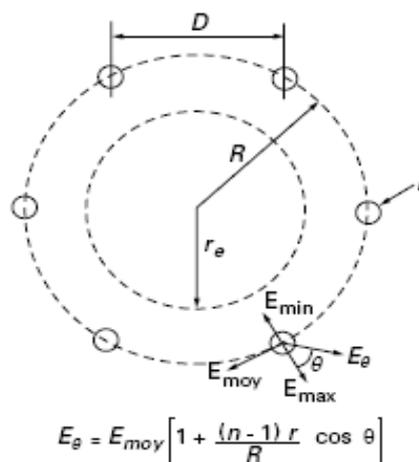


Figure III.10: conducteur en faisceaux

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes :

r (cm) : rayon des conducteurs élémentaires

n : nombre de conducteurs élémentaires

R (cm) : rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs)

D (cm) : distance entre deux conducteurs consécutifs :

$$D = 2R \sin \frac{\pi}{n} \tag{III.27}$$

r_e (cm) : rayon équivalent, c'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants, il est donné par l'expression :

$$r_e = R^n \sqrt[n]{\frac{nr}{R}} \tag{III.28}$$

Le champ superficiel d'un conducteur est donné de façon approché par :

$$E_\theta = E_{moy} \left[1 + \frac{(n+1)r}{R} \cos\theta \right] \tag{III.29}$$

Où E_{moy} : valeur moyenne du champ électrique sur le contour du conducteur

$$E_{moy} = \frac{U}{nr \log \frac{D_e}{r_e}} \tag{III.30}$$

U : tension du faisceau contre terre

D_e : distance équivalente par rapport au sol ($D_e = 2h$ pour le système conducteur-sol)

Puisque la charge totale du faisceau se répartit sur les n conducteurs du faisceau. Mais, par effet de blindage mutuel, le champ électrique est plus important vers l'extérieur, et plus faible vers l'intérieur du faisceau. On définit donc le champ maximal et le minimal des conducteurs, obtenus respectivement par les expressions :

$$\frac{dE_\theta}{d\theta} = 0 \Rightarrow \text{deux solutions :}$$

Un maximum pour $\alpha = \pi, 3\pi, \dots$

$$\alpha = (2k + 1)\pi$$

$$E_{\max} = E_{moy} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \right] \tag{III.31}$$

Un minimum pour $\alpha + 0,2\pi \dots\dots$

$$\alpha = 2k\pi$$

$$E_{\min} = E_{\text{moy}} \left[1 - \frac{(n-1)r}{R} \right] \quad (\text{III.32})$$

III.6 Les facteurs influençant l'effet couronne : [11]

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil de la décharge couronne, dont on distingue :

III.6.1 Influence de la densité de l'air : [11,12]

Il est bien connu que les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air, précisément dans les altitudes, elle est définie par :

$$\delta = \frac{P}{p_0} \frac{273 + T_0}{273 + T} \quad (\text{III.33})$$

Où δ : densité de l'air ;

P (p_0) : pression (pression atmosphérique $p_0 = 76$) en cmHg ;

T (T_0) : température (température ambiante $T_0 = 25$) en °C .

La tension de décharge U_d est proportionnelle à δ soit :

$$U_{dn} = U_d \frac{kh}{\delta} \quad (\text{III.34})$$

Où U_{dn} : tension de décharge dans les conditions normales ;

$\frac{kh}{\delta}$: correction à apporter pour avoir les conditions normales.

III.6.2 Influence de la température :

A pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue quand la température augmente, ce qui favorise la décharge couronne.

Au delà d'une certaine température (1500 °C), le champ électrique subit une grande déformation qui est dû à la distorsion des électrons.

III.6.3 Influence de l'humidité : [13]

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante et grande surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photoionisation.

Le facteur d'humidité kh est exprimé par la relation suivante :

$$kh^{-1} = [1 + (w - 11) \cdot 0,012] \quad (\text{III.35})$$

Où w : humidité absolue du milieu (l'humidité absolue de l'air étant égale à 11 g/m^3 à $T=20^\circ\text{C}$)

II.6.4 Influence de l'état de la surface : [10]

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que plus il se dégrade plus les pertes augmentent et plus le champ perturbateur est élevé.

Parmi les facteurs de dégradation, la pollution végétale ou industrielle, voire suintement en surface de graisse de toronage, jouent un rôle important, mais malheureusement difficilement maîtrisable. Plus encore, la pluie, en raison des aspérités que constituent les gouttes d'eau suspendues aux conducteurs, multiplie le nombre d'aigrettes génératrices de l'effet couronne.

III.7 Les avantages de l'effet couronne : [14]

Les décharges de couronnes ont de nombreuses applications commerciales et industrielles :

- ❖ Production d'ozone ;
- ❖ Filtrage des particules contenues dans l'air (système d'air conditionné) ;
- ❖ Destruction de particules organiques contenues dans l'atmosphère : pesticide, solvant,..... ;
- ❖ Traitement de surface de certains polymères ;
- ❖ Photocopieur ;
- ❖ Laser à azote ;
- ❖ Séparation électrostatique de matières conductrices et non-conductrices.

III.8 Les inconvénients de l'effet couronne :

III.8.1 Pertes par effet couronne : [15]

Dans une décharge couronne, une grande partie de l'énergie électrique est perdue dans les collisions entre les molécules neutres du gaz. Ainsi les pertes dépendent principalement de la quantité de charge produite. De plus elles sont fortement influencées par l'état de surface du conducteur et par les conditions climatiques. En effet, la valeur moyenne annuelle des pertes par effet de couronne est relativement faible soit de l'ordre de quelque kW/cm. Mais par mauvais temps on peut atteindre une valeur maximum de pertes par effet de couronne plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne. Ces augmentations ont une influence sur la livraison d'énergie surtout pendant les périodes de pointe. Pour ces raisons les concepteurs de ligne déterminent le diamètre et le nombre de conducteurs par phase en considérant le champ critique d'apparition de l'effet couronne et de l'intensité de précipitation.

III.8.1.1) Mécanisme de formation des pertes :

Quelque soit le mode d'émission, le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes en électrons et en ions positifs. Les charges de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirées vers celui-ci et neutralisées, alors que les charges de même signe sont entraînées vers l'extérieur par le champ électrique. Comme les électrons s'attachent très rapidement à des atomes neutres pour former des ions négatifs, tout ce passe, comme si le conducteur émettait, sous l'effet du phénomène d'ionisation, des ions lourds de même polarité que lui. [10]

La migration de ces ions dans le champ électrique entraîne des chocs avec les molécules neutres de l'air, ce qui dissipe l'énergie par frottement et constitue ainsi la cause physique des pertes couronne. [16]

a) Pertes aux tensions inférieures à la tension critique (régime localisé) : [16]

Tant que le nombre des points générateurs d'ions est faible, le champ principal dû aux charges portées par le conducteur n'est pratiquement pas perturbé. La quantité de charges émises est extrêmement fluctuante et dépend considérablement de l'état de surface du conducteur, de sorte qu'un calcul exact des pertes est quasi impossible et illusoire. Les pertes sont d'ailleurs dans cette zone de fonctionnement assez faibles pour que leur influence économique soit négligeable.

b) Pertes aux tensions supérieures à la tension critique (régime généralisé) :

Lorsque la tension appliquée s'accroît ou lorsque pluie, brouillard ou neige multiplient les aspérités du conducteur, le nombre d'aigrettes augmente. La charge d'espace créée devient suffisamment dense pour réagir de façon sensible sur le champ superficiel. Il se produit un phénomène de régulation par lequel le champ électrique superficiel ne peut pas dépasser une certaine valeur critique légèrement supérieure au seuil d'ionisation. Toute tendance au dépassement entraîne la génération de nouveaux ions qui tendent à leur tour à limiter la croissance du champ. Ainsi la qualité de charges émises est directement liée au phénomène d'interaction mentionné. Ce régime de formation intense des charges d'espace rend compte assez bien du phénomène qui se produit sous pluie ; c'est-à-dire justement dans des conditions où l'effet couronne est économiquement le plus gênant. Une description quantitative des mécanismes en jeu et par conséquent un calcul des pertes devient alors possible.

III 8.1.2) Calcul des pertes par effet couronne : [9]

On calcule les pertes par effet couronne avec deux formules semi-empiriques ; lorsque le

rapport $\frac{V_s}{V_{crit}} > 1,8$ on utilisera la formule de Peek :

$$P_C = 224(f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} \cdot (V_s - V_{crit}) \cdot 10^{-5}$$

Où f : fréquence ;

d : distance entre deux conducteurs de ligne ;

r : rayon du conducteur en cm ;

V_s : tension simple du réseau triphasé symétrique en KVe_{eff} ;

V_{crit} : tension simple d'apparition de l'effet couronne en KVe_{eff}.

Et si $\frac{V_s}{V_{crit}} < 1,8$ la formule de Peterson donne de bons résultats :

$$P_c = \frac{21 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot V_s^2}{\left[\log_{10} \left(\frac{d}{r} \right) \right]^2} \cdot F \quad [\text{KW/phase/Km}]$$

Avec le facteur F variant avec le rapport $\frac{V_s}{V_{crit}}$.

$\frac{V_s}{V_{crit}}$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
F	0,012	0,018	0,05	0,08	0,3	1,0	3,5	6,0	8,2

Remarque

Ces pertes sont par contre appréciables pour amortir la propagation des ondes de foudre.

III.8.2 Interférence radio télévision : [15]

La nature impulsionnelle de la décharge couronne est à l'origine des parasites ou interférence radio télévision qui peuvent être captées par les antennes des récepteurs qui se trouvent proches des lignes de transport d'énergie (moins de 100m). Outre l'effet de couronne, les étincelles ou les petits arcs électriques sont également responsables de perturbations.

III.8.2.1) Mécanisme de formation des perturbations : [10]

Le phénomène fondamental est ici le mode d'émission impulsionnelle, au cours duquel les charges libres, ions et électrons, sont brusquement formées puis violemment entraînées par le champ électrique intense au voisinage immédiat du conducteur.

La formation et le déplacement de ces charges dans l'espace voisin du conducteur provoquent une modification rapide de la distribution des potentiels électrostatiques, d'où résulte l'émission d'une onde électromagnétique : Ce rayonnement direct, de type sphérique, s'atténue en $1/r^2$ et il a été reconnu que sa contribution au champ perturbateur total mesuré en un point voisin de la ligne était faible. Mais le déplacement des charges provoque également un appel de courant dans le conducteur, se répartissant par moitié de part et d'autre de l'aigrette. Le siège de celle-ci peut donc être considéré comme origine de deux impulsions de courant symétriques, se propageant en sens inverses le long du conducteur.

III.8.3 Bruit audible : [15]

L'effet de couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant. La principale source de bruit audible provient des gouttes suspendues ou des gouttes passant à proximité des conducteurs. Il a été observé aussi que le givre est un générateur de bruit audible. De plus, en présence de la vibration induite par effet de couronne sous pluie, les bruits irréguliers sont parfois modulés à la fréquence de vibration mécanique des conducteurs.

III.8.4 Vibrations mécaniques :

Lors de la pluie et en présence d'un champ électrique, les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique se mettent à vibrer à la fréquence naturelle de la portée. Ce type de vibration est associé à la décharge par effet de couronne des gouttes d'eau suspendues en dessous des conducteurs.

L'amplitude des vibrations est de l'ordre de 10cm avec une fréquence de 1 à 10 Hz.

Conclusion :

Lorsque les rayons des conducteurs sont mal dimensionnés. Le champ disruptif de l'air est dépassé. L'effet couronne se produit, générant de la lumière (arcs = UV), du bruit, des perturbations radiophoniques, de l'ozone et des pertes électriques.

La modélisation d'une ligne de 330KV sans et avec la prise en compte de ce phénomène est sujet du quatrième chapitre.

IV.1 Introduction :

Les lignes électriques aériennes sont siège d'effet couronne à partir d'un certain niveau de tension (240KV).

Dans le but de mettre en évidence ce phénomène, et son impact sur la propagation des ondes de surtensions ; nous avons étudié par voie de la modélisation mathématique une ligne de 330KV en tenant compte de l'effet couronne d'une part, et d'autre sans tenir compte de ce dernier.

IV.2 Modélisation de la ligne sans effet couronne.

IV.2.1 Modélisation de la ligne sans effet couronne (avec un conducteur par phase) :

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

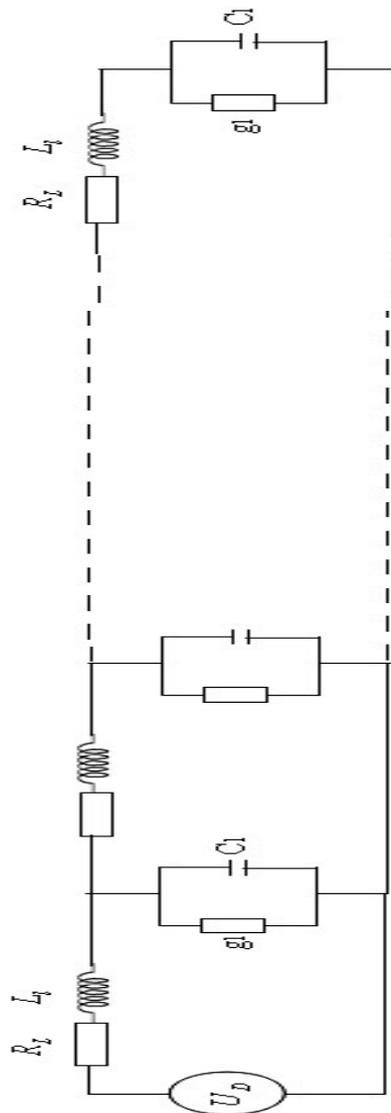


Figure (IV.1) : Le schéma équivalent de la ligne sans effet couronne

IV.2.1.1) Définition des paramètres :

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

U_0 : onde de surtension appliquée [V] ;

R_l : résistance d'un élément de la ligne [Ω] ;

L_l : l'inductance d'un élément de la ligne [H] ;

C_l : capacité d'un élément de la ligne [F] ;

g_l : conductibilité d'un élément de la ligne [$1/\Omega$].

IV.2.1.2) Calcul des paramètres de la ligne :**❖ Caractéristiques de la ligne :**

La tension nominale : $U_n = 330KV$.

Résistance kilométrique : $r_0 = 0,105$ [Ω/Km].

Réactance kilométrique : $X_0 = 0,441$ [Ω/Km].

Conductibilité réactive kilométrique : $B_0 = 2,565.10^{-6}$ [$1/\Omega.Km$].

Conductibilité active kilométrique : $g_0 = 2,98.10^{-8}$ [$1/\Omega.Km$].

Longueur de la ligne : $l=90Km$.

❖ Calcul de la résistance :

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

$$R = R_0.l. \quad (VI.1)$$

R : résistance totale de la ligne.

l : longueur totale de la ligne.

$$R = 0,105.90 = 9,45 \text{ } [\Omega].$$

Pour calculer la résistance d'un élément de la ligne, on a la relation suivante :

$$R = \frac{R}{n} . \quad (VI.2)$$

n : nombre d'éléments qui est égale à 10.

$$R_l = \frac{9,45}{10} = 0,945 \text{ } [\Omega].$$

❖ **Calcul de l'inductance :**

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

$$L = \frac{X}{\omega}. \quad (\text{VI.3})$$

L : inductance totale de la ligne.

X : réactance totale de la ligne.

$\omega = 2\pi f$: la pulsation propre avec $f=50\text{HZ}$.

• **Calcul de la réactance :**

La réactance totale de la ligne est :

$$X = X_0.l. \quad (\text{VI.4})$$

$$X = 0,441.90 = 39,69 \text{ } [\Omega].$$

La réactance d'un élément est :

$$X_l = \frac{X}{n}. \quad (\text{VI.5})$$

$$X_l = \frac{39,69}{10} = 3,97 \text{ } [\Omega].$$

L'inductance de la ligne est :

$$L = \frac{39,69}{2\pi f} = 0,12643 \text{ } [\text{H}].$$

L'inductance d'un élément est :

$$L_l = \frac{0,12643}{10} = 12643 \text{ } [\mu\text{H}].$$

❖ **Calcul de la capacité :**

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

$$C = \frac{B}{\omega}. \quad (\text{VI.6})$$

C : capacité totale de la ligne.

B : conductibilité réactive totale de la ligne.

• **Calcul de la conductibilité réactive de la ligne :**

$$B = B_0.l. \quad (\text{VI.7})$$

$$B = 2,565.10^{-6}.90 = 2,31.10^{-4} \text{ } [1/\Omega].$$

La conductibilité réactive d'un élément est :

$$B_l = \frac{B}{n}. \quad (\text{VI.8})$$

$$B_l = \frac{2,31 \cdot 10^{-4}}{10} = 2,31 \cdot 10^{-5} \left[\frac{1}{\Omega} \right].$$

La capacité de la ligne est :

$$C = \frac{2,31 \cdot 10^{-4}}{2\pi f} = 0,7356 \text{ } [\mu F].$$

La capacité d'un élément est :

$$C_l = \frac{C}{n} \quad (\text{VI.9})$$

$$C_l = \frac{0,7356}{10} = 0,07356 \text{ } [\mu F].$$

❖ Calcul de la conductibilité active

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

$$g = g_0 \cdot l. \quad (\text{VI.10})$$

g : conductibilité active totale de la ligne.

$$g = 2,98 \cdot 10^{-8} \cdot 90 = 2,682 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\Omega} \right].$$

La conductibilité active d'un élément est :

$$g_l = \frac{g}{n}. \quad (\text{VI.11})$$

$$g_l = \frac{2,682 \cdot 10^{-6}}{10} = 0,2682 \left[\frac{1}{M\Omega} \right].$$

Récapitulation des résultats :

R_l	0,945 [Ω]
L_l	12643 [μH]
C_l	0,07356 [μF]
g_l	0,2682

	$[1/M\Omega]$
--	---------------

IV.2.2 Modélisation de la ligne sans effet couronne (avec deux conducteurs par phase) :

Nous utilisons le même schéma équivalent de la figure (IV), avec deux conducteurs par phase.

IV.2.2.1) Calcul des paramètres de la ligne :

❖ Calcul de la résistance :

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

$$R' = \frac{R}{N}. \quad (\text{VI.12})$$

R : : résistance totale de la ligne (un conducteur par phase).

R' : résistance totale de la ligne (deux conducteur par phase).

N : nombre des conducteurs par phase qui est égale à 2.

$$R' = \frac{9,45}{2} = 4,725 \text{ } [\Omega].$$

La résistance d'un élément est :

$$R_l' = \frac{4,725}{10} = 0,4725 \text{ } [\Omega].$$

❖ Calcul de l'inductance :

Pour calculer l'inductance de la ligne, il faut d'abord trouver sa réactance.

• Calcul de la réactance :

La réactance X_0 est donnée par la formule suivante :

$$X_0 = 0,144 \log \frac{D_m}{r_e} + 0,016. \quad (\text{VI.13})$$

D_m : distance moyenne entre deux conducteurs.

$$D_m = \sqrt[3]{2}D. \quad (\text{VI.14})$$

$D_m = 1,26D$ avec $D=4m$.

$D_m = 1,26.4 = 5,04m$.

r_e : rayon équivalent des conducteurs sectionnés.

$$r_e = \sqrt[N]{a_m^{N-1} \cdot r_c}. \quad (\text{VI.15})$$

a_m : distance moyenne entre les conducteurs sectionnés (de même phase), $a_m = 400\text{mm}$.

r_c : rayon d'un conducteur, $r_c = 7,65\text{mm}$.

$$r_e = \sqrt{400 \cdot 7,65} = 55,32\text{mm}.$$

$$X_0 = 0,144 \log \frac{5,04}{55,32 \cdot 10^{-3}} + 0,016.$$

$$X_0 = 0,3 \text{ } [\Omega/\text{Km}].$$

Pour une longueur donnée de la ligne $l=90\text{Km}$.

$$X=27 \text{ } [\Omega].$$

$$L' = \frac{X}{2\pi f}.$$

L' : inductance totale de la ligne (deux conducteurs par phase).

$$L' = \frac{27}{2\pi f} = 0,086 \text{ } [H].$$

L' inductance d'un élément est :

$$L'_l = \frac{0,086}{10} = 8600 \text{ } [\mu H].$$

❖ Calcul de la capacité :

B_0 est calculer par la formule suivante :

$$B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_e}}. \quad (\text{VI.16})$$

$$B_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{5,04}{55,32 \cdot 10^{-3}}} = 3,87 \cdot 10^{-6} \text{ } [1/\Omega \cdot \text{Km}].$$

Pour une longueur donnée de la ligne $l=90\text{Km}$.

$$B' = 3,48 \cdot 10^{-4} \text{ } [1/\Omega].$$

$$C' = \frac{B'}{2\pi f} \text{ } [\mu F].$$

C' : capacité totale de la ligne (deux conducteurs par phase).

$$C' = \frac{3,48 \cdot 10^{-4}}{2\pi f} = 1,109 \text{ } [\mu F].$$

La capacité d'un élément est :

$$C'_l = \frac{1,109}{10} = 0,1109 \text{ } [\mu F].$$

❖ **Calcul de la conductibilité active :**

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

$$g' = g_0 \cdot l.$$

g' : conductibilité active totale de la ligne.

$$g' = 2,98 \cdot 10^{-8} \cdot 90 = 2,682 \cdot 10^{-6} \text{ } [1/\Omega]$$

La conductibilité active d'un élément est :

$$g'_l = \frac{2,682 \cdot 10^{-6}}{10} = 0,2682 \text{ } [1/M\Omega].$$

Récapitulation des résultats :

R'_l	0,4725 [Ω]
L'_l	8600 [μH]
C'_l	0,1109 [μF]
g'_l	0,2682 [$1/M\Omega$]

IV.3 Modélisation de la ligne avec effet couronne :

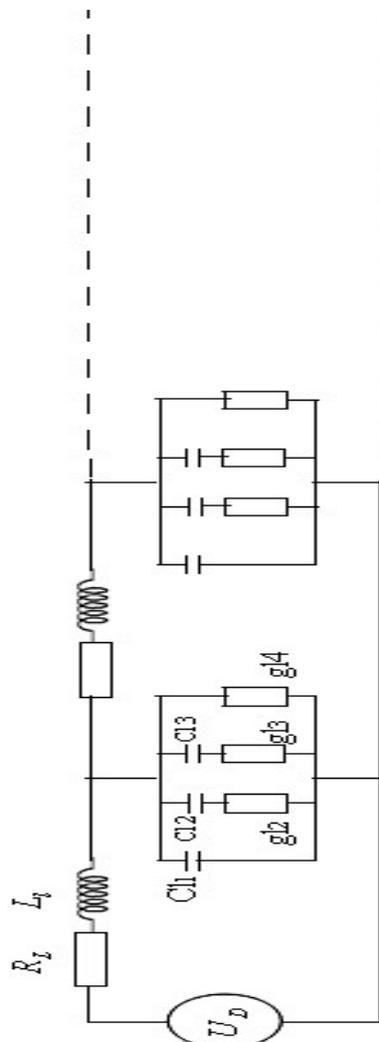
Lors du couronnement des conducteurs des lignes, certaines capacités et conductibilités variables sont additionnées sur les capacités et les conductibilités géométriques de la ligne.

La modélisation du changement des capacités et des conductibilités variables conditionnées par effet couronne ce fait par un schéma en chaîne constituant des éléments de capacités et conductibilités.

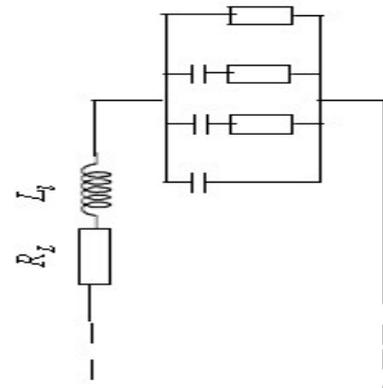
Le nombre de chaînes dépendent de la valeur de la fréquence des régimes transitoires dans les lignes de transport.

Comme modèle nous prenons les schémas proposés par l'université de polytechnique de Saint-Petersbourg. [17]

IV.3.1 Modélisation de la ligne avec effet couronne (1000HZ)



Figure(IV.2): Le schéma équivalent de la ligne avec effet couronne de fréquence $f=1000\text{Hz}$



IV.3.1.1) Définition des paramètres :

Sur le schéma équivalent de la figure (IV.2) nous avons :

C_{11} , C_{12} et C_{13} sont respectivement les capacités des chaînes 1, 2 et 3 du modèle.

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

IV.3.1.2) Calcul des paramètres de la ligne :**❖ Caractéristiques du modèle de la couronne :**

$C_{10} = 173,7 \text{ [PF/Km]}$: Capacité kilométrique de la chaîne 1.

$C_{20} = 621,5 \text{ [PF/Km]}$: Capacité kilométrique de la chaîne 2.

$C_{30} = 394,5 \text{ [PF/Km]}$: Capacité kilométrique de la chaîne 3.

$g_{20} = 1,0002122 \text{ [1/M}\Omega\text{.Km]}$: Conductibilité active kilométrique de la chaîne 2.

$g_{30} = 1,0227989 \text{ [1/M}\Omega\text{.Km]}$: Conductibilité active kilométrique de la chaîne 3.

$g_{40} = 0,327 \text{ [1/M}\Omega\text{.Km]}$: Conductibilité active kilométrique de la chaîne 4.

❖ Calcul des capacités :

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

$$C = C_0 \cdot l$$

C : Capacité totale du modèle de la couronne.

Pour la longueur donnée de la ligne $l=90\text{Km}$.

$$C_1 = C_{10}.l.$$

$$C_1 = 173,7.90 = 0,015633 \text{ } [\mu F].$$

$$C_2 = C_{20}.l.$$

$$C_2 = 621,5.90 = 0,055935 \text{ } [\mu F].$$

$$C_3 = C_{30}.l.$$

$$C_3 = 394,5.90 = 0,035505 \text{ } [\mu F].$$

On divise la ligne par 10 éléments, donc pour un élément de la ligne qui est équivalent à une longueur $\Delta l = 9Km$, on aura :

$$C_{11} = 0,0015633 \text{ } [\mu F].$$

$$C_{12} = 0,0055935 \text{ } [\mu F].$$

$$C_{13} = 0,0035505 \text{ } [\mu F].$$

❖ Calcul des conductibilités actives :

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

$$g = g_0.l.$$

g : Conductibilité active totale de la ligne.

Pour une longueur donnée de la ligne $l=90Km$.

$$g_2 = g_{20}.l.$$

$$g_2 = 1,0002128.90 = 90,019 \text{ } [1/M\Omega].$$

$$g_3 = g_{30}.l$$

$$g_3 = 1,0227989.90 = 92,052 \text{ } [1/M\Omega].$$

$$g_4 = g_{40}.l.$$

$$g_4 = 0,327.90 = 29,43 \text{ } [1/M\Omega].$$

On divise la ligne par 10 éléments, donc pour un élément de la ligne qui est équivalent à $\Delta l = 9Km$, on aura :

$$g_{12} = 9,0019 \text{ } [1/M\Omega].$$

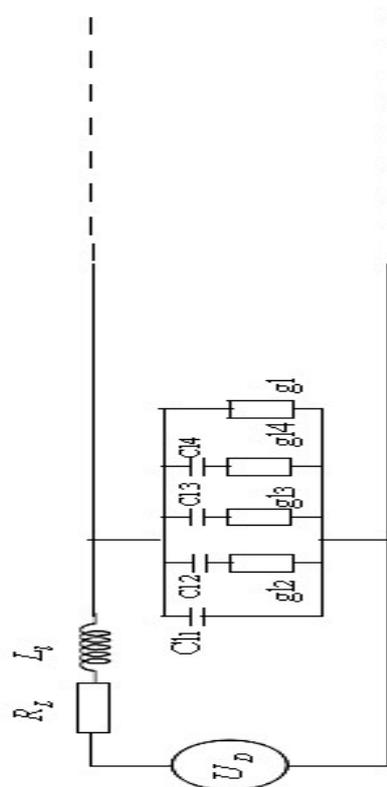
$$g_{13} = 9,2052 \text{ } [1/M\Omega].$$

$$g_{14} = 2,943 \text{ } [1/M\Omega].$$

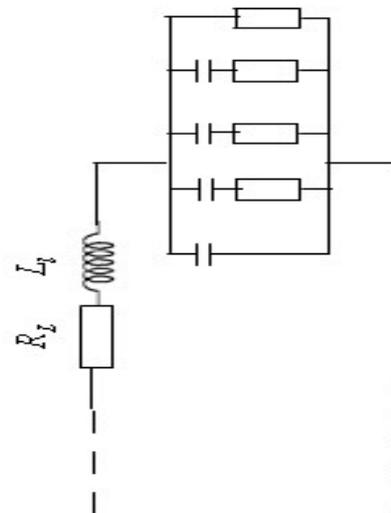
Récapitulation des résultats :

R_l	0,945 [Ω]
L_l	12643 [μH]
C_{l1}	0,0015633 [μF]
C_{l2}	0,0055935 [μF]
C_{l3}	0,0035505 [μF]
g_{l2}	9,0019 [$1/M\Omega$]
g_{l3}	9,2052 [$1/M\Omega$]
g_{l4}	2,943 [$1/M\Omega$]

IV.3.2 Modélisation de la ligne avec effet couronne (2000HZ)



Figure(IV.3). Le schéma équivalent de la ligne avec effet couronne de fréquence $f=2000\text{Hz}$



IV.3.2.1) Définition des paramètres :

Sur le schéma équivalent de la figure (IV.3), nous avons :

C_{11}, C_{12}, C_{13} et C_{14} sont respectivement les capacités des chaînes 1, 2, 3 et 4 du modèle.

R_{12}, R_{13} et R_{14} sont respectivement les résistances des chaînes 2, 3 et 4 du modèle.

g_l est la conductibilité active de la chaîne 5 du modèle.

IV.3.2.2) Calcul des paramètres de la ligne :**❖ Caractéristiques du modèle de la couronne :**

$$C_{10} = 424,2 \quad [PF/Km].$$

$$C_{20} = 1951 \quad [PF/Km].$$

$$C_{30} = 873,2 \quad [PF/Km].$$

$$C_{40} = 291,4 \text{ [PF/Km]}.$$

$$R_{20} = 0,697 \text{ [M}\Omega\text{.Km]}.$$

$$R_{30} = 0,178 \text{ [M}\Omega\text{.Km]}.$$

$$R_{40} = 0,622 \text{ [M}\Omega\text{.Km]}.$$

$$g_0 = 0,576 \text{ [1/M}\Omega\text{.Km]}.$$

❖ **Calcul des capacités :**

Pour une longueur de la ligne $l=90\text{Km}$.

$$C_1 = 0,03818 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_2 = 0,17559 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_3 = 0,07859 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_4 = 0,02623 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

Pour un élément de la ligne de longueur $\Delta l = 9\text{Km}$.

$$C_{11} = 0,003818 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_{12} = 0,017559 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_{13} = 0,007859 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

$$C_{14} = 0,02623 \text{ [}\mu\text{F]}.$$

❖ **Calcul des résistances :**

Pour une longueur de la ligne 90Km .

$$R_2 = 7744,4 \text{ [}\Omega\text{]}.$$

$$R_3 = 1977,8 \text{ [}\Omega\text{]}.$$

$$R_4 = 6911,1 \text{ [}\Omega\text{]}.$$

Pour un élément de la ligne de longueur 9Km .

$$R_{12} = 77444 \text{ [}\Omega\text{]}.$$

$$R_{13} = 19778 \text{ [}\Omega\text{]}.$$

$$R_{14} = 69111 \text{ [}\Omega\text{]}.$$

❖ **Calcul de la conductibilité relative :**

Pour $l=90\text{Km}$.

$$g = 51,84 \left[\frac{1}{M\Omega} \right].$$

Pour un élément $\Delta l = 9Km$.

$$g_l = 5,184 \left[\frac{1}{M\Omega} \right].$$

Récapitulation des résultats :

R_l	0,945 [Ω]
L_l	12643 [μH]
C_{l1}	0,003818 [μF]
C_{l2}	0,017559 [μF]
C_{l3}	0,007859 [μF]
C_{l4}	0,02623 [μF]
R_{l2}	77444 [Ω]
R_{l3}	19778 [Ω]
R_{l4}	69111 [Ω]
g_l	5,184 [$\frac{1}{M\Omega}$]

IV.4 Les équations des modèles :

Les tensions et les courants sont calculés d'après une cellule des différents modèles.

IV.4.1 Les équations des tensions :

$$U_1 - U_2 = R_l i_1 + L_l \frac{di_1}{dt}$$

$$U_2 - U_3 = R_l i_2 + L_l \frac{di_2}{dt}$$

$$U_3 - U_4 = R_l i_3 + L_l \frac{di_3}{dt}$$

$$U_4 - U_5 = R_l i_4 + L_l \frac{di_4}{dt}$$

$$U_5 - U_6 = R_l i_5 + L_l \frac{di_5}{dt}$$

$$U_6 - U_7 = R_l i_6 + L_l \frac{di_6}{dt}$$

$$U_7 - U_8 = R_l i_7 + L_l \frac{di_7}{dt}$$

$$U_8 - U_9 = R_l i_8 + L_l \frac{di_8}{dt}$$

$$U_9 - U_{10} = R_l i_9 + L_l \frac{di_9}{dt}$$

$$U_{10} - U_{11} = R_l i_{10} + L_l \frac{di_{10}}{dt}$$

Généralités :

Pour $1 \leq n \leq 10$

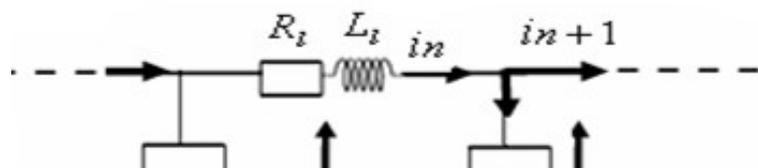
$$U_n - U_{n+1} = R_l i_n + L_l \frac{di_n}{dt} \tag{VI.17}$$

IV.4.2 Les équations des courants :

IV.4.2.1) Modèle sans effet couronne:

$$i_1 - i_2 = C_l \frac{dU_2}{dt} + g_l U_2$$

$$i_2 - i_3 = C_l \frac{dU_3}{dt} + g_l U_3$$



$$i_3 - i_4 = C_l \frac{dU_4}{dt} + g_l U_4$$

$$i_4 - i_5 = C_l \frac{dU_5}{dt} + g_l U_5$$

$$i_5 - i_6 = C_l \frac{dU_6}{dt} + g_l U_6$$

$$i_6 - i_7 = C_l \frac{dU_7}{dt} + g_l U_7$$

$$i_7 - i_8 = C_l \frac{dU_8}{dt} + g_l U_8$$

$$i_8 - i_9 = C_l \frac{dU_9}{dt} + g_l U_9$$

$$i_9 - i_{10} = C_l \frac{dU_{10}}{dt} + g_l U_{10}$$

Généralités :

Pour $1 \leq n \leq 10$

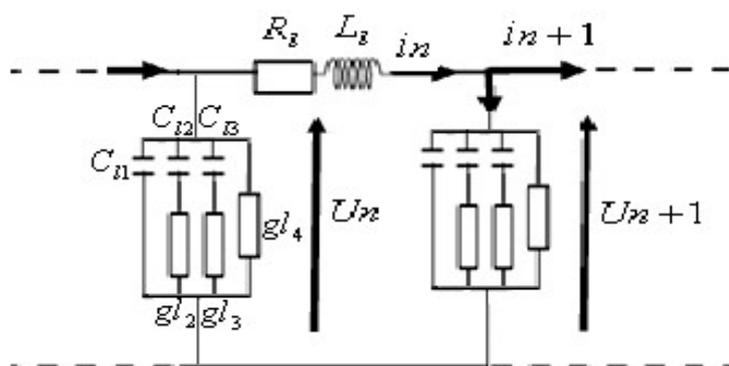
$$i_n - i_{n+1} = C_n \frac{dU_{n+1}}{dt} + g_l U_{n+1} \tag{VI.18}$$

IV.4.2.2) Modèle avec effet couronne (1000HZ) :

$$i_1 - i_2 = Y_l U_2$$

$$i_2 - i_3 = Y_l U_3$$

$$i_3 - i_4 = Y_l U_4$$



$$i_4 - i_5 = Y_l U_5$$

$$i_5 - i_6 = Y_l U_6$$

$$i_6 - i_7 = Y_l U_7$$

$$i_7 - i_8 = Y_l U_8$$

$$i_8 - i_9 = Y_l U_9$$

$$i_9 - i_{10} = Y_l U_{10}$$

Généralités :

Pour $1 \leq n \leq 10$

$$i_n - i_{n+1} = Y_l U_{n+1} \tag{VI.19}$$

Avec Y_l : L'admittance équivalente d'un élément du modèle de la couronne (1000HZ).

IV.4.2.3) Modèle avec effet couronne (2000HZ) :

$$i_1 - i_2 = Y_l' U_2$$

$$i_2 - i_3 = Y_l' U_3$$

$$i_3 - i_4 = Y_l' U_4$$

$$i_4 - i_5 = Y_l' U_5$$

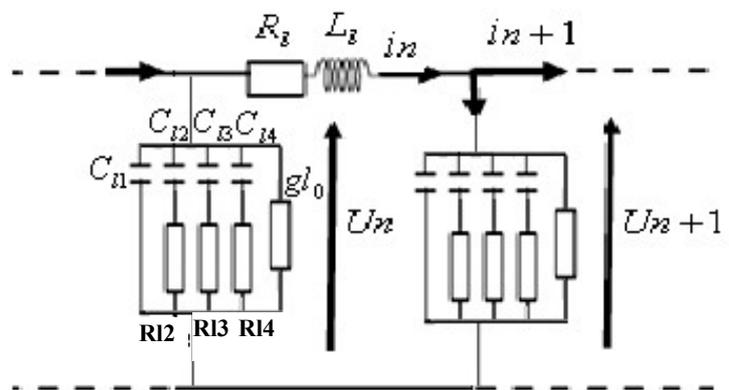
$$i_5 - i_6 = Y_l' U_6$$

$$i_6 - i_7 = Y_l' U_7$$

$$i_7 - i_8 = Y_l' U_8$$

$$i_8 - i_9 = Y_l' U_9$$

$$i_9 - i_{10} = Y_l' U_{10}$$



Généralités :

Pour $1 \leq n \leq 10$

$$i_n - i_{n+1} = Y_l' U_{n+1} \tag{VI.20}$$

Avec Y_l' : L'admittance équivalente d'un élément du modèle de la couronne (2000HZ).

Conclusion :

Afin de mettre en évidence l'impact de l'effet couronne sur la déformation de l'onde de surtension engendré par une décharge atmosphérique, nous avons adopté quatre modèles, sans et avec l'effet couronne. Ses simulations ainsi que l'interprétation des résultats sont présentés dans le dernier chapitre.

V.1 Introduction :

La foudre à toujours été une cause de perturbation dans l'utilisation de l'électricité, c'est pour cela quelle fait maintenant partie des grandes préoccupations des électriciens et chercheurs.

L'onde de foudre se propage le long de la ligne et peut avoir différents paramètres (amplitude, raideur et longueur).

Une étude des effets de la foudre est faite pour prévoir ce qui peut se passer sur une ligne donnée. Ceci est possible par l'utilisation de logiciels spécialisés qui simulent le comportement de la ligne. Dans ce présent travail, on utilise le logiciel P-spice.

La simulation des différents modèles est faite afin de faire apparaître l'impact de l'effet couronne sur la déformation de l'onde de foudre lors de sa propagation le long de la ligne, pour cela on a considéré des modèles avec et sans prise en compte du phénomène couronne.

V.2 Simulation des schémas équivalents :

Dans notre travail, la simulation est faite sur une ligne de tension nominale 330KV sur laquelle le phénomène couronne peut apparaître, de longueur 90Km, à constantes réparties le long de la ligne, elle est représenté par dix éléments, chaque éléments est équivalent à 9Km.

On considère :

- 1- La ligne est sans effet couronne avec un conducteur par phase ;
- 2- La ligne est sans effet couronne avec deux conducteurs par phase ;
- 3- La ligne est avec effet couronne, modèle (1000HZ) ;
- 4- La ligne est avec effet couronne, modèle (2000HZ) ;

Nous considérons aussi que la surtension impulsionnelle (1,2/50 μ s) d'amplitude 300KV aura lieu au début de la ligne.

Figure A: Les courbes des tensions aux différents points de la ligne.

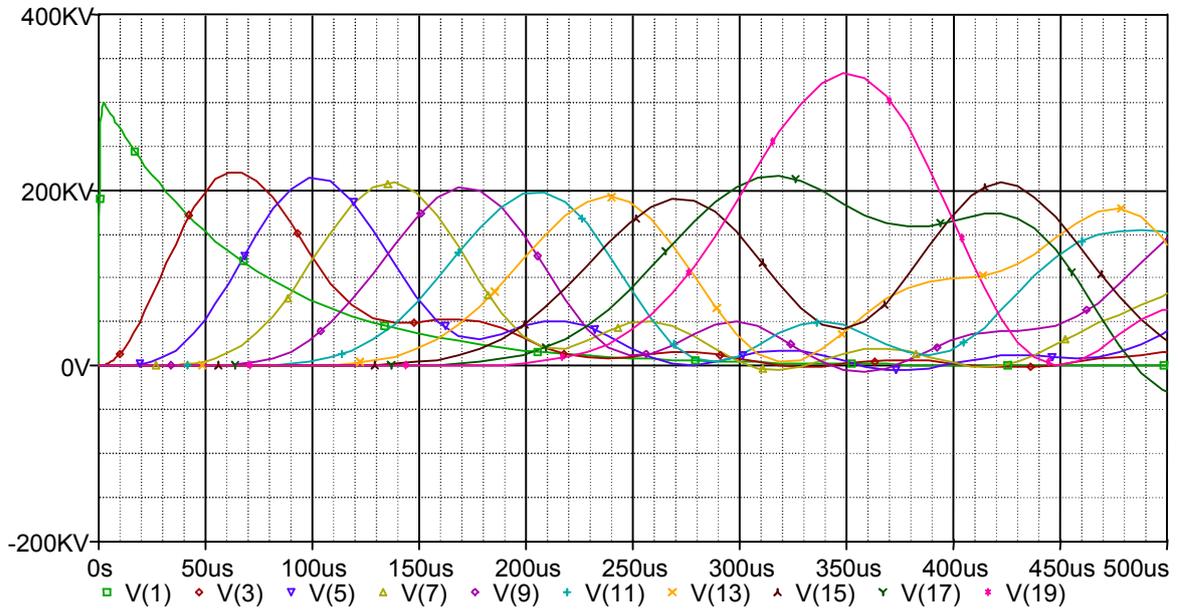


Figure A.1 : Modèle sans effet couronne (un conducteur par phase).

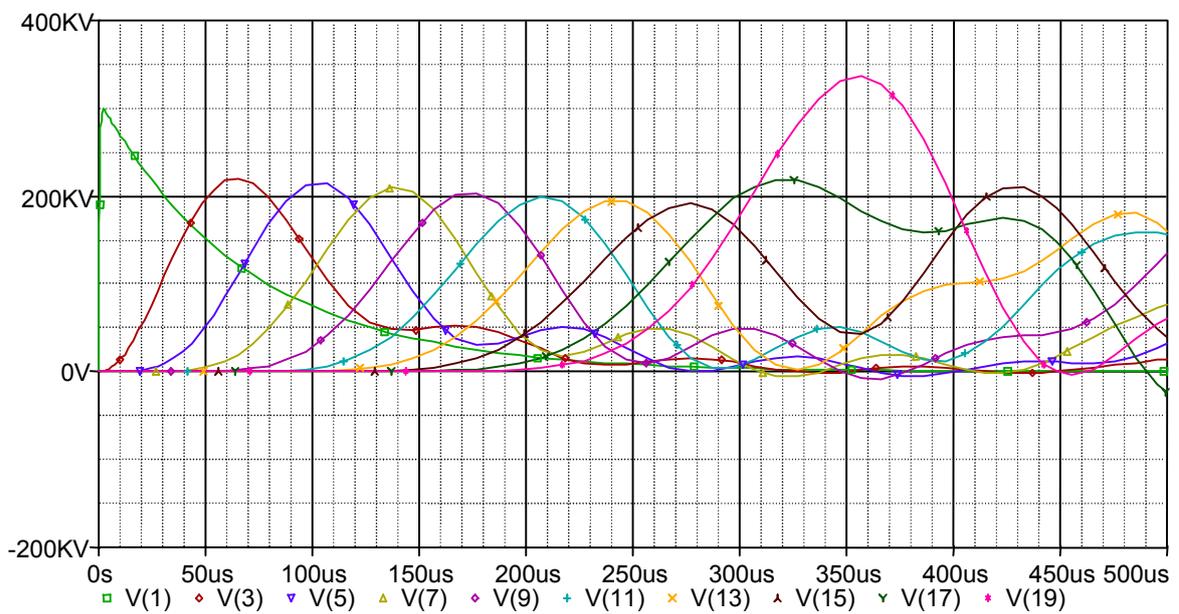


Figure A.2: Modèle sans effet couronne (deux conducteurs par phase).

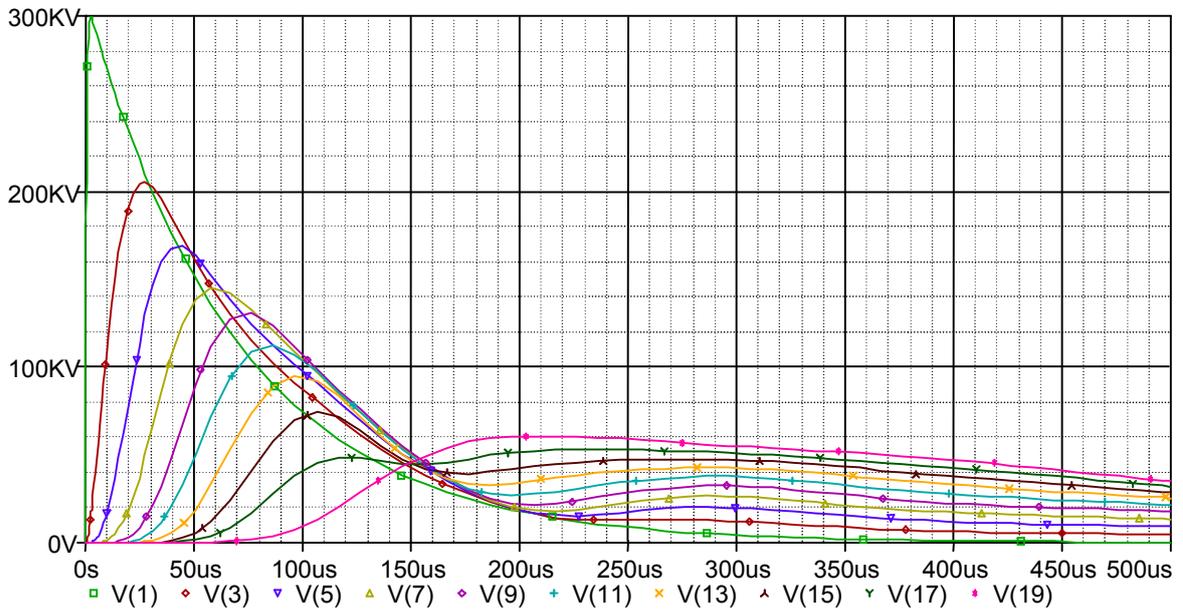


Figure A.3 : Modèle avec effet couronne (1000HZ).

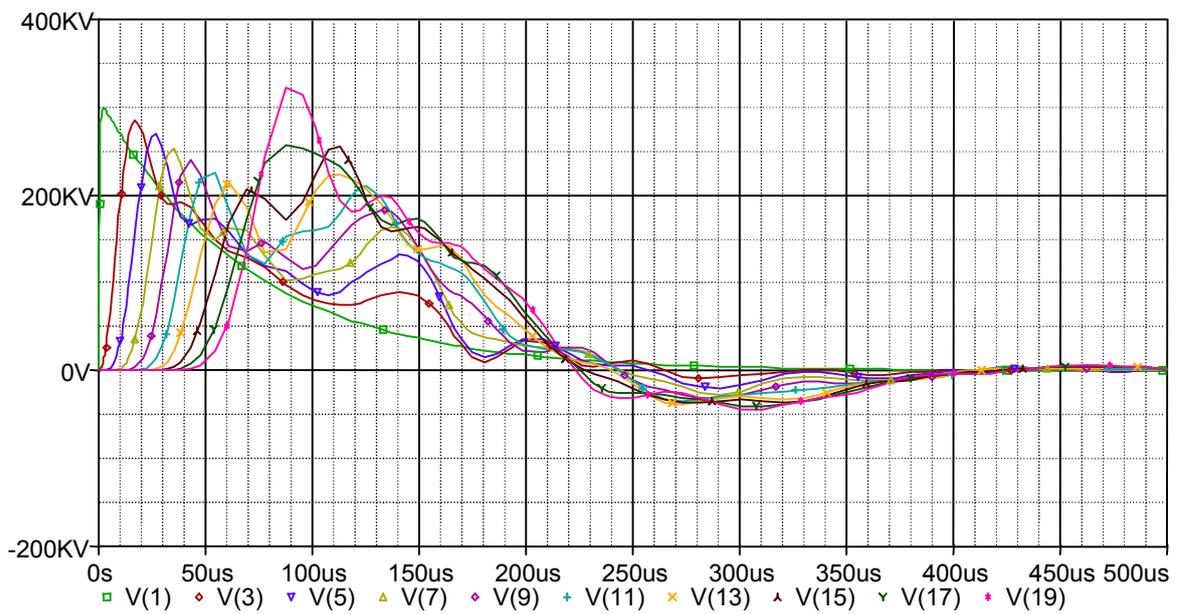


Figure A.4 : Modèle avec effet couronne (2000HZ).

Figure B : Les courbes des tensions au début de la ligne.

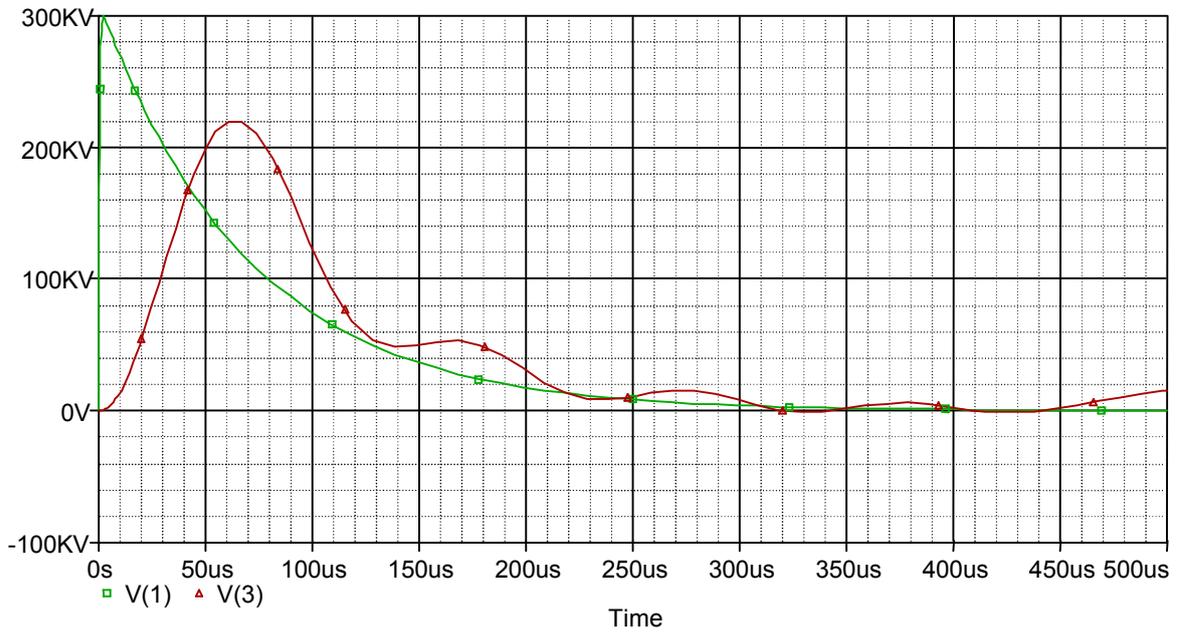


Figure B.1 : La tension au début de la ligne pour le modèle sans effet couronne (un conducteur par phase).

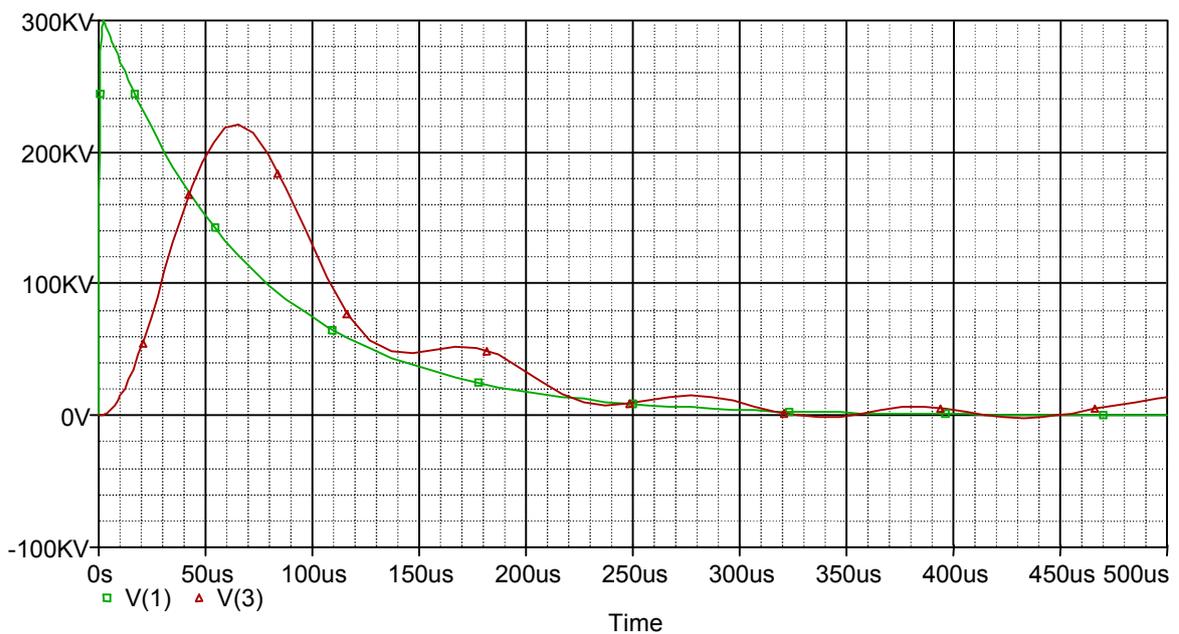


Figure B.2 : La tension au début de la ligne pour le modèle sans effet couronne (deux conducteurs par phase).

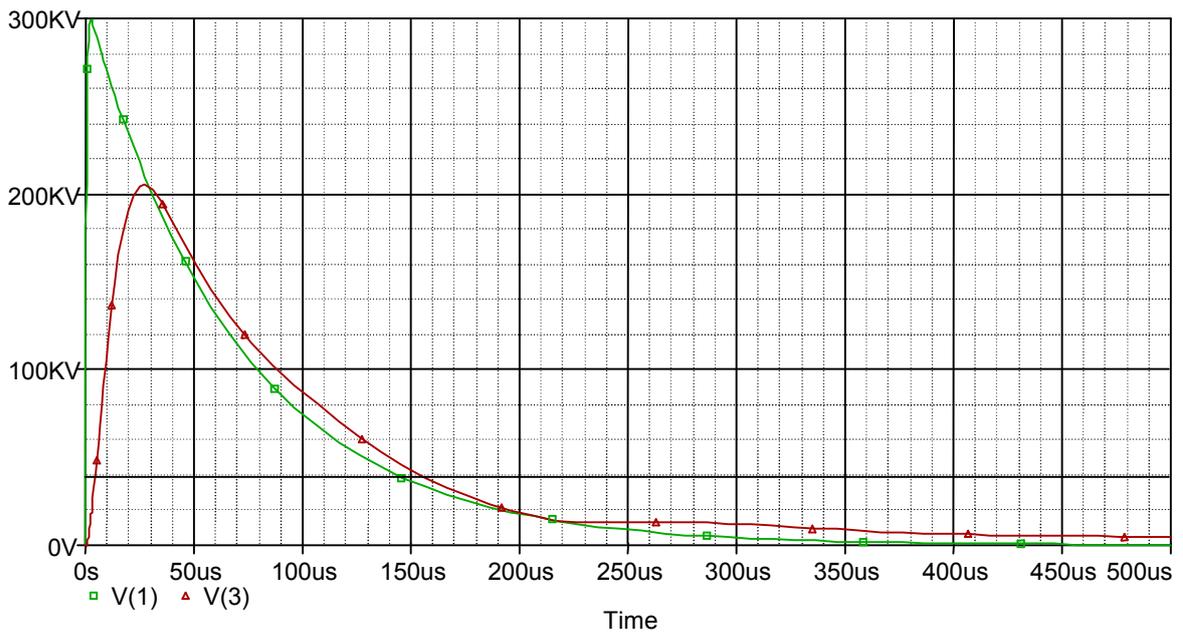


Figure B.3 : La tension au début de la ligne pour le modèle avec effet couronne (1000HZ).

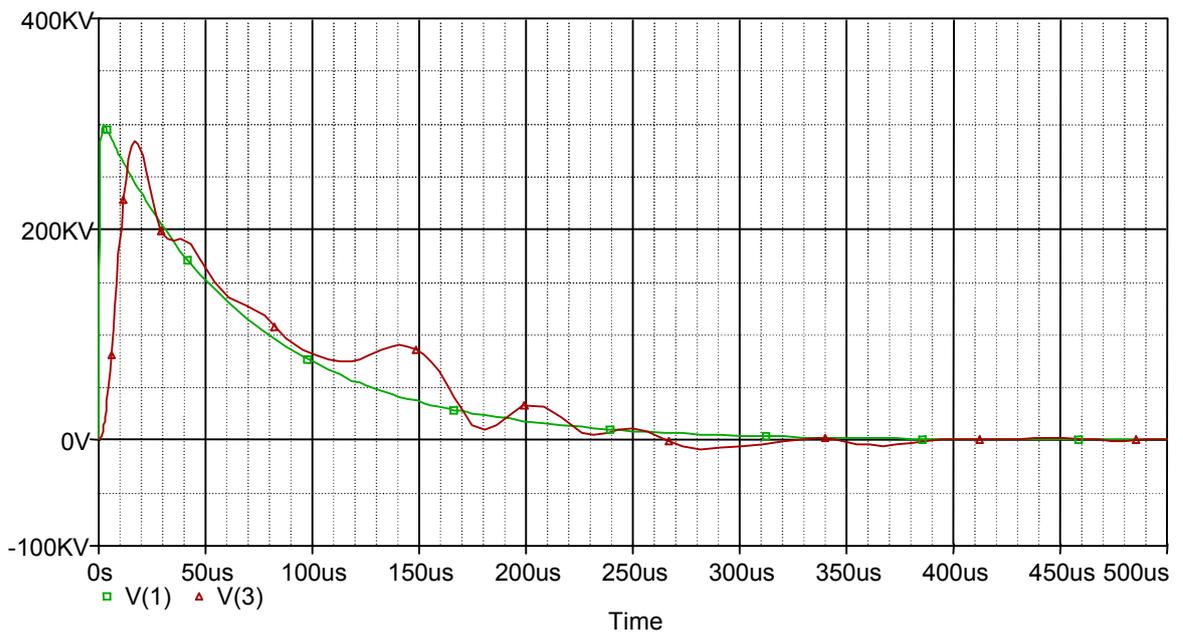


Figure B.4 : La tension au début de la ligne pour le modèle avec effet couronne (2000HZ).

Figure C: Les courbes des tensions au milieu de la ligne.

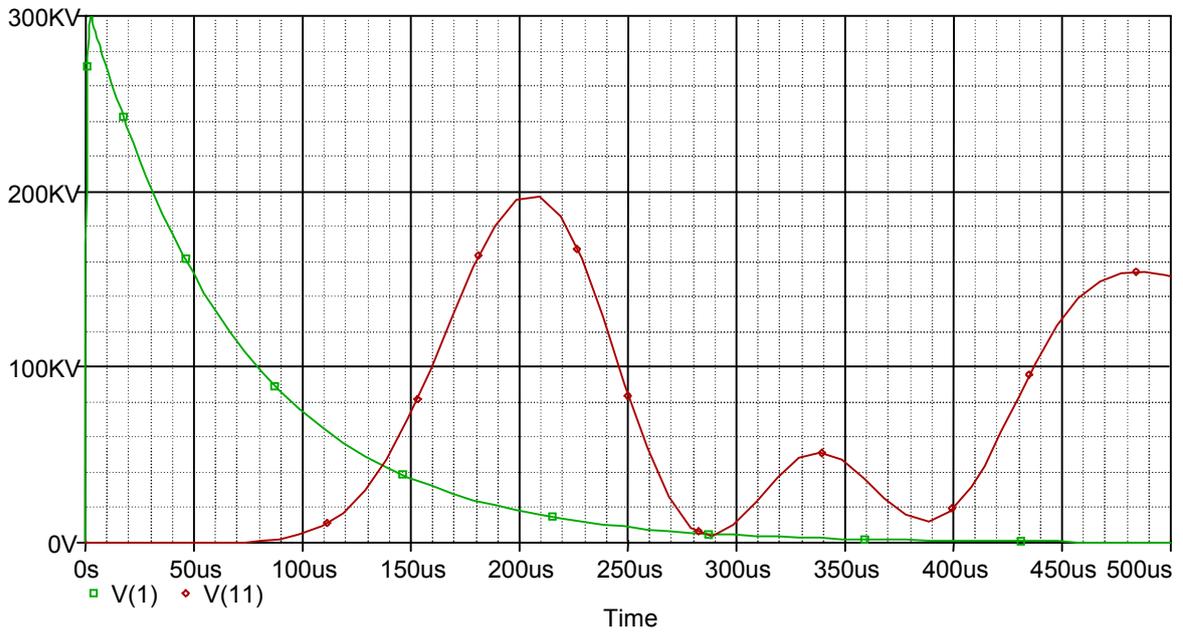


Figure C.1 : La tension au milieu de la ligne pour le modèle sans effet couronne (un conducteur par phase).

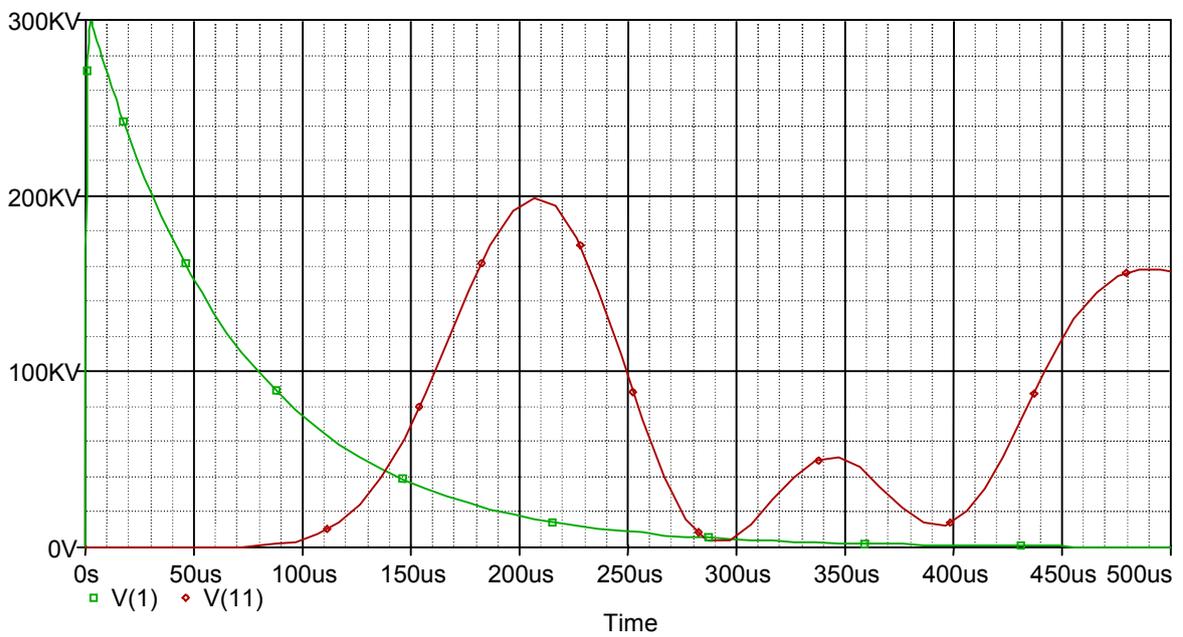


Figure C.2 : La tension au milieu de la ligne pour le modèle sans effet couronne (deux conducteurs par phase).

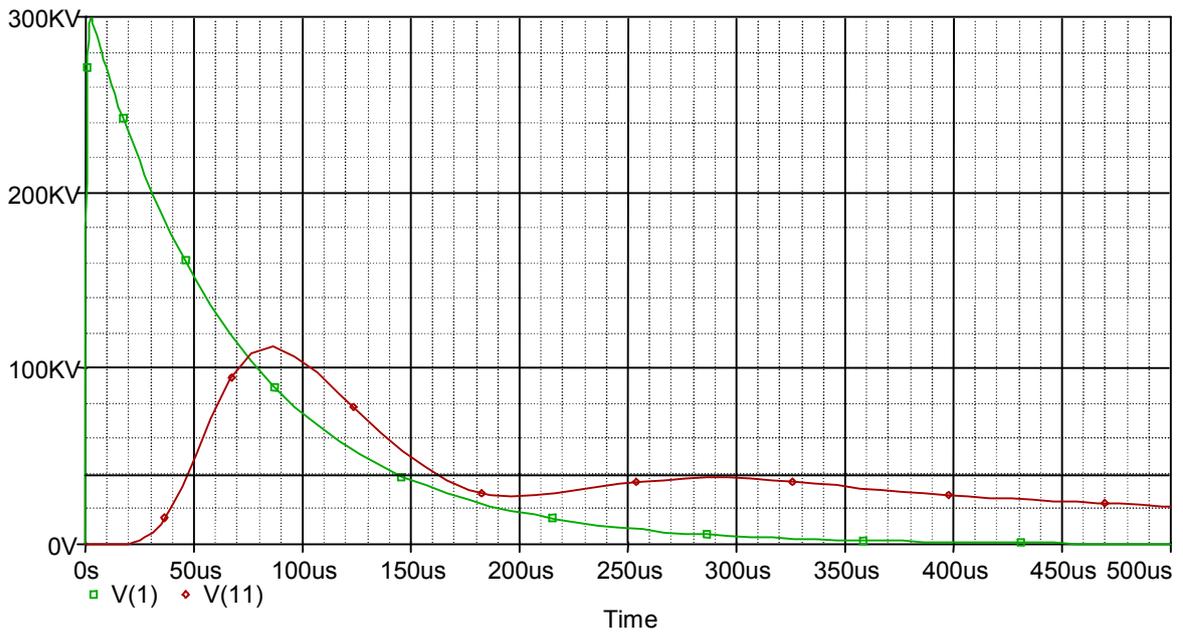


Figure C.3 : La tension au milieu de la ligne pour le modèle avec effet couronne (10000HZ).

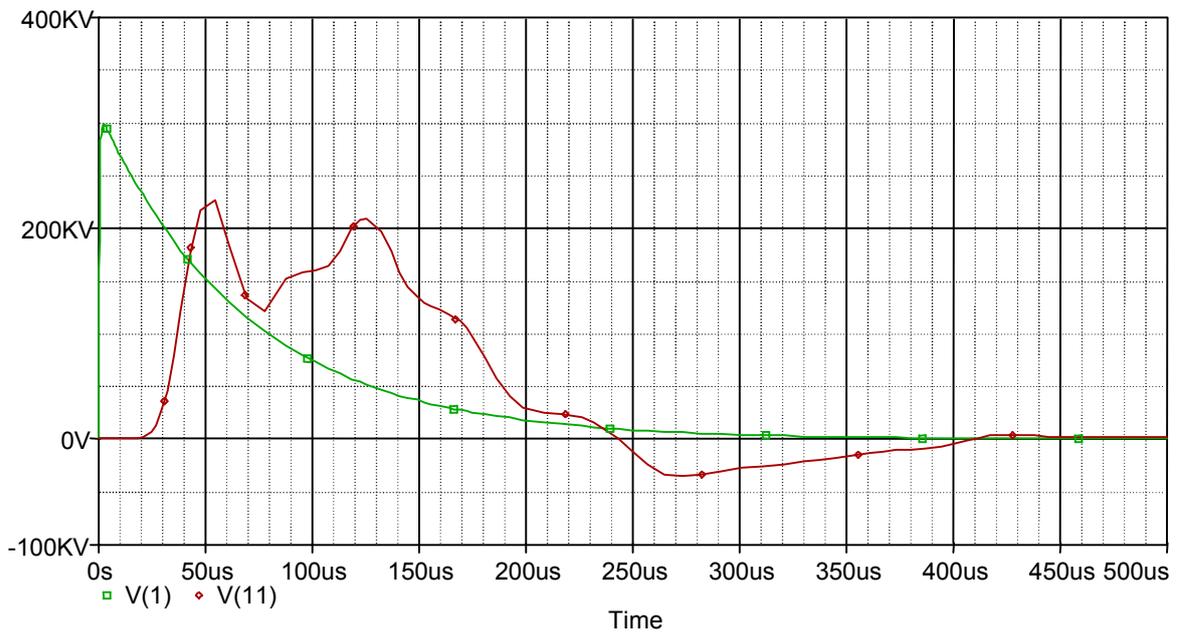


Figure C.4 : La tension au milieu de la ligne pour le modèle avec effet couronne (20000HZ).

Figure D: Les courbes des tensions à la fin de la ligne.

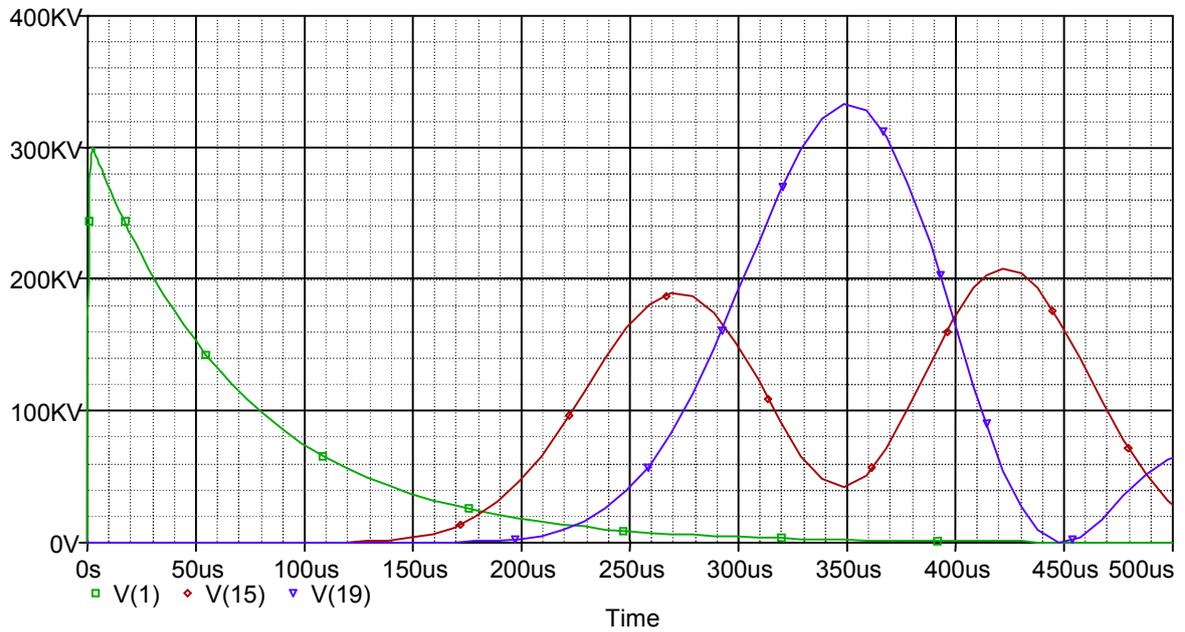


Figure D.1 : Les tensions à la fin de la ligne pour le modèle sans effet couronne (un conducteur par phase).

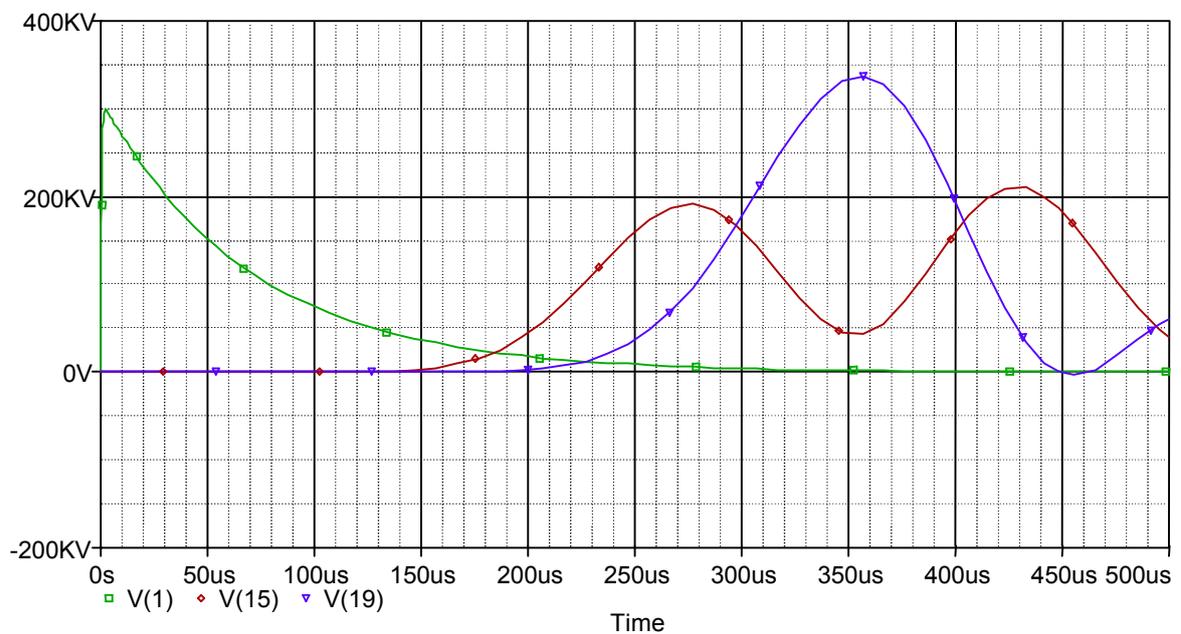


Figure D.2 : Les tensions à la fin de la ligne pour le modèle sans effet couronne (deux conducteurs par phase).

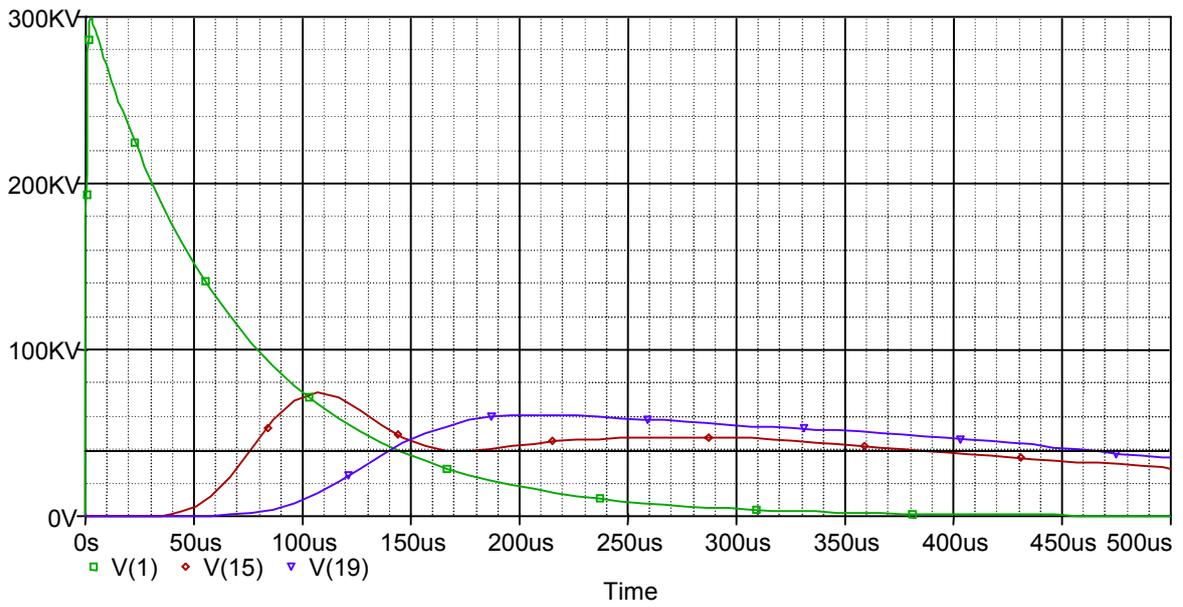


Figure D.3 : Les tensions à la fin de la ligne pour le modèle avec effet couronne (1000HZ).

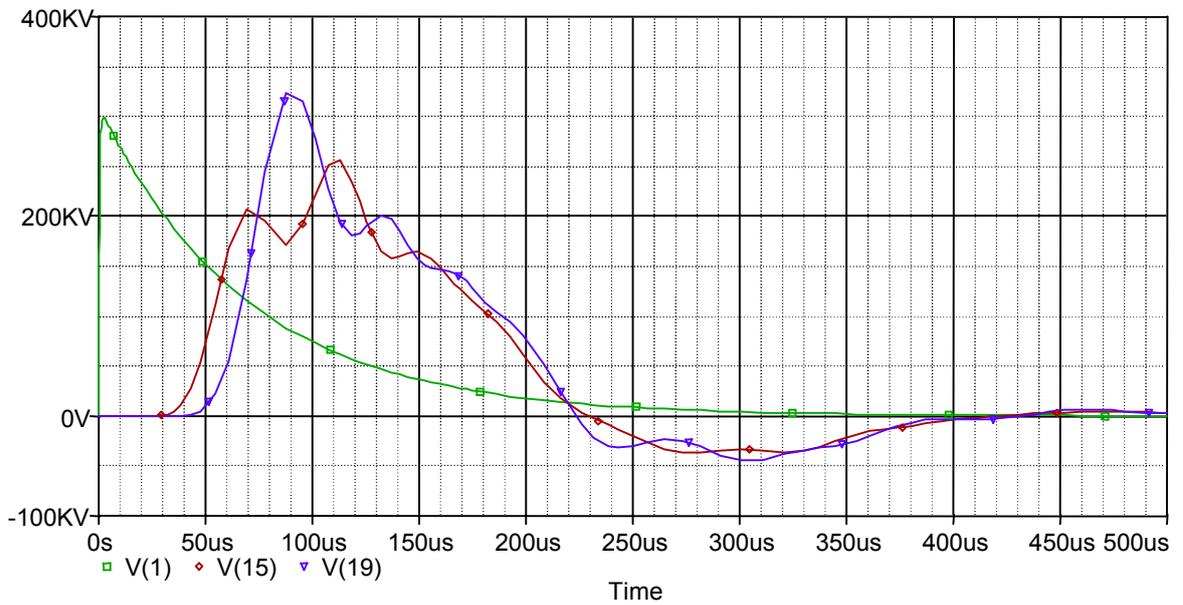


Figure D.4 : Les tensions à la fin de la ligne pour le modèle avec effet couronne (2000HZ).

Figure E: La superposition des tensions à la fin de la ligne.

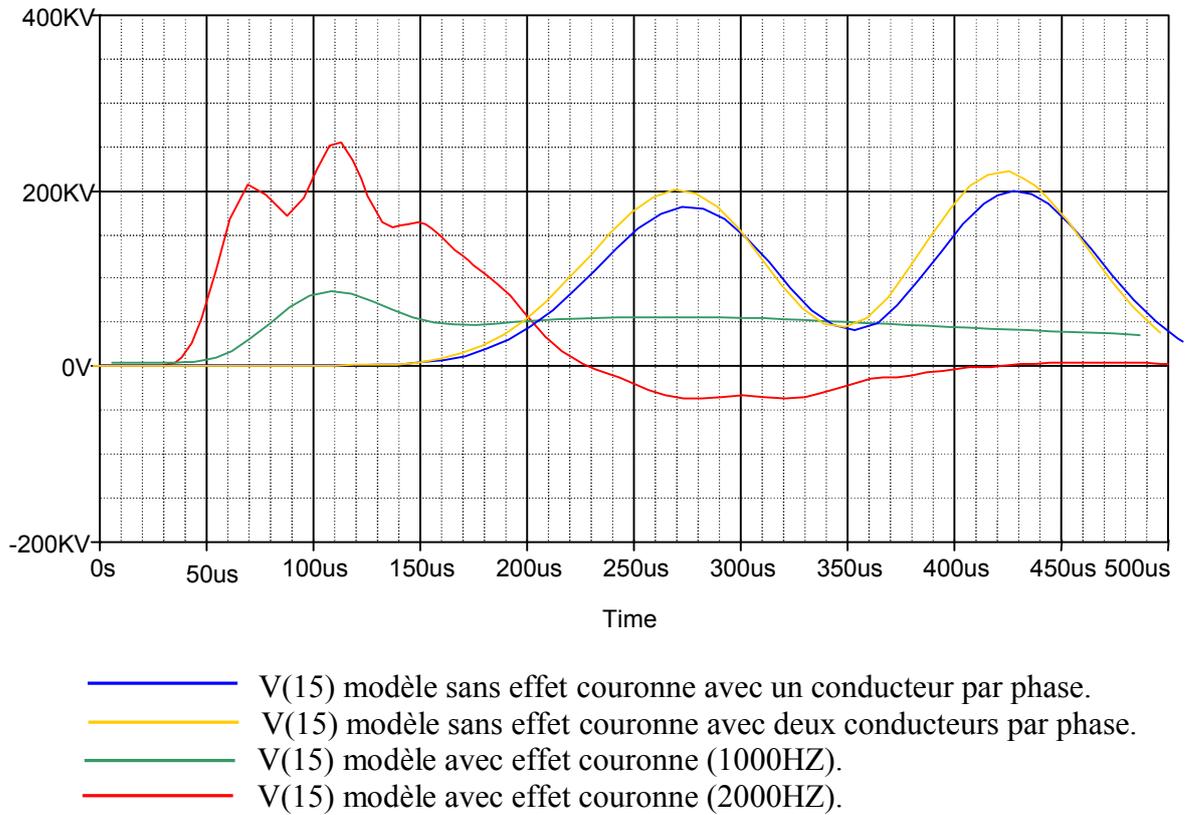


Figure F: Les courbes de fréquences des deux modèles avec effet

couronne et celle de la surtension appliquée

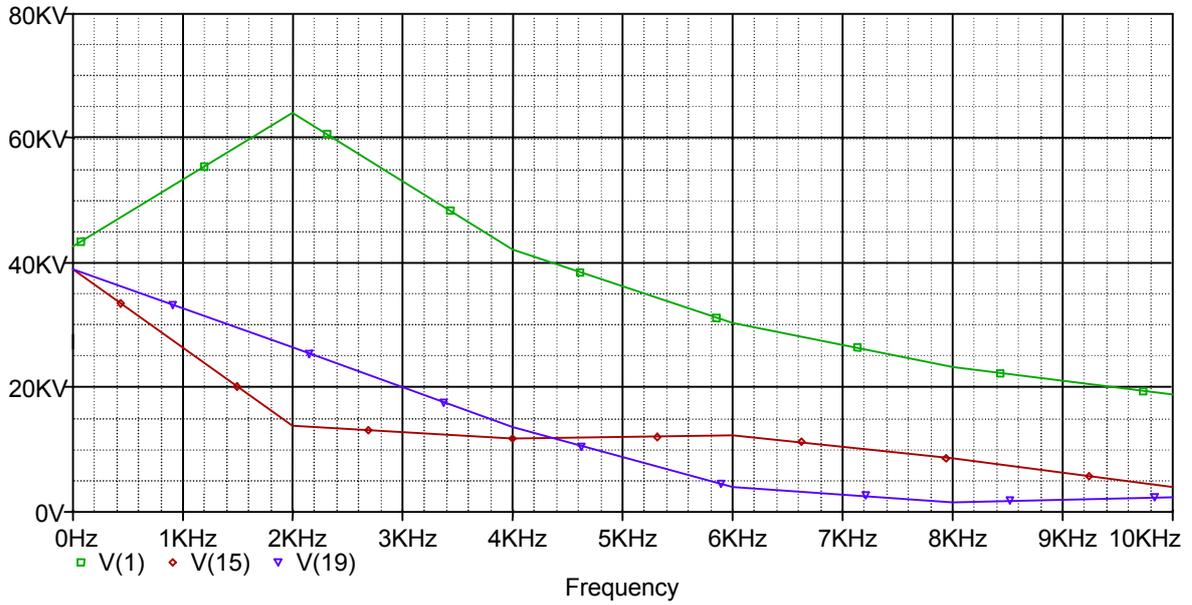


Figure F.1 : Modèle avec effet couronne (1000HZ).

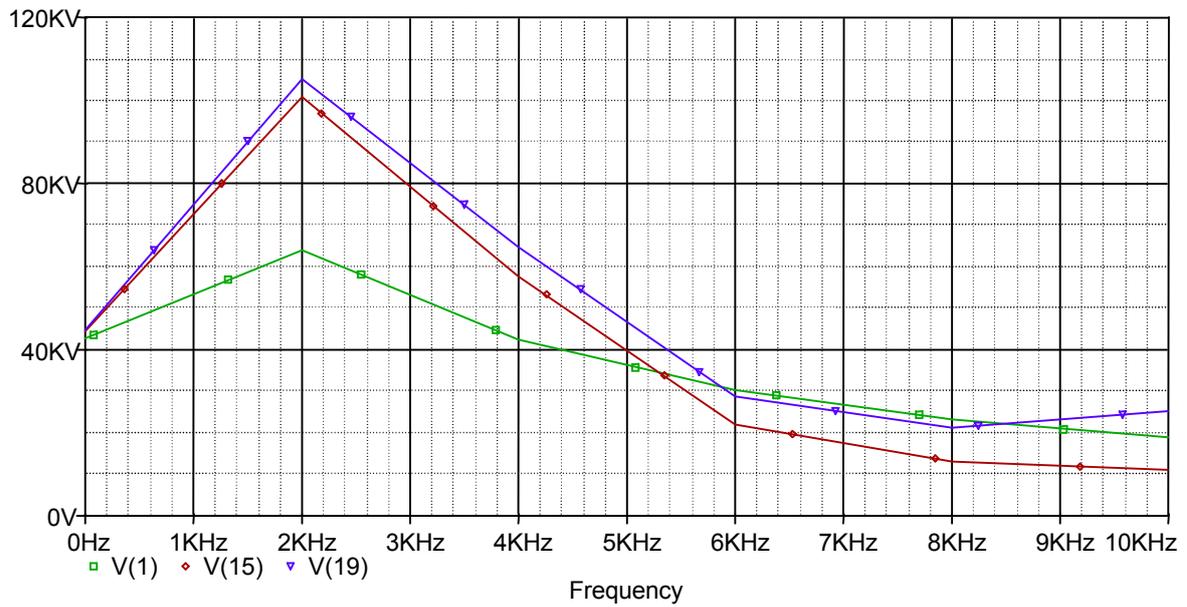
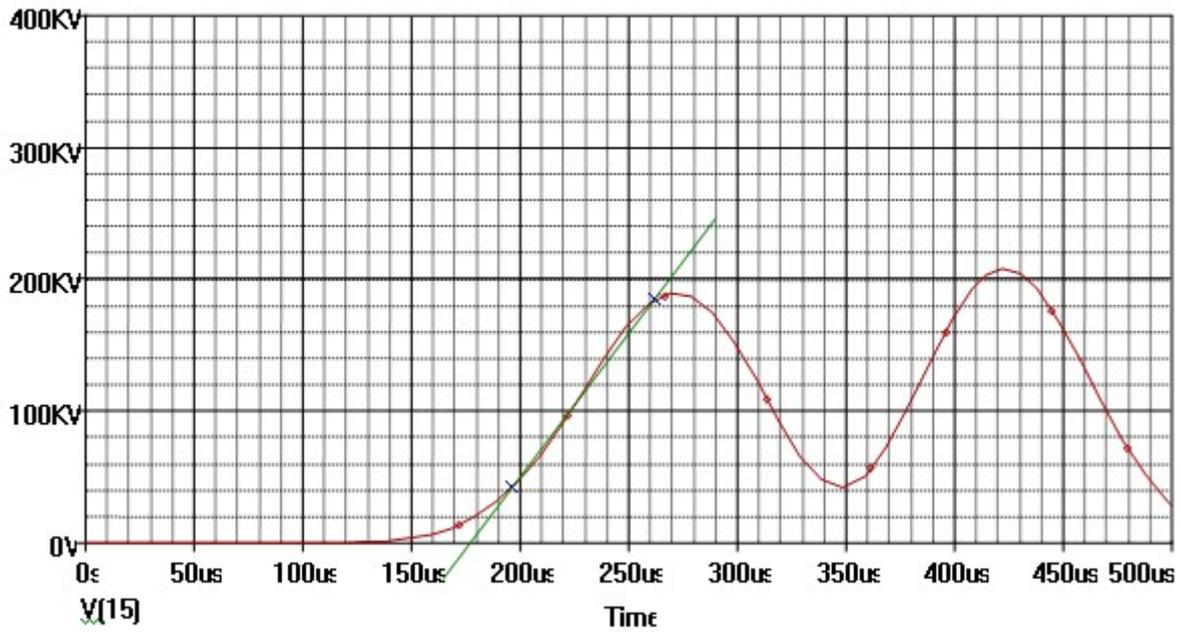


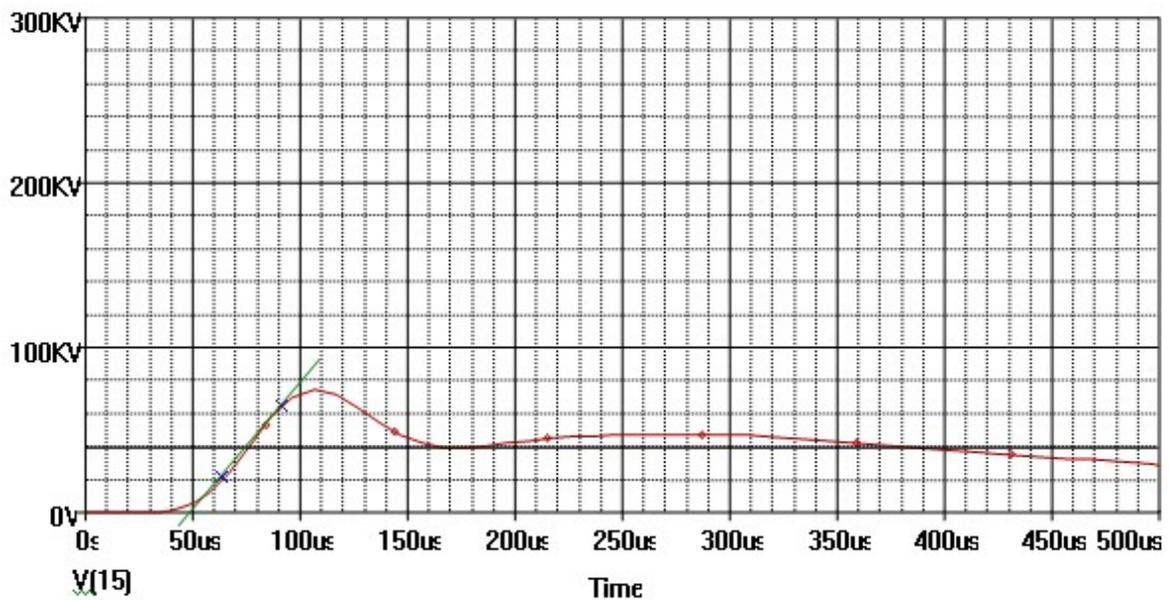
Figure F.2 : Modèle avec effet couronne (2000HZ).

Figure G : Calcul de la raideur pour les différents modèles à la fin de la ligne.



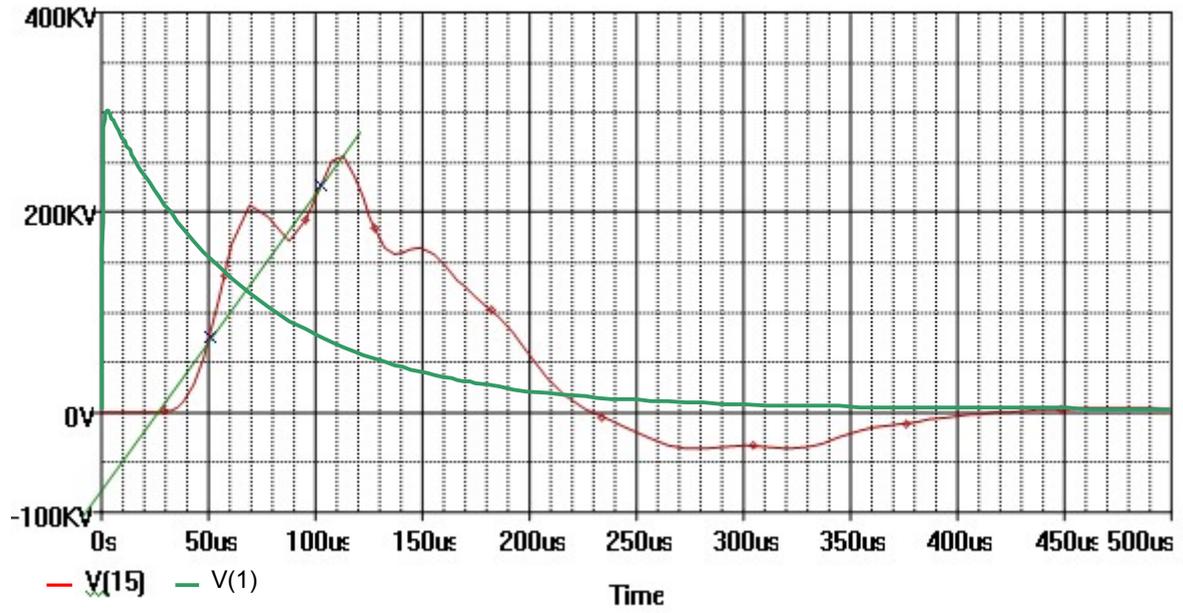
La raideur = 2,21 KV/µs.

Figure G.1 : Modèle sans effet couronne (un conducteur par phase).



La raideur = 1,48 KV/µs.

Figure G.2 : Modèle avec effet couronne (1000HZ)



La raideur =2,13 KV/ μ s.

Figure G.3 : Modèle avec effet couronne (2000HZ).

VI.3 Analyse et interprétation des résultats :

Lorsque l'onde de surtension se propageant le long d'un conducteur, arrive sur un point de changement d'impédance. On observe une réflexion et une transmission.

-Les figures A.1, A.2 et A.4 montrent que l'amplitude de la tension à la fin de la ligne (courbe U_{19}) est élevée par rapport à la surtension appliquée (courbe U_1), ceci est dû à la réflexion de l'onde de surtension à cause de l'ouverture de la ligne.

-D'après la figure A.3, en présence de l'effet couronne, modèle (1000HZ), l'amplitude de la tension à la fin de la ligne (courbe U_{19}) est diminué (60,8KV).

-On constat que pour chaque point de la ligne considérée, l'onde de surtension subit une déformation à cause des inductances et des capacités de la ligne selon les figures B, C et D.

-Les deux modèles adoptés sans effet couronne avec un seul et deux conducteurs sont quasi équivalents, et ceci est bien clair d'après les réponses des deux modèles représentés sur la figure E. Ce qui explique l'équivalence entre un modèle à un seul conducteur et une ligne sectionné et cette dernière à l'avantage de diminuer l'effet couronne d'une manière considérable.

-On remarque selon la figure F.2 que lors de la fréquence 2000HZ, on trouve les maximums des tensions (U_{15} , U_{19}), qui peut se traduire : le modèle avec effet couronne correspondant à 2000HZ représente bien le phénomène couronne sur la ligne considérée.

-Nous observons aussi que pour le modèle avec effet couronne (1000HZ), la surtension appliquée est amortie à cause de la présence de l'effet couronne, ainsi que l'amplitude qui diminue de 272KV (82%), et la raideur qui diminue de 3,02 KV/ μ s (82%).

-On conclue, que le modèle avec effet couronne (1000HZ) ne peut pas être validé avec la surtension impulsionnelle (1,2/50 μ s) considérée, cependant le modèle avec effet couronne (2000HZ) est plus proche de la réalité.

-La surtension est amortie lors de la prise en compte du phénomène couronne, modèle (2000HZ), la déformation de l'onde de surtension (diminution de l'amplitude de 15% par rapport à la surtension appliquée et la diminution de la raideur de 4 % par rapport au modèle sans effet couronne avec un seul conducteur par phase) est bien clair sur les figures G.1 et G.3.

Conclusion

D'après l'étude des différents modèles d'une ligne de 330KV sans et avec l'effet couronne, les résultats obtenues nous montre que ce dernier influe sur la déformation de l'onde de surtension (la diminution de la raideur et de l'amplitude) et le modèle validé est celui de la fréquence allant jusqu'à (2000HZ).

Conclusion générale

Plusieurs phénomènes apparaissant sur les lignes de transports d'énergie électrique et influent sur le bon déroulement ainsi qu'à la gestion de ce transport. L'effet couronne est l'un de ces phénomènes, il est à l'origine de plusieurs manifestations gênantes à savoir :

- ❖ Pertes par effet couronne.
- ❖ Perturbations radio télévision, téléphone (radio-électronique).
- ❖ Le bruit.
- ❖ Vibrations mécaniques.

En effet, le but de notre travail consiste de mettre en évidence l'influence de ce phénomène sur la déformation de l'onde de surtension lors de sa propagation le long de la ligne, pour cela nous avons adopté quatre modèles d'une ligne 330 KV sur laquelle l'effet couronne peut apparaître.

Les résultats obtenus lors de la simulation de ces quatre modèles, nous donne:

- Les deux modèles adoptés sans effet couronne avec un seul et deux conducteurs sont quasi équivalents malgré que ce dernier (ligne sectionnée) à l'avantage de diminuer l'effet couronne.
- La surtension appliquée ($1,2/50\mu s$) au modèle avec effet couronne (1000HZ) est amortie d'une manière considérable jusqu'à (82%), ce qui explique que ce modèle est loin de la réalité donc un tel modèle n'est pas validé pour cette surtension appliquée.
- Le modèle avec effet couronne (2000HZ) est plus proche de la réalité, car l'amplitude diminue de 15% par rapport à la surtension appliquée et aussi la raideur diminue de 4% par rapport au modèle sans effet couronne (un conducteur par phase), c'est-à-dire la diminution de l'amplitude et de la raideur pour 1 KM de la ligne considérée nous donne respectivement 0,2%, 0,06%.

En conclusion nous pouvons dire que l'effet couronne présente l'avantage d'amortir et de déformer l'onde de surtension lors de sa propagation le long de la ligne, et le modèle validé pour la surtension appliquée ($1,2/50\mu s$) est celui de la fréquence allant jusqu'à 2000HZ.

L [Km]	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81
U_i [KV]	299,4	220,1	215	209,1	202,8	197,3	193	207,9	215,8	332,8
T [μ s]	2,5	66,9	98,8	138,8	168,8	208,8	238,8	422,3	318,8	348,8

Annexe 1 : Tensions aux différents points de la ligne pour le modèle sans effet couronne (avec un conducteur par phase)

L [Km]	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81
U_i [KV]	299,4	220,6	214,3	209,6	203,7	199	193	207,9	210,4	337
T [μ s]	2,5	65,4	106,6	136,6	176,6	206,6	236,6	432,7	316,6	356,6

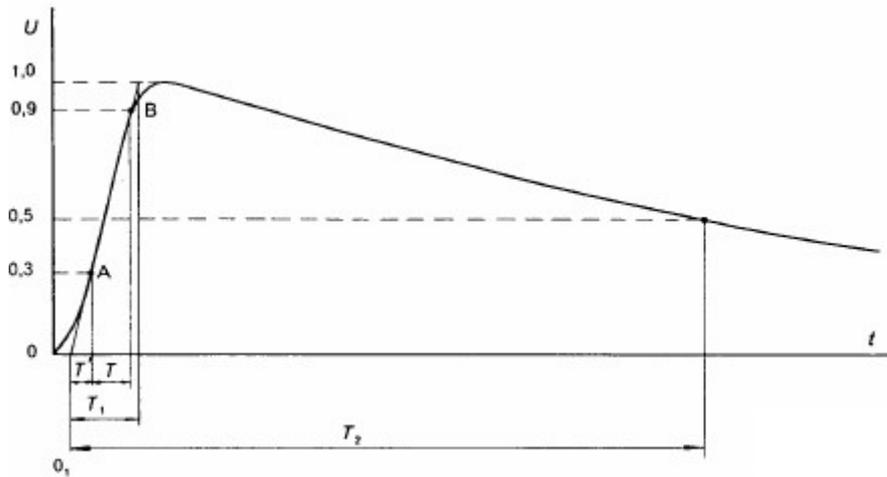
Annexe 2 : Tensions aux différents points de la ligne pour le modèle sans effet couronne (avec deux conducteurs par phase)

L [Km]	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81
U_i [KV]	299,4	205,6	168,6	144,5	131,4	112,4	94,9	74,3	53,2	60,8
T [μ s]	2,5	27,62	44,7	57,9	76,5	86,5	96,5	106,5	236,5	206,5

Annexe 3: Tensions aux différents points de la ligne pour le modèle avec effet couronne (1000HZ)

L [Km]	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81
U_i [KV]	299,4	284,2	269,2	252,7	239,9	226	223,9	255,9	256,8	322,6
T [μ s]	2,5	17	26,5	35,49	43,4	54,3	112,8	112,8	87,9	87,9

Annexe 4 : Tensions aux différents points de la ligne pour le modèle avec effet couronne (2000HZ)



Le point o_1 est l'origine conventionnelle de l'onde.

On peut calculer La raideur « S » du front par la formule suivante :

$$S = \frac{V_{\max}}{T_1}$$

Où V_{\max} : la tension maximale (valeur crête) ;

T_1 : temps de montée.

Annexe 5 : calcul de la raideur du front.

Bibliographie

[1] : www.hydroquebec.com.

[2] : **M.AGUET et M.LANOZ** « Traité d'électricité, Volume XXII (Haute tension) ». Edition Presses polytechnique et universitaire Romandes, Paris 2001,2004

[3] : **R.AUBER et C.REMON** « Installation électrique BT, choix et mise en œuvre des matériels ». Technique d'ingénieur, traité génie électrique, D5034, 2003.

[4] : **HANDALA** « cours de haute tension (Tec 424) » Université de Tizi-Ouzou, 2008

[5] : **P.FERRACCI** « La qualité de l'énergie électrique ». Edition octobre 2001.Cahier de charge n°199.

[6] : **D.FULCHIRON** « Surtension et coordination de l'isolement ». Edition décembre 1992. Cahier de charge n°151.

[7] : **B.DE METZ-NOBLAT** « La foudre et les installations électrique HT ». Edition juillet 1993. Cahier de charge n°168.

[8] : **M.GRACIET et J.PINEL** « Protection contre les perturbations, Origine des perturbations ».Technique d'ingénieur, D5170, 2003.

[9] : **J-F.AFFOLTER** « Haute tension » .Ecole d'ingénieurs du CANTON DE VAUD, département E+I, octobre 2000.

[10] : **C.GARY** « Effet couronne sur les réseaux électriques aériens ». Technique d'ingénieur, traité génie électrique, D4440, 2003.

[11] : **K.OULD LAMARA, F.OURLISSENE et B.SID MOHEND** « Etude théorique et expérimentale de la tension seuil d'apparition de l'effet couronne dans les lignes haute tension en faisceaux », mémoire d'ingénieur, Université de Tizi-Ouzou, 2000.

[12] : **B.BOURBIA et B.TLAMSI** « Contribution à l'étude de l'effet couronne par mesure de courant d'émission en tension alternative, mémoire d'ingénieur INES en électricité Tizi-Ouzou, 1988.

[13] : **G.LEROY** « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions ». Editions EYROLLES, Paris 1984.

[14] : « http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_corona »

[15] : **M.HAMEL** « Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par l'effet couronne ». thèse doctorat à l'université du Québec à Chicoutimi, Août 1991.

[16] : **C.GARY** « Choix et coordination des isolements technique des hautes tensions ». Edition EYROLLES, Paris 1977.

[17] : **G-N.ALELSANDROV, G-M.RIGEKOV et O-V CHERBATCHEV**
« Modélisation de la caractéristique de couronne de courant alternatif »
Recueil de l'institut polytechnique de Saint-Petersbourg, la série de la technique de la haute tension, 1958.