

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



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire
de MAGISTER En ELECTROTECHNIQUE

OPTION : Machines Electriques

Présenté par :

KADI Hocine

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique
de l'UMMTO (Tizi-Ouzou)

Thème

Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes
et les transformateurs de haute tension

Soutenu publiquement le / / devant le jury composé de :

Nacer Eddine BENAMROUCHE	Professeur	UMMTO	Président
Nahid MUFIDZADA	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Tahar OTMANE CHERIF	Maître de Conférence (A)	UMMTO	Examineur
Mustapha MOUDOUD	Maître de Conférence (B)	UMMTO	Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier très vivement Monsieur **Nahid MUFIDZADA** professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour la confiance qu'il m'a accordée en me proposant ce thème. Que toute ma gratitude lui soit exprimée pour m'avoir encadré et encouragé tout au long de ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur **Nacer Eddine BENAMROUCHE** Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury, en l'occurrence :

- **Tahar OTMANE CHERIF**, Maître de Conférence A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- **Mustapha MODOUD**, Maître de Conférence B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Que tous ceux et toutes celles qui m'ont soutenue et aidé à mener à bien ce travail, trouvent également ici l'expression de mes remerciements.

Table des matières

Introduction générale	1
 I. Généralités sur l'effet couronne	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de l'effet couronne.....	3
I.3 Mode d'émission des charges	4
I.3.1 Aigrettes négatives (impulsion de TRICHEL).....	4
I.3.2 Zone de conductivité d'HEMERSTEIN.....	5
I.3.3 Aigrettes positives.....	5
I.4 Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension).....	5
I.5 Mécanisme de la décharge couronne.....	7
I.6 Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne	7
I.6.1 Décharge positive.....	8
I.6.2 Décharge négative.....	9
I.7 Décharge en régime alternatif	10
I.7.1 Décharge couronne dans les lignes à courant alternatif.....	11
I.8 Tension d'apparition de l'effet couronne.....	14
I.8.1 Champ électrique critique (formule de Peek).....	14
I.8.2 Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne.....	15
I.9 Facteurs influençant la décharge couronne.....	16
I.9.1 Facteurs géométriques.....	16
I.9.2 Les facteurs physico-chimiques.....	19
I.9.3 Facteurs électriques.....	20
I.10 Phénomènes induits par la décharge couronne.....	21
I.10.1 Effets électromagnétiques.....	21
I.10.2 Effet chimique.....	22
I.11 Réduction de l'effet corona sur les lignes électriques.....	22
I.11.1 Utilisation de conducteurs de gros diamètre.....	22
I.11.2 Utilisation de faisceau de conducteurs.....	22
I.12 Applications utilisant la décharge couronne.....	25
I.12.1 Parafoudre.....	25
I.12.2 Neutralisation.....	25
I.12.3 Filtre électrostatique.....	26
I.12.4 Séparateur électrostatique.....	26

I.13 Avantages de la décharge couronne dans le réseau.....	27
I.14 Conclusion.....	28

II. Modélisation de l'effet couronne dans les lignes électriques

II.1 Introduction	29
II.2 Schéma du modèle de la couronne	30
II.3 Analyse théorique	31
II.3.1 Méthode analytique	32
II.3.2 Calcul des paramètres du modèle	32
II.3.3 Calcul des paramètres de la ligne.....	38
II.3.4 Comparaison des caractéristiques du modèle et de la ligne.....	38
II.3.5 Calcul des paramètres du système matriciel.....	39
II.3.6 Calcul des capacités du modèle.....	41
II.3.7 Calcul des résistances du modèle	42
II.4 Etude des paramètres de la ligne	43
II.5 Interprétations des résultats.....	46
II.6 Etude des paramètres du modèle	46
II.7 Interprétation des résultats.....	50
II.8 Conclusion	51

III. Modélisation et calcul des paramètres de la ligne et du transformateur, simulation et analyse

III.1 Introduction.....	51
III.2 Modélisation de la ligne et du transformateur sans tenir compte de l'effet couronne.....	51
III.2.1 Modélisation d'une ligne avec un conducteur par phase sans tenir compte de l'effet couronne	52
III.2.1.1 Détermination des paramètres de la ligne	53
III.2.1.1.1 Définition des paramètres	53
III.2.1.1.2 Caractéristiques de la ligne	53
III.2.1.1.3 Détermination de la résistance R_l d'un élément de la ligne.....	53
III.2.1.1.4 Détermination de l'inductance L_l d'un élément de la ligne	54

III.2.1.1.5 Détermination de la capacité C_1 d'un élément de la ligne	55
III.2.1.1.6 Détermination de la conductibilité active G_1 d'un élément de la ligne	55
III.2.2 Modélisation d'une ligne avec deux conducteurs par phase sans tenir compte de l'effet couronne	56
III.2.2.1 Détermination des paramètres de la ligne	56
III.2.2.1.1 Définition des paramètres	56
III.2.2.1.2 Caractéristiques de la ligne	57
III.2.2.1.3 Détermination de la résistance R'_1 d'un élément de la ligne	57
III.2.2.1.4 Détermination de l'inductance L'_1 d'un élément de la ligne	57
III.2.2.1.5 Détermination de la capacité C'_1 d'un élément de la ligne	58
III.2.2.1.6 Détermination de la conductibilité active G'_1 d'un élément de la ligne	59
III.2.3 Modélisation et calcul des paramètres du transformateur	59
III.2.3.1 Caractéristiques du transformateur.....	59
III.2.3.2 Caractéristiques géométriques	60
III.2.3.3 Détermination de la résistance du transformateur.....	60
III.2.3.4 Détermination de l'induction propre du transformateur	61
III.2.3.5 Détermination des capacités transversales	65
III.2.3.6 Détermination des capacités longitudinales.	65
III.2.3.7 Détermination des capacités des éléments du poste	66
III.3 Modélisation d'une ligne en tenant compte de l'effet couronne	67
III.3.1 Définition des paramètres	68
III.3.2 Caractéristiques du modèle	68
III.3.3 Calcul des capacités du modèle	68
III.3.3.1 Calcul des conductibilités actives du modèle	69
III.4 Simulation et interprétation des résultats	70
III. 4.1 Simulation des schémas équivalents	70
III. 4.2 Analyse et interprétation des résultats	81
Conclusion générale	83

Introduction générale

Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [1], [2]. Les premières études décrivant leur évolution et proposant des mécanismes de décharges datent du début du XX^{ème} siècle [3]. En effet, Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1915 avec les travaux effectués par F.W.PEEK [4], qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés [5], [15].

Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à des hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet de couronne autour des lignes de transport [12]. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces portés à des tensions suffisamment élevées ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, universellement employée de décharge couronne ou corona effect [8].

L'effet couronne est à l'origine d'interférences radiophoniques et télévisuelles, téléphoniques, de bruits audibles, de pertes électriques importantes et de vibrations mécaniques [6].

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes d'effet couronne et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène et son influence sur les surtensions des lignes de haute tension.

Les résultats de ces multiples études ont permis d'élaborer des modèles donnant les caractéristiques des décharges couronnes évoluant sur la surface des conducteurs et dans l'air environnant. Le paramètre principal régissant l'amplitude du phénomène couronne est le champ électrique à la surface du conducteur qui dépend du diamètre et de l'état de surface du conducteur, de la densité de l'air environnant, de la pluie, de la pollution,...etc. [30]

Toutefois, il faut préciser que la plus part de ces modèles sont empiriques ou semi empiriques. De nos jours d'autres modèles analytiques sont proposés [24], [38].

En plus du phénomène de couronne, le problème des surtensions dans les lignes a toujours été un sujet de controverses passionnées, due à plusieurs phénomènes de différentes origines, d'où la nécessité de protéger les installations et les appareils connectés au réseau y compris les éléments constituant le réseau électrique. Ces surtensions peuvent être perturbées et

déformées par l'effet couronne et l'effet de surface (effet de peau), ce qui complique le processus.

Ce présent mémoire s'inscrit dans le domaine de calcul des réseaux électriques qui a pour objectif la mise en évidence de l'influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension. Un modèle permettant la reproduction de l'effet couronne dans les lignes a été élaboré puis introduit dans le schéma équivalent de la ligne et simulé l'ensemble ligne-transformateur en considérant plusieurs cas, essentiellement, le cas de la ligne sans tenir compte de l'effet couronne et le cas où on considère cet effet. La simulation a été faite sous un logiciel spécialisé (P SPICE).

Afin de bien mener cette étude, nous avons subdivisé notre travail en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons définir l'effet couronne, donner certain cas de son apparition, citer les effets nuisible dus à son apparition et donner quelques définitions utiles de sorte a cerner le plus proche possible ce phénomène.

L'élaboration d'un modèle reproduisant l'effet couronne sur les lignes aériennes a partir d'un modèle déjà existant (proposé par l'université polytechnique de Saint Pétersbourg) et le teste de sa validité fera l'objet du deuxième chapitre.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous intégrerons le modèle de la couronne dans un ensemble ligne-transformateur dont tous les paramètres seront calculés et nous présenterons les différents résultats de simulation avec analyse et discussion.

Notre mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I:

Généralités sur l'effet couronne

I.1 Introduction

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

Il existe toujours dans certain nombre de paires d'ions positif -électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par la radioactivité naturelle. Lorsque ces électrons sont soumis à l'action d'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 heurtent (ionisation 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. Pour que celle-ci puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante.

Ce chapitre fait l'objet d'une recherche bibliographique sur le phénomène d'effet couronne et particulièrement dans les lignes de transport de l'énergie électrique.

I.2 Définition de l'effet couronne

L'effet couronne est lié à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs entourés par l'air, lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation de l'air et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [1], [9].

Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment fort, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge de corona. Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura

apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges de corona se produisent donc en général autour d'une électrode de rayon de courbure fort (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'une couche d'air ionisé, et une autre de rayon de courbure faible (une plaque métallique ou la terre).

I.3 Mode d'émission des charges

Lorsque le diamètre du fil croît, pour atteindre les dimensions des câbles utilisés sur les lignes de transport de l'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme ; il se discrétise en lieux localisés sous le nom général d'aigrettes.

La présence de certaines aspérités sur les conducteurs de HT qui provoquent des irrégularités de surface telle que le toronage, les dépôts de poussières végétale, de pollution industrielle et même de petits insectes où il existe un renforcement local du champ. Il se forme alors un système dissymétrique des électrodes pouvant être assimilés à un système pointe plan, et ont pour conséquence une réduction du niveau de la tension d'apparition des aigrettes.

On distingue de nombreux types de couronne par une pointe, mais l'étude de l'effet couronne des conducteurs cylindriques se limite pratiquement aux trois modes suivants :

I.3.1 Aigrettes négatives (impulsion de TRICHEL)

Lorsque le champ critique négatif est atteint au sommet de la pointe ou de l'aspérité, il apparaît un courant impulsionnel avec une fréquence de relaxation qui peut aller de 1kHz à 100 kHz.

En générale, les impulsions sont d'autant plus petites et serrées que la pointe est fine, leur largeur est de l'ordre de microseconde, leur amplitude est relativement faible (de l'ordre de milliampère) mais elles sont caractérisées par des fronts raides.

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 de type avalanche négative [27].

I.3.2 Zone de conductivité d'HEMERSTEIN

C'est un mode d'émission en polarité positive qui a la même propriété d'être continu. Il a lieu généralement en tensions alternatives, immédiatement au dessus du seuil positif. Sa participation est importante dans la formation des pertes couronne mais négligeable dans la formation des perturbations radioélectriques [27].

I.3.3 Aigrettes positives

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

Le courant d'émission prend la forme d'une série d'impulsion de grande amplitude ($\geq 100mA$). Visuellement, elles se présentent comme des aigrettes très lumineuses, dont la base est attachée à une aspérité de câble, et qui se propage d'une façon arborescente à des distances de plusieurs centimètres. Leur mécanisme de formation est de type Streamer. Ces aigrettes sont responsables du bruit radioélectrique des lignes à hautes tensions [27].

I.4 Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)

La figure I.1 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne [13], [14], [15], [16].

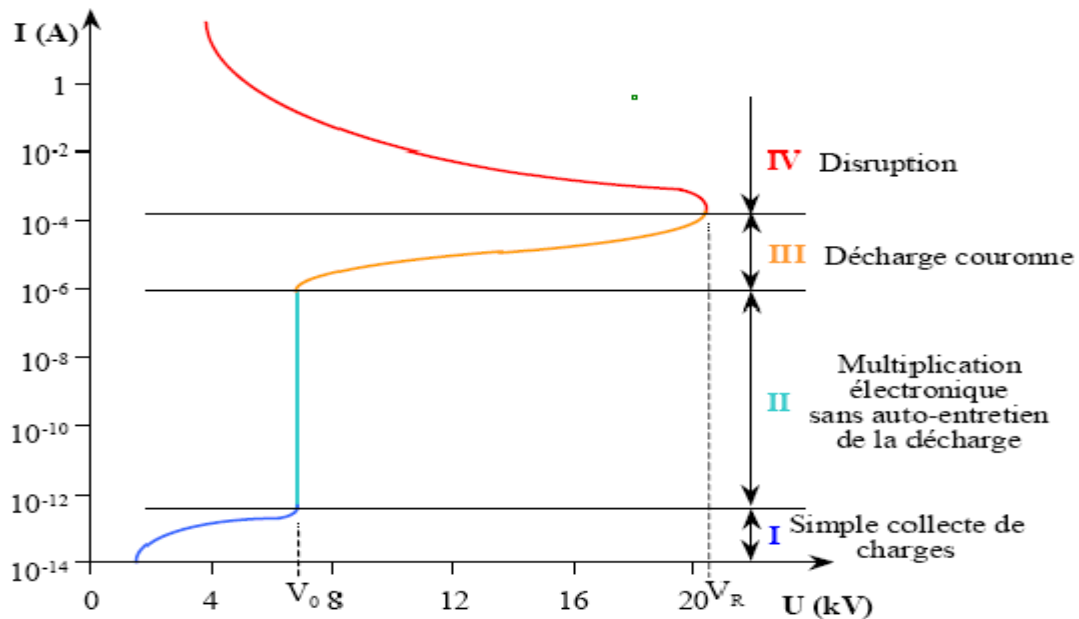


Figure I-1 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan)

- **le premier régime** : consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrodes.
- **Le second régime** : qui se produit à partir d'une tension seuil « V_0 », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.
- **Le troisième régime** : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs. La décharge est autoentretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui est responsable de la composante impulsionnelle du courant.
- **Le quatrième régime** : au-delà d'une tension appliquée « V_R », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit $\frac{E}{N}$

est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par apport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

I.5 Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [1], [17] :

-Le premier concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : c'est la décharge de Townsend.

-Le deuxième modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale : c'est la décharge par Streamers.

I.6 Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure [18]. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente. La décharge couronne négative se produit beaucoup plus qu'une décharge couronne positive par contre la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative [1], [19].

Pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance autour de la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Par contre en polarité positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense. De plus la décharge couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive. Mais la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité négative. Du point de vue de l'isolation, les décharges couronne positives sont plus néfastes que celles des couronnes négatives. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive [1].

De plus le champ seuil de l'effet couronne est légèrement plus petit en tension positive qu'en tension négative et les pertes sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive [20]. La décharge positive présente un grand intérêt dans la mesure où elle constitue la contrainte la plus sévère pour un intervalle du point de vue isolation. Les décharges négatives sont en effet de structure très complexe. Il faut pratiquement une tension d'environ deux fois plus forte que dans le cas de la décharge positive pour obtenir l'amorçage [21].

I.6.1 Décharge positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé à la Figure I-2. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs [39], est appelée région de « dérive ». (Figure I-2).

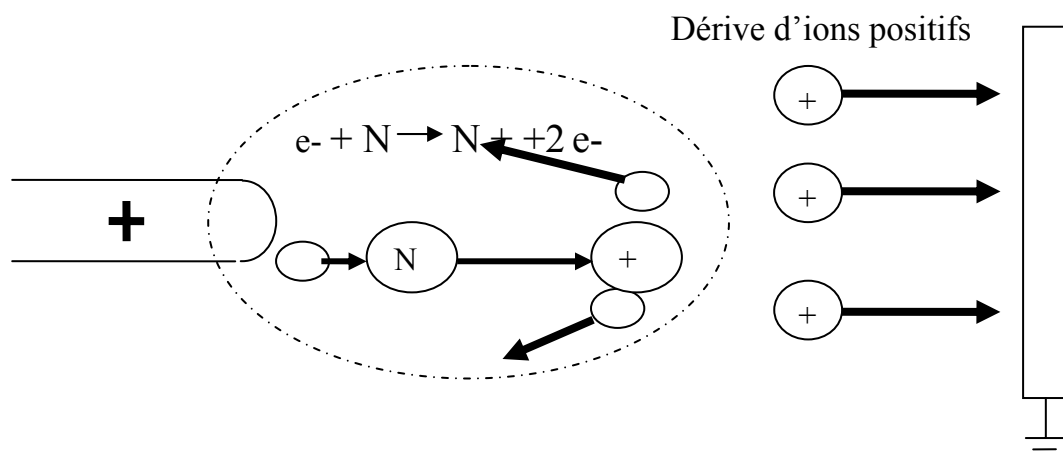


Figure I-2 : Descriptif de la décharge couronne positive.

Pour cette décharge, il y'a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode. D'après les modélisations de [40] la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de 2×10^5 m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires.

Goldman et al [41] indique qu'un courant positif de 50 μ A se décomposerait en un courant unipolaire continu de 20 μ A, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à 30 μ A percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz.

I.6.2 Décharge négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe.

Goldman et Sigmond [42] expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure I-3). Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers la plaque. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc.

Le courant de cette décharge est du à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

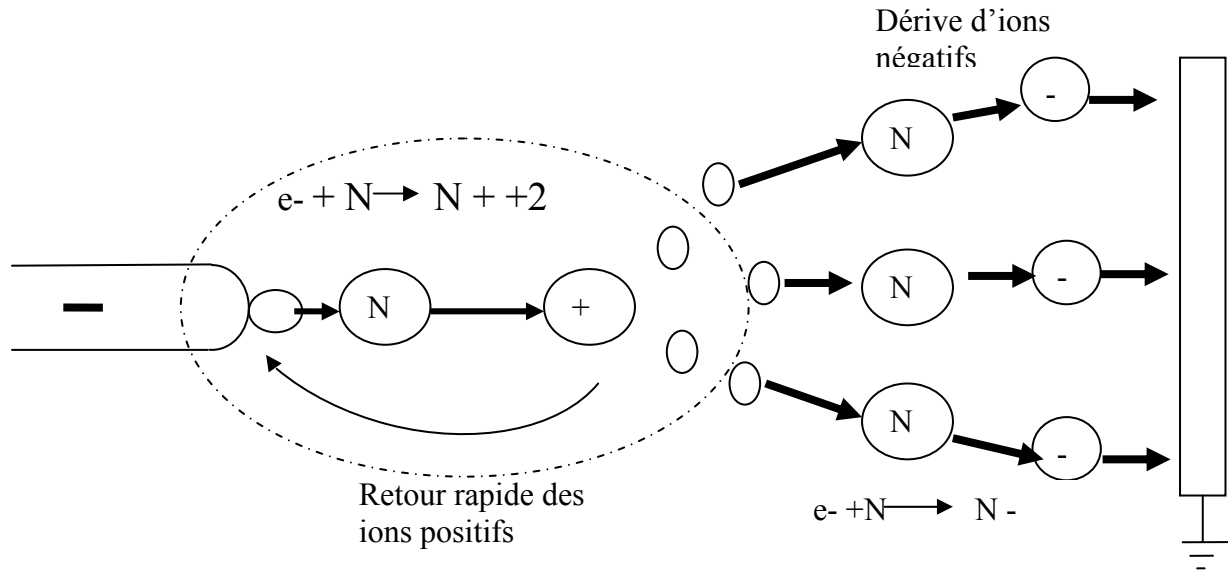


Figure I-3 : Descriptif de la décharge couronne négative

I.7 Décharge en régime alternatif

A la place d'un potentiel continu appliqué à la pointe, on peut également y appliquer un signal sinusoïdal à valeur moyenne nulle. Les alternances positives et négatives peuvent donner lieu à leurs modes de décharge respectifs. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées [7]. Ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance inter-électrodes d limites reliées par l'expression suivante [43] :

$$d_{\max} = \frac{\mu E_0}{\pi f} \Leftrightarrow f_{\max} = \frac{\mu E_0}{\pi d} \quad (\text{I.1})$$

Avec μ la mobilité des ions et E_0 l'amplitude du champ électrique. Si l'excitation est supérieure à cette fréquence $f_{\max}$, la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu.

Goldman et al [41] a identifié trois composantes du courant dans le cas d'une tension alternative :

- le courant capacitif dû à l'intervalle gazeux entre les électrodes qui jouent le rôle d'un condensateur,
- le courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée,
- le courant impulsif, somme des impulsions « streamers » pour les alternances positives et des impulsions de « Trichel » lors des alternances négatives.

On peut aussi utiliser des décharges couronnes pulsées. Elles consistent à appliquer des pics de forte tension mais pendant un très court instant ($\mu < 1$ ms) pour limiter le passage à l'arc. Dans ce cas, la valeur moyenne de la tension n'est pas nulle.

I.7.1 Décharge couronne dans les lignes à courant alternatif

Il est physiquement possible de voir apparaître, en tension alternative, tous les modes de décharges couronne en tension continue. Les alternances positives et négatives peuvent donner lieu à leurs modes de décharge respectifs. Cependant, il faut considérer le temps d'évacuation des charges d'espace formées pendant une alternance pour prévoir les modes qui seront possibles pendant l'alternance suivante. La distance entre les électrodes ainsi que le gradient de tension déterminent le temps de migration des ions et, par le fait même, leur effet sur les décharges. Si les ions n'ont pas le temps d'être évacués avant le changement de polarité de la tension appliquée, ceux-ci réduiront le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante [33]. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue. Le schéma de la figure I.4 illustre le comportement d'une décharge couronne dans le cas d'une ligne aérienne.

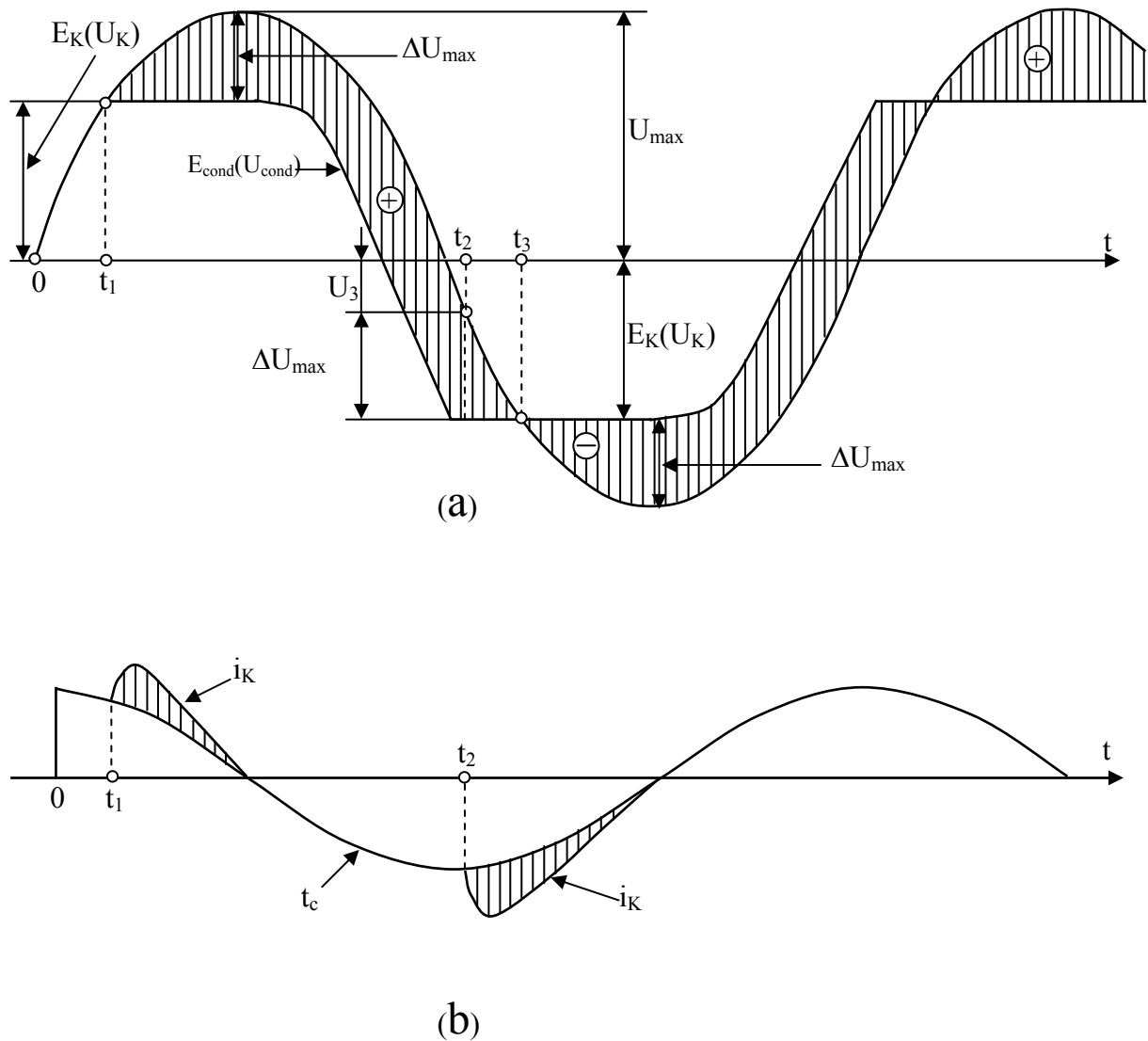


Figure I-4 : Tension et courant dans une ligne électrique à courant alternatif lors du phénomène couronne

La couronne sur le conducteur commence (s'allume) à l'instant t_1 lors de l'intensité du champ critique (E_k) sur le conducteur et de tension égale à:

$$U_{ph} = U_k \quad (\text{I.2})$$

Après avoir allumé la couronne autour du conducteur, les charges de même polarité que la polarité du conducteur s'accumulent. Ces charges arrêtent l'augmentation de l'intensité du champ sur la surface du conducteur qui reste égale à (E_k). Donc après allumage de la

couronne, les courbes de la tension et de l'intensité sont divergées, la tension continue à changer d'après la sinusoïde, mais l'intensité reste invariable.

$$U_{ph} = \frac{q_{cond}}{C} \quad \text{avec} \quad : \quad q_{cond} = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 r E_k$$

La différence de tension $\Delta U = U_{ph} - U_{cond}$ représentée sur la figure I.4, par la partie hachurée, est maintenue par l'accroissement des charges pour atteindre la valeur de ΔU_{max} et par élévation de la tension. Les charges totales sont données par la somme des charges sur le conducteur et dans l'espace $q_{tot} = q_{cond} + q_{esp}$. Les charges de l'espace environnant sont plus importantes que celles de la surface du conducteur ($q = U_{ph} \cdot C$) lors de la même tension en absence de couronne. Donc la couronne est accompagnée par l'augmentation des charges et des capacités de la ligne de la valeur usuelle (à une valeur qu'on nomme d'habitude capacité géométrique) jusqu'à une valeur équivalente donnée par la formule :

$$C_{eq} = \frac{q_{tot}}{U_{ph}} \quad (I.3)$$

Dès que la tension de source atteint sa valeur maximale, les charges totales q_{tot} commencent à diminuer, comme les charges d'espace sont lourdes, alors c'est celles du conducteur qui sont réduites, par conséquent on aura la diminution de l'intensité et l'extinction de la couronne

Lors de la période suivante, la couronne s'allume, dès que la valeur absolue de l'intensité du champ électrique sur le conducteur atteint la valeur E_k , à ce moment dans l'espace, il reste encore les charges de la polarité inverse de la demi-période précédente, par conséquent la valeur instantanée de la tension (U_3) sera considérablement petite que celle de la tension initiale, comme on voit à la figure I.4.a:

$$U_k = U_3 + \Delta U_{max} \quad (I.4)$$

Car $\Delta U_{max} = U_{max} - U_k$ alors : $U_3 = 2U_k - U_{max}$

Après l'allumage de la couronne lors de la demi période négative, on voit bien qu'autour du conducteur se créent des charges négatives qui compensent peu à peu les charges restantes de la demi-période précédente. A l'instant t_3 les charges positives sont compensées complètement. Dès que la tension atteint sa valeur maximale, les charges négatives

deviennent égales aux charges maximales dans la demi-période précédente. Puis le processus se répète.

Sur la figure I.4.b, on représente la courbe du courant des conducteurs couronnés de la ligne, en existence de couronne, ce courant dépasse la valeur de courant de capacité $i = C \frac{du}{dt}$ déterminée par la capacité géométrique de la ligne et par la tension de source.

I.8 Tension d'apparition de l'effet couronne

I.8.1 Champ électrique critique (formule de Peek)

Pour évaluer le seuil de l'effet couronne à la surface de l'anode, Peek, en s'inspirant de la théorie de Townsend proposée en 1920, a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant, et en tension alternative. Cette équation est appelée depuis la loi de Peek [1], [11], [32].

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (I.5)$$

Avec : $E=30$ kV/cm : Valeur de crête du champ électrique en conditions normales.

r : Rayon du conducteur en cm.

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

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

$m_1 = 0.9$: pour un conducteur normal.

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

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

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

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

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

δ : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (I.6)$$

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

Le terme $\left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right)$: est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur.

Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur [10]. Depuis de nombreuses formules empiriques et semi-empiriques du champ seuil de l'effet couronne ont été établies par divers auteurs. Dans tous les cas, l'expression du seuil E_s est donnée sous la forme générale suivante [6].

$$E_s = f \left(1 + \frac{G}{r_0^B} \right) \quad (1.7)$$

Avec :

E_s : Champ seuil d'apparition de la décharge.

G, B, f : Des constantes qui diffèrent d'un auteur à l'autre, elles dépendent de la géométrie de l'électrode et de la densité du gaz.

r_0^B : Rayon du conducteur de l'électrode active.

I.8.2 Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne

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

$$U_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) r \cdot \frac{2h}{r} \quad (I.8)$$

I.9 Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [22]. On distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physico-chimiques.
- Facteurs électriques.

I.9.1 Facteurs géométriques

I.9.1.a Rayon de la courbure

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

I.9.1.b Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure I.5.

Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes [23].

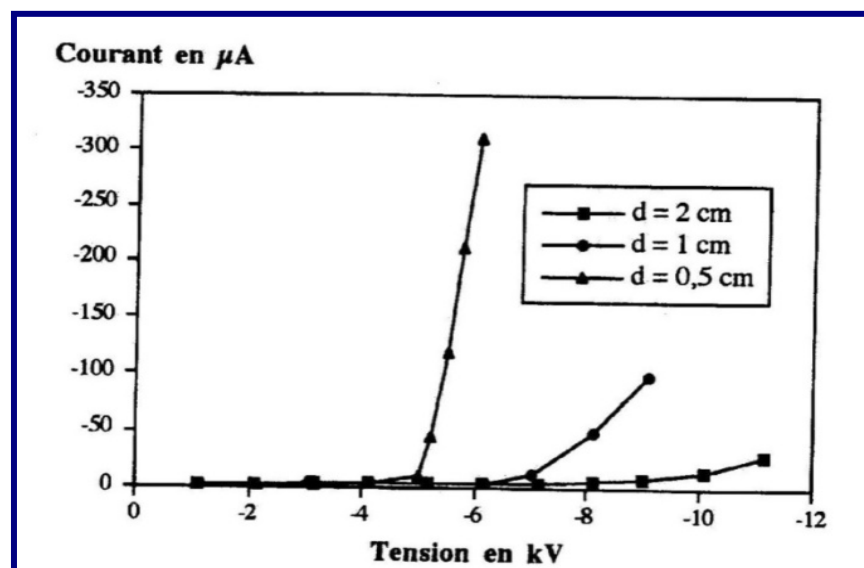


Figure I-5. Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [23]

I.9.1.c La nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la figure I-6.

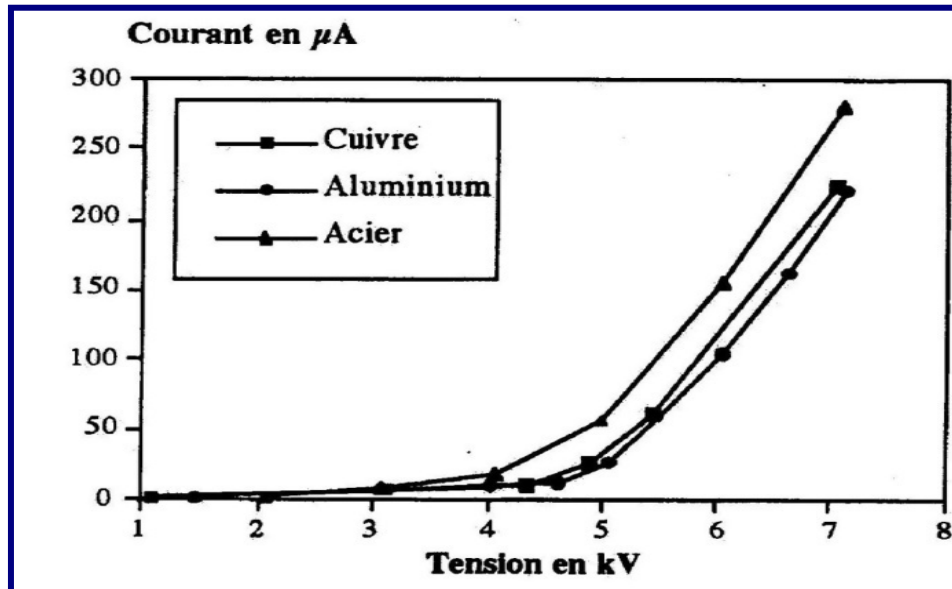


Figure I-6. Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes [23]

I.9.1.d La forme d'électrodes

Dans les systèmes d'électrodes utilisées, la distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode, avant amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes.

En champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan (figure I.7), la décharge couronne présente une zone de stabilité. Ce type de décharge est caractérisé par une tension seuil U de son apparition est une tension U_d de sa transition vers l'arc électrique.

Par contre, en champ homogène (figure I.8), dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit, la décharge couronne est inexistante et les tensions U et U_d sont confondues [24].

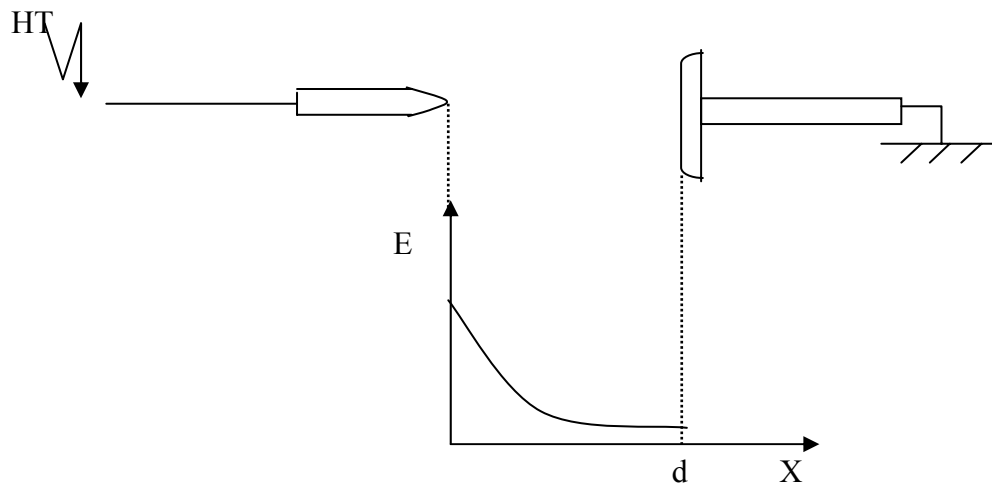


Figure I-7 distribution du champ dans un système pointe-plan

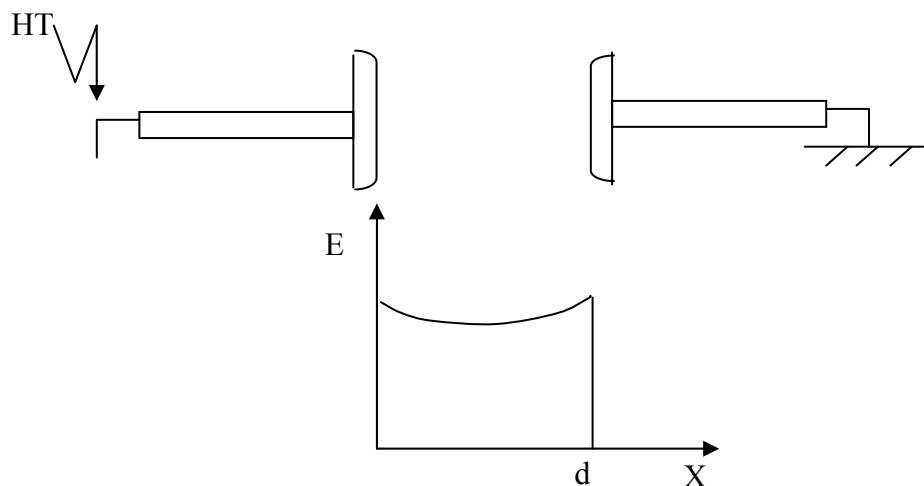


Figure I-8 distribution du champ dans un système plan-plan

I.9.1.e Etat de surface

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, voir 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 [28].

I.9.2 Les facteurs physico-chimiques

I.9.2.a La densité de l'air

Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

La tension U_d est proportionnelle à la densité de l'air :

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

U_{dn} : Tension de claquage dans les conditions normales.

$\frac{K_h}{\delta}$: Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

I.9.2.b La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [24].

I.9.2.c L'humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante, 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 (grande électronégativité) et d'autre part la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation [25]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [23]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

I.9.2.d La pression

A partir de la tension atmosphérique, l'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure I.9 montre l'effet de la pression sur la décharge.

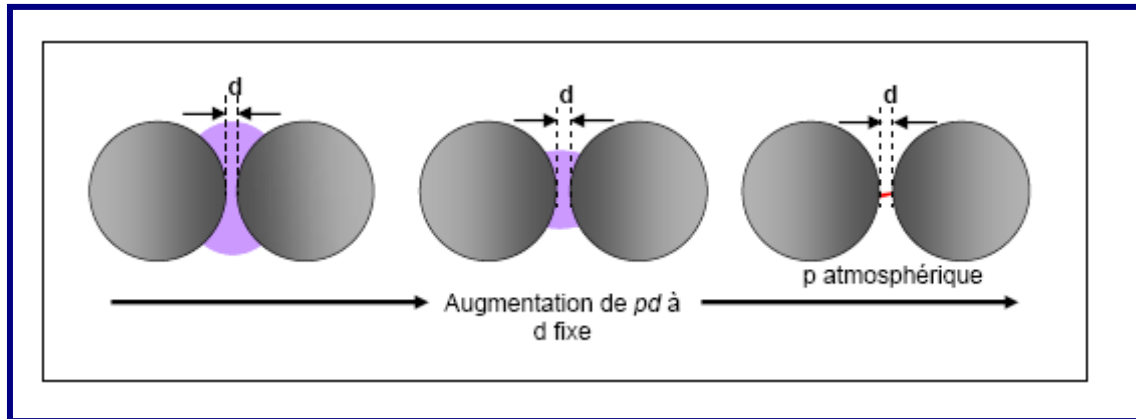


Figure I-9. Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [26]

I.9.3 Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [27].

I.10 Phénomènes induits par la décharge couronne

De nombreuses réactions autres que des réactions d'ionisation ont lieu au sein du gaz : dissociation, recombinaison, excitation moléculaire, excitation électronique...etc.

Les différentes espèces ainsi produites vont se distinguer par leur charge, leur masse, leur vitesse et leur énergie, mais aussi par leur nature et leur état d'énergie interne.

I.10.1 Effets électromagnétiques

Ces effets se traduisent par les perturbations radiophoniques et les pertes d'énergie dans les lignes de transport. Celui-ci est lié aux courants à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension au dessus de «1kV» peuvent être produites sur une très large bande de fréquence par :

- Les décharges par effet couronne dans l'air à la surface des conducteurs.
- Les décharges et claquages dans les régions à fortes contraintes des isolateurs.
- Les claquages au niveau de contacts défectueux.

Le phénomène d'effet couronne est à l'origine des pertes sur les lignes de transport d'énergie électrique, à cause du processus de l'ionisation par choc. Les charges des deux signes augmentent et celles de même polarité avec la polarité du conducteur s'éloignent de ce dernier. Le déplacement de ces charges sous l'action du champ électrique crée un courant de couronne qui est beaucoup plus grand que le courant de fuite dans les lignes. Les pertes liées à ce courant de couronne peuvent avoir des valeurs comparatives avec les pertes sur les résistances des lignes en cas des courants de service. [29], [30].

Les mesures effectuées sur les lignes expérimentales montrent que les pertes par effet couronne apparaissent à des tensions inférieures à la tension critique, celle qu'on appelle les pertes en régime localisé. Lors des tensions supérieures à la tension critique, les charges d'espace propagées sont en quantités suffisantes pour former une couronne autour du conducteur et dans ce cas on les appelle les pertes en régime généralisé.

I.10.2 Effet chimique

Nous assistons, suivant la polarité de la décharge, à la naissance de certaines espèces chimiques dérivées du gaz ambiant, par exemple dans le cas de l'air, à la naissance d'autres d'oxydes d'azote (NO , NO_2), de radicaux (HO) et (HO_2) ainsi que l'ozone (O_3) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières [1].

I.11 Réduction de l'effet couronne sur les lignes électriques

Les décharges de corona sont particulièrement à éviter dans:

- * Les installations de transmission électrique où elles provoquent une perte d'énergie, du bruit et de la distorsion des tensions et courants.
- * La plupart des équipements électriques : transformateurs, machines électriques (aussi bien générateurs que moteurs), etc. où elles endommagent progressivement les isolants amenant à une détérioration prématurée des équipements.
- * Toutes les situations nécessitant une tension importante mais où la production d'ozone doit être minimale.

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

I.11.1 Utilisation de conducteurs de gros diamètre

Pour limiter le champ électrique à la surface, cette mesure est souvent inefficace, et rarement économiquement justifiée, car l'effet de peau rend souvent inefficace le choix des conducteurs de grosse section.

I.11.2 Utilisation de faisceau de conducteurs

Une technique permettant de limiter l'effet couronne, consiste à remplacer un conducteur par plusieurs conducteurs maintenus à une distance fixe (par des entretoises), dont la section totale est égale à celle du conducteur unique. 2 conducteurs sont utilisés pour une tension de 400 kV, 3 conducteurs pour 500 kV. Cette technique trouve son application dans les lignes à très haute tension (supérieures à 300 kV). Par conséquent cet arrangement permet aussi de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles (une valeur de l'ordre de 17 KV/cm).

Le choix du nombre de conducteurs d'une ligne électrique se fait donc en fonction du courant à transiter, des conditions climatiques, des effets de peau Et corona, et bien-sûr des aspects économiques [4], [14], [27].

Un faisceau de conducteur est caractérisé par les grandeurs suivantes :

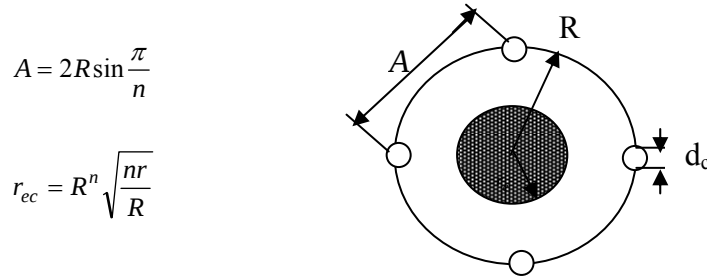


Figure I-10 : Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteur

r : rayon des conducteurs élémentaires [cm].

n : nombre de conducteurs élémentaires.

R : rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tout les conducteurs)[cm].

A : distance entre deux conducteurs consécutifs [cm].

r_{ec} : 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 avoisinant [cm].

Théoriquement, le champ à la surface du faisceau est donné de façon approchée :

$$E_{\alpha} = \left[1 - (n-1) \frac{2r_i}{R} \cos \alpha \right] E_m \quad (I.10)$$

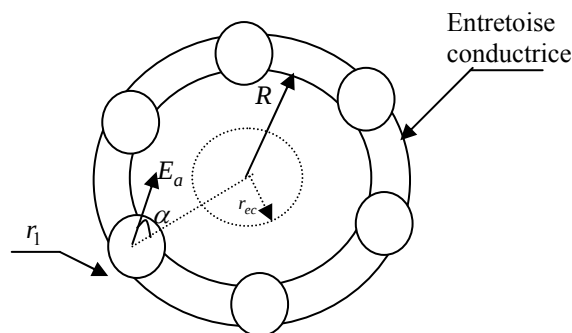


Figure I-11 : Une phase en faisceau

Avec :

$r_i(cm)$: rayon des conducteurs élémentaires.

n : nombre de conducteurs élémentaires du faisceau.

$R(cm)$: rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tout les conducteurs).

E_m : Valeur moyenne du champ électrique sur le contour du conducteur.

$$E_m = \frac{U}{nr_i \ln \frac{D_e}{r_{ec}}} \quad (I.11)$$

U : Tension du faisceau contre terre.

r_{ec} : rayon équivalent de l'ensemble des conducteurs du faisceau.

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

Le rayon équivalent de l'ensemble des conducteurs d'un faisceau est défini comme le rayon d'un conducteur unique qui, placé dans les mêmes conditions que le faisceau, aurait la même capacité par rapport au sol et autres conducteurs.

$$r_e = r_i \sqrt[n]{n \left(\frac{R}{2r_i} \right)^{n-1}} \quad (I.12)$$

Le champ électrique maximum sur le tour d'un conducteur en faisceau est donné par :

$$\frac{dE_\alpha}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \text{Deux solutions :}$$

-Maximum pour $\alpha = [2K + 1]\pi$

-Minimum pour $\alpha = 2K\pi$

$$E_{\alpha \max} = \left[1 + (n-1) \frac{2r_1}{R} \right] E_m \quad (I.13)$$

I.12 Applications utilisant la décharge couronne

I.12.1 Paratonnerre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre (Figure I-12).

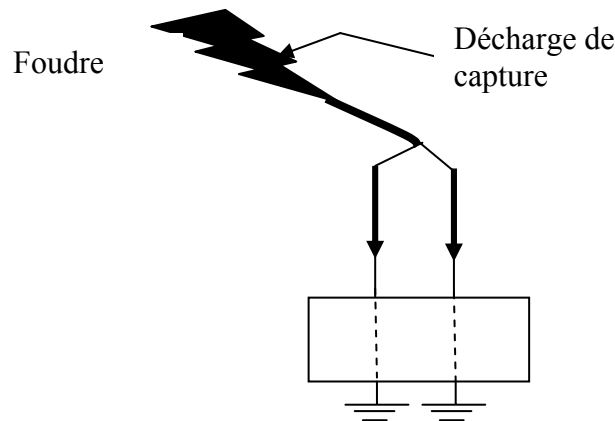


Figure I -12 : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre

I.12.2 Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produites par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

I.12.3 Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (Figure I- 13).

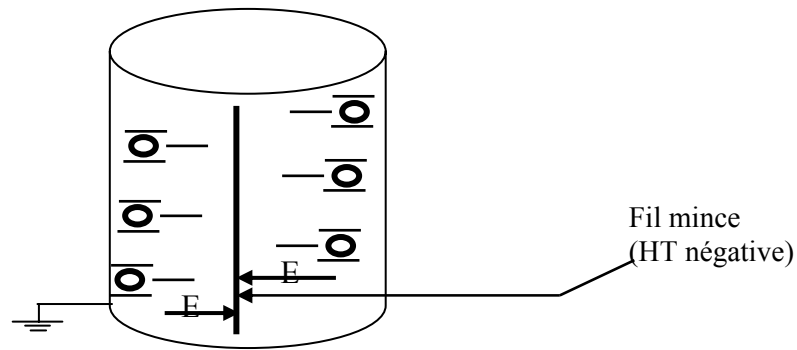


Figure I -13: Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique

I.12.4 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (Figure I- 14).

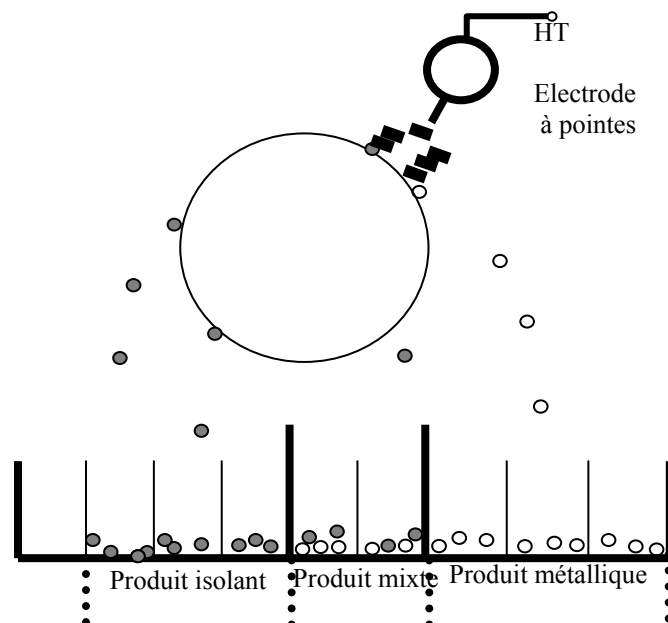


Figure I -14: Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique

Les décharges de corona ont de nombreuses autres applications commerciales et industrielles tel que.

- * Production d'ozone.
- * Traitement de surface de certains polymères.
- * Photocopieur.
- * Laser à azote.
- * Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud)
- * Coloration des véhicules.

I.13 Avantage de la décharge couronne dans le réseau

Quand le champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur. On dit que l'effet couronne est un régulateur de tension.

Donc la décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour du conducteur dans l'air environnant celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur tend à augmenter, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique. Des calculs récents effectués sur des modèles simulés d'une ligne de 220 kV soumise à une onde de choc 1,2/50 μ s simulant une surtension atmosphérique, l'atténuation de la surtension atteint 60% quand on s'éloigne de 7 km du point d'impact de cette surtension.

I.14 Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les différents aspects de l'effet couronne ainsi que le mécanisme de création de la décharge couronne dans le cas d'une décharge positive et négative et dans le cas des lignes de transport de l'énergie électrique aérienne (régime alternatif).

Dans le chapitre qui suit, nous allons élaborer un modèle permettant de reproduire le phénomène de la couronne dans les lignes aériennes.

Chapitre II:

Modélisation de l'effet couronne dans les lignes électriques

II.1 Introduction

Dès la naissance de l'électrotechnique des hautes tensions, des ingénieurs et des chercheurs, fut attirés par le curieux phénomène désigné par effet couronne, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre ces mécanismes et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène et son influence sur les surtensions dans les lignes de haute tension.

Les résultats de ces travaux ont permis d'élaborer des modèles donnant les caractéristiques des décharges couronnes. Toutefois, il faut préciser que la plus part de ces modèles sont empiriques.

Lors du couronnement des conducteurs des lignes, des capacités et des conductibilités variables sont additionnés sur les capacités et conductibilités géométriques de la ligne. Celles-ci dépendent de la valeur instantanée de la tension et de la fréquence des régimes transitoires dans les lignes de transport.

Comme modèle, nous utilisons le modèle proposé par l'université polytechnique de Saint-Petersbourg [34], en ajoutant la branche (g_0) qui caractérise l'éloignement des charges du conducteur lors de l'arrêt de l'effet couronne et une cinquième branche parallèle RC afin d'élargir la convergence des caractéristiques de la ligne avec celle du modèle étudié, (figure II.1).

II.2 Schéma du modèle de la couronne

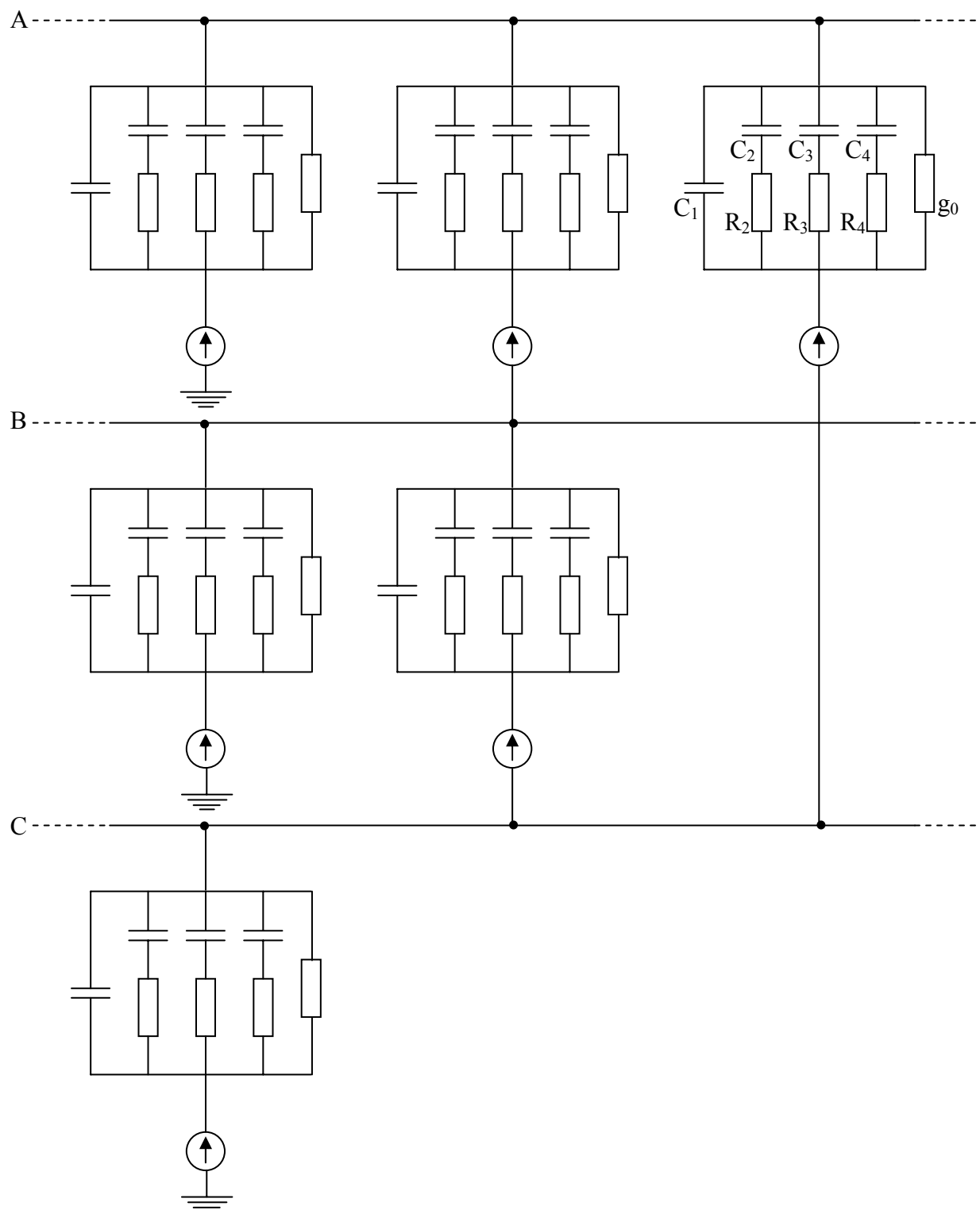


Figure II-1: schéma du modèle de l'effet couronne.

II.3 Analyse théorique

Les exigences importantes présentées aux modèles, sont les convergences des caractéristiques de fréquences conditionnées par la décharge couronne, des capacités et des conductibilités additionnelles lors de n'importe quelle valeur instantanée de tension dépassant la tension d'apparition de l'effet couronne.

Le schéma satisfaisant ces conditions comprend en général n branches parallèles de RC (résistances et capacités) avec les paramètres constituant la figure II.1. Les résultats de plusieurs travaux de recherche concernant ce problème montrent que la modélisation du phénomène d'effet couronne avec l'augmentation de nombre de branches parallèles, les convergences des caractéristiques de la ligne réelle et celle du modèle peuvent être assez proches, ce qui caractérise le haut niveau d'authenticité de la modélisation.

La condition de convergence des caractéristiques de la ligne et de modèle doit être considérée sous la forme suivante :

$$jw_k C_1 + \sum_{s=2} \left(R_s + \frac{1}{jw_k C_s} \right)^{-1} + g_0 = G(w_k) + jw_k C(w_k) \quad (\text{II.1})$$

Où

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

C_1, R_s, C_s, g_0 : Les paramètres du modèle.

C_1 : Capacité de la première branche.

R_s : Résistances des branches 2, 3 et 4.

C_s : Capacités des branches 2, 3 et 4.

g_0 : Conductibilité active de la 5^{ème} branche.

$G(w_k), C(w_k)$: Les paramètres de la ligne lors de la fréquence w_k déterminés d'après [37]

Le nombre minimal de branches du modèle et leurs paramètres correspondant, assurant la convergence des caractéristiques de fréquence avec une précision donnée dans un intervalle de variation des fréquences lors d'une valeur instantanée de la tension sur la ligne est déterminé d'après le nombre donnée de branche par voie de construction de n d'équations permettant de déterminer ces paramètres. Ces équations sont comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} jw_1 C_1 + \sum_{s=2}^n \left(R_s + \frac{1}{jw_1 C_s} \right)^{-1} + g_0 = G(w_1) + jw_1 C(w_1) \\ jw_2 C_1 + \sum_{s=2}^n \left(R_s + \frac{1}{jw_2 C_s} \right)^{-1} + g_0 = G(w_2) + jw_2 C(w_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ jw_n C_1 + \sum_{s=2}^n \left(R_s + \frac{1}{jw_n C_s} \right)^{-1} + g_0 = G(w_n) + jw_n C(w_n) \end{array} \right. \quad (II.2)$$

La solution du système d'équations (II.2) détermine les paramètres du modèle, dont la caractéristique de la fréquence dans les n nombre de nœuds correspondant aux valeurs des fréquences $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ coïncide avec une précision donnée par la caractéristique de fréquence de la ligne.

II.3.1 Méthode analytique

La méthode de calcul la plus efficace est la méthode analytique, cependant l'augmentation du nombre de branches, pour assurer une précision donnée dans un large intervalle de fréquences, complique la résolution du système d'équations. Par exemple pour déterminer les paramètres du modèle pour une valeur de $n > 6$, ce qui correspond aux processus orageux, on applique les méthodes d'itérations.

II.3.2 Calcul des paramètres du modèle

Considérons le calcul des paramètres du modèle représentés sur la figure III-1 et on cherche $C_1, C_2, C_3, C_4, R_2, R_3, R_4$ et g_0 de manière à satisfaire la relation suivante [37]:

$$jw_k C_1 + \sum_{s=2}^n \left(R_s + \frac{1}{jw_k C_s} \right)^{-1} + g_0 = G(w_k) + jw_k C(w_k) \quad (II.3)$$

$$(II.3) \Leftrightarrow jw_k C_1 + \frac{jw_k C_2}{jw_k C_2 R_2 + 1} + \frac{jw_k C_3}{jw_k C_3 R_3 + 1} + \frac{jw_k C_4}{jw_k C_4 R_4 + 1} + g_0 = G(w_k) + jw_k C(w_k)$$

On pose : $X_2=C_2R_2$, $X_3=C_3R_3$ et $X_4=C_4R_4$

$$(II.3) \Leftrightarrow jw_k C_1 + \frac{jw_k C_2}{jw_k X_2 + 1} + \frac{jw_k C_3}{jw_k X_3 + 1} + \frac{jw_k C_4}{jw_k X_4 + 1} + g_0 = G(w_k) + jw_k C(w_k)$$

On cherche le dénominateur commun :

$$(jw_k X_2 + 1) + (jw_k X_3 + 1) = 1 - w_k^2 X_2 X_3 + jw_k (X_2 + X_3)$$

$$(jw_k X_2 + 1) + (jw_k X_4 + 1) = 1 - w_k^2 X_2 X_4 + jw_k (X_2 + X_4)$$

$$(jw_k X_3 + 1) + (jw_k X_4 + 1) = 1 - w_k^2 X_3 X_4 + jw_k (X_3 + X_4)$$

$$\begin{cases} (jw_k X_2 + 1) + (jw_k X_3 + 1) + (jw_k X_4 + 1) = \\ 1 + jw_k (X_2 + X_3 + X_4) - w_k^2 (X_2 X_3 + X_2 X_4 + X_3 X_4) - jw_k^3 (X_2 X_3 X_4) \end{cases} \quad (II.4)$$

On pose :

$$Y_1 = X_2 + X_3 + X_4 \quad (II.5)$$

$$Y_2 = X_2 X_3 + X_2 X_4 + X_3 X_4 \quad (II.6)$$

$$Y_3 = X_2 X_3 X_4 \quad (II.7)$$

Alors ; X_2, X_3 et X_4 sont les racines de l'équation : $X^3 - Y_1 X^2 + Y_2 X - Y_3 = 0$

En remplaçant dans l'équation (II.4), on aura

$$(jw_k X_2 + 1) + (jw_k X_3 + 1) + (jw_k X_4 + 1) = 1 + jw_k Y_1 - w_k^2 Y_2 - jw_k^3 Y_3 \quad (II.8)$$

L'équation (II.3) devient lors :

$$\begin{cases} jw_k C_2 [1 - w_k^2 X_3 X_4 + jw_k (X_3 + X_4)] + jw_k C_3 [1 - w_k^2 X_3 X_4 + jw_k (X_3 + X_4)] + \\ jw_k C_4 [1 - w_k^2 X_3 X_4 + jw_k (X_3 + X_4)] = [(G(w_k) - g_0) + jw_k (C(w_k) + C_1)] [1 - w_k^2 Y_2 + jw_k (Y_1 + w_k^2 Y_3)] \end{cases} \quad (II.9)$$

Ce qui revient à écrire :

$$\begin{aligned} & -w_k^2 [C_2 (X_3 + X_4) + C_3 (X_2 + X_4) + C_4 (X_2 + X_3)] + jw_k [C_2 + C_3 + C_4 - w_k^2 (C_2 X_3 X_4 + C_3 X_2 X_4 + C_4 X_2 X_3)] \\ & = (G(w_k) - g_0) (1 - w_k^2 Y_2) - w_k^2 (C(w_k) - C_1) (Y_1 - w_k^2 Y_3) + jw_k [(G(w_k) - g_0) (Y_1 - w_k^2 Y_3) + (C(w_k) - C_1) (1 - w_k^2 Y_2)] \end{aligned} \quad (II.10)$$

En posant :

$$\begin{cases} \alpha = C_2(X_3 + X_4) + C_3(X_2 + X_4) + C_4(X_2 + X_3) \\ \beta = C_2 + C_3 + C_4 \\ \gamma = C_2X_3X_4 + C_3X_2X_4 + C_4X_2X_3 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Et en remplaçant dans l'équation (II.10), on aura :

$$\begin{aligned} -w_k^2\alpha + jw_k(\beta - w_k^2\gamma) = & -w_k^2C(w_k)y_1 + C_1y_1w_k^2 - w_k^2G(w_k)y_2 + g_0w_k^2y_2 + w_k^4C(w)y_3 - w_k^4C_1y_3 + \\ & G(w_k) - g_0 + jw_k[G(w_k)y_1 - g_0y_1 - w_k^2C(w_k)y_2 + w_k^2C_1y_2 - w_k^2G(w_k)y_3 + g_0w_k^2y_3 + C(w_k) - C_1] \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Par identification des parties réelles et imaginaires, on aura :

$$\begin{cases} -w_k^2\alpha = -w_k^2[C(w_k)y_1 + G(w_k)y_2 - w_k^2C(w_k)y_3 - w_k^{-2}G(w_k)] + w_k^2[C_1y_1 + g_0y_2 - w_k^2C_1y_3 - w_k^{-2}g_0] \\ \beta - w_k^2\gamma = G(w_k)y_1 - w_k^2C(w_k)y_2 - w_k^2G(w_k)y_3 + [-g_0y_1 - w_k^2C_1y_2 + g_0w_k^2y_3 + C(w_k) - C_1] \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

On pose :

$$\begin{cases} N_1 = C_1Y_3 \\ N_2 = \alpha + C_1Y_1 + g_0Y_2 \\ N_3 = \beta + g_0 + C_1 \\ N_4 = \gamma + C_1Y_2 + g_0Y_3 \\ Y_4 = g_0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

On aura :

$$\begin{cases} w_k^2N_1 - N_2 = -C(w_k)Y_1 - G(w_k)Y_2 + w_k^2C(w_k)Y_3 + w_k^{-2}G(w_k) - w_k^{-2}Y_4 \\ N_3 - w_k^2N_4 = G(w_k)Y_1 - w_k^2C(w_k)Y_2 + w_k^2G(w_k)Y_3 + C(w_k) \end{cases} \quad \begin{aligned} & (\text{II.15.a}) \\ & (\text{II.15.b}) \end{aligned}$$

Pour $k = 1, 2, 3, 4, 5$, on aura à partir de l'équation (II.15a) :

$$w_1^2N_1 - N_2 = w_1^{-2}G(w_1) - C(w_1)Y_1 - G(w_1)Y_2 + w_1^2C(w_1)Y_3 - w_1^{-2}Y_4 \quad (\text{II.16.a})$$

$$w_2^2N_1 - N_2 = w_2^{-2}G(w_2) - C(w_2)Y_1 - G(w_2)Y_2 + w_2^2C(w_2)Y_3 - w_2^{-2}Y_4 \quad (\text{II.16.b})$$

$$w_3^2N_1 - N_2 = w_3^{-2}G(w_3) - C(w_3)Y_1 - G(w_3)Y_2 + w_3^2C(w_3)Y_3 - w_3^{-2}Y_4 \quad (\text{II.16.c})$$

$$w_4^2N_1 - N_2 = w_4^{-2}G(w_4) - C(w_4)Y_1 - G(w_4)Y_2 + w_4^2C(w_4)Y_3 - w_4^{-2}Y_4 \quad (\text{II.16.d})$$

$$w_5^2N_1 - N_2 = w_5^{-2}G(w_5) - C(w_5)Y_1 - G(w_5)Y_2 + w_5^2C(w_5)Y_3 - w_5^{-2}Y_4 \quad (\text{II.16.e})$$

A partir de l'équation (II.15.b), on aura :

$$-w_1^2 N_4 - N_3 = C(w_1) + G(w_1)Y_1 - w_1^2 C(w_1)Y_2 - w_1^2 G(w_1)Y_3 \quad (\text{II.17.a})$$

$$-w_2^2 N_4 - N_3 = C(w_2) + G(w_2)Y_1 - w_2^2 C(w_2)Y_2 - w_2^2 G(w_2)Y_3 \quad (\text{II.17.b})$$

$$-w_3^2 N_4 - N_3 = C(w_3) + G(w_3)Y_1 - w_3^2 C(w_3)Y_2 - w_3^2 G(w_3)Y_3 \quad (\text{II.17.c})$$

$$-w_4^2 N_4 - N_3 = C(w_4) + G(w_4)Y_1 - w_4^2 C(w_4)Y_2 - w_4^2 G(w_4)Y_3 \quad (\text{II.17.d})$$

$$-w_5^2 N_4 - N_3 = C(w_5) - G(w_5)Y_1 - w_5^2 C(w_5)Y_2 + w_5^2 G(w_5)Y_3 \quad (\text{II.17.e})$$

La soustraction de l'équation (II.16.b) respectivement de (II.16.a) et (II.16.c) et en faisant leur rapport, permet d'aboutir à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_2^2 - w_1^2}{w_2^2 - w_3^2} = \frac{[w_2^{-2}G(w_2) - w_1^{-2}G(w_1)]}{[w_2^{-2}G(w_2) - w_3^{-2}G(w_3)]} + \\ \frac{[C(w_1) - C(w_2)]Y_1 + [G(w_1) - G(w_2)]Y_2 + [w_2^2 C(w_2) - w_1^2 C(w_1)]Y_3 + (w_1^{-2} - w_2^{-2})Y_4}{[C(w_3) - C(w_2)]Y_1 + [G(w_3) - G(w_2)]Y_2 + [w_2^2 C(w_2) - w_3^2 C(w_3)]Y_3 + (w_3^{-2} - w_2^{-2})Y_4} \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

La soustraction de l'équation (II.16.b) respectivement de (II.16.d) et (II.16.e) et en faisant leur rapport, permet d'aboutir à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_2^2 - w_4^2}{w_2^2 - w_5^2} = \frac{[w_2^{-2}G(w_2) - w_4^{-2}G(w_4)]}{[w_2^{-2}G(w_2) - w_5^{-2}G(w_5)]} + \\ \frac{[C(w_4) - C(w_2)]Y_1 + [G(w_4) - G(w_2)]Y_2 + [w_2^2 C(w_2) - w_4^2 C(w_4)]Y_3 + (w_4^{-2} - w_2^{-2})Y_4}{[C(w_5) - C(w_2)]Y_1 + [G(w_5) - G(w_2)]Y_2 + [w_2^2 C(w_2) - w_5^2 C(w_5)]Y_3 + (w_5^{-2} - w_2^{-2})Y_4} \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

La soustraction de l'équation (II.17.b) respectivement (II.17.a) et (II.17.c) et en faisant leur rapport, permet d'aboutir à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_1^2 - w_2^2}{w_3^2 - w_2^2} = \frac{[C(w_2) - C(w_1)]}{[C(w_2) - C(w_3)]} + \\ \frac{[G(w_2) - G(w_1)]Y_1 + [w_1^2 C(w_1) - w_2^2 C(w_2)]Y_2 + [w_1^2 G(w_1) - w_2^2 G(w_2)]Y_3}{[G(w_2) - G(w_3)]Y_1 + [w_3^2 C(w_3) - w_2^2 C(w_2)]Y_2 + [w_3^2 G(w_3) - w_2^2 G(w_2)]Y_3} \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

La soustraction de l'équation (II.17.b) respectivement (II.17.d) et (II.17.e) et en faisant leur rapport, permet d'aboutir à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_4^2 - w_2^2}{w_5^2 - w_2^2} = \frac{[C(w_2) - C(w_4)]}{[C(w_2) - C(w_5)]} + \\ \frac{[G(w_2) - G(w_4)]Y_1 + [w_4^2 C(w_4) - w_2^2 C(w_2)]Y_2 + [w_4^2 G(w_4) - w_2^2 G(w_2)]Y_3}{[G(w_2) - G(w_5)]Y_1 + [w_5^2 C(w_5) - w_2^2 C(w_2)]Y_2 + [w_5^2 G(w_5) - w_2^2 G(w_2)]Y_3} \end{array} \right. \quad (\text{II.21})$$

On pose : $V_1 = (w_2^2 - w_1^2)^{-1}, V_2 = (w_2^2 - w_3^2)^{-1}$ (II.22)

$$\delta_1 = (w_2^2 - w_4^2)^{-1}, \delta_2 = (w_2^2 - w_5^2)^{-1} \quad (\text{II.23})$$

$$U_1 = (w_1^2 - w_2^2)^{-1}, U_2 = (w_3^2 - w_2^2)^{-1} \quad (\text{II.24})$$

$$\lambda_1 = (w_4^2 - w_2^2)^{-1}, \lambda_2 = (w_5^2 - w_2^2)^{-1} \quad (\text{II.25})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = V_2 [w_2^{-2} G(w_2) - w_3^{-2} G(w_3)] - V_1 [w_2^{-2} G(w_2) - w_3^{-2} G(w_3)] \\ A_1 = V_1 [C(w_1) - C(w_2)] - V_2 [C(w_3) - C(w_2)] \\ A_2 = V_1 [G(w_1) - G(w_2)] - V_2 [G(w_3) - G(w_2)] \\ A_3 = V_1 [w_2^2 C(w_2) - w_1^2 C(w_1)] - V_2 [w_2^2 C(w_2) - w_3^2 C(w_3)] \\ A_4 = V_1 (w_1^{-2} - w_2^{-2}) - V_2 (w_3^{-2} - w_2^{-2}) \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

Et :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_0 = \delta_2 [w_2^{-2} G(w_2) - w_5^{-2} G(w_5)] - \delta_1 [w_2^{-2} G(w_2) - w_4^{-2} G(w_4)] \\ B_1 = \delta_1 [C(w_4) - C(w_2)] - \delta_2 [C(w_5) - C(w_2)] \\ B_2 = \delta_1 [G(w_4) - G(w_2)] - \delta_2 [G(w_5) - G(w_2)] \\ B_3 = \delta_1 [w_2^2 C(w_2) - w_4^2 C(w_4)] - \delta_2 [w_2^2 C(w_2) - w_5^2 C(w_5)] \\ B_4 = \delta_1 (w_4^{-2} - w_2^{-2}) - \delta_2 (w_5^{-2} - w_2^{-2}) \end{array} \right. \quad (\text{II.27})$$

$$\begin{cases} D_0 = U_2 [C(w_2) - C(w_3)] - U_1 [C(w_2) - C(w_1)] \\ D_1 = U_1 [G(w_2) - G(w_1)] - U_2 [G(w_2) - G(w_3)] \\ D_2 = U_1 [w_1^2 C(w_1) - w_2^2 C(w_2)] - U_2 [w_3^2 C(w_3) - w_2^2 C(w_2)] \\ D_3 = U_1 [w_1^2 G(w_1) - w_2^2 G(w_2)] - U_2 [w_3^2 G(w_3) - w_2^2 G(w_2)] \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

$$\begin{cases} E_0 = \lambda_2 [C(w_2) - C(w_5)] - \lambda_1 [C(w_2) - C(w_4)] \\ E_1 = \lambda_1 [G(w_2) - G(w_4)] - \lambda_2 [G(w_2) - G(w_5)] \\ E_2 = \lambda_1 [w_4^2 C(w_4) - w_2^2 C(w_2)] - \lambda_2 [w_5^2 C(w_5) - w_2^2 C(w_2)] \\ E_3 = \lambda_1 [w_4^2 G(w_4) - w_2^2 G(w_2)] - \lambda_2 [w_5^2 G(w_5) - w_2^2 G(w_2)] \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

En tenant compte des équations (II.26), (II.27), (II.28) et (II.29), les équations (II.18), (II.19), (II.20) et (II.21) s'écrivent respectivement comme suit :

$$A_1 Y_1 + A_2 Y_2 + A_3 Y_3 + A_4 Y_4 = A_0$$

$$B_1 Y_1 + B_2 Y_2 + B_3 Y_3 + B_4 Y_4 = B_0$$

$$D_1 Y_1 + D_2 Y_2 + D_3 Y_3 = D_0$$

$$E_1 Y_1 + E_2 Y_2 + E_3 Y_3 = E_0$$

Sous une forme matricielle, les équations précédentes, s'écrivent comme suit :

$$[M][Y] = [A] \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$[M] = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 \\ E_1 & E_2 & E_3 & E_4 \end{bmatrix} ; [Y] = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} ; [A] = \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \\ D_0 \\ E_0 \end{bmatrix}$$

$[Y]$ étant le vecteur des inconnus de notre modèle.

Après avoir déterminé les paramètres du model de couronne, on calcule ses caractéristiques de fréquences lors du multiple de surtension $\left(\frac{V_m}{V_n}\right)$ donné par l'expression suivante :

$$G_M + j\omega_k C_M = j\omega_k C_1 + \sum_{s=3} \left(R_s + \frac{1}{j\omega_k C_s} \right)^{-1} + g_0 \quad (\text{II.31})$$

II.3.3 Calcul des paramètres de la ligne

Les paramètres de la ligne sont déterminés d'après les relations suivantes [31], [37]:

$$\begin{cases} G(\omega_k) = 0.83 \left(\frac{f}{50} \right)^{0.62} \left[1 - e^{-3.05 \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right)} \right] & \left(\frac{1}{M\Omega.Km} \right) \\ C(\omega_k) = 1.9 \left(\frac{50}{f} \right)^{0.42} \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right) 10^3 & \left(\frac{pF}{Km} \right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Où :

$\left(\frac{V_m}{V_n}\right)$: le multiple de surtension.

f : la fréquence [Hz]

II.3.4 Comparaison des caractéristiques du modèle et de la ligne

Les caractéristiques du modèle G_M et C_M doivent être comparées avec les caractéristiques de fréquence de la ligne $G(\omega_k)$ et $C(\omega_k)$.

Les précisions de calculs sont déterminées par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \Delta G(\%) = \frac{G(\omega_k) - G_M}{G(\omega_k)} * 100 \\ \Delta C(\%) = \frac{C(\omega_k) - C_M}{C(\omega_k)} * 100 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

II.3.5 Calcul des paramètres du système matriciel

Les calculs suivants sont effectués pour fréquences $f(\text{Hz})$ suivantes : 50, 200, 700, 1200, 2000,

3000, 4000, 5000 et un multiple de surtension $\left(\frac{V_m}{V_n}\right)=2.5$

(Hz)	(s ⁻¹)	(s ⁻²)	(s ²)	1/MΩKm	pF/Km	s ² /MΩKm	s ⁻² /MΩKm	s ⁻¹ /MΩKm
f	W	w ²	w ⁻²	G(w)	C(w)	w ⁻² G(w)	W ² G(w)	W ² C(w)
50	100π	9.8696 10 ⁴	10.1321 10 ⁻⁶	0.8214	2850 10 ⁻⁶	8.3229 10 ⁻⁶	8.1073 10 ⁴	281.2837
200	400π	1.5791 10 ⁶	6.3325 10 ⁻⁷	1.9402	1592.1391 10 ⁻⁶	1.2286 10 ⁻⁶	3.0638 10 ⁶	2514.1973
700	1400π	1.9344 10 ⁷	5.1694 10 ⁻⁸	4.2186	940.7431 10 ⁻⁶	2.1807 10 ⁻⁷	8.1606 10 ⁷	18198.1339
1200	2400π	5.6848 10 ⁷	1.7590 10 ⁻⁸	5.8926	750.1638 10 ⁻⁶	1.0365 10 ⁻⁷	3.3498 10 ⁸	42646.0028
2000	4000π	1.5791 10 ⁸	6.3325 10 ⁻⁹	8.0882	605.3125 10 ⁻⁶	5.1218 10 ⁻⁸	1.2772 10 ⁹	95587.1186

Tableau II.1 Paramètres C et G du modèle

Ce qui permet de déterminer :

$$V_1 = 6.7547 \cdot 10^{-7} \text{ s}^2, V_2 = -5.6289 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2$$

$$\delta_1 = -1.8093 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2, \delta_2 = -6.3965 \cdot 10^{-9} \text{ s}^2$$

$$U_1^{-1} = -6.7547 \cdot 10^{-7} \text{ s}^2, U_2 = 5.6289 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2$$

$$\lambda_1 = 1.8093 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2, \lambda_2 = 6.3965 \cdot 10^{-9} \text{ s}^2$$

Les paramètres de matrice $[M]$ sont :

$$A_0 = 4.7351 \cdot 10^{-12} \text{ s}^4 / M\Omega Km, A_1 = 8.1298 \cdot 10^{-10} \text{ s}^3 / M\Omega Km$$

$$A_2 = -6.2746 \cdot 10^{-7} \text{ s}^2 / M\Omega Km, A_3 = 6.2543 \cdot 10^{-4} \text{ s} / M\Omega Km$$

$$A_4 = 6.3835 \cdot 10^{-12} \text{ s}^4$$

$$B_0 = 1.2823 \cdot 10^{-14} \text{ s}^4 / M\Omega Km, B_1 = 8.9215 \cdot 10^{-12} \text{ s}^3 / M\Omega Km$$

$$B_2 = -3.2184 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2 / M\Omega Km, B_3 = 1.3076 \cdot 10^{-4} \text{ s} / M\Omega Km$$

$$B_4 = 7.1291 \cdot 10^{-15} \text{ s}^4$$

$$D_0 = -8.1298 \cdot 10^{-10} \text{ s}^3 / M\Omega Km, D_1 = -6.2746 \cdot 10^{-7} \text{ s}^2 / M\Omega Km$$

$$D_2 = 6.2543 \cdot 10^{-4} \text{ s} / M\Omega Km, D_3 = -2.4063 \text{ 1} / M\Omega Km$$

$$E_0 = -8.9215 \cdot 10^{-12} \text{ s}^3 / M\Omega Km, E_1 = -3.2184 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2 / M\Omega Km$$

$$E_2 = 1.3076 \cdot 10^{-4} \text{ s} / M\Omega Km, E_3 = -2.1448 \text{ 1} / M\Omega Km$$

D'où le système matriciel suivant

$$[M][Y] = [A]$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} 8.1298 \times 10^{-10} & -6.2746 \times 10^{-7} & 6.2543 \times 10^{-4} & 6.3835 \times 10^{-12} \\ 8.9215 \times 10^{-12} & -3.2184 \times 10^{-8} & 1.3076 \times 10^{-4} & 7.1291 \times 10^{-15} \\ -6.2746 \times 10^{-7} & 6.2543 \times 10^{-4} & -2.4063 & 0 \\ -3.2184 \times 10^{-8} & 1.3076 \times 10^{-4} & -2.1448 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.7351 \times 10^{-12} \\ 1.2823 \times 10^{-14} \\ -8.1298 \times 10^{-10} \\ -8.9215 \times 10^{-12} \end{bmatrix}$$

Ce qui permet donc de déterminer les inconnus de notre modèle comme suit :

$$[Y] = [M]^{-1}[A]$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1.4115 \times 10^{-3} \\ 6.6341 \times 10^{-8} \\ -1.2980 \times 10^{-11} \\ 0.5697 \end{bmatrix}$$

Donc :

$$Y_1 = 1.4115 \cdot 10^{-3} \text{ s}, Y_2 = 6.6341 \cdot 10^{-8} \text{ s}^2, Y_3 = -1.2980 \cdot 10^{-11} \text{ s}^4 \text{ et } Y_4 = g_0 = 0.5697 \text{ 1} / M\Omega Km$$

X_2 , X_3 et X_4 sont les racines du polynôme $X^3 - Y_1X^2 + Y_2X - Y_3 = 0$

En remplaçant Y_1 , Y_2 et Y_3 par leurs valeurs respectives on obtient :

$$X_2 = 1.3555 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$X_3 = 1.2978 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$X_4 = -7.3779 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

La soustraction de l'équation (II.16.b) l'équation (II.16.a) permet d'aboutir à :

$$N_1 = V_1 \left\{ \begin{array}{l} [C(w_1) - C(w_2)]Y_1 + [G(w_1) - G(w_2)]Y_2 + [w_2^2 C(w_2) - w_1^2 C(w_1)]Y_3 + [w_1^{-2} - w_2^{-2}]Y_4 + \\ [w_2^{-2} G(w_2) - w_1^{-2} G(w_1)] \end{array} \right\} \quad (\text{II.34})$$

$$N_1 = -6.4448 \cdot 10^{-15} \text{ s}^4 / M\Omega Km$$

A partir de l'équation (II.16.b), on détermine N_2 comme :

$$N_2 = w_1^2 N_1 - w_1^{-2} G(w_1) + C(w_1)Y_1 + G(w_1)Y_2 - w_1^2 C(w_1)Y_3 + w_1^{-2} Y_4$$

$$N_2 = 1.5307 \cdot 10^{-6} \text{ s}^2 / M\Omega Km$$

La soustraction de l'équation (II.17.b) de l'équation (II.17.a) permet d'aboutir

$$N_4 = U_1 \{ [G(w_2) - G(w_1)]Y_1 + [w_1^2 C(w_1) - w_2^2 C(w_2)]Y_2 + [w_1^2 G(w_1) - w_2^2 G(w_2)]Y_3 + [C(w_2) - C(w_1)] \} \quad (\text{II.35})$$

$$N_4 = -1.4318 \cdot 10^{-10} \text{ s}^3 / M\Omega Km$$

A partir de l'équation (II.15.b), on détermine N_3 comme :

$$N_3 = w_1^2 N_4 - w_1^2 C(w_1)Y_2 + C(w_1) + G(w_1)Y_1 - w_1^2 G(w_1)Y_3 \quad (\text{II.36})$$

$$N_3 = 3.8296 \cdot 10^{-3} \text{ s} / M\Omega Km$$

II.3.6 Calcul des capacités du modèle

La capacité C_1 peut être déduite de la relation $N_1 = C_1 Y_3 \Rightarrow C_1 = \frac{N_1}{Y_3}$

Ce qui permet d'avoir la capacité $C_1 = 496.5234 \text{ pF/Km}$

Pour le calcul des capacités C_2 , C_3 et C_4 , on doit passer par la détermination de α , β et γ d'après la relation (II.14), on aura donc :

$$\begin{cases} \alpha = N_2 - C_1 Y_1 - g_0 Y_2 \\ \beta = N_3 - g_0 Y_1 - C_1 \\ \gamma = N_4 - C_1 Y_2 - g_0 Y_3 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

$$\alpha = 7.9205 \cdot 10^{-7} \text{ s}^2 / M\Omega Km, \beta = 2.5288 \cdot 10^{-3} \text{ s}^4 / M\Omega Km, \gamma = -1.6872 \cdot 10^{-10} \text{ s}^3 / M\Omega Km$$

Les équations définies par (II.11), peuvent être réécrites sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_3 + X_4 & X_2 + X_4 & X_2 + X_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ X_3 X_4 & X_2 X_4 & X_2 X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Ce qui permet de déduire C_2 , C_3 et C_4 comme ;

$$\begin{bmatrix} C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_3 + X_4 & X_2 + X_4 & X_2 + X_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ X_3 X_4 & X_2 X_4 & X_2 X_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{II.39})$$

Après calcul, on aura :

$$C_2 = 1943.1008 \text{ pF/Km}, C_3 = 917.4673 \text{ pF/Km}, C_4 = 331.7460 \text{ pF/Km}$$

II.3.7 Calcul des résistances du modèle

Les résistances R_2 , R_3 et R_4 sont déterminées d'après : X_2 , X_3 et X_4 ,

On obtient donc :

$$R_2 = 0.6976 \text{ M}\Omega/\text{Km}, R_3 = 0.1414 \text{ M}\Omega/\text{Km}, R_4 = 0.2223 \text{ M}\Omega/\text{Km}$$

Le tableau suivant résume les résultats ainsi retrouvés

g_0 [1/MΩkm]	Capacité [pF/Km]				Résistance [MΩ/Km]		
	C_1	C_2	C_3	C_4	R_2	R_3	R_4
0.5697	496.5234	1943.1008	917.4673	331.7460	0.6976	0.1414	0.2223

Tableau II.2 : Récapitulatif des paramètres calculés

II.4 Etude des paramètres de la ligne

Ces paramètres sont en fonction de la fréquence et du multiple de surtension.

$$\begin{cases} C(w_k) = 1.9 \left(\frac{50}{f} \right)^{0.42} \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right) 10^3 & \left(\frac{pF}{Km} \right) \\ G(w_k) = 0.83 \left(\frac{f}{50} \right)^{0.62} \left[1 - e^{-3.05 \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right)} \right] & \left(\frac{1}{M\Omega.Km} \right) \end{cases}$$

On considère les fréquences [Hz] suivantes : 50, 200, 700, 1000, 1200, 2000, 5000, 7500 et 10000.

Et les multiples de surtension suivants : 1.1, 1.2, 1.5, 1.8, 2, 2.2, 2.5, 2.7

2.7 correspond au multiple de surtension pour la tension nominale 330 KV utilisée dans ce travail.

On représente les résultats dans le tableau suivant, ainsi que leurs courbes appropriées :

G en [1/MΩKm] et C en [pF/Km]

V_m/V_n	f(Hz)	50	200	700	1000	1200	2000	5000	10000
1.1	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.218	0.515	1.120	1.398	1.565	2.148	3.792	5.827
	C (pF/Km)	190	106.1	62.7	53.9	50.011	40.3	27.5	20.5
1.2	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.379	0.895	1.946	2.429	2.719	3.732	6.586	10.123
	C(pF/Km)	380	212.3	125.4	107.9	100.022	80.7	54.9	41.1
1.5	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.649	1.533	3.335	4.160	4.658	6.394	11.285	17.343
	C (pF/Km)	950	530.7	313.6	269.9	250.05	201.8	137.3	102.6
1.8	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.757	1.789	3.891	4.854	5.435	7.460	13.166	20.230
	C (pF/Km)	1520	849.1	501.7	431.9	400.1	322.8	219.7	164.2
2	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.790	1.867	4.060	5.065	5.672	7.785	13.740	21.117
	C (pF/Km)	1900	1061.4	627.1	539.9	500.1	403.5	274.6	205.2
2.3	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.814	1.923	4.182	5.217	5.841	8.017	15.15	21.747
	C (pF/Km)	2470	1379.8	815.3	701.8	650.142	524.6	357	266.8
2.5	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.821	1.940	4.219	5.263	5.893	8.088	14.275	21.940
	C (pF/Km)	2850	1592.1	940.7	809.9	750.164	605.3	411.9	307.9
2.7	$G(M\Omega.Km)^{-1}$	0.825	1.950	4.238	5.288	5.92	8.127	14.343	22.043
	C (pF/Km)	3230	1804.4	1066.2	917.8	850.186	686	466.8	348.9

Tableau II.2 : Résultats des paramètres trouvés pour la ligne et le modèle lors $\left(\frac{V_m}{V_n}\right)=2.5$

Les figures II-2 et II-3 représentent respectivement la variation de la conductibilité géométrique et de la capacité géométrique de la ligne en fonction de la fréquence pour différents multiples de tension.

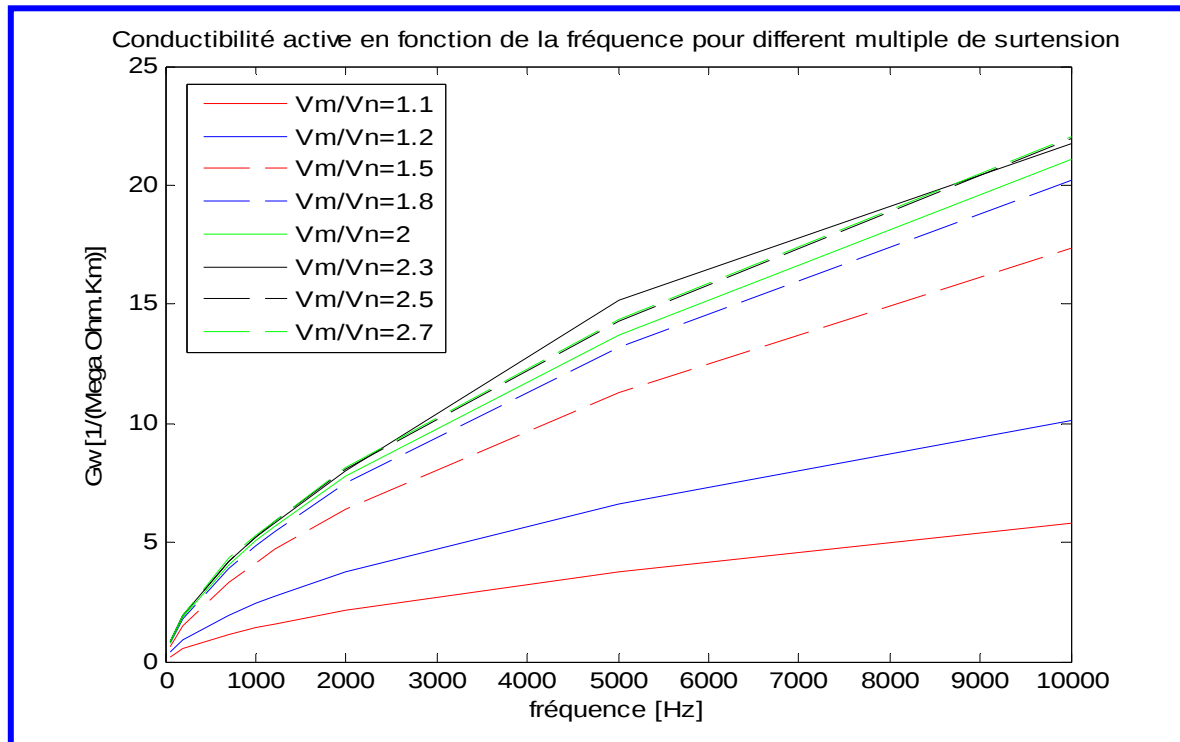


Figure II-2 : Conductibilité de la ligne en fonction de la fréquence pour différents multiples de surtension

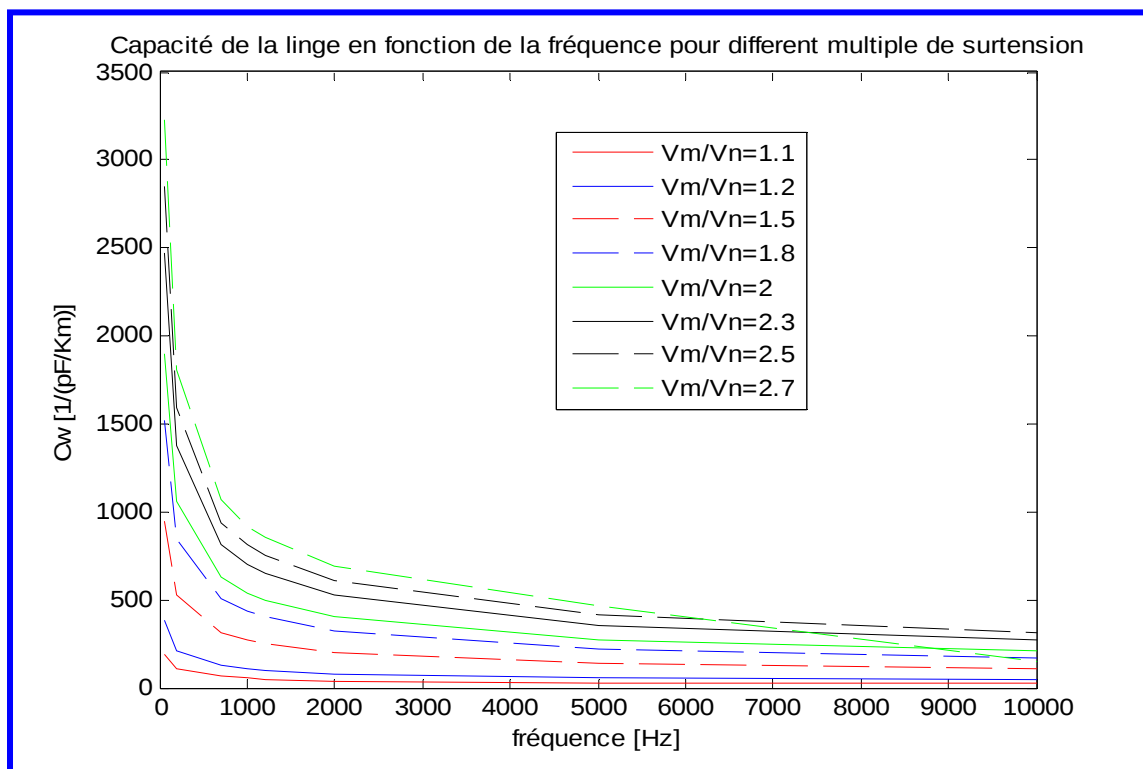


Figure II-3 : Capacité de la ligne en fonction de la fréquence pour différents multiples de surtension

II.5 Interprétations des résultats

La figure II-2 représente les variations de la conductibilité géométrique de la ligne en fonction de fréquences pour différents multiples de tensions. Avec l'accroissement de la fréquence et l'élévation du multiple de tension, on constate l'augmentation de la conductibilité géométrique de la ligne.

Dans la figure II-3, nous avons représenté les variations de la capacité géométrique de la ligne en fonction de fréquences ainsi que pour différents multiples de surtensions. On constate qu'elle varie contrairement par rapport à la variation de la conductibilité, c'est -à-dire, elle diminue avec l'augmentation de la fréquence et l'élévation du multiple de tension.

III.6 Etude des paramètres du modèle

Selon [37], on a :

$$\begin{aligned}
 G_M + jw_k C_M &= jw_k C_1 + \sum_{s=3} \left(R_s + \frac{1}{jw_k C_s} \right)^{-1} + g_0 \\
 &= jw_k C_1 + \frac{jw_k C_2}{jw_k C_2 R_2 + 1} + \frac{jw_k C_3}{jw_k C_3 R_3 + 1} + \frac{jw_k C_4}{jw_k C_4 R_4 + 1} + g_0 \\
 &= jw_k C_1 + \frac{w_k^2 C_2^2 R_2 + jw_k C_2}{w_k^2 C_2^2 R_2^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_3^2 R_3 + jw_k C_3}{w_k^2 C_3^2 R_3^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_4^2 R_4 + jw_k C_4}{w_k^2 C_4^2 R_4^2 + 1} + g_0 \\
 &= \frac{w_k^2 C_2^2 R_2}{w_k^2 C_2^2 R_2^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_3^2 R_3}{w_k^2 C_3^2 R_3^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_4^2 R_4}{w_k^2 C_4^2 R_4^2 + 1} + g_0 + jw_k \left[\frac{w_k^2 C_2^2 R_2}{w_k^2 C_2^2 R_2^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_3^2 R_3}{w_k^2 C_3^2 R_3^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_4^2 R_4}{w_k^2 C_4^2 R_4^2 + 1} + C_1 \right]
 \end{aligned} \tag{II.40}$$

Par identification des parties réelles et imaginaires :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_M = \frac{w_k^2 C_2^2 R_2}{w_k^2 C_2^2 R_2^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_3^2 R_3}{w_k^2 C_3^2 R_3^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_4^2 R_4}{w_k^2 C_4^2 R_4^2 + 1} + g_0 \quad \left[\frac{1}{M\Omega Km} \right] \\ C_M = \frac{w_k^2 C_2^2 R_2}{w_k^2 C_2^2 R_2^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_3^2 R_3}{w_k^2 C_3^2 R_3^2 + 1} + \frac{w_k^2 C_4^2 R_4}{w_k^2 C_4^2 R_4^2 + 1} + C_1 \quad \left[\frac{pF}{Km} \right] \end{array} \right. \tag{II.41}$$

$$\tag{II.42}$$

Dans le tableau suivant sont représentés les résultats des paramètres de la ligne et du modèle de la couronne ainsi que l'erreur relative pour différentes valeurs de la fréquence et un multiple de

surtension $\frac{V_m}{V_n} = 2.5$.

F (Hz)	G _w [1/MΩKm]	G _M [1/MΩKm]	ΔG(%)	C _w [pF/Km]	C _M [pF/Km]	ΔC(%)
50	0.821445	0.804000	2.1236	2.85*10 ⁻³	2.725*10 ⁻³	4.3613
60	0.919753	0.886984	3.5627	2.639*10 ⁻³	2.621*10 ⁻³	0.7147
80	1.099343	1.060426	3.5400	2.339*10 ⁻³	2.405*10 ⁻³	2.8365
100	1.262459	1.228800	2.6661	2.130*10 ⁻³	2.203*10 ⁻³	0.3031
120	1.413545	1.383073	2.1557	1.973*10 ⁻³	2.024*10 ⁻³	2.6200
150	1.623282	1.584500	2.3891	1.796*10 ⁻³	1.808*10 ⁻³	0.6600
180	1.817550	1.755570	3.4100	1.664*10 ⁻³	1.645*10 ⁻³	1.1431
200	1.940242	1.857322	4.2737	1.592*10 ⁻³	1.555*10 ⁻³	2.0600
250	2.228128	2.085865	6.3848	1.449*10 ⁻³	1.401*10 ⁻³	3.3400
300	2.494782	2.297329	7.9147	1.342*10 ⁻³	1.294*10 ⁻³	3.5756
350	2.744983	2.506037	9.5347	1.258*10 ⁻³	1.218*10 ⁻³	3.2145
400	2.981911	2.718782	8.8240	1.190*10 ⁻³	1.159*10 ⁻³	2.5904
450	3.207814	2.938312	8.4014	1.132*10 ⁻³	1.111*10 ⁻³	1.9372
500	3.424355	3.165242	7.5667	1.083*10 ⁻³	1.069*10 ⁻³	1.2568
550	3.632807	3.399054	6.4344	1.041*10 ⁻³	1.033*10 ⁻³	0.7190
600	3.834169	3.638654	5.0992	1.003*10 ⁻³	1.000*10 ⁻³	0.3135
650	4.029245	3.882675	3.6376	9.704*10 ⁻⁴	9.700*10 ⁻⁴	0.0843
700	4.218696	4.129675	2.1561	9.407*10 ⁻⁴	9.415*10 ⁻⁴	0.0850
750	4.403068	4.378230	0.5641	9.138*10 ⁻⁴	9.147*10 ⁻⁴	0.0955
1000	5.262807	5.602435	6.4563	8.098*10 ⁻⁴	8.009*10 ⁻⁴	1.1040

1500	6.766967	7.697199	13.7466	$6.830 \cdot 10^{-4}$	$6.522 \cdot 10^{-4}$	4.5044
2000	8.088278	9.214434	13.9232	$6.053 \cdot 10^{-4}$	$5.754 \cdot 10^{-4}$	4.9279
2500	9.288386	10.275667	10.6291	$5.511 \cdot 10^{-4}$	$5.371 \cdot 10^{-4}$	2.5406
3000	10.399984	11.022105	5.9819	$5.105 \cdot 10^{-4}$	$5.177 \cdot 10^{-4}$	1.4206
3500	11.442994	11.556495	0.9918	$4.785 \cdot 10^{-4}$	$5.076 \cdot 10^{-4}$	6.0961
4000	12.430674	11.947221	3.8891	$4.524 \cdot 10^{-4}$	$4.022 \cdot 10^{-4}$	11.0182
5000	14.275091	12.461386	12.7053	$4.119 \cdot 10^{-4}$	$4.975 \cdot 10^{-4}$	20.7893
7500	18.355046	13.040916	28.9518	$3.474 \cdot 10^{-4}$	$4.955 \cdot 10^{-4}$	42.6224
12500	25.194265	13.374376	46.9270	$2.803 \cdot 10^{-4}$	$4.958 \cdot 10^{-4}$	76.8631
27500	41.077477	13.527345	67.0687	$2.013 \cdot 10^{-4}$	$4.963 \cdot 10^{-4}$	146.545

Tableau II-2 : Résultats des paramètres de la ligne, du modèle de la couronne et de l'erreur relative avec $\left(\frac{V_m}{V_n}\right)=2.5$

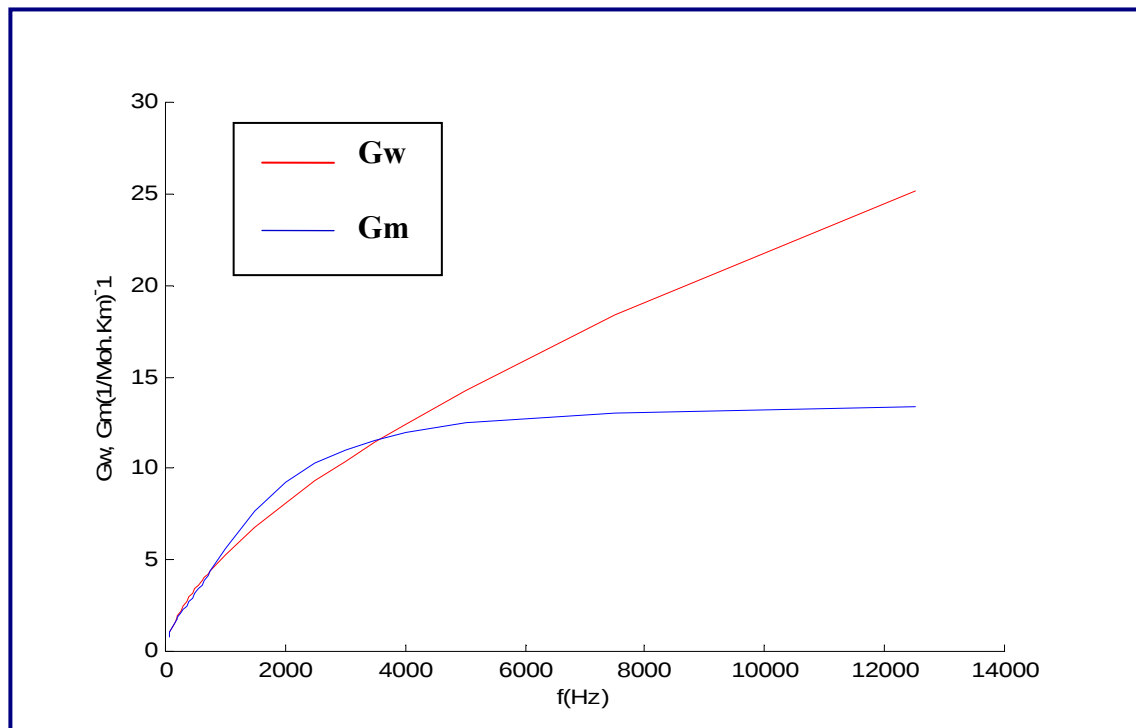


Figure II-4 Conductibilité de la ligne et du modèle en fonction de la fréquence

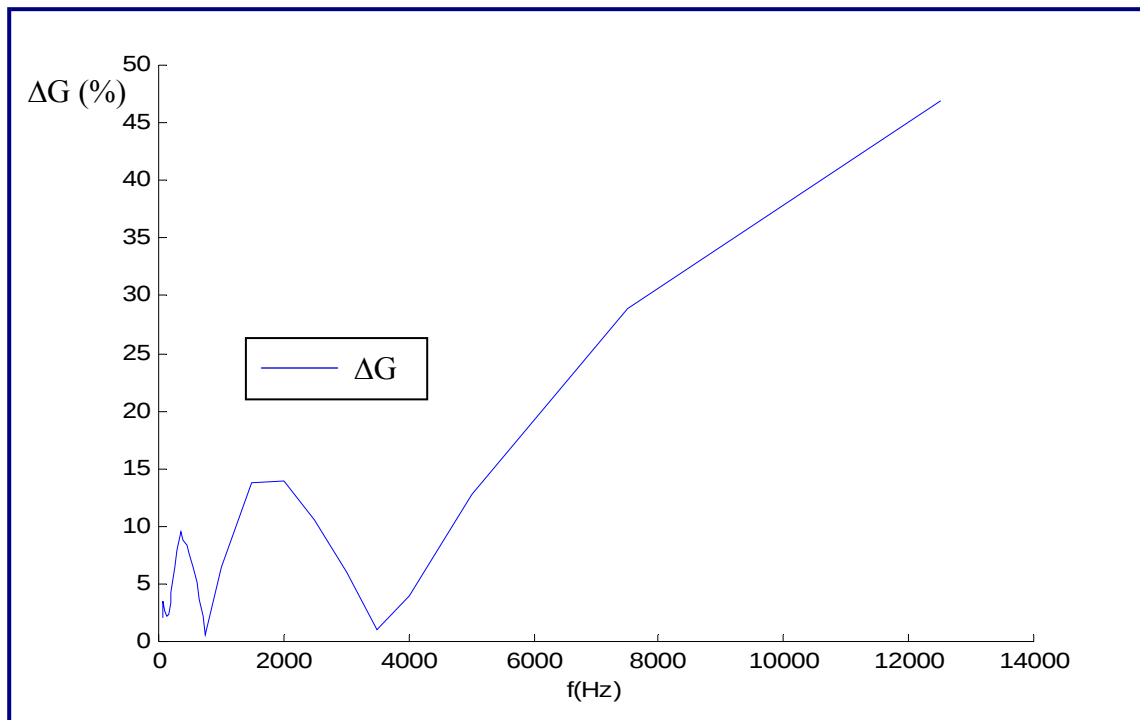


Figure II-5 : Erreur relative pour la conductibilité en fonction de la fréquence

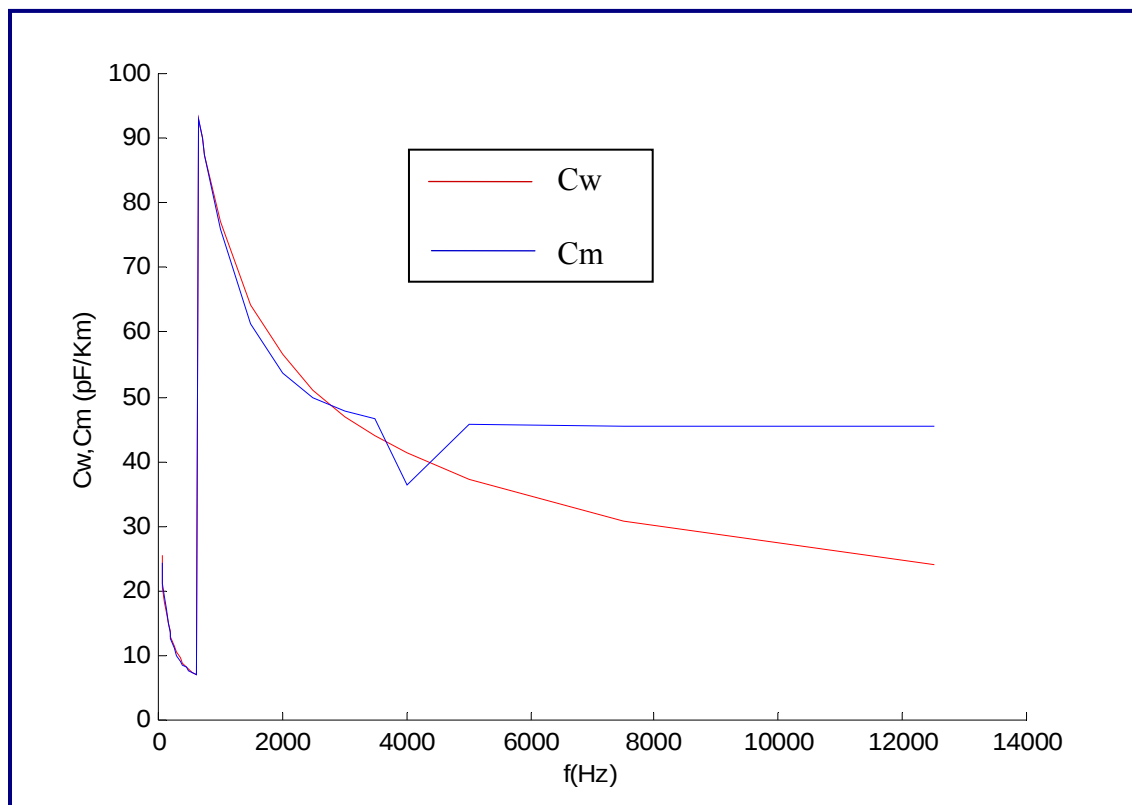


Figure II-6 Capacités de la ligne et du modèle en fonction de la fréquence

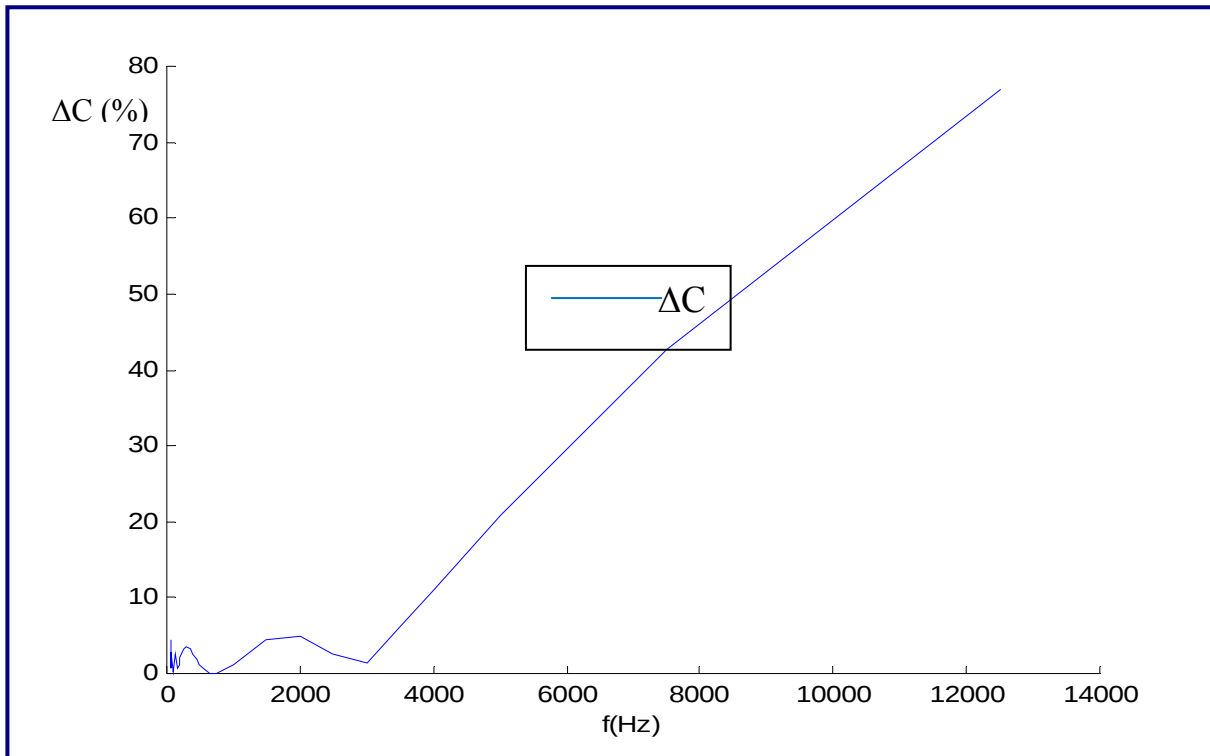


Figure II-7 : Erreur relative pour la capacité en fonction de la fréquence

II.7 Discussions des résultats

- On constate à partir de la figure II-4 et la figure II-5 que dans l'intervalle de fréquences $[50 \div 5000]$ (Hz), les conductibilités du modèle et de la ligne se convergent avec une erreur de 0.56(%) à 13.92 (%), ensuite elles se divergent avec une erreur relative supérieure à cette dernière.

On remarque à partir des figures II-6 et II-7 que dans l'intervalle de fréquences $[50 \div 5000]$ (Hz), les capacités du modèle et de la ligne se convergent elles aussi avec une erreur relative de 0.08(%) à 20.78(%), ensuite elles se divergent avec une erreur relative supérieure à cette dernière.

➤ Ce qui montre qu'avec un tel modèle on peut prédire les paramètres de la ligne pour des fréquences allant de 50 à 5000 (Hz), c'est-à-dire pour une grande partie des régimes transitoires créés à cause des surtensions dans les réseaux considérés.

II.8 Conclusion

Les résultats obtenus par notre étude, nous permettent de conclure que le modèle du phénomène couronne dans les lignes de transport d'énergie électrique est satisfaisant pour des tensions impulsionnelles, de fréquences allant jusqu'à 5000Hz, au-delà il perd sa précision.

Dans ce qui suit, nous allons calculer les paramètres d'une ligne et d'un transformateur et nous allons simuler l'ensemble ligne et transformateur avec et sans tenir compte de l'effet couronne pour mettre en évidence son influence sur les surtensions.

Chapitre III:

Modélisation et calcul des paramètres de la ligne et du transformateur, simulation et analyse

III.1 Introduction

Du point de vue physique et électrique, le phénomène de couronne est dû à l'ionisation de l'air, dès que le champ électrique régnant au voisinage immédiat du conducteur devient suffisant. Lorsque l'on utilise des conducteurs de plus gros diamètres, comme ceux qui équipent les lignes aériennes, on constate que la gaine lumineuse évolue en décharges discrètes que l'on appelle « aigrettes » ou « effluves ».

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

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

III.2 Modélisation de la ligne et du transformateur sans tenir compte de l'effet couronne

III.2.1. Modélisation d'une ligne avec un conducteur par phase sans tenir compte de l'effet couronne

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

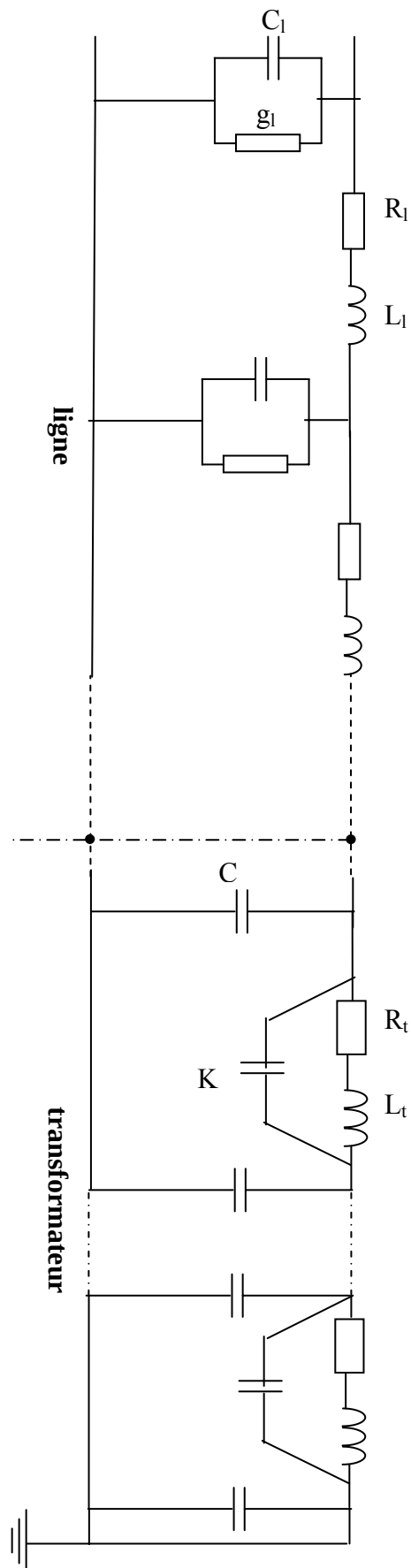


Figure III-1 : schéma équivalent de la ligne et du transformateur.

III.2.1.1 Détermination des paramètres de la ligne ayant un conducteur par phase

III.2.1.1.1 Définition des paramètres

Sur le schéma équivalent de la figure III-1, nous avons :

R_l : résistance d'un élément de la ligne.

L_l : l'inductance d'un élément de la ligne.

C_l : capacité d'un élément de la ligne.

g_l : conductibilité d'un élément de la ligne.

III.2.1.1.2 Caractéristiques de la ligne

On suppose que le conducteur de la ligne est de type AA-500.

Pour ce type de conducteurs, on a les caractéristiques suivantes [31]:

Résistance kilométrique : $R_0 = 0.06 \Omega/Km$

Réactance kilométrique : $X_0 = 0.32 \Omega/Km$

Puissance réactive : $Q_0 = 0.42 \text{ MVAR/Km}$

Nombre de conducteurs : 1

Distance moyenne entre phases : 11m

Conductibilité réactive kilométrique : $B_0 = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\Omega Km$

Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

On considère une ligne de longueur $l = 250 \text{ km}$, on divise la longueur de la ligne en n' éléments tel que $n' = 10$.

III.2.1.1.3 Détermination de la résistance R_l d'un élément de la ligne

$$R_{lt} = R_0 \cdot l \quad (\text{III.1})$$

$$R_0 = \delta \cdot \frac{1}{s} \quad (\text{III.2})$$

R_{lt} : la résistance totale de la ligne [Ω].

l : longueur de la ligne [Km].

S : section du conducteur [mm^2].

δ : résistivité électrique [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{Km}$].

$$R_{lt} = 0.06 \cdot 250 = 15 \text{ } [\Omega]$$

$$R_l = \frac{R_{lt}}{n} = \frac{15}{10} = 1.5 \text{ } [\Omega]$$

III.2.1.1.4 Détermination de l'inductance L_l d'un élément de la ligne

Pour se faire, on doit d'abord calculer sa réactance X_{lt} .

$$X_{lt} = X_0 \cdot l \tag{III.3}$$

$$X_0 = 0,144 \log \frac{D_m}{r_c} + 0.016 \tag{III.4}$$

Avec :

$$D_m = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3} \tag{III.5}$$

D_m : Distance moyenne entre phase.

D_1, D_2, D_3 : Distance entre les conducteurs de différentes phases.

r_c : Rayon d'un seul conducteur.

X_{lt} : Réactance totale de la ligne.

$$X_{lt} = 0,32 \times 250 = 80 \Omega.$$

Soit X_l la réactance d'un élément.

$$X_l = \frac{X_{lt}}{n} = 8 \Omega$$

L'inductance de la ligne est calculée comme suit :

$$L_{lt} = \frac{X_{lt}}{\omega} \tag{III.6}$$

Avec $\omega = 2\pi f$: pulsation propre.

$$L_{lt} = 254777,07 \mu H.$$

Soit L_1 l'inductance d'un élément.

$$L_1 = \frac{L_{lt}}{10} \quad (III.7)$$

$$L_1 = 25477,70 \mu H.$$

III.2.1.1.5 Détermination de la capacité C_1 d'un élément de la ligne

$$B_{lt} = B_0 \times l \quad (III.8)$$

B_0 : Conductibilité réactive kilométrique.

B_{lt} : Conductibilité réactive totale.

$$B_0 = 7,58 \times \frac{10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_c}}.$$

$$B_{lt} = 8,75 \cdot 10^{-4} [\Omega^{-1}].$$

La conductibilité réactive pour un élément est : B_1 .

$$\text{Tel que : } B_1 = \frac{B_{lt}}{10} = \frac{8,75 \cdot 10^{-4}}{10}.$$

$$B_1 = 8,75 \cdot 10^{-5} [\Omega^{-1}].$$

La capacité d'un élément est calculée en utilisant :

$$C_1 = \frac{B_1}{\omega} \quad (III.9)$$

$$C_1 = 0,27866242 \mu f.$$

III.2.1.1.6 Détermination de la conductibilité active G_1 d'un élément de la ligne

$$G_{lt} = G_0 l \quad (III.10)$$

$$G_0 = \frac{\Delta p_{\text{couronne}}}{U_n^2} \quad (III.11)$$

Avec :

G_0 : conductibilité active kilométrique.

G_{lt} : conductibilité active totale de la ligne.

$$G_0 = 1,46924.10^{-8} \text{ [1/}\Omega\text{Km]}$$

$$G_{lt} = 1,46924.10^{-8}.250$$

$$G_{lt} = 3,6731.10^{-6}\Omega^{-1} .$$

Soit G_l la conductibilité active d'un élément :

$$G_l = \frac{G_{lt}}{n'} \quad (\text{III.12})$$

$$G_l = 3,6731 \cdot 10^{-7} \text{ [}\Omega^{-1}\text{]}$$

Récapitulatif des paramètres de la ligne calculés pour un élément :

$$R_l = 1,5 \Omega.$$

$$L_l = 25477,70 \mu\text{H}.$$

$$C_l = 0,27866242 \mu\text{f}.$$

$$G_l = 3,6731.10^{-7} \Omega^{-1}.$$

III.2.2 Modélisation d'une ligne avec deux conducteurs par phase sans tenir compte de l'effet couronne

Nous utiliserons le schéma équivalent de la ligne et du transformateur, avec deux conducteurs par phase représenté sur la figure III-1.

III.2.2.1 Détermination des paramètres de la ligne ayant deux conducteurs par phase

III.2.2.1.1 Définition des paramètres

R'_l : résistance d'un élément de la ligne.

L'_l : l'inductance d'un élément de la ligne.

C'_l : capacité d'un élément de la ligne.

G'_l : conductibilité d'un élément de la ligne.

III.2.2.1.2 Caractéristiques de la ligne

On utilisera le conducteur de type 2×AA-240.

Pour ce type de conducteurs, on a les caractéristiques suivantes :

Résistance kilométrique : $R_0 = 0.06 \Omega/Km$

Réactance kilométrique : $X_0 = 0.331 \Omega/Km$

Nombre de conducteurs d'une phase: $n' = 2$

Distance moyenne entre phases : 11m

Conductibilité réactive kilométrique d'un conducteur : $B_0 = 3.38 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/\Omega Km$

Fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

III.2.2.1.3 Détermination de la résistance R'_1 d'un élément de la ligne

$$R_{lt} = R_0 \cdot l \text{ avec } R_0 = \delta \cdot \frac{1}{s}$$

Pour les conducteurs sectionnés :

$$R = \frac{R_0}{n'} l$$

n' : nombre de conducteurs d'une phase.

$$R'_{lt} = 0.06 \cdot 250 = 15 [\Omega]$$

$$R'_1 = \frac{R_{lt}}{n} = \frac{15}{10} = 1.5 [\Omega]$$

III.2.2.1.4 Détermination de l'inductance L'_1 d'un élément de la ligne

Pour se faire, on doit d'abord calculer sa réactance X'_{lt} .

$$X'_{lt} = X_0 \cdot l$$

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

$$r_{eq} = (a_n^{n-1} r_c)^{1/2} . \quad (III.13)$$

$$a_n = (a_1 a_2 a_3) \quad (III.14)$$

Avec :

r_{eq} : rayon équivalent des conducteurs sectionnés.

D_m : Distance moyenne entre phase.

X'_{lt} : réactance totale de la ligne.

$$X'_{lt} = 82.75\Omega.$$

Soit X'_1 la réactance d'un élément.

$$X'_1 = \frac{X'_{lt}}{n} = 8.275\Omega$$

Pour calculer l'inductance de la ligne on utilise la loi suivante :

$$L'_{lt} = \frac{X'_{lt}}{\omega}$$

$$L'_{lt} = \frac{X'_{lt}}{2\pi f} = 263535,03\mu H.$$

Soit L'_1 l'inductance d'un élément.

$$L'_1 = \frac{L'_{lt}}{10} = 26353,503\mu H.$$

III.2.2.1.5 Détermination de la capacité C'_1 d'un élément de la ligne

$$B'_{lt} = B_0 \times l$$

B'_{lt} : Conductibilité réactive totale.

$$B_0 = 7,58 \times \frac{10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_{eq}}} = 8,45.10^{-4} [\Omega^{-1}].$$

La conductibilité réactive pour une un élément est B'_1

$$\text{Tel que : } B'_1 = \frac{B'_{lt}}{10} = 8,45.10^{-5} [\Omega^{-1}].$$

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

$$C'_1 = \frac{B'_1}{\omega} = 0,2691083\mu f.$$

III.2.2.1.6 Détermination de la conductibilité active G'_1 d'un élément de la ligne

$$G'_{lt} = G_0 l$$

$$G_0 = \frac{\Delta p_{\text{couronne}}}{U_n^2}$$

G'_{lt} : conductibilité réactive totale de la ligne.

$$G'_{lt} = 3,6731.10^{-6} \Omega^{-1} .$$

$$G'_l = \frac{G_{lt}}{n'} = 3,6731 \cdot 10^{-7} [\Omega^{-1}]$$

Récapitulatif des paramètres de la ligne calculés pour un élément :

$$R'_l = 1,5 \Omega.$$

$$L'_l = 26353,503 \mu H.$$

$$C'_l = 0,2691083 \mu f.$$

$$G'_l = 3,6731.10^{-7} \Omega^{-1} .$$

III.2.3 Modélisation et calcul des paramètres du transformateur

III.2.3.1 Caractéristiques du transformateur

TDU: 250 000/330

Puissance nominale apparente : $S_n = 250 \text{MVA}$

Tension du côté haute tension : $HT = 347 \text{KV}$

Tension du côté basse tension : $BT = 13,8 \text{KV}$

Perte de puissance à vide : $\Delta P_0 = 214 \text{KW}$

Perte de puissance en court-circuit : $\Delta P_{cc} = 605 \text{KW}$

Tension de court-circuit : $\Delta U_{cc} = 11\%$

Courant à vide : $I_0 = 0,5\%$

Fréquence de service du transformateur : $f = 50 \text{Hz}$

III.2.3.2 Caractéristiques géométriques

Diamètre extérieur de l'enroulement haute tension : $d_{bext}=2180\text{mm}$

Diamètre intérieur de l'enroulement haute tension : $d_{bint}=1550\text{mm}$

Diamètre extérieur de l'enroulement basse tension : $d_{bext}=1350\text{mm}$

Diamètre intérieur de l'enroulement basse tension : $d_{bint}=1030\text{mm}$

Longueur de l'enroulement : $L_{en} = 2080\text{mm}$

Diamètre du noyau : $d_n = 930\text{mm}$

III.2.3.3 Détermination de la résistance du transformateur

La résistance équivalente (R) de l'enroulement HT lors d'un courant impulsionnel $i(t)$ est telle que :

$$W_i = \int_{-\infty}^{\infty} i^2(t) dt. \quad (\text{III.15})$$

Où W_i est l'énergie de l'impulsion qui est déterminée à l'aide du développement en série de Fourier du courant impulsionnel.

$$W_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R(w) S^2(w) dw. \quad (\text{III.16})$$

Où $S(w)$ est la densité du courant.

Dans le cas d'une impulsion de forme rectangulaire de durée t_r , R égale à :

$$R_{\square} = 1,6 \frac{R_0}{\sqrt{WTh}}. \quad (\text{III.17})$$

Dans le cas d'une impulsion triangulaire de durée $2Tr$:

$$R_{\Delta} = 1,0575 \frac{R_0}{\sqrt{WTh}}. \quad (\text{III.18})$$

$Th = 50\mu s$ qui est la longueur d'onde.

R_0 est résistance de l'enroulement HT correspond à la fréquence 50Hz.

$$R_0 = \frac{\Delta P_{cc} U n^2}{S n^2} \quad (\text{III.19})$$

$$R_0 = 1,054\Omega.$$

$$R_{\Delta} = 8,8955 \Omega.$$

La résistance d'un élément du transformateur côté haute tension est R_{Ht} .

$$R_{Ht} = \frac{R_{\Delta}}{n'} = 0,88955 \Omega.$$

III.2.3.4 Détermination de l'induction propre du transformateur

Il faut d'abord calculer la valeur de l'inductance de l'enroulement en court-circuit L_{Hcc} .

$$L_{Hcc} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc} U_n^2}{100 S_n}. \quad (II.20)$$

$$L_{Hcc} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{11 \cdot 347^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 250 \cdot 10^6} = 0,168725987 \text{ H}.$$

L'inductance total de l'enroulement est donnée par :

$$L_{Htot} = K_l * L_{Hcc} \quad (II.21)$$

K_l : facteur de précision qui tient compte de la forme d'onde.

Pour une onde impulsionnelle de forme triangulaire $K_l = 0,65$.

$$L_{Htot} = 0,109671891 \text{ H}.$$

Soit L_{Hi} l'inductance d'un élément de l'enroulement.

$$L_{Hi} = \frac{L_{Htot}}{n}.$$

$$L_{Hi} = 0,0109671891 \text{ H}.$$

L'inductance L_i d'un élément de l'enroulement se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} L_i &= L_i + \sum M_{ij} \Rightarrow L_i = L_i \left(1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_i} \right) \\ \Rightarrow L_i &= \frac{L_i}{\left(1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_i} \right)}. \end{aligned} \quad (II.22)$$

Il faut calculer les valeurs des coefficients de mutualité $\frac{M_{ij}}{L_i}$ qui sont donnés par dépendance.

$$\frac{M_{ij}}{L_i} = f\left(\frac{a}{b}\right). \quad (II.23)$$

Avec :

a : distance entre les éléments de l'enroulement, $a = \frac{L_{en}}{n}$

b : distance entre les enroulements HT et BT,

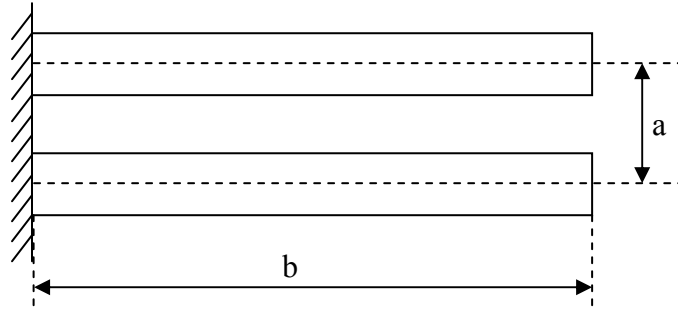


Figure III- 2: représentation des enroulements du transformateur

$$a = \frac{L_{en}}{n} = \frac{2080}{10} = 208\text{mm.}$$

$$b = r_{HT} - r_{BT} .$$

$$r_{HT} = \frac{d_{HText} + d_{HTint}}{4} = \frac{2180 + 1550}{4} = 932,5\text{mm.}$$

$$r_{BT} = \frac{d_{BTtext} + d_{BTint}}{4} = \frac{1350 + 1030}{4} = 595\text{mm.}$$

$$b = 932,5 - 595 = 337,5\text{mm.}$$

Disposition schématique de spires :

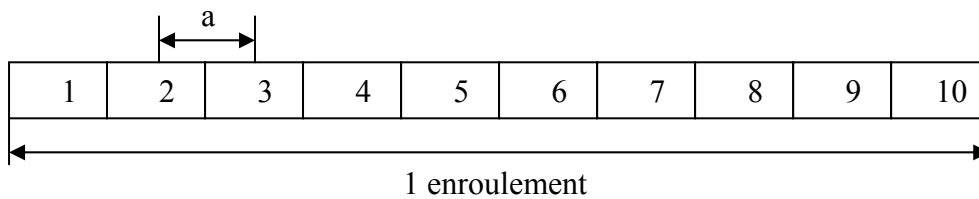
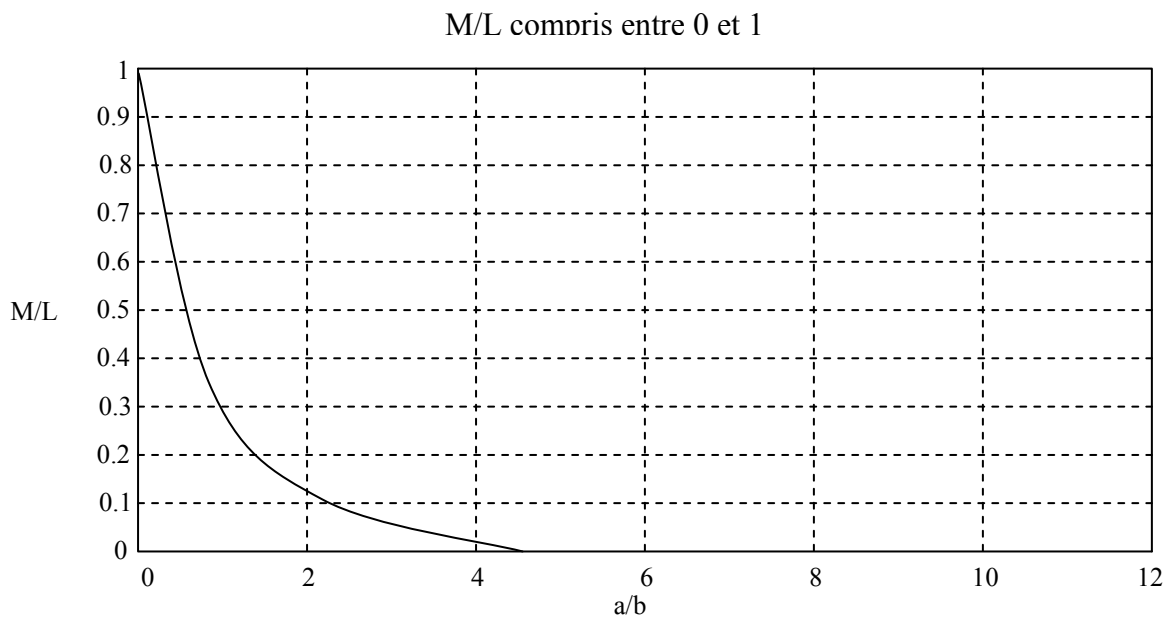
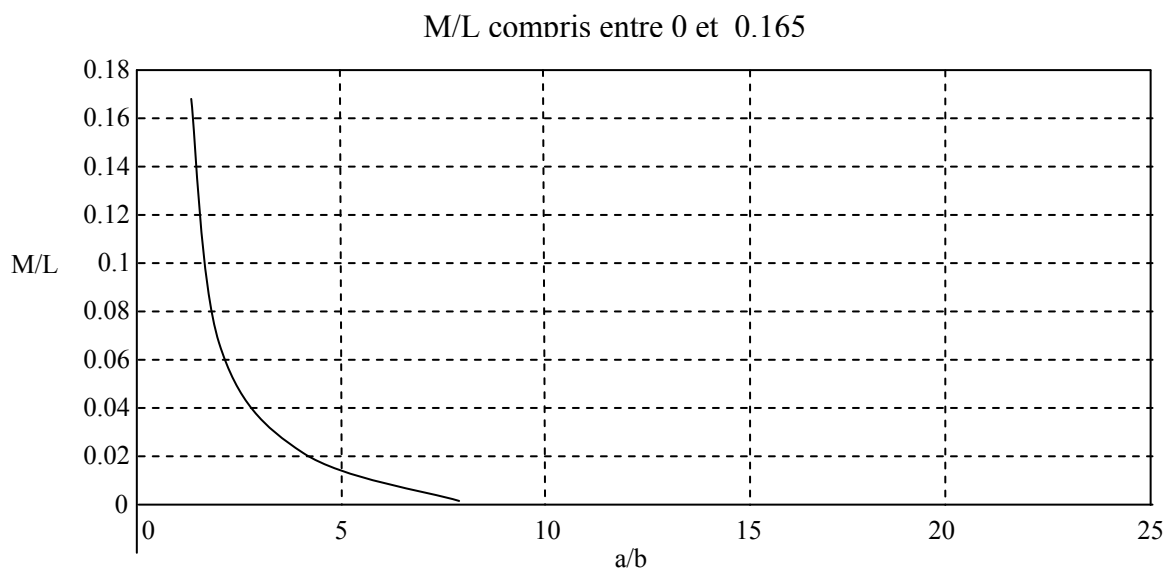


Figure III- 3: Représentation schématique des spires

Les figures suivante donnent les valeurs de $\frac{M}{L}$ en fonction du rapport $\frac{a}{b}$; $\frac{M_{ij}}{L_i} = f\left(\frac{a}{b}\right)$ [36]



a)



b)

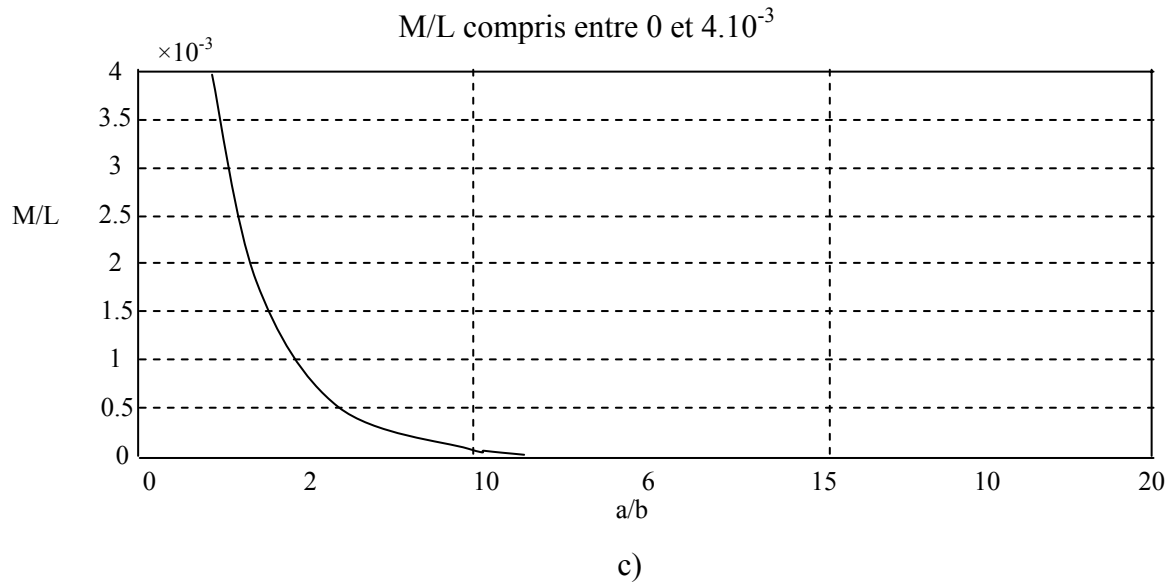


Figure III- 4: Représentation de la fonction $\frac{M_{ij}}{L_i} = f\left(\frac{a}{b}\right)$

Le tableau suivant résume les différentes valeurs de a , b , $\frac{a}{b}$, M_{ij} et $\frac{M_{ij}}{L_i}$ relevées sur les courbes précédentes.

Elément N°	a(mm)	b(mm)	a/b	$\frac{M_{ij}}{L_i}$	$M_{ij}(\mu H)$
1	208	337,5	0,6163	0,520	2665
2	416	337,5	1,2326	0,250	1281
3	624	337,5	1,8489	0,165	846
4	832	337,5	2,4652	0,090	461
5	1040	337,5	3,0815	0,055	282
6	1248	337,5	3,6978	0,040	205
7	1456	337,5	4,3141	0,018	92
8	1664	337,5	4,9304	0,0012	6
9	1872	337,5	5,5466	0,0008	4

$$\text{Donc : } L_i = \frac{0,0109671891}{1+1.14} = 5124.8547 \mu\text{H}.$$

Soit L_p , l'inductance placée entre le transformateur et le parafoudre à une distance $d = 120\text{m}$.

$$L_p = L_{p0} d \quad (\text{II.24})$$

$$L_{p0} = 1.33 \mu\text{H /Km}$$

$$\text{D'où : } L_p = 1.33 * 120 = 160 \mu\text{H}$$

III.2.3.5 Détermination des capacités transversales

La capacité totale C_{tot} entre l'enroulement HT et BT est :

$$C_{tot} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \pi \cdot l \cdot \frac{d_{HT} + d_{BT}}{d_{HT} - d_{BT}}. \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$d_{HT} = \frac{d_{HText} + d_{HTint}}{2} = \frac{2180 + 1550}{2}.$$

$$d_{HT} = 1865\text{mm}.$$

$$d_{BT} = \frac{d_{BTtext} + d_{BTint}}{2} = \frac{1350 + 1030}{2}.$$

$$d_{BT} = 1190\text{mm}.$$

$$\text{D'où La capacité totale } C_{tot} = 1,020253991 \cdot 10^{-9}\text{F}$$

$$C_{tot} = 0,0012025 \mu\text{F}.$$

La capacité transversale d'un élément est :

$$C = \frac{C_{tot}}{n} = \frac{0,0012025}{10}, C = 0,00012025 \mu\text{F}.$$

III.2.3.6 Détermination des capacités longitudinales

Cette capacité K, dépend de la valeur du facteur α de la répartition initiale de la tension le long de l'enroulement.

$$U_x = U_0 e^{-\alpha x} \quad (\text{II.26})$$

avec :

$$\alpha = 2,35.$$

Par ailleurs :

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}} \Rightarrow K_{tot} = \frac{C_{tot}}{\alpha^2}$$

$$K_{tot} = 217,746 \text{ Pf.}$$

La capacité d'un élément est K :

$$K = K_{tot} \cdot n = 2177,46 \text{ PF.}$$

III.2.3.7 Détermination des capacités des éléments du poste

Soit C_p , la capacité de la distance entre le parafoudre et le transformateur.

$$C_p = C_{p0} d \quad (\text{II.27})$$

d : distance entre le parafoudre et le transformateur. Pour un poste unidirectionnel de tension nominale 330 kV, $d = 120\text{m}$ [32]

$$\text{Avec : } C_{p0} = 8.33 \text{ } \mu\text{F/M}$$

$$C_p = 8.33 \cdot 120 \approx 1000 \text{ } \mu\text{F}$$

Soit C_{post} , la capacité du poste qui est égale à :

$$C_{post} = 1000 \text{ } \mu\text{F. [32]}$$

La capacité de la fin de la ligne C_{11} dans le cas d'une ligne à un conducteur est:

$$C_{11} = \frac{C_l}{2} + \frac{C_p}{2} + C_{post} \quad (\text{III.28})$$

$$\text{D'où : } C_{11} = 0,140831 \text{ } \mu\text{F.}$$

La capacité de la fin de la ligne C'_{11} dans le cas d'une ligne à deux conducteurs

$$C_{11} = \frac{C'_l}{2} + \frac{C_p}{2} + C_{post} \quad (\text{III.29})$$

$$\text{D'où: } C_{11} = 0,0082277 \text{ } \mu\text{F.}$$

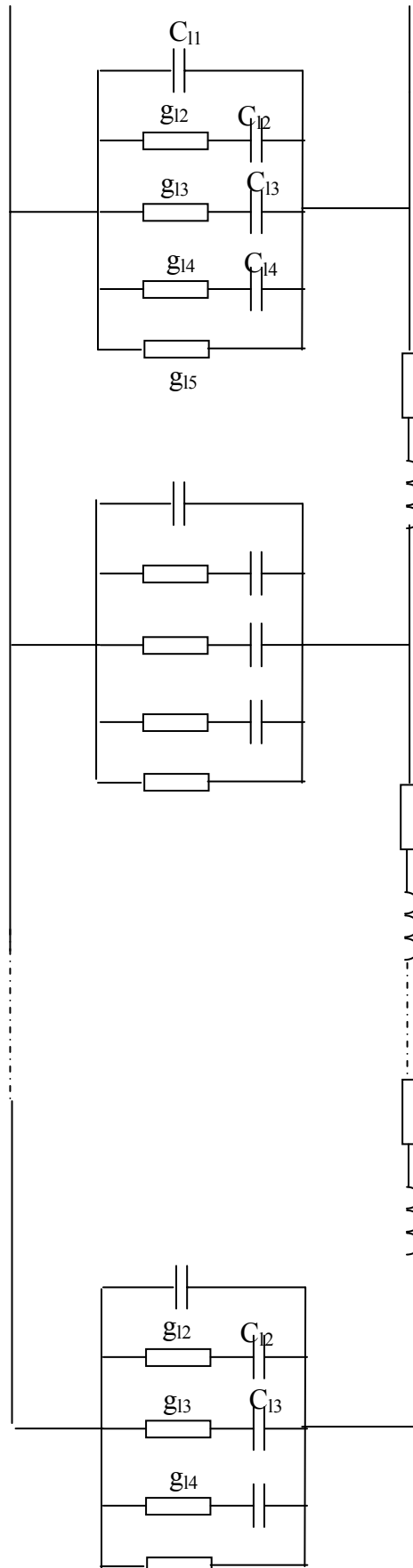
Capacité au début du transformateur C_{t1} :

$$C_{t1} = \frac{C_{tr}}{2} + \frac{C_p}{2}.$$

$$C_{t1} = 0,000560 \mu\text{f.}$$

III.3 Modélisation d'une ligne en tenant compte de l'effet couronne

Figure I-5: schéma équivalent de la ligne en tenant compte de l'effet couronne.



III.3.1 Définition des paramètres

Sur le schéma équivalent de la figure III-5, C_{11} , C_{12} , C_{13} et C_{14} sont respectivement les capacités des branches de la chaîne 1,2,3 et 4 du modèle de couronne.

g_{12} (R_{12}), g_{13} (R_{13}), g_{14} (R_{14}), et g_{15} sont respectivement les conductibilités actives (résistances) des branches 2, 3, 4 et 5 du modèle.

III.3.2 Caractéristiques du modèle

C'est les paramètres déjà calculés dans le chapitre précédent :

Les capacités kilométriques des branches 1, 2, 3, et 4 sont respectivement:

$$C_{01} = 496.5234 \text{ pF/Km}$$

$$C_{02} = 1943.1008 \text{ pF/Km}$$

$$C_{03} = 917.4673 \text{ pF/Km}$$

$$C_{04} = 331.746 \text{ pF/Km}$$

Les résistances kilométriques des branches 2, 3, et 4 sont respectivement :

$$R_{02} = 0.6976 \text{ M}\Omega/\text{Km}$$

$$R_{03} = 0.1414 \text{ M}\Omega/\text{Km}$$

$$R_{04} = 0.2223 \text{ M}\Omega/\text{Km}$$

Les conductibilités actives kilométriques des branches 2, 3, 4 et 5 sont respectivement :

$$g_{02} = 1.4335 \text{ 1/M}\Omega\text{Km}$$

$$g_{03} = 7.0721 \text{ 1/M}\Omega\text{Km}$$

$$g_{04} = 4.4984 \text{ 1/M}\Omega\text{Km}$$

$$g_{05} = 0.5697 \text{ 1/M}\Omega\text{Km}$$

III.3.3 Calcul des capacités du modèle

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

$$C = C_0 * l$$

Soit C_1 , C_2 , C_3 et C_4 les capacités du modèle de couronne :

$$C_1 = C_{01} * l = 124130,85 \text{ pF}$$

$$C_2 = C_{02} * l = 485775,07 \text{ pF}$$

$$C_3 = C_{03} * l = 229366,82 \text{ pF}$$

$$C_4 = C_{04} * l = 82936,50 \text{ pF}$$

Les capacités d'un élément de la ligne sont C_{11} , C_{12} , C_{13} et C_{14} :

$$C_{11} = C_1 / n' = 12413,08 \text{ pF}$$

$$C_{12} = C_2 / n' = 48577,50 \text{ pF}$$

$$C_{13} = C_3 / n' = 22936,68 \text{ pF}$$

$$C_{14} = C_4 / n' = 8293,65 \text{ PF}$$

III.3.4 Calcul des conductibilités actives du modèle

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

$$g = g_0 * l$$

Soit g_2 , g_3 , g_4 et g_5 les conductibilités active du modèle de couronne :

$$g_2 = g_{02} * l = 358,375 \text{ 1/M}\Omega$$

$$g_3 = g_{03} * l = 1786,05 \text{ 1/M}\Omega$$

$$g_4 = g_{04} * l = 1124,6 \text{ 1/M}\Omega$$

$$g_5 = g_{04} * l = 142,425 \text{ 1/M}\Omega$$

Les conductibilités actives d'un élément de la ligne sont, g_{12} , g_{13} , g_{14} et g_{15} :

$$g_{12} = g_2 / n' = 35,8375 \text{ 1/M}\Omega$$

$$g_{13} = g_3 / n' = 178,60 \text{ 1/M}\Omega$$

$$g_{14} = g_4 / n' = 112,46 \text{ 1/M}\Omega$$

$$g_{l5} = g_1 / n' = 14,2425 \text{ } 1/M\Omega$$

III.4 Simulation et interprétation des résultats

III.4.1 Simulation des schémas équivalents

Les surtensions sont souvent une cause de perturbation dans les réseaux électriques, les ondes de surtensions le long de la ligne se déforment et s'amortissent.

Dans ce présent travail, on a étudié et calculé les paramètres de la ligne, du transformateur et du modèle de l'effet couronne ; afin de prévoir l'influence de l'effet couronne sur les surtensions et le comportement de la ligne lors de l'effet couronne, on a effectué une simulation de différents modèles.

Nous avons considéré un poste de transformation de 330 KV et une ligne de 250 Km où le phénomène de la couronne peut avoir lieu. Pour la simulation, les schémas équivalents de la ligne et du transformateur sont divisés, chacun en dix éléments.

Afin de mettre en évidence l'influence de l'effet couronne, on a simulé :

- La ligne ayant un seul conducteur par phase et le transformateur sans tenir compte de l'effet couronne.
- La ligne ayant deux conducteurs par phase et le transformateur sans tenir compte de l'effet couronne .
- La ligne ayant un conducteur par phase et le transformateur en tenant compte de l'effet couronne sans la protection du parafoudre.
- La ligne ayant un conducteur par phase et le transformateur en tenant compte de l'effet couronne avec la protection du parafoudre.

Pour se faire on utilise les schémas équivalents de la ligne, du transformateur et du modèle reproduisant l'effet couronne dont les paramètres sont déjà calculés précédemment. Comme surtension, nous avons choisi une surtension impulsionnelle (1,2 /50µs) avec l'amplitude 725KV qui est la surtension maximale qu'on peut avoir sur la ligne de tension nominale 330KV.

Le schéma de simulation pour la ligne et le transformateur sans tenir compte de l'effet couronne est représenté dans la figure II-1.

Le schéma de simulation pour la ligne et le transformateur en compte de l'effet couronne est représenté dans la figure III-5.



R3		5
.111		
R1		
36		
uF		
20K		

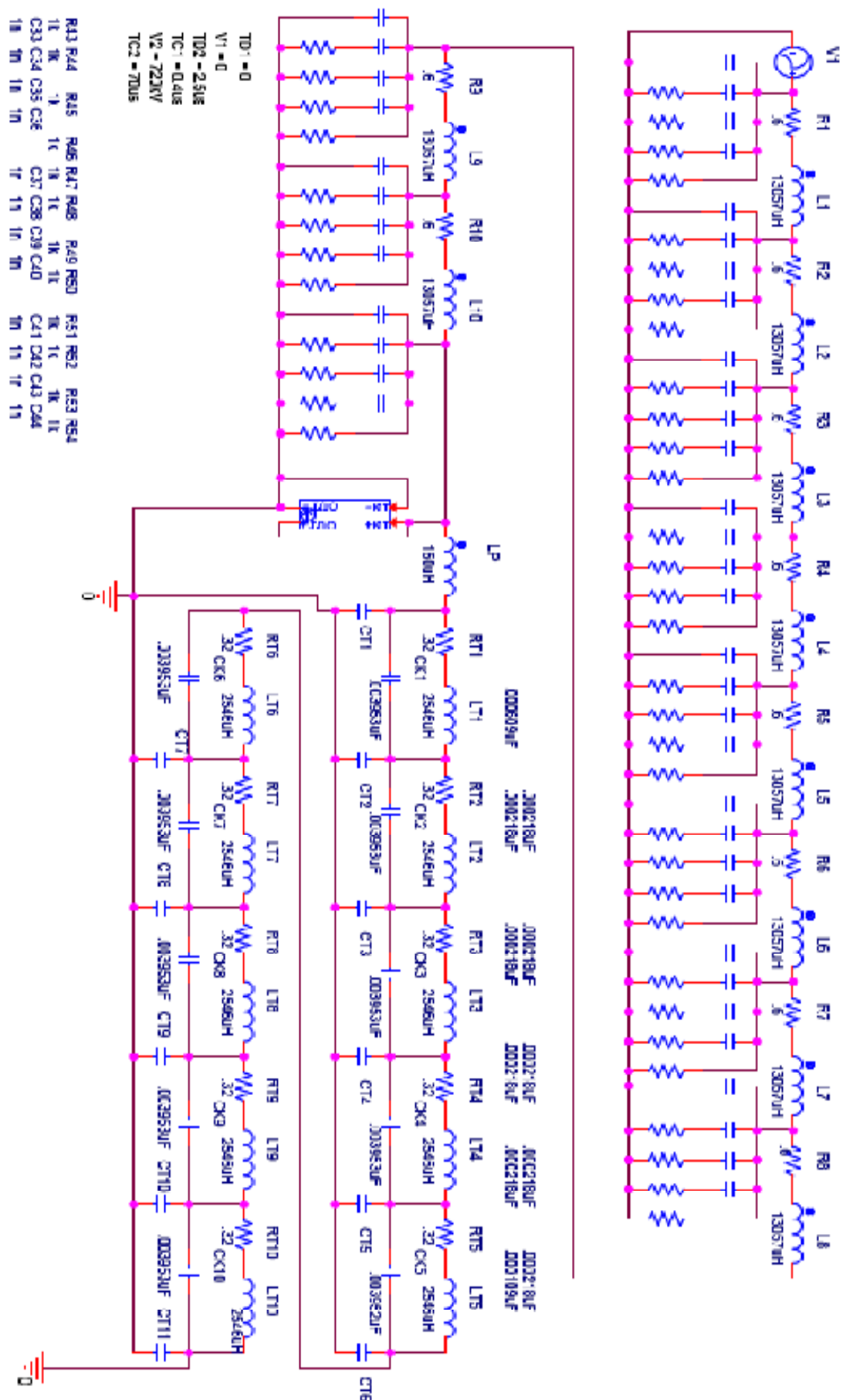


Figure III -7 : Schéma de simulation en tenant compte de l'effet couronne

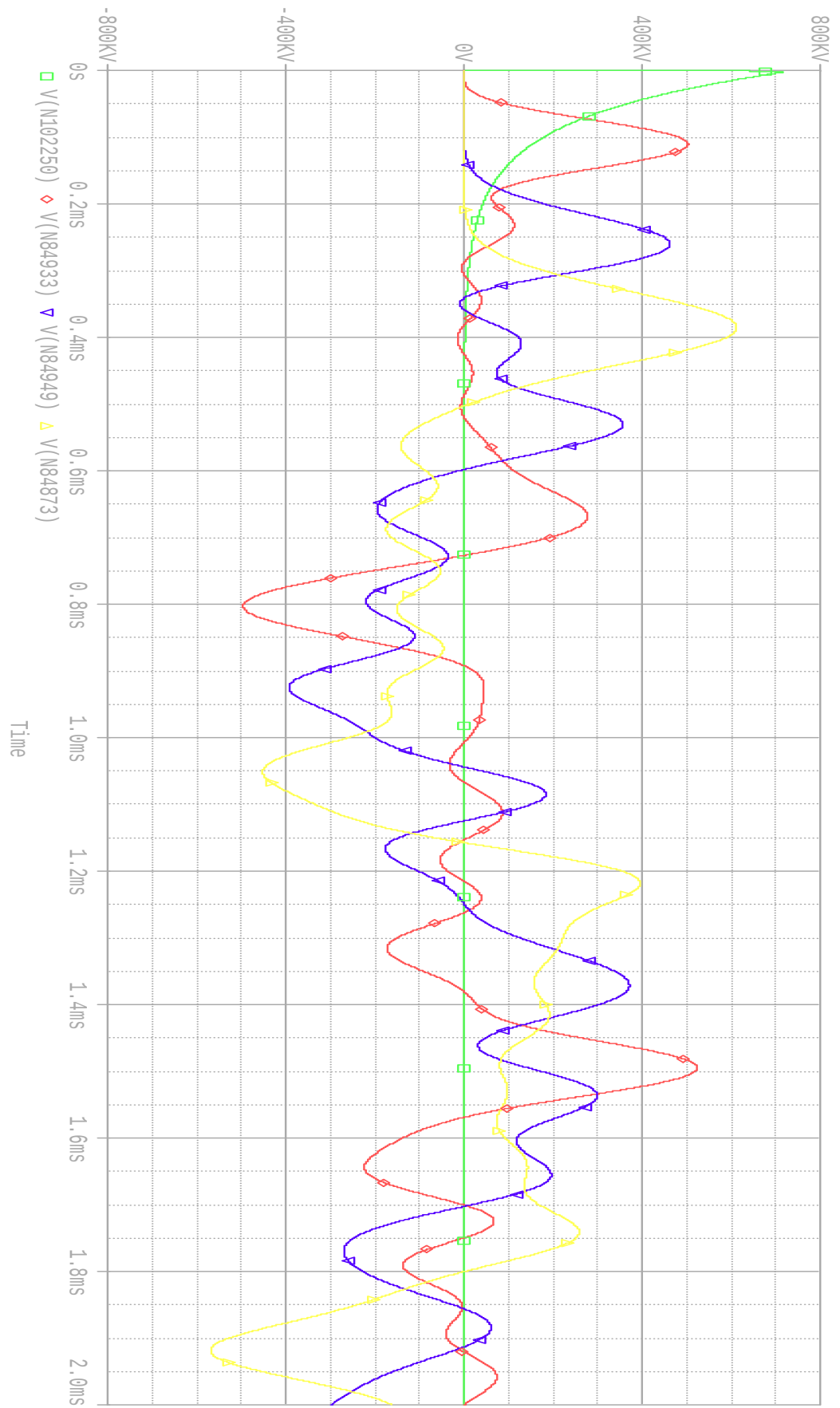


Figure III-8 : Surtension dans la ligne avec un conducteur par phase

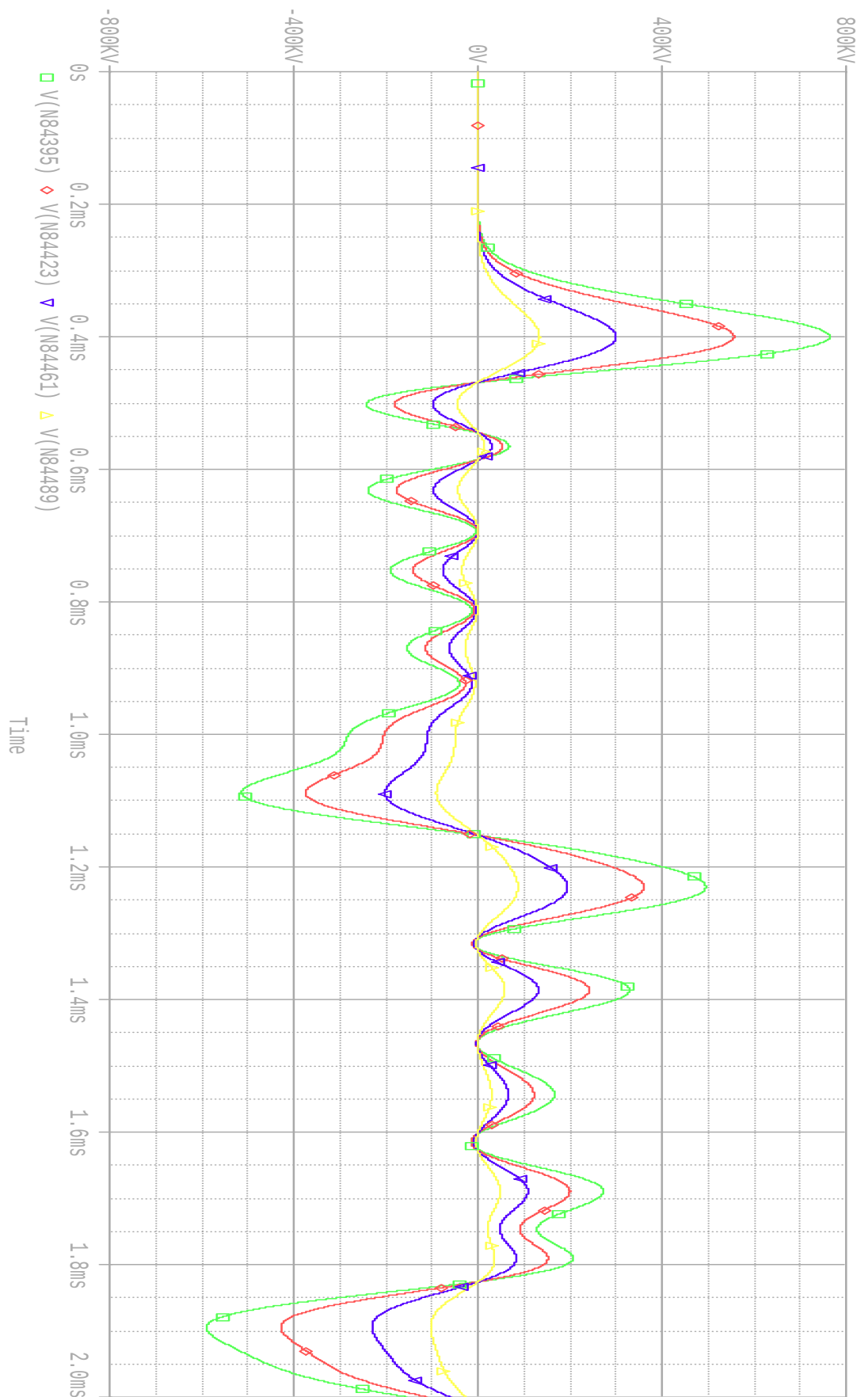


Figure III-9 : Surtension dans le transformateur, la ligne avec un conducteur par phase

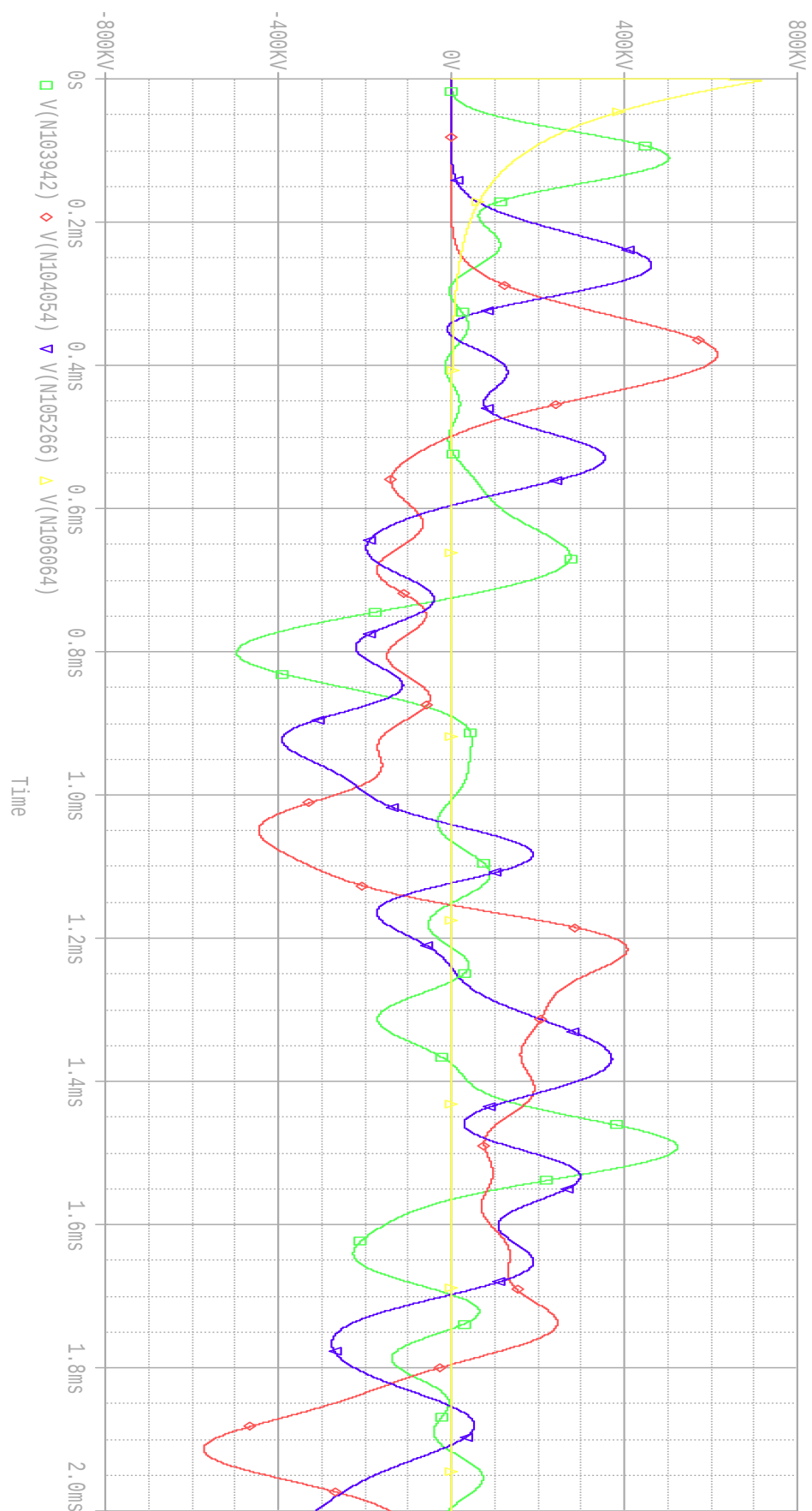


Figure III -10 : Surtension dans la ligne avec deux conducteurs par phase

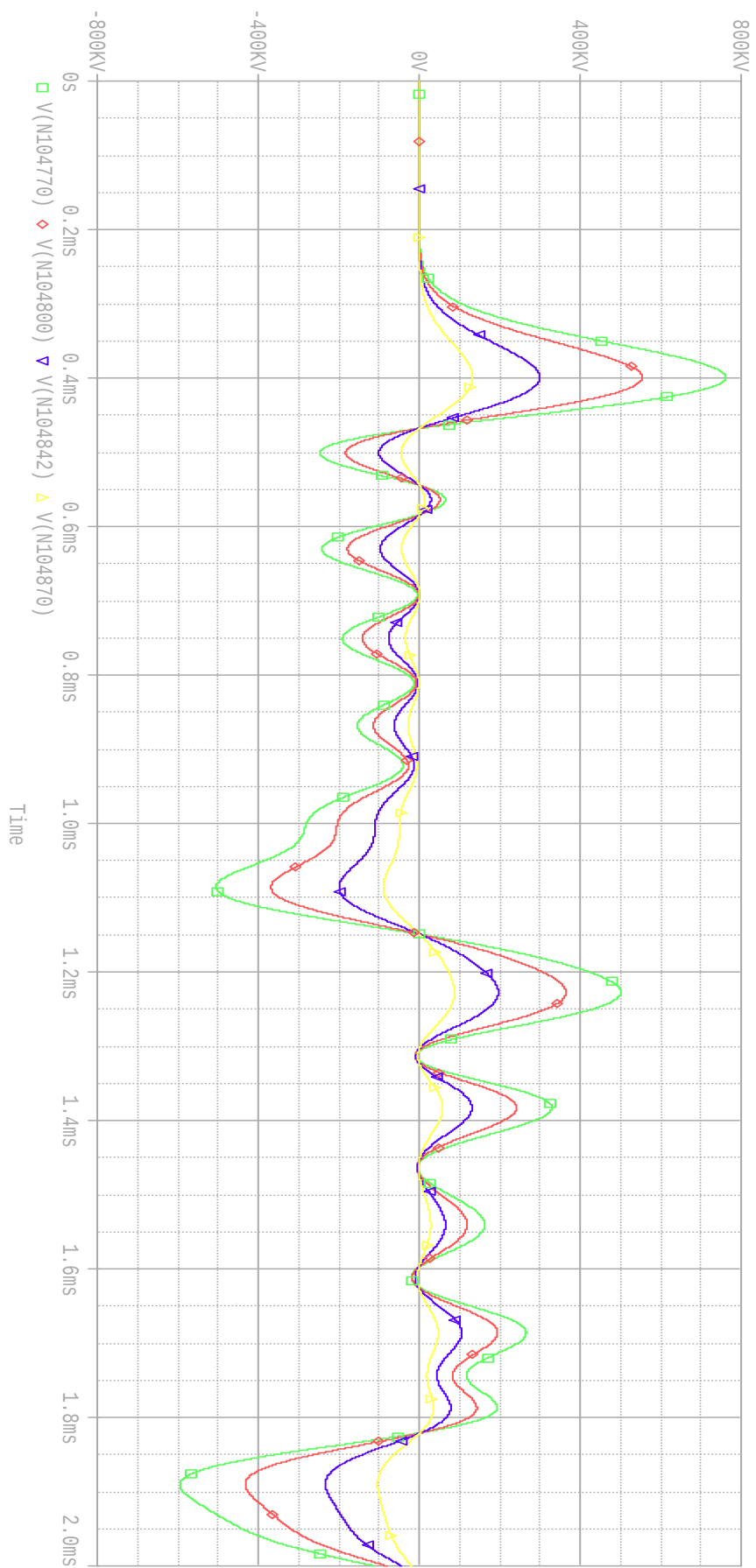


Figure III -11 : Surtension dans le transformateur, la ligne avec deux conducteurs par phase



Figure III - 12 : Surtension dans la ligne en tenant compte de l'effet couronne, (sans parafoudre)

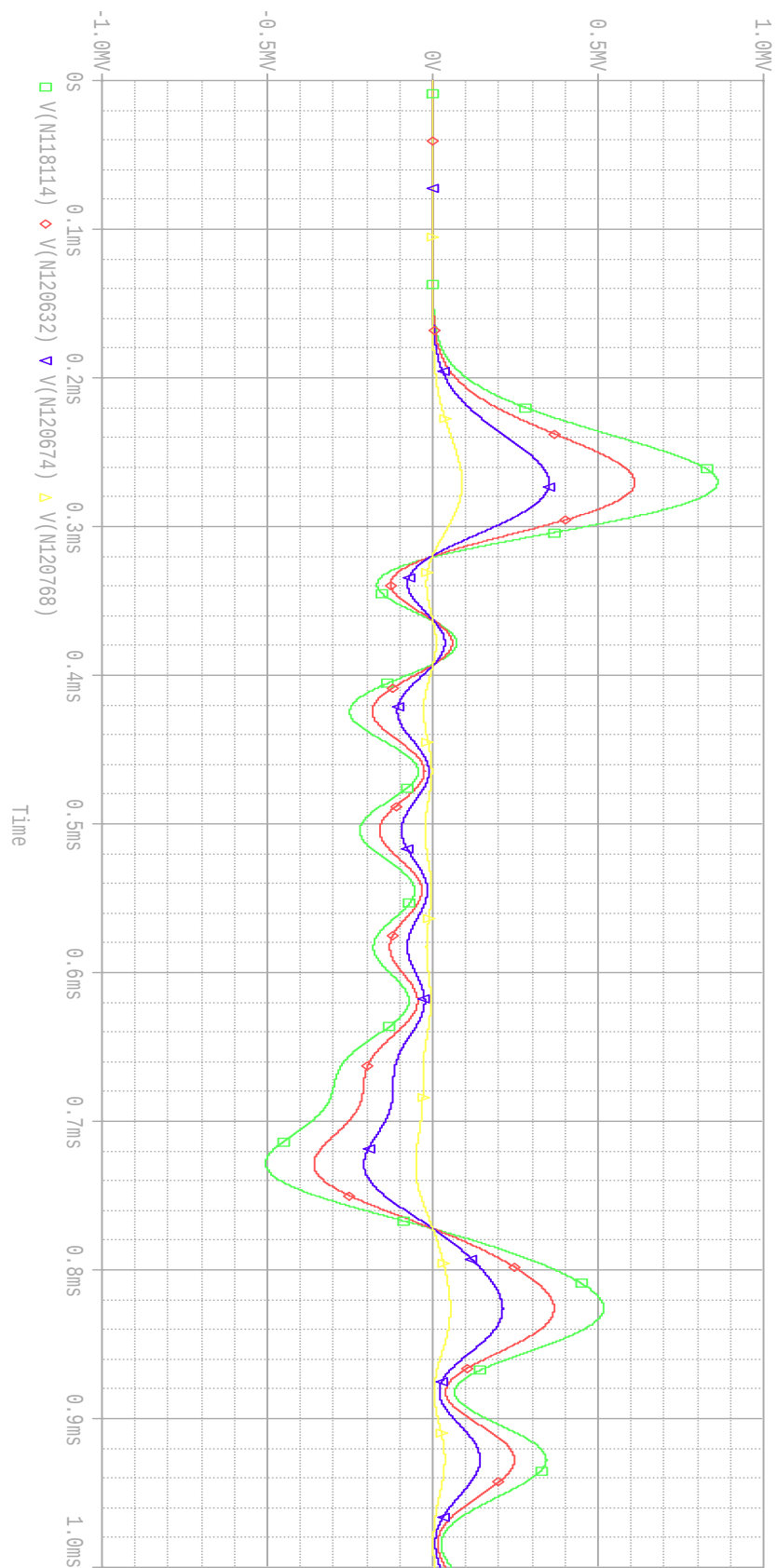


Figure III -13 : Surtension dans le transformateur en tenant compte de l'effet couronne, (sans parafoudre)

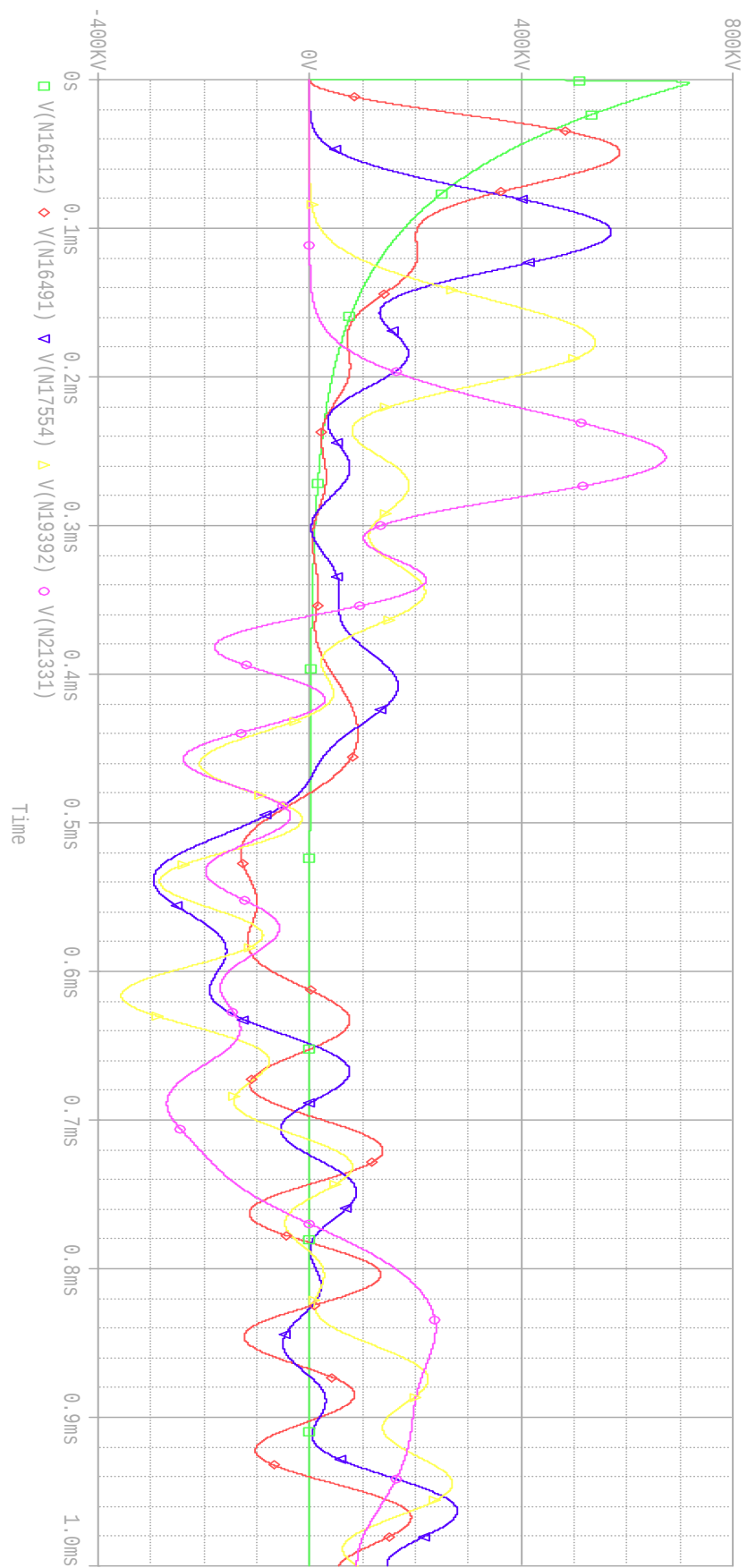


Figure III-14 : Surtension dans la ligne en tenant compte de l'effet couronne, (avec parafoudre)

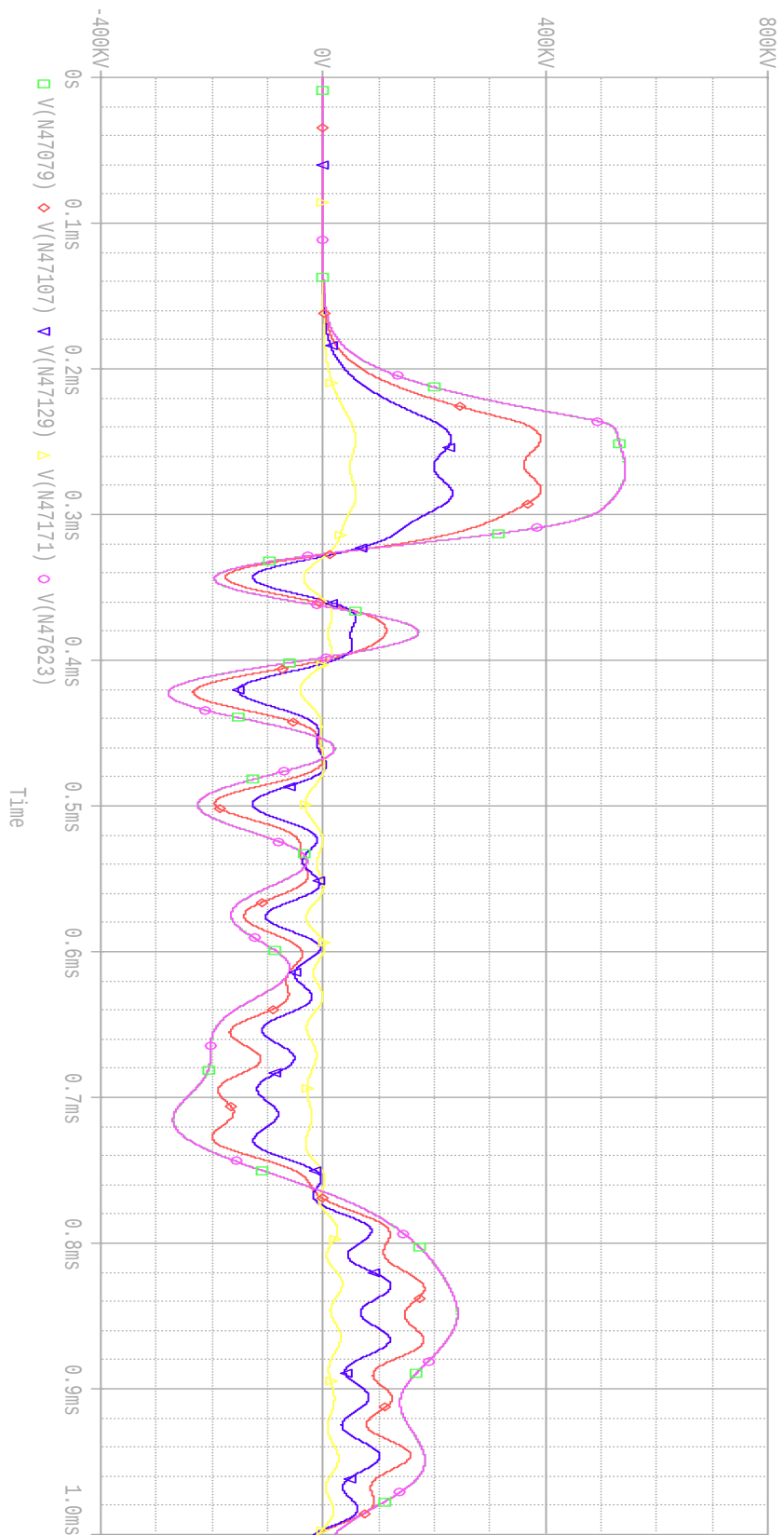


Figure III -15 : Surtension dans le transformateur en tenant compte de l'effet couronne, (avec parafoudre)

III.4.2 Analyse et interprétation des résultats

L'étude du problème considéré est effectuée à partir de quatre schémas équivalents de la ligne et du transformateur : ligne-transformateur sans tenir compte de l'effet couronne, avec un et deux conducteurs par phase et ligne-transformateur en tenant compte de l'effet couronne, avec et sans parafoudre. On applique une tension sur la ligne et on compare les différents résultats, on distingue l'influence de l'effet couronne sur les surtensions dans la ligne et le transformateur.

A partir des figures III-8 à III-15 qui représentent les surtensions sur les lignes et le transformateur, pour les lignes avec un conducteur par phase, avec deux conducteurs et celle en tenant compte de l'effet couronne, on constate qu'au début de la ligne, la surtension est égale à 725kV, qui est la tension appliquée, cette valeur diminue progressivement puis cette diminution se ralentit sur une partie importante de la ligne, en se déplaçant sur la ligne, la surtension diminue puis augmente en s'approchant de la fin de la ligne.

Sur cette grande partie de la ligne, la surtension ne dépasse pas les 500kV. Sur le point de connexion ligne-transformateur, la tension atteint son maximum (environ 750kV) que ce soit dans le cas de la ligne avec un conducteur, deux conducteurs par phase ou en tenant compte de l'effet couronne. On voit bien sur la fig III-15 que le fonctionnement du parafoudre diminue cette surtension jusqu'à 550kV et ce n'est qu'à la fin de la ligne que le parafoudre intervient.

L'augmentation de la surtension sur le point de connexion ligne-transformateur est due à la différence des impédances caractéristiques de la ligne et du transformateur, qui produit une onde de tension réfléchissante positive qui s'ajoute à l'onde incidente.

L'onde de surtension s'applique sur l'enroulement du transformateur avec un retard de 0.17 ms qui correspond au temps d'élimination de la partie de la ligne à partir du point d'impacte de l'onde jusqu'au transformateur.

Au bornes de l'enroulement du transformateur, on a presque la même tension que celle sur l'élément précédent c'est-à-dire le dernier élément de la ligne, si on ne considère pas le fonctionnement du parafoudre, cette tension diminue le long de l'enroulement dont le neutre est mis à la terre, voir les courbes de la fig III-13.

Les Fig III-8 à III-11 illustrent les courbes de surtension sur la ligne avec un et deux conducteurs par phase et le transformateur. Dans le cas d'utilisation de deux conducteurs par phase, la tension diminue mais légèrement de quelques kilo volt et la répartition de la tension

est quasiment la même que dans le cas de la ligne avec un conducteur par phase parce que la résistance de la ligne de tension nominal 330kV est très petite et la différence entre les réactances d'inductions ne sont pas très grandes ce qui nous amène à dire que l'utilisation de deux conducteurs par phase n'a pas une grande influence sur la forme et l'amplitude de la surtension.

Les fig III-12 à III-15 montrent que la considération de l'effet couronne augmente la surtension dans la ligne et le transformateur mais un peu moins dans le transformateur.

D'après ces mêmes figures, l'effet couronne contribue à l'atténuation de l'oscillation des surtensions sur la ligne, à titre d'exemple, sur les fig III-8 et III-12 pour la ligne sans effet couronne, à l'instant $0.4\mu s$, la surtension atteint les 600kV et ne dépasse pas les 200kV sur la ligne avec effet couronne au même instant.

L'apparition de l'effet couronne diminue considérablement la période d'oscillation, sur les fig III-8 et fig III-12, la période passe de 1 ms dans le cas où on ne considère pas l'effet couronne à 0.2 ms dans le cas où on tient compte de cet effet, c'est-à-dire 05 fois plus petite.

D'après le calcul de raideurs sur les courbes de surtensions dans la ligne pour les trois cas, on constate que la raideur de l'onde dans le cas d'une ligne avec un conducteur par phase est plus importante que celle avec deux conducteurs par phase et encore beaucoup plus importante dans la ligne avec effet couronne.

Dans le cas d'une ligne avec effet couronne, la raideur des surtensions est plus importante dans les enroulements du transformateur, ceci présente un danger sur les niveaux d'isolation longitudinale de l'enroulement.

La vitesse de l'onde sur la ligne couronnée est plus grande que celle sur la ligne normale.

En présence de l'effet couronne, il y a aussi création d'harmoniques qui à leurs tour détériorent la qualité de l'énergie et influe sur les surtensions.

Le fonctionnement du parafoudre limite considérablement les surtensions dans le transformateur, celui-ci a diminué la surtension de la valeur 860kV jusqu'à 540kV.

En résumé, l'apparition de l'effet couronne dans les lignes électriques déforme la surtension sur tout le plan, que ce soit au niveau de la période, de la raideur, de la vitesse, de l'allure ou de l'amplitude.

Conclusion générale

La création de la décharge couronne dans les lignes de transport d'énergie électrique perturbe le fonctionnement normal, non seulement des éléments de réseaux électriques, mais aussi les éléments des réseaux de communications. La présence de l'effet couronne augmente considérablement les pertes de puissances, devenant comparable, même dépassant les pertes Joule dans les conducteurs des lignes. Dans les réseaux de tensions nominales 330 kV et plus les pertes de puissance par l'effet couronne atteignent quelques centaines de kilowatts par kilomètre. La création de l'effet couronne est liée aussi par la production des harmoniques dans les réseaux électriques. La pollution harmonique est un des phénomènes les plus perturbateurs entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie électrique.

Pour notre cas, on a étudié l'influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension.

Afin de réaliser cette étude, on a d'abord élaboré un modèle reproduisant l'effet couronne puis l'associé au schéma équivalent de la ligne et du transformateur et effectué des simulations on injectant une surtension de 725kV dans une ligne dont la tension nominal est 330kV, la simulation a été faite pour différents cas, c'est-à-dire ,pour une ligne avec un conducteur, avec deux conducteurs par phase et avec effet couronne pour mieux constater les influences de la couronne sur les surtensions, de même, la simulation a été faite avec la protection contre les surtensions.

En effet, les résultats obtenus montrent bien que la présence de l'effet couronne influe considérablement sur les surtensions dans la ligne et dans le transformateur, tout en augmentant l'amplitude et la raideur des surtensions, la propre fréquence de la ligne, la vitesse de propagation de l'onde sur la ligne en plus de la création d'harmoniques ; l'effet couronne déforme complètement l'onde de surtension.

En perspectives, il serait intéressant d'ajouter d'autres branches au modèle de l'effet couronne élaboré dans ce présent travail pour élargir son domaine de validité en terme de fréquence afin de prédire l'influence de l'effet couronne sur les surtensions de différentes origines.

Il serait également intéressant d'établir un modèle reproduisant l'effet de peau et l'associer au modèle de l'effet couronne et étudier simultanément l'influence de ces deux phénomènes sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension.

Bibliographie

[1] R. Farhi, C. Morel, G. Chéron «Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité». INRS, ED638, Octobre 2006.

[2] M. Handala. Mohand-Amokrane «Étude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide». Thèse de doctorat d'Etat, UMM T.O, décembre 2007.

[3] Julien. Jarrige «Étude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008.

[4] Gueller-B Veverka-A « Les processus impulsionnels dans les machines électriques »,ENERGUIYA ,Moscou,1976.

[5]: Myriam. Hamel, B.SC.A. «Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne». Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Chicoutimi, 1991.

[6] : Hamoumeche. K «Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan». Mémoire de magister, UMMTO, décembre 2009.

[7] Alexandre Labergue « Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements»,Thèse de Doctorat, Université de Poitiers,2005.

[8] Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.

[9] Saad Djedjiga « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, Avril 2011.

[10] : Hakim. Yala «Calcul numérique du champ électrique en géométries fil-cylindre et fil-plan lors de la décharge couronne positive dans l'air». Mémoire de magister, université, A .Mira de Bedjaia 2001.

[11] Lokhanine A-K «détermination des inductances des transformateurs HT » , ELECTRITCHESTVO,Moscou ,1976.

[12] Carl. Potvin «Comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne». Mémoire d'ingénieur de l'université de Québec, mars 2000.

[13] Jérôme JOLIBOIS «Étude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-Application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile». Thèse de doctorat de l'université de Poitier, décembre 2008.

[14] M. Aguet et M. Lanoz «Traité d'électricité : Haute Tension», vol XXII 2ème édition 2004.

[15] Daill. Guillaume. FOURNAUD. Benoît «Décharges couronne application et modélisation». Énergétique industrielle ESIP 2004/2005.

[16] Bourek. Yacine «Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue». Thèse de magister, université de Batna, 2005.

[17] Zibin. LU «Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, décembre 1991.

[18] J. Koller, V. Kriha, J. Pichal, L. Aubrecht «Corona discharge light emission et electric field intensity comparison». Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, 2004.

[19] Junhong. Chen ET Jane H. Davidson «Model of the Negative DC Corona Plasma: Comparison to the Positive DC Corona Plasma». Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, Mars 2003.

[20] Yall B.S.C.A «Contribution à l'étude de l'influence des décharges de couronne sur la perte de volume d'une aspérité de glace portée à un potentiel élevé». Thèse pour l'obtention du grade de maîtrise en ressources et systèmes. Université de Québec à Chicoutimi. Avril 1993.

[21] Issouf. FOFANA «Modélisation de la décharge positive dans les grandes intervalles d'air». Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon novembre 1996.

[22] Rezzouga M, Tilmatine A, Gouri R, Medles K, Dascalescu L «Experimental modiling of high-voltage corona discharge using design of experiments». Front. Electr. Electron. Eng, 2(2): 139-143. China 2007.

[23] : M.P. Panaget « Étude en laboratoire des effets physico-chimique induits par les pertes électriques des lignes de transport à haute tension». Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie 1997.

[24] Acte de la deuxième conférence nationale sur la haute tension, université de Tizi-Ouzou 1997.

[25] G.N Adelsandrov, G.M Rigeikov. O.V Cherbatchev «Modélisation de la caractéristique de couronne de courant alternatif» Recueil de l'institut polytechnique de Saint Petersburg, la série de la technique de la haute tension. 1958.

[26] : Flavien. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.

[27] C.Gary; «Effet couronne en tension alternative»: Techniques de l'ingénieur, Tome 1 D640.

[28] C.Gary; «Effet couronne sur les réseaux électriques aériens»: Techniques de l'ingénieur, D4440.

- [29] V.M. Blok « réseaux électriques », Moskou, Bischaya Chkola , 1986.
- [30] G.N Alelsandrov, « les décharges de couronne dans les lignes de transport d'énergie », 1964.
- [31] B.N Neclepaev, J.P Kryoutchkov, « partie électrique des centrales et des postes électriques ». Energoatomizdat, Moscou, 1989.
- [32] D.V Razevig, « Technique de haute tension », Energya, Moscou, 1976.
- [33] V. J Levitov, « Couronne du courant alternatif », Energya, Moscou, 1975.
- [34] G.N Alelsandrov, « Ultrahaute tensions », Energya, Sant-Persbourg, 1973.
- [35] E. N Jouravlev « Perturbations émissif par les lignes couronnées », Energya, Moscou, 1971.
- [36] W. Mosca, P. Ostano, G. Rumi « MVDC visual corona and RIV testing on insulators and conductor samples » IEEE Transaction on power app. A. Syst, N° 1, 1971
- [37] A. M. Machniv, B. M. Sadikov, V. F. Latchonguin, « Les paramètres du modèle de couronne », Essais numériques lors d'étude des processus transitoires dans les réseaux électriques ». Elen, Bakou, 1991.
- [38] R. Pelissier, «Réseaux d'énergie électrique», Edition DUNOD, Tomel Paris 1971.
- [39] Lacoste A, Pai D, Laux C., 2004, «Ion wind effect in a positive DC corona discharge inatmospheric pressure air», *AIAA Paper* n°2004-0354, Reno.
- [40] Loiseau J.F., Batina J, Noël F, Peyrous R., 2002, «Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor», *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 1020-1031.

[41] Goldman M, Goldman A, Sigmond R.S, 1985, «The corona discharge, its properties and specific uses», *Pure and Appl. Chem.* 57, n°9, p. 1353-1362.

[42] Goldman M, Sigmond R.S, 1982, «Corona insulation, *IEEE Trans.* *Elec. Ins.*, EI. 17/2, pp. 90-105.

[43] Parissi L., 1999, «Etude d'un procédé de traitement d'air chargé en composé organiques volatiles par décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique : mécanisme mis en oeuvre et recherche d'optimisation», Thèse Univ. Paris VI.

RESUME

La création de l'effet couronne dans les lignes de transport de l'énergie électrique perturbe le fonctionnement normal, non seulement des éléments des réseaux électriques mais aussi des réseaux de communications.

Dans notre étude, on s'intéressera à l'influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension.

Le but de cette étude est de déterminer un modèle qui simule le plus fidèlement le phénomène d'effet couronne dans les lignes de transport de l'énergie électrique et les enroulements du transformateur lors des régimes transitoires causés par les surtensions qui engendrent la distorsion des tensions et des courants.

Pour se faire, en premier lieu, on a élaboré un modèle reproduisant l'effet couronne dans les lignes de haute tension, en deuxième lieu, on a modélisé et simulé une ligne avec un conducteur, une ligne avec deux conducteurs et un transformateur de haute tension sans tenir compte de l'effet couronne, puis en tenant compte de ce phénomène dans les lignes électriques et les transformateurs. Une comparaison entre les deux simulations a été faite afin de mettre en évidence l'influence de ce phénomène sur les surtensions dans les lignes électriques et les transformateurs.

Les résultats obtenus montrent bien que la présence de l'effet couronne influe considérablement sur les surtensions dans la ligne et dans le transformateur, tout en augmentant l'amplitude et la raideur des surtensions, la propre fréquence de la ligne, la vitesse de propagation de l'onde sur la ligne en plus de la création d'harmoniques ; l'effet couronne déforme complètement l'onde de surtension.