

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA
BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté :Sciences de l'Ingéniorat

Département : Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de LICENCE

Thème :

**ANALYSE DE L'EFFET COURONNE EN REGIME
ALTERNATIF**

Présentés Par:

- KHELIFI Safa
- DJOUDI Roumaissa

Encadrant : AZZAG El bahi Grade : Pr Université : UBMA

Jury de Soutenance:

KSENINI Abdelhamid	MCA	UBMA	Examineur
AZZAG El- bahi	Pr	UBMA	Encadrant

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Avant tout , nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la fore d'atteindre notre but et d'accomplir notre travail .

Que nos remerciements les plus sincères s'adressent tout particulièrement à notre encadreur Monsieur Azzag .El bahi , qui nous a encadré durant tout le long de ce travail , leur conseils , pour leur patience ,leur soutien permanent et leurs encouragement qui nous ont permis de mener à bien ce mémoire .

Nos remerciements vont également à Mr .ksentini .Abdelhamid , maître de conférences a bien voulu présider notre jury de mémoire .

Enfin on adresse tous nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail .

Nos remerciement vont également à tous les personnes qu'on n'a pas citées et qui ont de près ou loin participé à la réalisation de ce travail.

KHELIFI Safa

Dédicace

Je dédie modestement le fruit de mes longues années d'étude tout d'abord
Amon très cher père qui mérite tout mon respect , qui m'a indiqué la bonne voie en me
rappelant que la volonté fait toujours les grands Hommes
A la prunelle de mes yeux et la joie de ma vie ma mère , quiaoeuvré pour ma réussite , par
son soutien , tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils.
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie .
A ceux qui m'encouragent avec soutien moral
A ma chère sœur Rania
A ma belle sœur Bochra
Au mari de ma sœur Tarek
Au seul petit Ghraith
A mes chères copines
A toute ma grande famille : mes oncles , mes tantes , cousines.
A mes enseignants
A mes amis les plus sincères
Sans oublier toute la promotion de 3^{ème} Année licence Electrotechnique 2021
Avec qui j'ai partagé de très bons moments
A tous ceux qui m'aiment et j'aime .

KHELIFI .Safa

Dédicace

Je dédie modestement ce travail à :

Mes parents qui méritent tous mon respect .

Mon frère et mes sœurs .

La promotion de 3^{ème} Année 2021

Tous mes amis

Tous les gens qui m'ont encouragé .

Djoudi . Roumaissa



Université Badji Mokhtar- Annaba

Faculté des sciences de l'ingénierat

Département d'Electrotechnique



Rapport sur le travail de mémoire de licence

Présentées par :

Khelifi safa –Djoudi roumaissa

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

Intitulé du mémoire :

ANALYSE DE L'EFFET COURONNE EN REGIME ALTERNATIF

Résumé :

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 de l'effet couronne dans les lignes haute tension

Le but de cette étude est une étude du phénomène d'effet couronne dans les lignes HT .cette étude nous même a voir les effets positifs et négatifs de l'effet couronne .

Pour caracteuser l'existence de l'effet couronne.

Mots clés : l'effet couronne, Lignes haute tension.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale	1
Chapitre I : Réseau dans les lignes de transport dans les lignes HT	
I.1 Introduction	3
I.2 Le réseau de transport HT	3
I.3 Rôle du réseau électrique	3
I.4 Niveaux de tension	4
I.5 Types de lignes	4
I.5.1 Lignes de distribution à basse tension (BT)	5
I.5.2 Lignes de distribution à moyenne tension (MT)	5
I.5.3 Lignes de transport à haute tension (HT)	5
I.6 La ligne à haute tension	5
I.6.1 Composants d'une ligne	5
I.6.2 Conducteurs	6
I.6.3 Les Eclateurs	6
I.6.4 Les supports	7
I.6.5 Câble de garde	7
I.7 Schéma équivalent d'une ligne électrique	8
I.7.1 Résistance longitudinale	10
I.7.2 Réactance longitudinale.....	11
I.7.3 Résistance transversale	11
I.8 Modélisation en π des lignes électriques	12
I.8.1 Equation des télégraphistes	13
I.9 Modèle en π	13
I.9.1 Impédance et admittance	13
I.9.2 Nombre de π à utiliser	14
I.10 Calcul des paramètres électrique pour une ligne aérienne	14
I.10.1 Conducteur équivalent	14
I.10.2 Distance inter-faisceaux/ conducteur équivalente	16
I.10.3 Résistance de la ligne	16
I.10.4 Inductance	17
I.10.5 Valeurs typiques de l'impédance	17
I.10.6 Valeurs typique de l'admittance	18
I.11 Conclusion.....	19

TABLE DES MATIERES

Chapitre II : L'effet couronne dans les lignes de transport HT

II.1	Introduction	20
II.2	L'effet couronne	21
II.3	Phénomènes d'ionisation dans les gaz	22
II.3.1	Excitation atomique	23
II.3.2	Ionisation par collision électronique	23
II.3.3	Photo-ionisation	23
II.3.4	Recombinaison	24
II.3.5	Détachement	24
II.4	Mouvement des charges dans champ électrique	24
II.5	Conclusion	25

Chapitre III : Décharge dans la ligne électrique

III.1	Introduction	26
III.2	Régimes de décharge dans un gaz	26
III.3	Mécanisme de la décharge couronne	28
III.4	Caractéristique du Claquage dans les gaz	28
III.5	Avalanche électronique (décharge Townsend)	28
III.6	Streamer.....	29
III.7	Champ électrique	30
III.8	Décharge couronne	34
III.8.1	Décharges couronnes positives	35
III.8.2	Décharge couronne négative	36
III.8.3	Décharge couronne dans les lignes à courant alternatif	37
III.8.4	Phénomènes induits par la décharge couronne.....	37
III.8.5	Effets électromagnétiques.....	37
III.8.6	Effet chimique	38
III.9	LOI DE PEEK	38
III.9.1	Définition	38
III.9.2	Obtention de la loi de Peek.....	41
III.10	Les différentes corrections.....	42
III.10.1	Corrections climatiques.....	42
III.10.2	Corrections liées à la surface du conducteur central.....	43
III.11	PERTES COURONNE DANS LES réseaux électriques.....	43
III.11.1	Nature des pertes	43
III.11.2	Influence de la pluie	44
III.11.3	PERTURBATION ELECTROMAGNETIQUE.....	45
III.11.4	BRUIT.....	45
III.11.5	DEGAGEMENT D'OZONE	45
III.12	Solutions	46
III.12.1	Conducteur en faisceaux.....	46
III.12.2	AVANTAGE DE LA DECHARGE COURONNE DANS LE RESEAU	46
III.12.3	Conducteurs	47
III.12.4	L'utilisation des faisceaux des conducteurs.....	48

TABLE DES MATIERES

III.12.5 Caractéristique d'un faisceau	48
III.12.6 Calcul du rayon équivalent d'un faisceau.....	49
III.13 APPLICATIONSUTILISANTLADECHARGE COURONNE.....	49
III.13.1 Parafoudre	49
III.13.2 Neutralisation.....	49
III.13.2 Filtre électrostatique.....	50
III.13.3 Séparateur électrostatique.....	50
III.14 Conclusion.....	51
Conclusion Générale	52
Références Bibliographiques.....	53

LISTE DES FIGURES

- Fig. I.1 :** Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite, l'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur les propriétés électriques du conducteur
- Fig. I.2 :** chaînes des isolateur
- Fig. I.3:** Modèle de supports
- Fig. I.4:** Modèle de ligne électrique
- Fig. I.5:** Résistance linéique en fonction de la fréquence
- Fig. I.6:** Modèle en π d'une ligne électrique
- Fig. I.7:** Modèle en π
- Fig. I. 8:** Faisceaux de conducteur de 2, 3 ou 4 conducteurs
- Fig. I. 9:** Distance entre les faisceaux de conducteur sur un pylône
- Fig. I.10:** modale de système triphasé
- Fig. III .1:** régime de décharge en courant continue
- Fig. III.2:** Avalanche électronique
- Fig.III. 3:** photographie dans une chambre
- Fig.III. 4:** champ de charge électrique
- Fig. III.5:** Grandeurs caractéristiques d'un faisceau
- Fig. III.6:** descriptif de la décharge couronne positive
- Fig.III. 7:** descriptif de la décharge couronne négative
- Fig. III.8:** Tension et courant dans une ligne électrique à courant alternatif lors du phénomène couronne
- Fig. III.9:** Température
- Fig. III.10 :** polarités positive et négative
- Fig. III.11 :** Conducteur creux et en faisceaux
- Fig. III.12 :** conducteurs en faisceau
- Fig.III. 13 :** Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre
- Fig.III. 14 :** Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.
- Fig. III.15 :** Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Valeurs typiques de l'impédance

Tableau I.2 : Valeurs typiques de Résistance

Tableau I.3 : Valeurs typiques de Inductance

Tableau I.4 : Valeurs de temps

Tableau I.5: Valeurs typique de l'admittance

Tableau II.1: Principales collisions inélastiques intervenant dans les mécanismes de l'effet couronne.

Tableaux III.1 :les facteur des conducteurs

Introduction générale

Dès les débuts de l'électrotechnique des hautes tensions, l'effet couronne ou « corona effect » (en notation anglo saxonne) a attiré l'attention des chercheurs notamment par les phénomènes lumineux ayant lieu. C'est à R.W. Peek a qui revient la première étude sur l'effet couronne. Celui-ci qui, en 1929 a établi une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la lueur, loi qui est encore en usage. De là une grande étape a été franchie et des travaux ne cessent de s'effectuer sur la compréhension du phénomène physique lui même et sur les moyens de détermination de ses paramètres électriques à savoir le champ, le courant, la charge et tel que, le canal de décharge...etc. Cependant, la maîtrise du phénomène permet la dimensionnement des lignes et des postes HT et THT du fait qu'il mène à l'amorçage de tout l'intervalle d'isolement.

La décharge couronne ayant des avantages et des inconvénients. Comme l'avantage, la création du vent ionique. Les ions créés par ces décharges sont accélérés par le champ électrique. La vitesse est transférée aux molécules du gaz ambiant par la collision, lui donnant un mouvement de la pointe de l'aspérité vers le milieu du gaz. Et aussi comme un inconvénient en présente le bruit audible, dans les lignes de transport, au dessus de 500 kV.

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Le système des électrodes peut former diverses configurations à savoir fil – plan, pointe – plan, fil – cylindre, sphère – plan,...etc. Lorsque le champ devient important à proximité de l'électrode active, l'ionisation du gaz a lieu. A vrai dire, il se forme deux zones, celle à proximité du conducteur dite zone d'ionisation se distingue par une charge totale nulle et celle dans l'espace restant est dite zone de dérive. Dans cette dernière les ions de même polarité que la tension appliquée sont entraînés par la force électrostatique et tendent à se déplacer le long des lignes du champ.

Les décharges dans un gaz sont à l'origine associée au courant traversant l'espace inter électrode, et plus généralement, elles regroupent tous les processus tels que l'ionisation, l'attachement ou la photo émission qui interviennent dans un gaz lorsqu'un champ électrique suffisamment important lui est appliqué, mais également les écoulements des particules chargées et neutres qui s'en suivent.

Introduction générale

Ainsi notre travail est réparti en trois chapitres. Le premier est consacré aux rappels sur les différents types de réseaux électriques et leurs applications dans le domaine d'électrotechnique.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présentés une étude de formulation du problème du l'effet couronne.

Tant que le troisième chapitre, qui est le dernier chapitre dans notre mémoire est consacré aux rappels sur les différents types de décharges électriques et leurs applications dans le domaine d'électrotechnique.

Chapitre I :
Etude des lignes de transport dans les réseaux HT

I.1 Introduction :

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive et capacitive. Ce chapitre vise à déterminer les valeurs de ces paramètres. Il fait la distinction entre les caractéristiques longitudinales (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs).

I.2 Réseau de transport HT :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers Les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MV A) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,...

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains).Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [1].

I.3 Rôle du réseau électrique :

Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs. Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension de réseau électrique ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. [1]

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

1. La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sureté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs.

2. L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale.

3. Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché de l'électricité.

I.4 Niveaux de tension :

Les niveaux de tension utilisés diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) les niveaux de tension sont définis comme suit : THT (VHV) : Très Haute Tension (Very High Voltage), pour des tensions composées supérieures à 220 kV ; HT (HV) : Haute tension (High Voltage), des tensions composées supérieures comprises entre 33 kV et 220 kV ; MT (MV) : Moyenne tension (Medium voltage), des tensions composées comprises entre 1 kV et 33 kV ; BT (LV) : Basse tension (Low voltage), tension comprise entre 100 V et 1 kV ; TBT (VLV) : Très basse tension (Very low voltage), inférieure à 100 V. D'autres normes existent, notamment la norme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Celle-ci définit la tension moyenne sur une large plage (de 1 kV jusqu'à 69 kV). La norme IEEE est utilisée surtout en Amérique du nord. Il y a aussi la norme française qui définit les niveaux comme suit : HTB : supérieure à 50 kV, HTA : entre 1 kV et 50 kV, BTB : entre 500 V et 1 kV, BTA : entre 50 et 500 V et TBT : inférieur à 50 V. Remarque : En pratique, il y a des valeurs de tensions standards pour chaque niveau. En Algérie ces niveaux sont 220 kV en transport, 60 kV et 30 kV en répartition et distribution MT et 400 V en distribution BT.[1]

I.5 Types de lignes :

Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

Puissance active à transporter[2]

- Distance de transport
- Coût
- Esthétique, encombrement et facilité d'installation

- Nous distinguons quatre types de lignes :

I.5.1 Lignes de distribution à basse tension (BT) :

Ce sont des lignes basses tension qui acheminent l'électricité vers les consommateurs BT. Avec une tension comprise entre 230 et 400 volts, pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes,... etc [2].

I.5.2 Lignes de distribution à moyenne tension (MT) :

Ce sont des lignes qui relient les clients MT aux postes de transformation HT/MT de la compagnie d'électricité. Leur tension est comprise entre 1 kV et 50 kV[2].

I.5.3 Lignes de transport à haute tension (HT) :

Les lignes haute tension acheminent l'électricité sur des distances plus courtes et relient les régions et les agglomérations entre elles, à des tensions comprise entre 50 et 150 kV [2].

I.6 La ligne à haute tension :

constitue l'élément essentiel dans les infrastructures énergétiques de transport d'électricité. Elle permet l'acheminement de l'électricité des centrales électriques vers les centres de consommation. Les lignes peuvent être aériennes, souterraines, et parfois sous-marines. Dans notre étude, nous nous intéressons exclusivement à la ligne à haute tension aérienne.

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée. Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765 kV. Les lignes à courant continu haute tension permettent de transporter [2].

I.6.1 Composants d'une ligne :

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs, de supports et de câbles de garde[2].

I.6.2 Conducteurs :

Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avec âme en acier (ACSR «Aluminium câble stèle reinforced») ; ces derniers sont généralement les plus économiques [2].



Figure I.1 : Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite, l'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur les propriétés électriques du conducteur.

I.6.3 Les Eclateurs :

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes [2].



Figure I .2 chaines des isolateur

I.6.4 Les supports :

Les supports en général, les pylônes et les poteaux en particulier sont des maillons nécessaires à la constitution des lignes aériennes de transport et de distribution de l'électricité.

De forme et d'importance très variées, les supports peuvent aller des simples poteaux en bois ou en béton, d'une douzaine de mètres en hauteur, aux pylônes treillis d'acier, de plus de 50 m de hauteur et ayant une masse pouvant atteindre, voire dépasser 100 t.

Les supports sont définis en fonction des contraintes mécaniques principalement créées par les conducteurs qu'ils supportent et en fonction des contraintes d'isolement électrique [2].



Figure I .3 Modèle de supports

I.6.5 Câble de garde :

Constitué d'un seul conducteur, surplombe parfois les lignes électriques. Il est attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie :

Il est relié au réseau de terre et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les 3 phases de la ligne, évitant ainsi les "creux de tension" perturbant les clients.

Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant[2].

Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

I.7 Schéma équivalent d'une ligne électrique:

Une ligne aérienne (de longueur inférieure à 100 km) peut se mettre sous la forme du schéma équivalent suivant[3] :

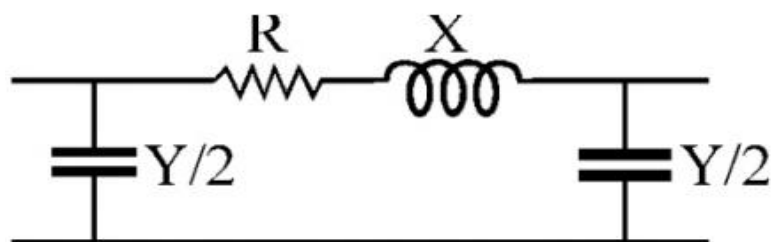


Figure I .4 Modèle de ligne électrique

• L'impédance effective longitudinale (composée de la résistance linéique R' et de la réactance linéique

$$X' = j\omega L [\Omega/m] \dots\dots\dots (I.1)$$

Z' longitudinale :

$$z' = R' + jX' [\Omega/m] \dots\dots\dots (I.2)$$

L'impédance effective transversale composée de la susceptance linéique :

$$Y' = j\omega c' [S] \dots\dots\dots (I.3)$$

I.7.1 Résistance longitudinale :

Partons de la loi d'ohm locale :

$$\vec{j} = \vec{E} \cdot \delta \dots\dots\dots (I.4)$$

Où :

J est la densité de courant [A/m²] ;

σ est la conductivité électrique [Ω⁻¹m⁻¹] ;

E est le champ électrique (dans le conducteur) [V/m].

Appliquée à un conducteur de longueur 'l' [m], de section 'S' [m²] et de conductivité 'σ' [Ω⁻¹m⁻¹], parcouru par un courant continu d'intensité 'I' [A], nous trouvons

$$i = \partial \cdot S \cdot v / l \dots\dots\dots (I.5)$$

La résistance d'un conducteur se définit de la manière suivante :

où « ρ = 1/σ » est la résistivité du conducteur [Ωm].

Par extension, la loi d'Ohm est également utilisée en régime quasi-stationnaire. Cependant, ce régime introduit des modifications dans la répartition du courant dans les conducteurs.

Les courants alternatifs qui circulent dans les conducteurs créent un champ d'induction magnétique (alternatif également) qui existe non seulement entre les conducteurs, mais aussi à l'intérieur de ceux-ci. . Un contour fermé à l'intérieur d'un

tel conducteur embrasse un flux d'induction variable et se trouve être le siège d'une tension induite qui provoque, à son tour, l'apparition de courants dans le métal. Ces courants, appelés courants de Foucault, modifient la répartition du vecteur densité de courant, 'J', admise uniforme en première approximation. Plus la fréquence est élevée et l'épaisseur des conducteurs forte, plus l'effet des courants de Foucault est important. La répartition du courant à l'intérieur d'un conducteur (plein ou faisceau) est différente en courant alternatif de ce qu'elle est en courant continu. Pour un conducteur plein, le courant se concentre sur la surface externe (effet pelliculaire).

L'utilisation d'un faisceau de conducteurs au lieu d'un conducteur unique améliore cette situation (meilleure exploitation du matériau conducteur) ; ce n'est toutefois pas la raison pour laquelle on utilise des faisceaux de conducteurs en HT. Lors d'un défaut à la terre, la partie des courants de retour qui circulent par la terre circulent essentiellement en surface (effet pelliculaire1) et suivent le tracé de la ligne (effet de proximité).[3]

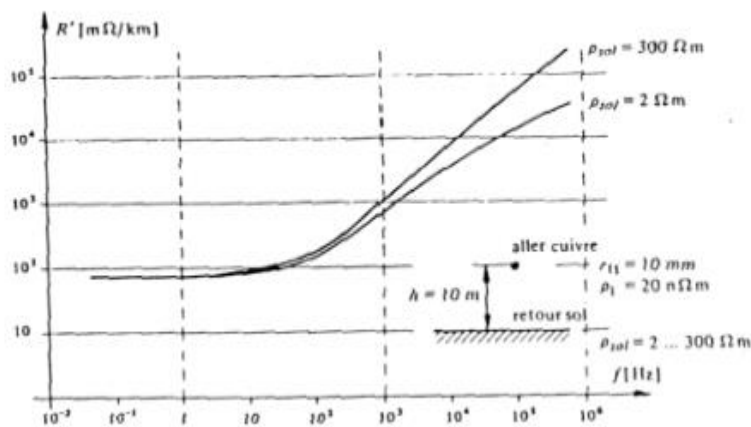


Figure I .5 Résistance linéique en fonction de la fréquence

La profondeur de pénétration de l'effet pelliculaire ou effet de peau est défini comme

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \dots\dots\dots (I.6)$$

Avec :

ω : Pulsation du courant.

σ : Conductivité du milieu.

μ_0 : perméabilité du vide.

La densité de courant en surface est d'autant plus marquée que l'épaisseur du matériau est grande ou que ω est élevée.

Vu que, à 50 Hz, $\delta = 1$ cm (pour Cu ou Al), l'effet pelliculaire est faiblement marqué (quelques pourcents sur la valeur de la résistance), sauf pour des diamètres de conducteur supérieurs à 3 cm.

L'effet de proximité est le phénomène par lequel le courant alternatif a tendance à emprunter des chemins aussi voisins que possible pour l'aller et le retour.

La difficulté d'introduire dans les calculs le conducteur terre provient du fait que les dimensions de la couche de terre par où passe le courant sont mal définies, que la répartition du courant dans cette couche n'est pas uniforme et que la résistivité du sol est irrégulière dans l'espace et variable au cours du temps. Nous devons aussi nous attendre à trouver diverses canalisations enterrées (eau, gaz, câbles, ...), particulièrement aux voisinages des lignes électriques. La résistivité du sol peut ainsi varier, suivant l'endroit et les conditions météorologiques, entre 0,1 et 106 $\Omega \cdot m$. La résistance du sol dépend fortement de la fréquence, du courant.

Pour un courant de fréquence 50 Hz, la profondeur de pénétration pour un conducteur de cuivre vaut 10 mm et pour un sol de résistivité 100 $\Omega \cdot m$, elle vaut 100 m. Nous pouvons donc assimiler le sol à un conducteur de 100 m de rayon.

La résistance du sol est donc de environ 70 m Ω /km.

La résistivité d'un matériau croît avec la température selon la loi 1.6 :

$$\rho_\theta = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \dots\dots\dots (I.7)$$

I.7.2 Réactance longitudinale (inductance) :

Une inductance (supposée linéaire) est toujours le quotient entre le flux embrassé par la boucle conductrice et le courant qui la parcourt. Elle est déterminée par la relation (1.8) :

$$L = \Phi / i \quad [H] \dots\dots\dots (I.8)$$

où Φ est le flux induit par le courant [Wb] ; i est le courant circulant dans le conducteur [A]. Nous avons deux types d'inductances :

- L'inductance propre (ou self-inductance) d'un conducteur électrique parcouru par un courant est définie, à un instant donné, comme étant le rapport entre les valeurs du flux induit par le courant et ce courant lui-même.

• L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs de phases, entre les conducteurs des différents ternes et entre tous les conducteurs parcourus par un courant tel que le fil de garde et le retour par la terre [3].

I.7.3 Résistance transversale (capacité) :

Nous pouvons assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre). A cause de la présence des charges, sur ces deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes sur ces deux -ci. Si nous prenons comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence), la valeur de la tension du conducteur de phase représente la différence de potentiel. La relation linéaire qui lie la charge électrique (q+, q-) sur les deux conducteurs et la différence de potentiel entre ceux-ci est donnée par [3]:

$$C = q/u \quad [F] \dots\dots\dots (I.9)$$

I.8 Modélisation en π des lignes électriques :

La modélisation en π des lignes électriques permet de représenter le comportement électrique attendu de celles-ci. Elle est basée sur les équations des télégraphistes. Le calcul des paramètres électriques utilisé pour la modélisation repose sur les équations de Maxwell. Le modèle avec une seule section en π n'est valable que pour de faibles fréquences et des lignes électriques courtes, dans le cas contraire plusieurs sections en π doivent être connectées en série [4].

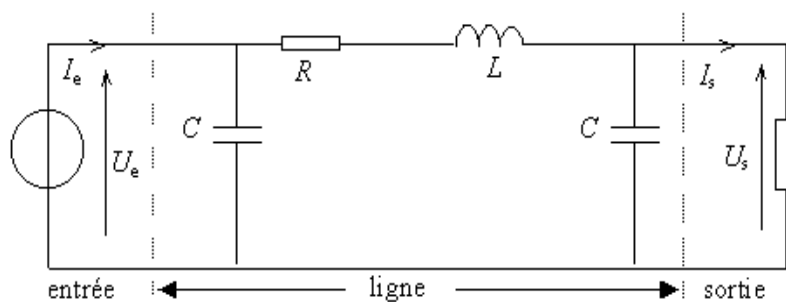


Figure I.6 Modèle en π d'une ligne électrique

I.8.1 Equation des télégraphistes :

Une portion de ligne électrique peut être représentée par le quadripôle ci-contre où :

- La résistance linéique (par unité de longueur) R du conducteur est représentée par une résistance série (exprimée en ohms par unité de longueur).
- du conducteur est représentée par une résistance série (exprimée en ohms par unité de longueur).
- L'inductance linéique L est représentée par une self (Henry par unité de longueur).
- La capacité linéique C entre les 2 conducteurs est représentée par un condensateur C shunt (Farad par unité de longueur).
- La conductance linéique G du milieu diélectrique séparant les 2 conducteurs est représentée par une résistance shunt (Siemens par unité de longueur). La résistance dans ce modèle a une valeur de 1/G ohms[4].

Dans ce modèle, on définit la tension en tout point éloigné d'une distance x du début de la ligne et à tout instant t la tension U(x ;t) et le courant I(x ;t). Les équations s'écrivent :

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = -L \frac{\partial I}{\partial t}(x, t) - R I(x, t) \dots\dots\dots(I.10)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x}(x, t) = -L \frac{\partial I}{\partial t}(x, t) - R I(x, t) \dots\dots\dots(I.11)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x}(x, t) = -C \frac{\partial U}{\partial t}(x, t) - G U(x, t) \dots\dots\dots(I.12)$$

De la formulation ci-dessus, on peut tirer 2 équations aux dérivées partielles ne faisant chacune intervenir qu'une variable :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}(x, t) = LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(x, t) + (RC + GL) \frac{\partial U}{\partial t}(x, t) + GRU(x, t) \dots\dots\dots(I.13)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2}(x, t) = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}(x, t) + RC + GL) \frac{\partial I}{\partial t}(x, t) + GRI(x, t) \dots\dots\dots(I.14)$$

I.9. Modèle en π:

I.9.1 Impédance et admittance :

En considérant les pertes, l'impédance ZI et l'admittance Yq se calculent comme suit :

$$Z_t = r \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \dots\dots\dots (I.15)$$

$$\frac{Y_q}{2} = \frac{1}{r} \tanh(\gamma \cdot \frac{l}{2}) \dots\dots\dots (I.16)$$

Avec :

la constante de propagation

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z' \cdot Y'} \dots\dots\dots (I.17)$$

Z' l'impédance linéique de la ligne et Y' l'admittance linéique de la ligne, Et :

$$r = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \dots\dots\dots (I.18)$$

l'impédance de la ligne. l est la longueur de la ligne.

Pour une ligne sans perte [4]:

$$Z_t = r \cdot j \cdot \sin(B \cdot l) \dots\dots\dots (I.19)$$

$$\frac{Y_q}{2} = \frac{1}{r} \cdot j \cdot \tan(B \cdot \frac{l}{2}) \dots\dots\dots (I.20)$$

Pour une ligne aérienne courte, inférieure à 80 km, on peut négliger les capacités et simplifier l'impédance :

$$Z_t = Z' \cdot l \dots\dots\dots (I.21)$$

$$\frac{Y_q}{2} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{Y_q}{2} = \frac{Y' \cdot l}{2} \dots\dots\dots (I.22)$$

I.9.2. Nombre de π à utiliser :

Une section en π n'est constituée que d'éléments concentrés. Avec une seule section, le modèle en π n'est valable qu'en basse fréquence pour de faible longueur de ligne. Quand la longueur ou la fréquence augmente, le nombre de sections en π à connecter en série pour avoir une modélisation correcte doit être augmenté.

Une ligne peut être considérée comme "courte", c'est-à-dire modélisable avec une seule section en π , jusqu'à 200 km pour une ligne aérienne en 50 Hz et de 100 km pour un câble . Le nombre de sections en π doit augmenter proportionnellement avec la fréquence et inversement proportionnel à la longueur de ligne[4].

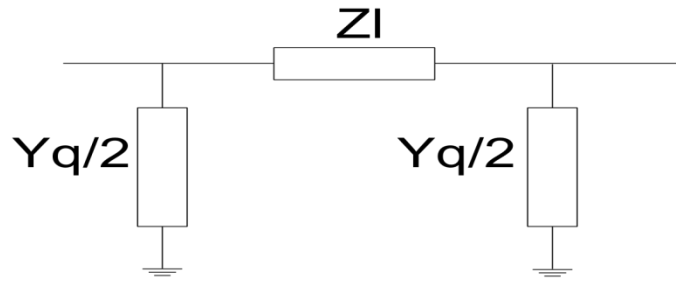


Figure I.7 Modèle en π

I.10. Calcul des paramètres électrique pour une ligne aérienne :

I.10.1 Conducteur équivalent :

Les lignes à haute tension, surtout à plus de 220 kV, ne possèdent pas un conducteur unique par phase, mais de faisceaux de conducteurs en contenant de 2 à 4 (voir image ci-contre). Il est possible de modéliser un faisceau de conducteurs par un conducteur équivalent de rayon [4]:

$$r_{equivalent} = \sqrt[n]{n \cdot r_c \cdot r^{n-1}} \dots\dots\dots (I.23)$$

Où $r_{equivalent}$ est le rayon équivalent du faisceau, r_c le rayon des conducteurs, r_t le rayon du cercle formé par le faisceau, n le nombre de conducteurs par faisceau (voir image)[4].

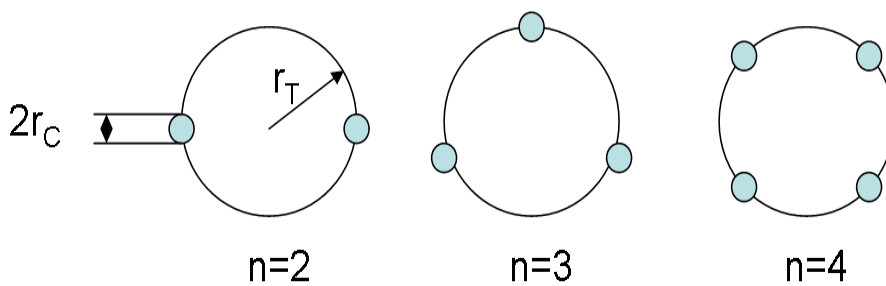


Figure I.8 Faisceaux de conducteur de 2, 3 ou 4 conducteurs

I.10.2 Distance inter-faisceaux/ conducteur équivalente :

Pour un système triphasé, il est possible de définir une distance équivalente entre les conducteurs, ou faisceaux de conducteurs selon le cas, en calculant la moyenne géométrique. Dans le cas d'un système triphasé simple, elle vaut :

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \dots \dots \dots (I.24)$$

Pour le cas d'un système double (deux lignes triphasés de chaque côté du pylône):

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31} \cdot \frac{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}}{D_{11'} \cdot D_{22'} \cdot D_{33'}}} \dots \dots \dots (I.25)$$

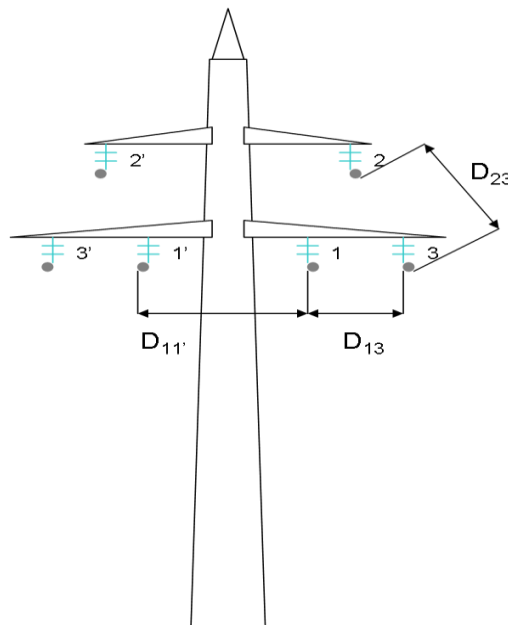


Figure I.9 Distance entre les faisceaux de conducteur sur un pylône

I.10.3 Résistance de la ligne :

La résistance linéaire d'un conducteur à 20 °C est :

$$R_{20} = \frac{p}{s} \dots \dots \dots (I.26)$$

Avec *s* la section et *p* la résistivité du matériau conducteur. Pour un conducteur en cuivre la résistivité est de l'ordre de 1,8 x 10⁻⁸ Ω·m pour de l'aluminium de 3 x 10⁻⁸ Ω·m.

La résistance de la ligne dépend également de la température :

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \dots \dots \dots (I.27)$$

Où α est la coefficient de température et ΔT la différence en kelvins entre la température et 20 °C.

Dans le cas d'un faisceaux de conducteurs, ces derniers étant en parallèle la résistance doit être divisée par le nombre de conducteurs[4].

I.10.4 Inductance :

L'inductance linéique d'une ligne vaut :

$$L'_{\text{ligne}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{rGMR}\right) \dots \dots \dots (I. 28)$$

I.10.5 Valeurs typiques de l'impédance :

Ci-dessous quelques valeurs typique pour un réseau 50 Hz avec des conducteurs aluminium / acier de section d'aluminium 240 mm² et d'acier 40 mm²[4]

Tension de la ligne[KV]	Nombre de conducteurs par faisceau	Impédance [Ω /Km]
110	1	0.12+j0.4
220	2	0.06+j0.3
380	4	0.03+j0.25

Tableau I.1 Valeurs typiques de l'impédance

D'autres valeurs pour la résistance seulement :

Tension de la ligne[KV]	Nombre de conducteurs par faisceau	Résistance [Ω /Km]
70	1	0.09-0.35
110	1	0.12
220	2	0.04-0.09
380	4	0.03

Tableau I.2 Valeurs typiques de Résistance

1. l'inductance:

Tension de la ligne[KV]	Nombre de conducteurs par faisceau	Inductance[Ω/Km]
70	1	0.2-0.4
110	1	0.4
220	2	0.3
380	4	0.25

Tableau I.3 Valeurs typiques de Inductance

2. Capacité :

Dans un système triphasé, il y a des capacités entre les lignes et la terre, mais également entre lignes. L'objectif est de synthétiser le tout dans une seule capacité "moyenne" C_b égale pour les trois lignes[5] :

$$C''_b = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \dots \dots \dots (I.29)$$

Dans laquelle les ϵ_0 et ϵ_r sont les permittivité diélectrique du vide et du matériau (dans le cas de l'air pour les lignes ϵ_r vaut environ 1).

On peut démontrer en utilisant le théorème de Kennelly que

$$C''_b = 3 \cdot C_L + C_T) \dots \dots \dots (I.30)$$

Avec C_L la capacité mutuelle et C_T la capacité à la terre

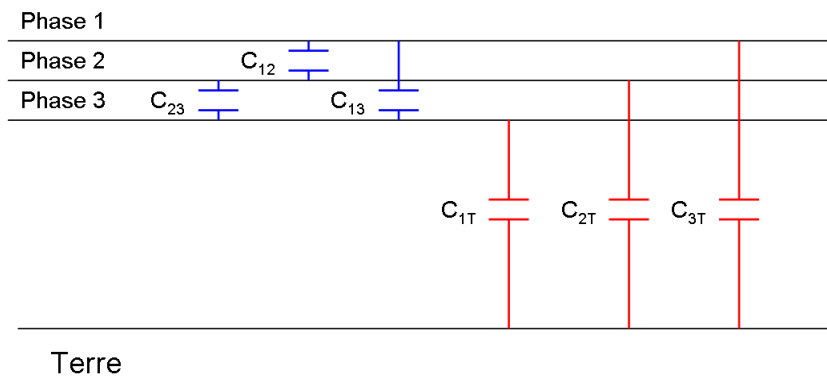


Figure I.10 : modale de système triphasé

3. Conductance :

Une résistance doit être représentée en parallèle aux capacités pour être complet. Elle est due au effet corona et aux fuites de courant (causées par la pollution sur les isolateurs par exemple). Pour une ligne de 380 kV elle vaut[5] :

Temps sec	Temps humide
3 nS/km	30 nS/km

Tableau I.4 Valeurs de temps

I.10.6 Valeurs typique de l'admittance :

Ci-dessous quelques valeurs typiques pour un réseau 50 Hz[5]

Tension de la ligne (kV)	Nombre de conducteurs par faisceau	Admittance (uS/km)
110	1	3
220	2	3,9
380	4	4,3

Tableau I.5 Valeurs typique de l'admittance

I.11. Conclusion :

Dans le premier chapitre, nous allons définir réseaux électrique (HT), donner quelques définitions utiles de le demain, et modalisation d'une ligne (HT).

Chapitre II :
L'effet couronne dans les lignes de transport HT

II.1 Introduction :

L'effet couronne, phénomène aujourd'hui bien connu, se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse bleuâtre qui apparaît autour d'un fil mince, lorsque celui-ci est porté à un potentiel suffisant. Il rappelle le halo lumineux visible à la périphérie du soleil, au moment des éclipses, et qui lui a donné son nom. Du point de vue physique et électrique, ce phénomène est dû à l'ionisation de l'air, dès que le champ électrique régnant au voisinage immédiat du conducteur devient suffisant.

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

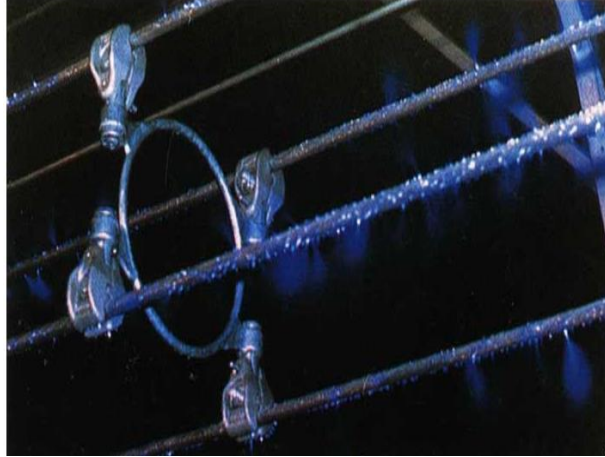
Par l'analyse des résultats de mesures antérieures sur de nombreux types de conducteurs, on a mis en évidence l'influence des principaux paramètres régissant l'amplitude des phénomènes couronne. Dans leur ordre de mise en évidence ce sont : le champ électrique superficiel du conducteur, son diamètre, son état de surface, la densité de l'air environnant.

Pour l'exploitation du réseau à 380 KV, l'effet couronne devient gênant et le choix de conducteurs en faisceaux permet d'en limiter les pertes et le champ perturbateur à des valeurs raisonnablement acceptables.

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que, plus il se dégrade, plus les pertes augmentent, et plus le champ perturbateur est élevé. Parmi les facteurs de dégradation, la pollution végétale ou industrielle, voire le suintement en surface de la graisse de toronnage, 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.

II.2 L'effet couronne :

désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. C'est l'importance du champ électrique à proximité de ce conducteur qui est à l'origine de l'ionisation du gaz, en particulier au voisinage des régions de forte courbure (effet de pointe). Une des conséquences les plus importantes est l'apparition d'un courant de fuite, vu comme tel par le conducteur .



Les premières expériences sur l'effet couronne, étaient faites à l'aide de fils minces, de quelques millimètres, lorsqu'un tel fil est porté à une tension suffisante, il se forme autour de lui une gaine lumineuse de couleur bleue violette, dont l'épaisseur augmente avec la tension, c'est la présence de cette lueur uniforme, autour du conducteur qui a donné naissance à l'expression, maintenant universellement employée «**d'effet couronne**» ou «**corona**». Mais lorsque le diamètre du fil croit, pour atteindre les dimensions des câbles utilisés sur les lignes de transport d'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme, il se discrétise en lueurs localisées sous le nom général d'aigrettes. Cette discrétisation de l'effet couronne est observée sur des cylindres parfaitement polis, et est encore grandement favorisée, dans le cas des conducteurs industriels, par les irrégularités de surface telles que le tramage, les éraflures, les dépôts de poussières végétales, de pollution industrielle, voire de petits insectes; toutes ces aspérités de nature diverses créent un renforcement local de champ électrique, et ont pour conséquence une réduction du niveau de tension, d'apparition des aigrettes. On voit donc apparaître, dès maintenant, l'influence notable de l'état de surface qui sera introduit dans les calculs par la définition d'un coefficient «d'état de surface».

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U \geq 400\text{kV}$), lorsqu'il fait sombre[6].

II.3 Phénomènes d'ionisation dans les gaz:

On sait que les phénomènes qui ont pour siège les milieux gazeux sont représentés par des mécanismes de collisions entre particules des gaz. Lorsque l'énergie cinétique des particules, avant et après collisions, respecte le principe de conservation de l'énergie, on parle par analogie, de collisions élastiques. Dans le cas contraire, le bilan énergétique est retrouvé en faisant intervenir des changements d'énergie interne d'une ou plusieurs particules, et on parle de collisions inélastiques. Ce sont ces dernières qui retiennent notre attention pour expliquer les phénomènes en jeu dans l'effet couronne[6].

Les divers types d'évènements qui modifient l'énergie interne des particules font tous intervenir les charges électriques; dans les cas qui nous intéressent plus directement, les partenaires de collision les plus importants sont les électrons et les photons. Le tableau I.1 tente de résumer les principales réactions (elles sont nombreuses et complexes).

Processus	Partenaires initiaux	Particules résultantes	Processus inverse
Excitation atomique	A, e A, p	A*, e A*	Collision super élastique émission d'un photon
Ionisation par collision	A, e A, B A, B ⁺	A ⁺ , 2 e A ⁺ , e, B A ⁺ , e, B ⁺	Recombinaisons à trois corps
Photo-ionisation	A, p	A ⁺ , e	Recombinaison avec émission d'un photon
Attachement électronique	A, e	A ⁻	Détachement

Tableau II .1: Principales collisions inélastiques intervenant dans les mécanismes de l'effet couronne.

A, B : Atomes neutres

A* : Atomes excités

A⁺, A⁻ : ions positifs et négatifs

e : Electron

p : Photon

II.3.1 Excitation atomique :

Un atome neutre peut être excité soit par collision avec un électron, soit absorption d'un photon[8] :

Dans le premier cas , la réaction s'écrit :



Cette réaction n'est évidemment possible que si l'énergie cinétique de l'électron incident est au moins égale à l'énergie d'excitation $e.V^{*}$.

Dans le deuxième cas , la réaction s'écrit :



Cette réaction est très sélective ,c'est -à-dire qu'elle n'a lieu pour une plage de fréquence très étroite sur :

$$h\nu \neq e.V^{*} \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

Rappelons que l'énergie d'un photon de fréquence ν a pour valeur $h\nu$,où $h = 6.625.10^{-34}$ est la constante de Planck[6] .

II.3.2 Ionisation par collision électronique :

L'ionisation d'un gaz par les électrons libres accélérés dans le champ électrique est le processus essentiel de la formation d'ions positifs.

L'ionisation d'un atome par un choc électronique n'est possible que si l'énergie cinétique de l'électron incident est au moins égale à l'énergie d'ionisation de l'atome considérée[6].

II.3.3 Photo-ionisation :

Pour qu'un processus d'ionisation puisse se produire lors de l'absorption d'un photon par une particule gazeuse, il faut que l'énergie d'un photon incident soit au moins égale à l'énergie de la particule considérée .la réaction est beaucoup moins sélective que la réaction de photo -excitation , car l'électron éjecté peut emporter l'excédent d'énergie sous forme d'énergie cinétique . si ν_s est la Fréquence de seuil d'ionisation et ν la fréquence du photon incident , l'énergie cinétique de cet électron sera donc [6]:

$$h\nu - h\nu_s \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

II.3.4 Recombinaison :

C'est réaction inverse à celles présentées précédemment. On appelle ainsi les réactions par lesquelles deux particules possèdent des charges de signe différent échangeant ces charges pour revenir à l'état neutre, ces réactions libèrent une certaine énergie, soit sous forme de photon, soit sous forme d'énergie cinétique cédée à une molécule de gaz voisine. Dans l'effet couronne ces réactions se produisent dans les régions de champ électrique faible[7].

- recombinaison entre ions.
- recombinaison entre ion $^+$ - électron.

II.3.5 Détachement :

C'est un phénomène qui se produit quand un ion négatif perd son électron supplémentaire, l'énergie nécessaire pour provoquer le détachement est relativement faible[7].

II.4 Mouvement des charges dans champ électrique :

Ce dernier phénomène, intervient dans l'étude des pertes par effet couronne .les particules chargées subissent normalement un mouvement désordonné d'agitation thermique en présence d'un champ électrique, ces particules sont soumises de plus en plus à une force unidirectionnelle de valeur $q \cdot \vec{E}$ qui leur communique une accélération dans la direction du champ ; mais sous l'effet de cet ensemble de forces, les particules acquièrent en définitive une composante de vitesse moyenne \vec{v} , proportionnelle à l'intensité du champ électrique et inversement proportionnelle à la fréquence des collisions[7].

Le mouvement des ions est régi par la loi simple :

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

Le coefficient μ : appelé mobilité ionique, a pour valeur dans l'air à pression et températures normales:

$$\mu^+ = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s par V/m} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

$$\mu^- = 1,80 \cdot 10^{-4} \text{ m/s par V/m} \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

Ainsi l'ion consomme immédiatement, en frottement dans l'air, l'énergie qu'il acquiert dans le champ.

II.5 Conclusion :

Dans ce 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.

:

:

Chapitre III: **Décharge dans la ligne électrique**

III.1 Introduction :

Le gaz le plus abondant et le plus utilisé de tout temps dans l'isolation électrique (lignes aériennes, électrostatique...) est l'air. Cependant, d'autres gaz tels que l'azote (N₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et surtout l'hexafluorure de soufre (SF₆) connaissent, depuis plus de trois décennies, un succès grandissant dans le domaine des systèmes haute tension (postes blindés, câbles à isolation gazeuse, ...). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions.), les gaz peuvent perdre, sous l'effet d'agents ionisants naturels ou artificiels (U, V, X, leurs propriétés diélectriques et devenir plus ou moins conducteurs. Cette perte de propriétés (ionisation) se traduit par la dissociation de molécules neutres en électrons et en ions. En présence d'un champ électrique entre les électrodes (planes et parallèles), le mouvement provoqué par les porteurs de charges (en augmentation) donne naissance à un courant dit "courant de décharges". La variation de ce courant en fonction de la tension (caractéristique courant - tension) a été étudiée pour la première fois par Townsend .

III.2 Régimes de décharge dans un gaz :

Un gaz soumis à une décharge de laboratoire, peut se trouver dans différents régimes de fonctionnement. Afin d'identifier ces régimes, nous considérons une décharge de type continu : nous connectons à une source de tension continue, deux électrodes (anode et cathode) séparées par le gaz (à basse pression et confiné) qui sera ionisé. Les décharges obtenues dans le dispositif de Townsend peuvent être analysées en examinant la courbe caractéristique V(I) qui lui est associée . Quatre régimes , de décharges peuvent être obtenus dans ce type de systèmes (Figure III.1) .[8]

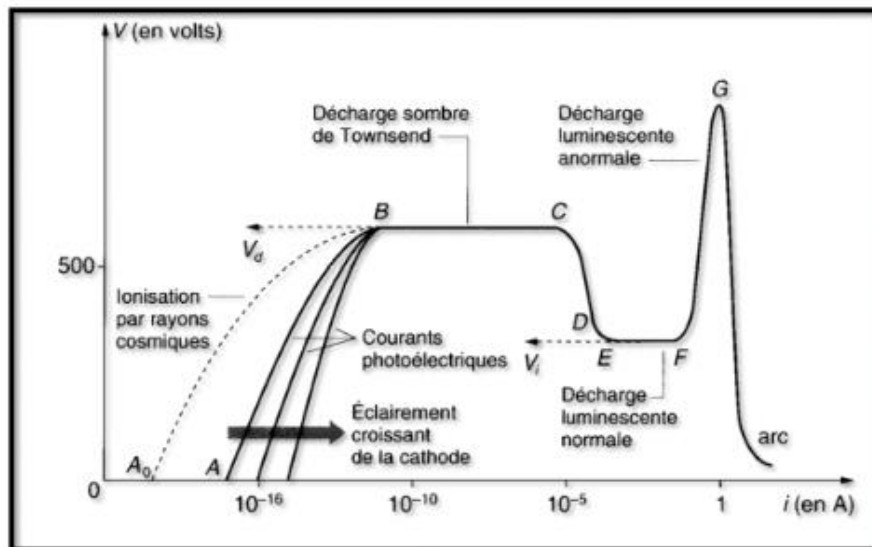


Figure III.1 régime de décharge en courant continu

- **Le premier régime** : correspond aux décharges non autonomes. La décharge ne peut exister qu'en présence d'un moyen extérieur, souvent une source lumineuse, assurant la production d'électrons primaires à la cathode par effet photoélectrique.
- **Le second régime** : correspond à ce que l'on appelle les décharges de Townsend. Il est caractérisé par une croissance quasi-verticale du courant pour une valeur de tension appelée tension disruptive. Cette croissance correspond au passage d'un régime où la multiplication des électrons est principalement gouvernée par l'ionisation par impact d'électrons sur les molécules du gaz à un régime où l'essentiel de la multiplication est assurée par l'augmentation du flux d'électrons extraits par bombardement ionique de la cathode. Dans le régime de Townsend, la charge d'espace générée par le plasma est faible et le champ électrique reste égal au champ Laplacien.

Le troisième régime : correspond aux décharges luminescentes. Dans le cas des basses pressions considérées, ces décharges sont également généralement entretenues par un mécanisme de type Townsend. La grande différence qu'elles présentent avec les décharges dites de Townsend réside dans le fait que c'est le champ de charge d'espace et non pas le champ Laplacien qui gouverne la dynamique des espèces chargées.

- **Le quatrième régime** : correspond au régime d'arc. Celui-ci est caractérisé par une très faible tension de maintien (quelques dizaines de volts), de fortes densités de courant et un échauffement important de la décharge dont la température peut facilement atteindre plusieurs milliers de Kelvin. Le maintien du régime d'arc est également gouverné par des processus élémentaires à la cathode. Ces processus très complexes sont cependant différents de ceux rencontrés dans le cas des décharges luminescentes. On cite souvent des effets comme l'effet thermoïonique, l'émission de champ, ..., etc. Le maintien d'un régime d'arc impose également de fortes contraintes sur l'alimentation électrique qui doit pouvoir assurer la circulation de courants fort

III.3 Mécanisme de la décharge couronne :

- Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles :
- -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.[9]

III.4 Caractéristique du Claquage dans les gaz :

Les Claquages électriques, visibles à l'œil nu par l'étincelle ou la décharge produite correspond au moment où le champ électrique dépasse la valeur seuil nécessaire à l'amorçage de la décharge. Les mécanismes de claquage dans les gaz sont principalement . -le mécanisme de l'avalanche. -le mécanisme du Streamer[10].

III.5 Avalanche électronique (décharge Townsend) :

Si on considère un gaz contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz en l'absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de charges créés par des mécanismes naturels, tels que rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant ultraviolet pour en extraire des électrons . -Si un champ électrique est appliqué, les électrons sont suffisamment accélérés par le champ pour produire d'autres électrons par les collisions, qui à leur tour acquièrent par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autres atomes,

et ainsi de suite, et le nombre d'électrons libres continuera à augmenter comme ils continuent à se déplacer sous l'action du champ électrique. C'est ce phénomène, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode. Le claquage a donc lieu fait du phénomène d'avalanche ceci est montré sur figure (III.2)[10]

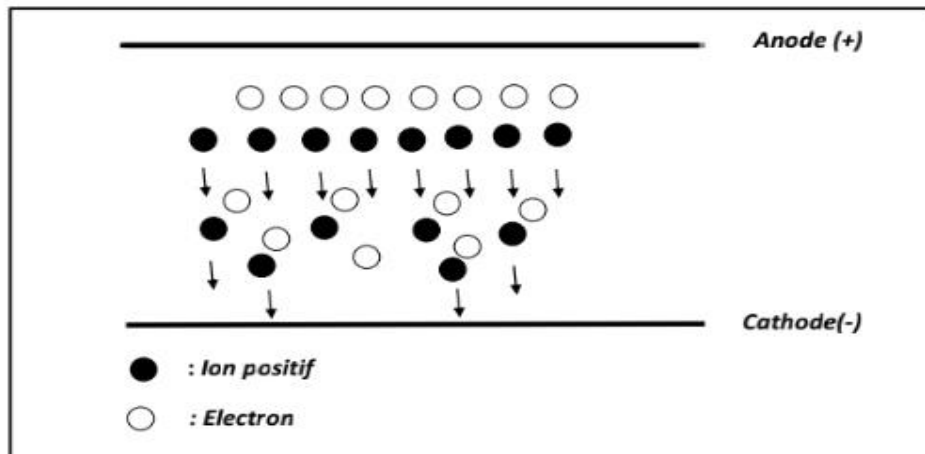


Figure III .2 :Avalanche électronique

III.6 Streamer :

La théorie sur les streamers a été développée suite aux travaux de Loeb, Meek et Raether en 1940. Les nombreuses expériences menées par les groupes de Raether sur des décharges planes et de Loeb sur les décharges couronnes ont mis en évidence en l'occurrence, avant la phase de claquage (formation d'une étincelle), de pulses de courant ayant des durées largement inférieures au temps caractéristique de dérive des électrons et des ions. Ces pulses de courant durent en général moins d'une centaine de nano-secondes, ont des intensités de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de milliampères et sont accompagnés d'une émission lumineuse moins intense que celle caractérisant les étincelles. Cette émission dessine un canal ayant un rayon de l'ordre d'une Dans le cas de décharges couronnes fortement asymétriques, ces phénomènes lumineux ont également été observés dans des zones où le champ Laplacien est quasi-nul. La présence de ces pulses indique l'occurrence d'un phénomène permettant d'entretenir une ionisation importante même en absence de champ électrique Laplacien significatif. Cette ionisation ne pouvait donc être entretenue que par un champ de charge d'espace. Le problème qui se posait dès lors concernait la source de la charge d'espace. La réponse à cette question a été encore une fois amenée par les expérimentateurs. Ces derniers ont en effet clairement montré

soit par des analyses de courant, des visualisations en chambre de Wilson (cf. Figure III.3) ou à l'aide de diagnostics par caméra streak que la production de ces micro-décharges était toujours précédée par la formation et le développement d'avalanches[10]

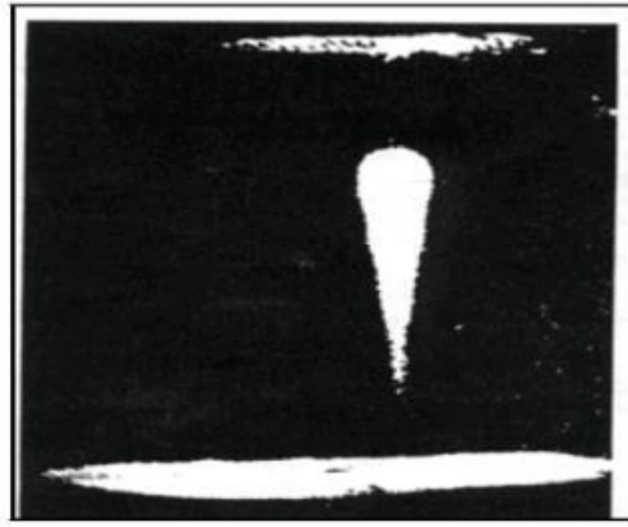


Figure III .3:photographie dans une chambre

Dans le cas d'électrodes fortement asymétriques, ces phénomènes d'avalanche avaient lieu au voisinage de l'électrode à forte courbure où le champ Laplacien est significatif centaine de microns qu'on appellera micro-décharge

A partir de ces observations il a été possible de proposer un autre mécanisme de claquage dans les décharges à haute pression. Le scénario stipule que le claquage commence d'abord par la formation d'une avalanche. Celle-ci va se développer jusqu'à ce que son champ de charge d'espace devienne plus important que le champ Laplacien. A partir de cet instant c'est le champ de charge d'espace qui pilote la dynamique de la décharge. On obtient une onde d'ionisation qui se propage sous l'effet de son propre champ de charge d'espace. C'est cette onde d'ionisation qu'on appelle streamer . Un nombre important de travaux ont ensuite été menés pour bien caractériser la transition avalanche-streamer. Il s'agissait notamment de définir le niveau à partir duquel une avalanche devenait assez importante pour donner lieu à la formation d'un streamer. Des modèles semianalytiques associés à des mesures de

tailles d'avalanche ont montré que ceci avait lieu à partir du moment où l'avalanche contenait entre 10^8 et 10^9 ions

Comme la propagation d'un streamer ne dépend que de son propre champ de charge d'espace, elle peut a priori avoir lieu vers la cathode ou vers l'anode. Cette possibilité permet de distinguer deux types de streamers : les streamers anodiques et les streamers cathodiques

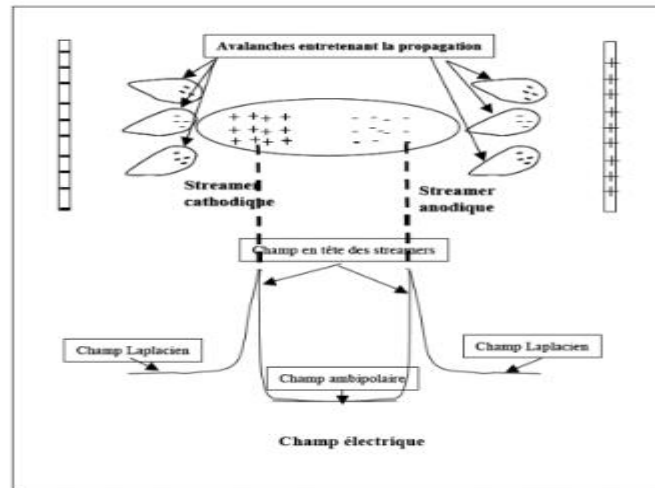


Figure III. 4 champ de charge électrique

III.7 Champ électrique :

Le champ électrique produit par le conducteur diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du conducteur, il s'agit donc d'un champ non uniforme. Important : L'effet couronne a lieu dans un champ non uniforme. Soit un système d'électrodes pointe-plan. Que se produit-il si le champ près de la pointe est égal à 30 kV/cm ? Réponse : Décharge couronne Le champ étant non uniforme, l'ionisation se produit uniquement près de la pointe et ne se produit pas près de l'électrode plane. Soit un système d'électrodes pointe-plan. Que se produit-il si le champ près de la pointe est égal à 30 kV/cm ? Réponse : Décharge couronne Le champ étant non uniforme, l'ionisation se produit uniquement près de la pointe et ne se produit pas près de l'électrode plane. [11]

Le champ superficiel d'un conducteur se calcule de la façon la plus générale, par le théorème de Gauss.

- Dans le cas d'un **conducteur** de rayon **r**, le champ électrique est :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \dots\dots\dots(III.1)$$

E : champ superficiel en V/cm.

q : charge superficiel par unité de longueur en C/m.

r : rayon du conducteur, en cm.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} = 8,854 \cdot 10^{-12} [F/m] : \text{Permittivité du vide (ou de l'air).}$$

Le champ électrique produit par le conducteur diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du conducteur, il s'agit donc d'un champ non uniforme.

Important: L'effet couronne à lieu dans un champ non uniforme.

- Dans le cas d'un **faisceau de n** conducteurs :

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes (figure III.5) :

- **r (cm)** : rayon des conducteurs élémentaires.
- **n**: nombre de conducteurs élémentaires.
- **R (cm)** : rayon géométrique du faisceau (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs),
- **D (cm)** : distance entre deux conducteurs consécutifs :

$$D = 2.R \cdot \sin \frac{\pi}{n} \dots\dots\dots(III.2)$$

- **r_{éq} (cm)** rayon équivalent d'un faisceau : C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants. Il est donné par l'expression :

$$r_{éq} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{n \cdot r}{R}} \dots\dots\dots(III.4)$$

Le champ électrique moyen est :

$$E_{moy} = \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_{\acute{e}q}} \text{ et } Q = n \cdot q \dots\dots\dots(III.5)$$

Q : charge linéique totale portée par le faisceau [C/m].

$r_{\acute{e}q}$: rayon équivalent du faisceau [cm].

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

$$E_{\max} = E_{moy} \cdot \left[1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R}\right] \quad E_{\min} = E_{moy} \cdot \left[1 - \frac{(n-1) \cdot r}{R}\right]$$

$$E_{\max} = E_{moy} \cdot \left[1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R}\right] \quad E_{\min} = E_{moy} \cdot \left[1 - \frac{(n-1) \cdot r}{R}\right]$$

On admet généralement que le champ varie autour du conducteur de la façon suivante :

$$E_{\theta} = E_{moy} \cdot \left[1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R} \cdot \cos \theta\right] \dots\dots\dots(III.6)$$

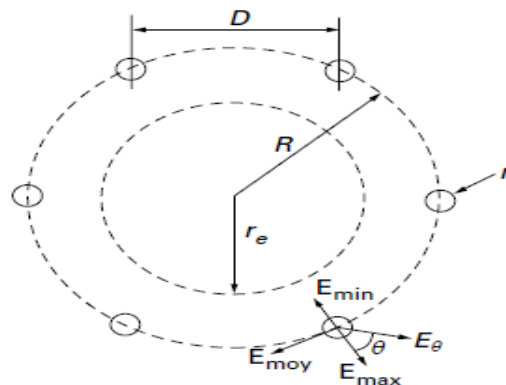


Figure III. 5: Grandeurs caractéristiques d'un faisceau.

III.8 Décharge couronne :

La décharge couronne est une décharge entretenue dans un gaz de grande densité soumis à un champ électrique non uniforme entre deux électrodes sous tension.

Dans le cas d'un conducteur électrique, la décharge couronne a lieu au voisinage de ce dernier et dépend essentiellement de son état de surface et de son diamètre. Dans le cas général, la décharge couronne se localise au voisinage de l'électrode de faible rayon de courbure et occupe un espace dit «zone d'ionisation ou enveloppe de couronne», lors de l'application d'une tension suffisante aux électrodes.

Dans cette zone d'ionisation, il se crée des charges électriques qui se déplacent sous l'action des forces du champ électrique en créant le courant de couronne.

Les particules qui ont le même signe que l'électrode en couronne sautent de la zone d'ionisation à une zone antérieure. Cette dernière est sombre car il n'y a pas de processus d'ionisation. L'enveloppe de couronne dépend de la polarité et du genre de la tension appliquée à l'électrode en couronne, de la forme géométrique de l'électrode et de l'état de sa surface. [12]

La décharge couronne peut se faire au niveau de la cathode ou de l'anode, c'est pourquoi on a deux genres de décharges : décharge positive et décharge négative.

III.8.1 Décharges couronnes positives :

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 III.6) . 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, est appelée région de « dérive ». (Figure III.6).

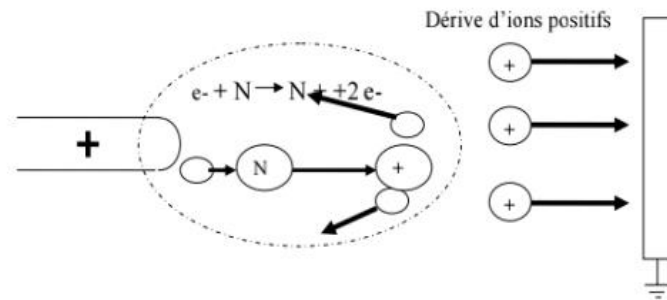


Figure III.6 : descriptif de la décharge couronne positive.

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 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 indique qu'un courant positif de $50 \mu\text{A}$ se décomposerait en un courant unipolaire continu de $20 \mu\text{A}$, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à $30 \mu\text{A}$ percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz[13].

III.8.2 Décharge couronne négative :

Dans le cas d'une décharge sur une cathode, du fait de la grande différence de rayon de courbure entre les électrodes des précipitateurs (classiquement des fils et des plaques), le champ électrique est fortement inhomogène (Figure I.8), l'avalanche électronique se développe dans ce cas jusqu'à une distance telle que l'intensité du champ électrique n'est plus suffisante pour assurer la multiplication électronique. Ces mécanismes sont à l'origine de la formation d'une charge d'espace ionique dans l'espace inter-électrodes. En dehors de cette région d'ionisation, les électrons libres s'attachent rapidement aux molécules neutres pour former des ions négatifs ; à partir d'une certaine distance de l'électrode ionisante, tout se passe comme si l'électrode à faible rayon de courbure émettait des ions de la même polarité qu'elle .

Les phénomènes d'ionisation qui ont lieu dans la couronne lumineuse et qui génèrent les électrons libres, donnent aussi naissance à une forte densité d'ions positifs. Sous l'action du champ électrique, ces ions se déplacent vers le fil et en raison de leur mobilité bien plus petite que celle des électrons, une charge d'espace ionique se forme dans cette zone (Figure(I.7)) [13].

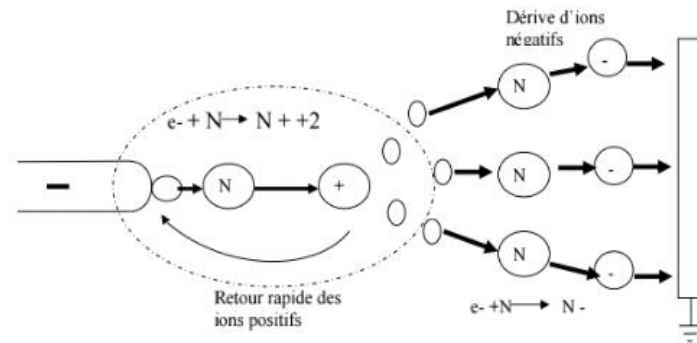


Figure III.7: descriptif de la décharge couronne négative

III.8.3 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. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue. Le schéma de la (figure III.8) illustre le comportement d'une décharge couronne dans le cas d'une ligne aérienne[13].

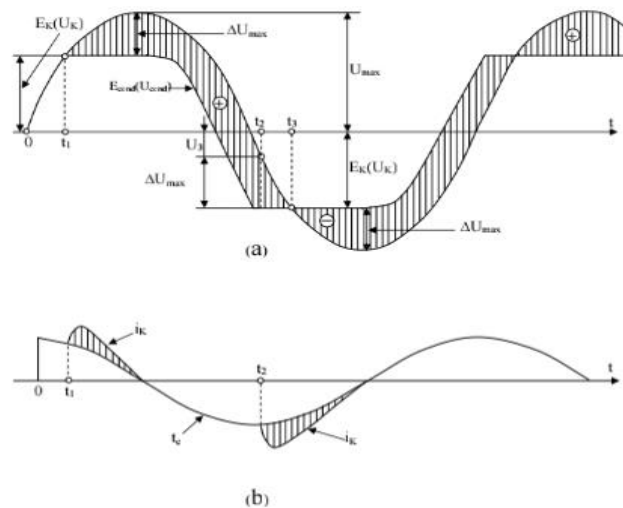


Figure III.8: Tension et courant dans une ligne électrique à courant alternatif lors du phénomène couronne

III.8.4 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 [13].

III.8.5 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. . 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. énergie, mais aussi par leur nature et leur état d'énergie interne.[13]

III.8.6 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 , NO₂), de radicaux (HO) et (HO₂) ainsi que l'ozone (O₃) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières[13].

III.9 LOI DE PEEK :

III.9.1 Définition :

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.[14]

L'aspect général de l'effet couronne dépend de la taille du conducteur. Pour un fil très fin, l'effet est très reproductible, on observe une gaine lumineuse autour du fil, par contre pour des grands rayons de courbure ($r > 2\text{mm}$), l'effet couronne se localise en certains endroits, perd sa symétrie et devient plus instable. Ces instabilités sont à l'origine des nombreuses formes d'émission de couronne.

En tension alternative, le seuil critique apparaît d'abord en polarité négative.

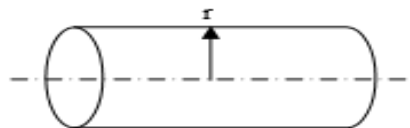
Peek observa que l'apparition de la couronne était fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur et de la densité de l'air. Il donna à sa loi la forme empirique suivante .

$$E_{cr} = E_p \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{K}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right] \dots\dots\dots(III.7)$$

Champ Critique Le champ critique d'apparition de l'effet couronne sur un conducteur est:

1. Conducteur lisse:

$$E_{cc} = E_s \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} \left(\frac{kV}{cm} \right) \right) \dots\dots\dots(III.8)$$



Pour une tension continue : Ecc en valeur efficace ;

Pour une tension alternative : Ecc en valeur max ou amplitude

Es = 30 kV/cm ;

P (cm Hg) : pression en cm de mercure

r (cm) : rayon du conducteur

k = 0,308.

conditions normales P = 76 cm et t = 25°C ⇒ δ=1

$$\text{avec } \delta = \frac{3.92P}{273 + t} \text{ densité relative de l'air}$$

2. Conducteur réel :

Le conducteur réel d'une ligne aérienne présente une surface non lisse et rugueuse (toronnée). En plus, la graisse du conducteur favorise le dépôt de poussières, particules végétales et même des insectes. Ces particules forment des micro-pointes qu'on appelle aspérités.

Le pouvoir de pointe fait diminuer le champ critique :

$$E_0 = m \cdot E_{cc}$$

avec $0 < m < 1$: coefficient de l'état de surface.

Conducteur	Facteur de surface m
Lisse et neuf	1
Lisse ,oxydé	0.93-0.98
Toronné	0.72-0.9
Par défaut	0.85

Tableaux .III.1 .les facteur des conducteurs

L'effet couronne dépend de la géométrie des conducteurs (forme, présence d'irrégularités...) et de l'environnement (pression, humidité, pollution)[14].

3. Correction de Peek :

La relation théorique donnant la tension d'apparition de l'effet de couronne dans une ligne coaxiale a été corrigée empiriquement par Frank William Peek (1881-1933)

$$U_c = E d_0 k m \left(1 + \frac{0.03}{\sqrt{k.R1}} \right) R1 \ln \left(\frac{R2}{R1} \right) [V] \dots \dots \dots (III.9)$$

Facteurs de corrections climatiques :

$$K = \delta \cdot K \dots \dots \dots (III.10)$$

Facteurs de corrections liées à l'état de surface du conducteur:

$$m = m_g \cdot m_p \dots \dots \dots (III.11)$$

III.9.2 Obtention de la loi de Peek :

Si ρ est l'abscisse le long d'une ligne de champ issue d'un conducteur de rayon r
 Le champ électrique en fonction de ρ est donné par [14]:

$$E(\rho) = E_m \cdot \frac{r}{\rho} \dots \dots \dots (III.11)$$

E_m : champ maximal à la surface du conducteur.

On obtient :

$$E_m = E_0 \left[1 + \frac{k}{\sqrt{r}} \right] \dots\dots\dots (III.12)$$

K : coefficient de Peek.

E₀ = la tension disruptive de l'air 31 kV/cm.

Donc le champ critique maximal est donné par la formule empirique de Peek :

$$E_{cr \max} = 30,3 . \delta . m \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta . r}} \right) [KV / cm] \dots\dots\dots (III.13)$$

➤ **Remarque :**

La loi de Peek a donc donné un seuil critique à partir duquel on dit qu'il y a effet couronne ou cet effet est négligeable :

On note : Si $U > U_{cr} \implies$ il y a effet couronne

Si $U \leq U_{cr} \implies$ il n'y a pas d'effet couronne

Où U : est la valeur de la tension efficace simple appliquée.

U_{cr}: est le potentiel critique simple qui dans notre cas proportionnel au champ critique donné par Peek [14]:

$$U_{crit} = 84 . m . m_a . \delta . r . \log \left(\frac{D_{MG}}{r} \right) [KV] \quad III.14)$$

$$U_{crit/milieu} = 0,96 U_{crit} \dots\dots\dots (III.15)$$

$$U_{crit/extérieur} = 1,06 U_{crit} \dots\dots\dots (III.16)$$

m : Coefficient tenant compte de l'état de surface du conducteur.

m_a : Coefficient tenant compte des conditions atmosphérique.

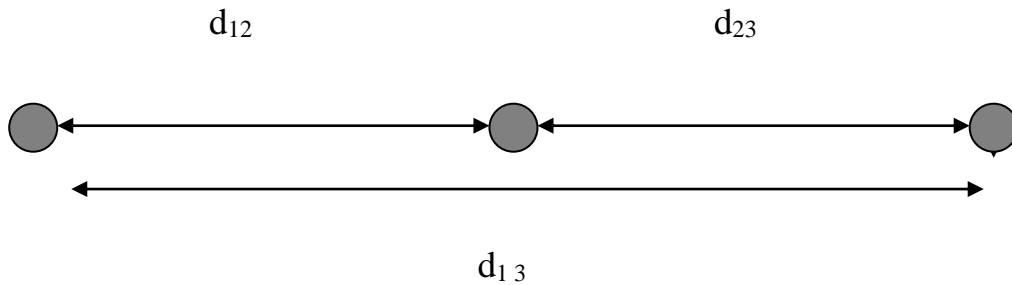
m_a=1 pour beau temps

m_a=0,8 pour mauvais temps

r : rayon de conducteur en cm.

D_{MG} : distance moyenne géométrique entre les conducteurs de phases .

$$D_{MG} = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \dots \dots \dots III.17$$



On a :

$$d_{12} = d_{23}$$

$$d_{13} = 2d_{12} = 2d_{23}$$

donc :

$$D_{MG} = \sqrt[3]{d \cdot 2d \cdot d} = \sqrt[3]{2d^3} = 1,26d$$

III.10 Les différentes corrections sont :

III.10.1-Corrections climatiques :

1-Correction due à la pression :

$$\sigma = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \dots \dots \dots (III.18)$$

2-Correction due à l'humidité :

$$K = [0.002 \left(\frac{H_{abc}}{8} - 8.5 \right)] \dots \dots \dots III.19$$

avec : Habs en g/m³

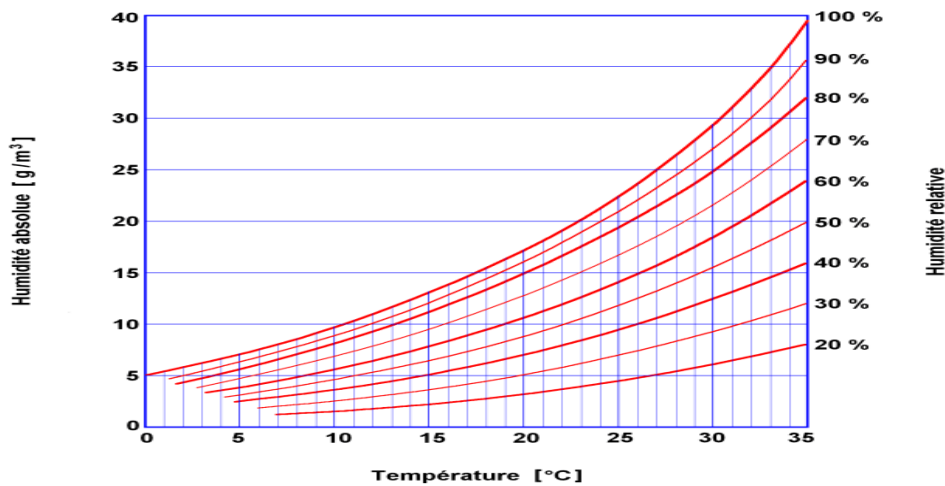


Figure III. 9: Relation entre humidités absolue et relative

III.10.2-Corrections liées à la surface du conducteur central :

1-Correction géométrique :

2-Correction de propreté :

$$0.95(CYLINDRE) > m_p > 0.3(pollué).....III.20$$

III.11 PERTES COURONNE DANS LES réseaux électriques :

III.11.1 Nature des pertes :

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

- Alternance positive : le conducteur attire les charges négatives et repousse les charges positives. Tout se passe comme si le conducteur émet des ions positifs.
- Alternance négative : le conducteur attire les charges positives et repousse les charges négatives. tout se passe comme si le conducteur émet des ions négatifs [14].

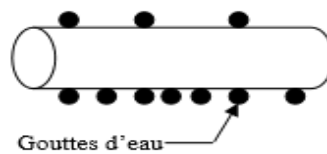


Figure III .10 :polarités positive et négative

Le mouvement des ions provoque une dissipation d'énergie par échauffement suite au frottement avec les atomes de l'air. Cette énergie qui est prélevée du réseau représente les pertes couronne. Les pertes sont dues à un courant dans le plasma formant la couronne autour du conducteur, dont l'ordre de grandeur est environ $\Delta P \cong 100 \text{ kW/km}$.

III.11.2 Influence de la pluie :

Les gouttes sur la surface du conducteur forment de véritables pointes qui rendent l'effet couronne beaucoup plus intense et les pertes considérables[14].



$$\Delta p = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r_{cond}}{D_{moy}} (U_{ph} - U_{cri})^2} \dots \dots \dots \text{(III. 21)}$$

δ :Densité relative de la pression atmosphérique et de la température

$$p = p_0(1 - H10^{-4}) \dots \dots \dots \text{(III.22)}$$

$$\delta = 3.92 \frac{p}{273+T} \dots \dots \dots \text{III.23}$$

$$U_{crit} = 48.9m_0.mt. \delta.r_{cond}. \log(D_{moy}/r_{cond}) \dots \dots \dots \text{III.24}$$

➤ **Remarques :**

- Les lignes haute tension sont conçues de telle façon que l'effet couronne ne devrait pas poser de problèmes par temps sec ; c'est lorsque le temps est pluvieux qu'il devient vraiment gênant.
- Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage du conducteur.
- Le temps améliore l'état de surface du conducteur, car une bonne partie des aspérités est brûlée au fur et à mesure par la décharge elle même.
- Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf car la graisse favorise l'accumulation des différentes particules.

III.11.3 PERTURBATION ELECTROMAGNETIQUE :

L'effet couronne est à l'origine des perturbations des ondes radio, car les fréquences du courant de couronne (de l'ordre du MHz) sont du même ordre de grandeur que celles des ondes radio. Les charges créées par ionisation sont brusquement mises en mouvement par le champ superficiel. Le courant qui en résulte crée un champ électromagnétique variable qui se propage dans l'air et provoque la perturbation des ondes radio[15].

III.11.4 BRUIT :

L'effet couronne produit un bruit ressemblant au bourdonnement d'abeilles. Le déplacement brusque des ions par le champ superficiel produit une variation locale de la pression de l'air qui se transforme en ondes sonores. Le bruit est un facteur nuisible qui peut avoir des conséquences nuisibles sur le tissu biologique. Le bruit est tellement gênant pour l'environnement qu'il devient la paramètre principal à prendre en considération lors de la réalisation de réseaux THT ($U \geq 1000$ kV)[15].

III.11.5 DEGAGEMENT D'OZONE :

La décharge couronne, à l'instar de la décharge de claquage, est aussi accompagnée d'un dégagement d'odeur due à la formation de l'ozone. Par ailleurs, en présence de l'humidité, de l'acide nitrique est produit qui cause la corrosion du conducteur[15].

III.12 Solutions :

Le champ électrique superficiel E_s produit à la surface d'un conducteur cylindrique peut être calculé par le théorème de Gauss[16] :

$$E_S = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \dots\dots\dots(III.25)$$

La seule solution utilisée pour remédier contre l'effet couronne est de diminuer le champ superficiel du conducteur en augmentant le rayon.

On utilise pour augmenter le rayon:

- ✓ soit un conducteur creux (cher).

- ✓ soit un conducteur en faisceaux (il permet en plus de faire transiter une plus grande puissance).

III.12.1 Conducteur en faisceaux :

$$R_{\text{equ}} = R \sqrt[n]{\frac{n r}{R}} \dots\dots\dots(III.26)$$

avec n nombre de conducteurs ;

Réq : rayon équivalent qu’aurait un conducteur central dans cette cellule[16].

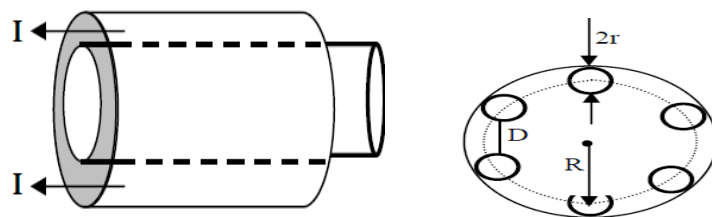


Figure III .11:Conducteur creux et en faisceaux

III.12.2 AVANTAGE DE LA DECHARGE COURONNE DANS LE RESEAU :

Quand la 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

celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur augmente, 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 µs 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[16].

III.12.3 Conducteurs :

Les conducteurs des lignes aériennes à très haute tension sont toujours nus. On emploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avec âme en acier, ces derniers sont généralement les plus économiques. Pour le domaine de la THT, le mode d’utilisation des conducteurs est identifié selon des causes technico-économiques pour remédier à plusieurs phénomènes, qu’ils sont souvent

rencontrés en vue le transport de l'énergie électrique, comme les pertes par effet couronne, les pertes réactives de la ligne, les pertes par effet Joules...etc Afin de réduire l'effet couronne par exemple, il est préférable d'utiliser la technologie des lignes en faisceau de conducteurs .

Le faisceau est composé de 2, 3 ou 4 conducteurs (figure III.12). Parmi les effets de l'utilisation des faisceaux, l'augmentation de rayon équivalent de la phase et la réduction de l'intensité du champ électrique aux alentours du conducteur. «L'avantage le plus important de l'utilisation du faisceau de conducteurs est la réduction de la réactance de la ligne et des pertes par effet couronne »[17] .

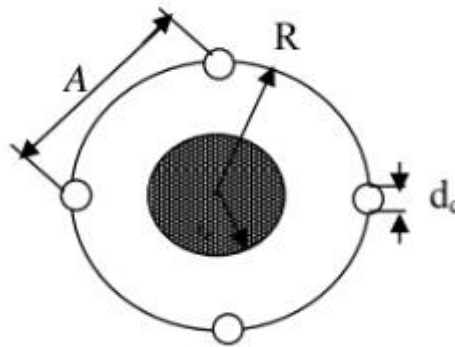


Figure III .12 : conducteurs en faisceau

Les conducteurs hautes tensions sont aériens ou souterrains (et parfois-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transport, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Pour toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique.

III.12.4 L'utilisation des faisceaux des conducteurs :

En générale le diamètre du conducteur est artificiellement augmenté par l'utilisation des faisceaux de conducteurs. A partir de 400 kV un conducteur de phase est constitué de plusieurs conducteurs élémentaires maintenus entre eux à une distance de $a = (20 \div 60)$ cm par des entretoises. Le principal but de cette disposition est de réduire le champ électrique à la surface des conducteurs. La figure 1.3 représente un faisceau de huit conducteurs élémentaires :

$n=8$: Le nombre de conducteurs élémentaires du faisceau. On appelle la distance entre deux conducteurs élémentaires le pas de faisceau (a) R : le rayon de faisceau. Le rayon équivalent de faisceau peut être calculé par la relation suivante [17] :

III.12.5 Caractéristique d'un faisceau :

les lignes à très hautes tensions supérieures à 300 [kV], sont équipées presque exclusivement de faisceaux conducteurs par phase. Cette disposition permet de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles (elle réduit en outre l'inductance des lignes, ce qui est favorable à l'accroissement de leur capacité de transport de puissance).

L'emploi de faisceaux entraîne la nécessité de définir deux nouvelles grandeurs :

- le rayon équivalent d'un faisceau ; c'est le rayon d'un conducteur unique fictif qui aurait les mêmes capacités par rapporte à tous les autres conducteurs de la ligne

le gradient superficiel maximal : par un effet de blindage mutuel des conducteurs du faisceau, le gradient réel est plus faible vers l'intérieur, et passe par un maximum vers l'extérieur du faisceau or, dans toutes les études relatives au champ perturbateur radio-électrique des lignes, il est d'usage de se référer à ce gradient maximal [17].

III.12.6 Calcul du rayon équivalent d'un faisceau :

Considérons un faisceau formé de n conducteurs, régulièrement répartis sur un cercle de centre O , et de rayon R .

R est le rayon géométrique du faisceau

Remarque : entre R et D distance entre deux conducteurs voisins, existe la relation immédiate [17]:

$$D = 2R \sin \frac{\pi}{n} \dots \dots \dots (III.27)$$

III.13 APPLICATIONS UTILISANT LA DÉCHARGE COURONNE :

III.13.1 Parafoudre :

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 III.13) [18].

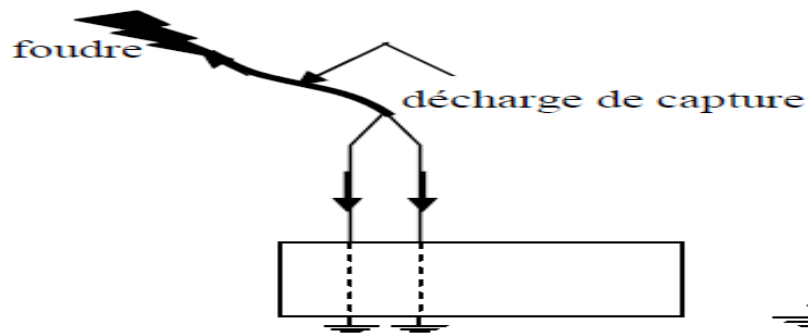


Figure III.13: Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre

III.13.2 Neutralisation :

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques [18].

III.13.2 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 III.14) [18].

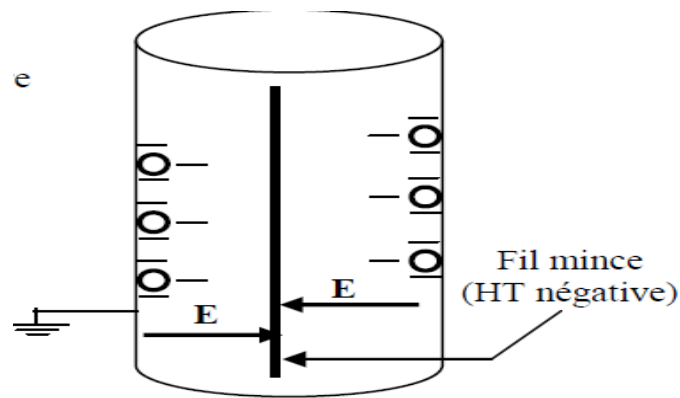


Figure III.14: Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.

III.13.3 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 III.15)[18].

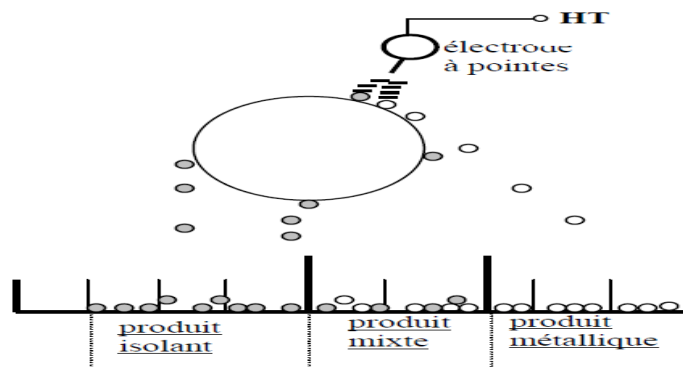


Figure III.15: Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique

III.14. Conclusion :

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été effectuée généralisée décharge électrique dans les gaz. Dans le chapitre suivant, nous nous sommes proposés d'étudier l'influence, que ces transferts d'énergie, pouvait avoir sur la formation des inhomogénéités des neutres (densité, température), et sur les mouvements dans le gaz qui en résultait.

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 en pi et le schéma équivalent de la ligne H T .

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.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] : Cours (Transport et distribution de l'énergie électrique)
- [2] : Support de cours réseaux électrique 2017/2018 (centre universitaire Nour El Bachir Bayadh)
- [3] : MEMOIRE du diplôme de MASTER (Conception et simulation d'une ligne aérienne de transport électrique 220KV) Par BELLAREDJ Amina et GAOUAR Youcef.
- [4] :https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_en_Pi_des_lignes_%C3%A9lectriques
- [5] :https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_en_Pi_des_lignes_%C3%A9lectriques
- [6] :Dr.EB.Azzag (cour de technique de haute tension) Dpt électrotechnique
- [7] :C.Gary et M.Moreau (l'effet de couronne en tension alternative)Edition Eyrolles 1976.
- [8] :Cours Décharge électrique 2010
- [9] :Mémoire de Magister en électrotechnique (influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les ligne et les transformateur de haute tension)par Kadi Hocine
- [10] : Cours Décharge électrique 2010
- [11] : Dr.EB.Azzag (cour de technique de haute tension) Dpt électrotechnique
- [12] : cours de décharge couronne
- [13] : Cours(Décharge électrique 2010)
- [14] : Dr.EB.Azzag (cour de technique de haute tension) Dpt électrotechnique
- [15] : Cours (Décharge électrique 2010)
- [16] : Dr.EB.Azzag (cour de technique de haute tension) Dpt électrotechnique
- [17] : C.Gary et M.Moreau (l'effet de couronne en tension alternative)Edition Eyrolles 1976.
- [18] : Mémoire de Magister en électrotechnique (influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les ligne et les transformateur de haute tension)par Kadi Hocine