

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE**

N° :.....



**DOMAINE : Science Technologie**

**FILIERE : GENIE ELECTRIQUE**

**OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master**

**Par :**  
**Benziane warda**  
**Souyah meryem**

/

**Intitulé**

**Etude de la compatibilité électromagnétique au voisinage des**  
**lignes haute tension**

**Soutenu devant le jury composé de :**

- |                             |                   |            |
|-----------------------------|-------------------|------------|
| - Dr. ROUABHI Riad          | Université M'sila | Président  |
| - DR. CHOUCOU Abdelmadjid   | Université M'sila | Rapporteur |
| - Dr. HERIZI Abde Elghafour | Université M'sila | Examineur  |

**Année universités : 2023 /2024**

## ***Remerciements***

Nous tenons à remercier en tout premier Dieu car chaque succès était dû à son succès.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements au Dr. Chouchou Abdelmadjid, directeur scientifique de ce travail. Je lui adresse toute ma reconnaissance et mon respect pour ses conseils avisés, ses encouragements constants, sa disponibilité, ses qualités humaines et surtout pour la confiance qu'il m'a accordée pour mener à bien cette thèse.

Mes remerciements vont également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter de participer à ce jury.

Je remercie ainsi toutes les personnes qui m'ont aidé et témoigné de leur soutien durant la réalisation de ce travail.

Enfin tous mes remerciements et ma reconnaissance à toute ma famille.

## *Dédicace*

Avec l'aide de dieu tout puissant est enfin achevé ce travail, lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont chères ;

À la mémoire de mon cher père qui m'a orienté vers le savoir et la connaissance depuis mon jeune âge ;

Aux témoignages d'affection, d'amour et de Grande reconnaissances, aux êtres les plus Chers que j'ai dans ma vie ; ma mère, mes sœurs et mes frères ;

A mon cher mari pour son aide précieuse et son encagement le long de ce travail et surtout sa patience ; et mon petit ange LOUDJAINE que dieu nous la garde.

*Souyah Meryem*

## *Dédicace*

Ma chère maman, dont l'absence physique ne fait que renforcer la présence spirituelle qui emplit mon cœur chaque jour. En ce jour tant attendu, j'aurais tant voulu partager cette joie avec toi. Je te dédie ce diplôme en hommage à ton amour, tes prières et tes sacrifices. Sans toi, je ne serais jamais arrivée là où je suis aujourd'hui. Que Dieu te bénisse et t'accorde le paradis.

À mon cher papa, que Dieu te donne longue vie et te garde comme notre roc et notre soutien indéfectible.

À mes précieuses sœurs, Jihad et Mariam, et à mon cher frère Hicham, mes piliers inébranlables qui restent solides malgré les tempêtes de la vie.

*Benziane Warda*



# SOMMAIRE

# ***SOMMAIRE***

## **Chapitre I**

### **Généralités sur la compatibilité électromagnétique des lignes de haute tension**

Introduction générale .....	01
I.1. Introduction .....	03
I.2. Champs électromagnétique .....	03
I.3. Définition .....	03
I.3. Sources de champs électromagnétiques .....	04
I.3.1. Sources de champs électromagnétiques .....	4
I.3.2. Sources d'origine artificielle .....	05
I.3.2.1. Dans l'environnement général .....	05
I.3.2.2. Dans l'environnement domestique .....	06
I.4. Influence des champs électromagnétique sur la santé humain .....	06
I.4.1. Effets sur la santé .....	06
I.4.2. Effets sur le corps humain .....	06
I.5. Normes Internationales .....	07
I.5.1. Réponse de l'OMS .....	07
I.6. Description d'un coup de foudre .....	08
I.6.1. Origine de la foudre .....	08
I.6.2. Types de coups de foudre .....	10
I.6.2. 1. Classification des décharges au sol .....	10
I.6.3.2 Le coup de foudre descendant .....	10
I.6.3.3. Le coup de foudre ascendant .....	11
I.6.3.4 Le coup de foudre positif .....	11
I.6.3.5 Le coup de foudre négatif .....	12
I.6.4. Mécanisme du coup de foudre .....	12
I.6.5. Schéma électrique équivalent .....	13
I.7. Définition de la CEM .....	14

I.7.1. Acteurs de la CEM .....	14
I.7.2. Source .....	15
I.7.2.1. Définition .....	15
I.7.2.2. Réseaux électriques comme source .....	15
I.7.3 Les modes de couplage .....	15
I.8. Conclusion .....	16

## **Chapitre II. Généralisés sur les réseaux électriques**

II.1. Introduction .....	17
II.2. Rôle des réseaux électriques .....	17
II.3. Architecture de réseaux haute tension .....	18
II.4. Les niveaux de tension des réseaux électriques .....	18
II.4.1. Tensions normalisées .....	18
II.4.2. Tension et puissance du réseau électrique .....	19
II.5. Différents types des réseaux électriques .....	19
II.5.1. Le réseau de transport THT .....	19
II.5.2. Le réseau de transport HT .....	20
II.5.3. Le réseau de répartition MT .....	21
II.5.4. Le réseau de distribution BT .....	21
II.4. Différents types de structures des réseaux .....	22
II.4.1. Structure maillée .....	22
II.4.2. Structure radiale ou bouclée .....	22
II.4.3. Structure arborescente .....	22
II.2. Définition des lignes électriques .....	22
II.4. Utilisation des lignes selon le type de réseau électrique .....	23
II.4.1. Lignes de distribution à basse tension (TBT) .....	23
II.4.2. Lignes de distribution à moyenne tension (TMT) .....	23
II.4.3. Lignes de transport à haute tension (THT) .....	23
II.4.4. Lignes de transport à très haute tension (TTHT) .....	24
II.5. Composantes d'une ligne .....	24
II.5.1. Supports .....	24
II.5.2. Conducteurs .....	24
II.5.3. Câble de garde .....	26
II.6. Modélisation des lignes HT .....	26

II.6.1. Ligne de transmission courte .....	27
II.6.2. Ligne de transmission moyenne.....	28
II.6.3. Ligne de transmission longue .....	29
II.7 .Conclusion .....	30

### **Chapitre III      Calcul de champs électromagnétique dans les lignes de haute tension**

III.1 Introduction .....	31
III.2- Modélisation analytique des champs électromagnétiques 50 Hz .....	31
III.2.1- Equations de Maxwell .....	32
III.2.2 .Détermination du vecteur potentiel magnétique.....	33
III.3- Calcul analytique du champ électrique rayonné par une ligne Haute tension .....	34
III.3.1- Grandeurs de l'électrostatique .....	34
III.3.1.2. Équations locale du potentiel et du champ électrique .....	34
III.3.1.3. Les équations locales du champ électrique.....	35
III.4.Méthodes de calcul du champ électrique .....	36
III.4.1. Formulation mathématique du champ électrique en deux dimensions .....	36
III.5. Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne Haute tension.....	40
III.5.1- Champ magnétique génère par un fil rectiligne .....	40
III.6 Effet couronne et processus de la décharge couronne .....	41
III.6.1. Définition de l'effet couronne .....	41
III.6.2. Mécanisme de la décharge couronne .....	41
III.6.3. Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension) .....	42
III.7 Modes de décharge par effet couronne .....	43
III.7.1.Effet couronne en tension continue positive .....	43
III.7.2. Effet couronne en tension continue négative .....	43
III.8. Décharge couronne dans les lignes électriques .....	44
III.8.1 Décharge couronne dans les lignes à courant continu .....	44
III.8.2 Décharge couronne dans les lignes à courant alternatif .....	45
III.9 Utilisation et conséquences de l'effet de couronne .....	47
III.9.1 Utilisation de l'effet de couronne .....	47
III.9.2 Conséquences négatives de l'effet de couronne .....	48
III.10 .LOI DE PEEK .....	48

III.10.1 Définition .....	48
III.10.2. Obtention de la loi de Peek .....	50
III.11 lignes de conducteurs en faisceaux .....	51
III.11.1 Définition d'un faisceau conducteur .....	51
III.11.1.1 Caractéristiques d'un faisceau .....	51
III.11.1.2 Champ électrique dans un faisceau conducteur .....	52
III.12.Mécanisme de formation des pertes couronne .....	53
III.12.1. Pertes en régime localisé .....	54
III.12.2 . Pertes en régime généralisé .....	54
III.12.3. Calcul des pertes .....	54
III.13. Perturbations radioélectriques .....	55
III.14.Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>67</b>

## **Références bibliographiques**

# Liste des Figures

## Chapitre I

<b>Figure I .1</b> Différentes sources des champs électromagnétiques.....	4
<b>Figure 1.2.</b> Champ électromagnétique terrestre assimilable à celui d'un dipôle.....	5
<b>Figure I.3.</b> Effets sur le corps humain des champs.....	7
<b>Figure I.4.</b> La décharge électrique (La foudre).....	8
<b>Figure I.5 .</b> Répartition des charges électriques dans un cumulo-nimbus isolé (tripôle).....	9
<b>Figure 1.6.</b> Divers types de décharges de foudre.....	10
<b>Figure I.7.</b> Classification des décharges au sol.....	12
<b>Figure I.8.</b> Mécanisme du coup de foudre.....	13
<b>Figure I.9.</b> Surtensions dues à la foudre.....	13
<b>Figure I.10.</b> Coup de foudre dans les conducteurs d'une ligne. ....	14
<b>Figure I .11 .</b> Transmission des perturbations.....	14
<b>Figure I.12</b> Classification des modes de couplages.....	16

## Chapitre II

<b>Figure II.1.</b> Structure d'un réseau électrique. ....	18
<b>Figure II. 2.</b> Réseau HTA aérienne. ....	20
<b>Figure II.3.</b> Schéma d'un réseau électrique. ....	21
<b>Figure.II.4</b> Schéma de différents types des réseaux.....	22
<b>Figure II.5</b> Photo des lignes aériennes .....	23
<b>Figure II.6.</b> Types de pylônes.....	24
<b>Figure II.7.</b> Ligne triphasée.....	25
<b>FigureII.8.</b> Chaîne d'isolateurs. ....	26
<b>Figure II.9.</b> Schéma de modèle d'une ligne.....	27
<b>Figure II.10</b> Ligne de longueur moyenne, représentation en $\Pi$ .....	29
<b>Figure II.11</b> Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur .....	29

## Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> Disposition du calcul du champ électromagnétique.....	33
<b>Figure III.2.</b> Constitution d'un faisceau de deux conducteurs $n=2$ . ....	37
<b>FigureIII.3.</b> Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne.....	37
<b>FigureIII.4.</b> Détermination le champ électrique pour une phase. ....	39

<b>Figure III.5.</b> Champ magnétique rayonné par un fil de longueur infinie.....	40
<b>Figure III.6.</b> Effet de couronne sur un éclateur.....	41
<b>Figure III.7.</b> Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan) .....	42
<b>Figure III.8.</b> Effet de couronne en tension positive et négative.....	43
<b>Figure III.9.</b> Descriptif de la décharge couronne négative.....	44
<b>Figure III.10</b> Tension et courant dans une électrique à courant alternatif lors du phénomène couronne. ....	45
<b>Figure III.11</b> Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteur.....	52
<b>Figure II.12.</b> Une phase en faisceau.....	52



## Introduction générale

La présence de champs électromagnétiques invisibles suscite des préoccupations concernant la santé publique, en particulier pour les femmes enceintes et les jeunes enfants. Ces inquiétudes sont amplifiées dans le milieu professionnel, où les travailleurs peuvent être exposés à des champs électromagnétiques d'origine artificielle, souvent de plus forte intensité et sur des périodes plus longues.

Un champ électrique, dont l'intensité est mesurée en volt par mètre, résulte de la présence de particules électriquement chargées. Lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur sous tension, il engendre un champ électromagnétique. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un rayonnement électromagnétique qui se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière. Ainsi, le champ électrique et le rayonnement électromagnétique sont des manifestations interconnectées des phénomènes électriques, se produisant dès qu'un conducteur est parcouru par un courant.

Les rayonnements électromagnétiques sont des rayonnements non ionisants, au même titre que les rayons de la lumière visible, ultraviolette ou infrarouge, c'est-à-dire que, contrairement aux rayons X ionisants, ils ne sont pas assez énergétiques pour arracher des électrons aux atomes qu'ils atteignent.

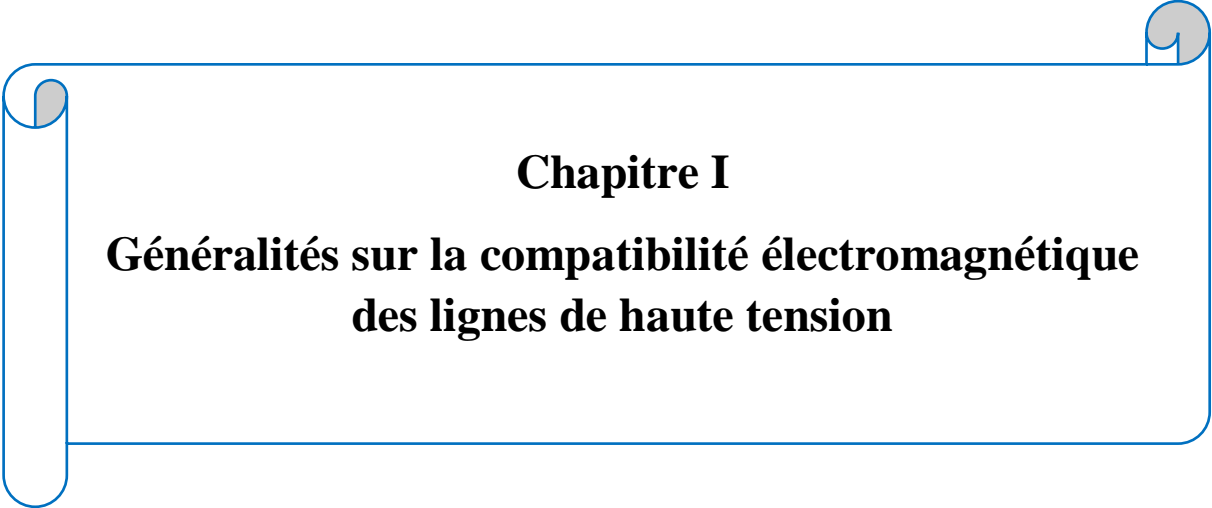
L'effet couronne, également connu sous le nom anglais de "corona effect", a suscité un vif intérêt dans la communauté scientifique, notamment en raison des phénomènes lumineux qui l'accompagnent. Ce phénomène, aujourd'hui bien compris, se manifeste par l'apparition d'une gaine lumineuse autour d'un conducteur fin lorsque celui-ci est soumis à un potentiel électrique suffisamment élevé.

Les premières études approfondies sur l'effet couronne sont attribuées à R. W. Peek. Vers 1920, il a établi une loi empirique décrivant le seuil d'apparition de cette lueur en fonction du champ électrique à la surface du conducteur. Cette loi, remarquable par sa longévité, reste encore largement utilisée de nos jours pour prédire et analyser l'apparition de l'effet couronne dans diverses applications électriques.

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, ...etc. Cependant, la maîtrise du phénomène permet le dimensionnement des lignes et des postes électrique THT et HT du fait qu'il mène à l'amorçage de tout l'intervalle d'isolement.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des un aperçu sur le champ électromagnétiques ainsi que des généralités sur la compatibilité électromagnétique Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des lignes de haute tension. Dans le troisième chapitre nous nous intéressons au calcul de champ électromagnétique généré par les lignes, nous présentons aussi le mécanisme effet couronne et nous calculons la tension et le champ critique.

Nous terminons par une conclusion générale ;



**Chapitre I**  
**Généralités sur la compatibilité électromagnétique  
des lignes de haute tension**

## **I.1. Introduction**

Les systèmes électriques et électroniques sont constamment exposés à des perturbations causées par des énergies parasites qui pénètrent involontairement leurs limites. Ces énergies indésirables sont connues sous le nom de perturbations électromagnétiques.

En examinant l'environnement électromagnétique d'un dispositif électronique, on constate l'existence de diverses sources de perturbations. Celles-ci peuvent être classées en deux catégories principales :

- Les perturbations d'origine naturelle, issues de phénomènes environnementaux.
- Les sources de perturbations liées à l'activité humaine, résultant de l'utilisation et du fonctionnement de divers équipements et infrastructures.

Cette diversité de sources de perturbations souligne la complexité de l'environnement électromagnétique dans lequel opèrent les systèmes modernes, nécessitant des stratégies de protection et de blindage appropriées [1].

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique La Compatibilité électromagnétique est une discipline qui a pour objectif d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique. Elle a pour vocation de :

- ✚ Etudier les transferts d'énergie non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques,
- ✚ Mettre au point des procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises et de ce fait satisfaire à la réglementation en vigueur,
- ✚ Mettre au point des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites.

## **I.2.Champs électromagnétique**

### **I.3. Définition**

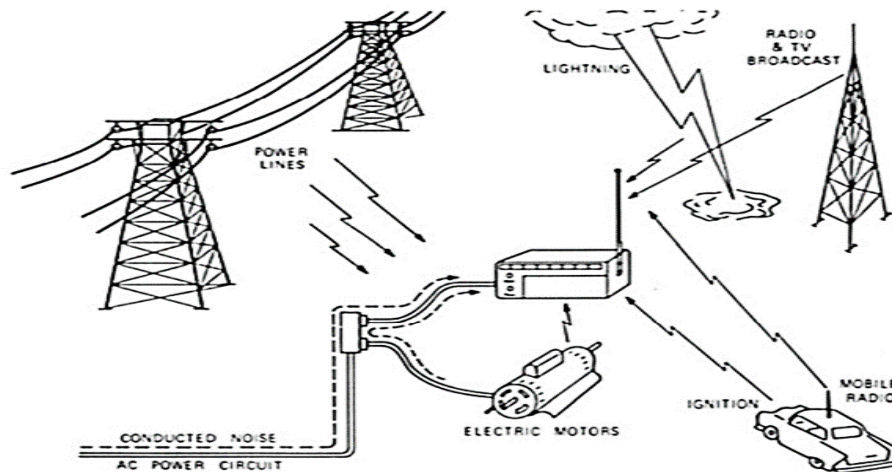
Un champ électromagnétique est une représentation spatiale de la force électromagnétique exercée par des particules chargées. C'est un concept fondamental en électromagnétisme décrivant les différentes composantes de la force électromagnétique qui s'appliquent sur une particule chargée en mouvement dans un référentiel galiléen. Pour une particule de charge  $q$  se déplaçant à la vitesse  $v$ , la force électromagnétique subie peut s'exprimer mathématiquement par :

$$F^{\rightarrow} = (E^{\rightarrow} + v^{\rightarrow} \wedge B^{\rightarrow}) \quad (I.1)$$

Où  $\vec{E}$  est le champ électrique et  $\vec{B}$  est le champ magnétique. Le champ électromagnétique est l'ensemble  $(\vec{E}, \vec{B})$ .

Cela permet de modéliser et calculer précisément l'effet du champ électromagnétique sur une particule chargée en fonction de sa charge et de sa vitesse. Cette formulation joue un rôle clé pour comprendre et prédire les phénomènes électromagnétiques [2].

### I.3. Sources de champs électromagnétiques



**Figure I.1.** Différentes sources des champs électromagnétiques.

Dans la nature on distingue deux types de sources de champs électromagnétiques :

#### I.3.1. Sources d'origine naturelle

La plupart des champs électromagnétiques naturels sont statiques, c'est-à-dire qu'ils ont une fréquence de 0 Hz. Cela inclut par exemple le champ magnétique terrestre qui oriente les boussoles, et le champ électrique atmosphérique qui peut atteindre des valeurs très élevées sous les nuages orageux et aux pôles. Cependant, certaines sources naturelles produisent des champs électromagnétiques variables dans le temps avec des fréquences parfois très élevées. On peut citer **l'électricité statique**, la foudre qui est un phénomène électromagnétique transitoire très puissant, ainsi que les rayonnements électromagnétiques naturels à très hautes fréquences provenant par exemple du Soleil et des sources cosmiques. Bien que statiques dans la plupart des cas, les champs électromagnétiques d'origine naturelle peuvent donc également varier temporellement sur une large gamme de fréquences [3].

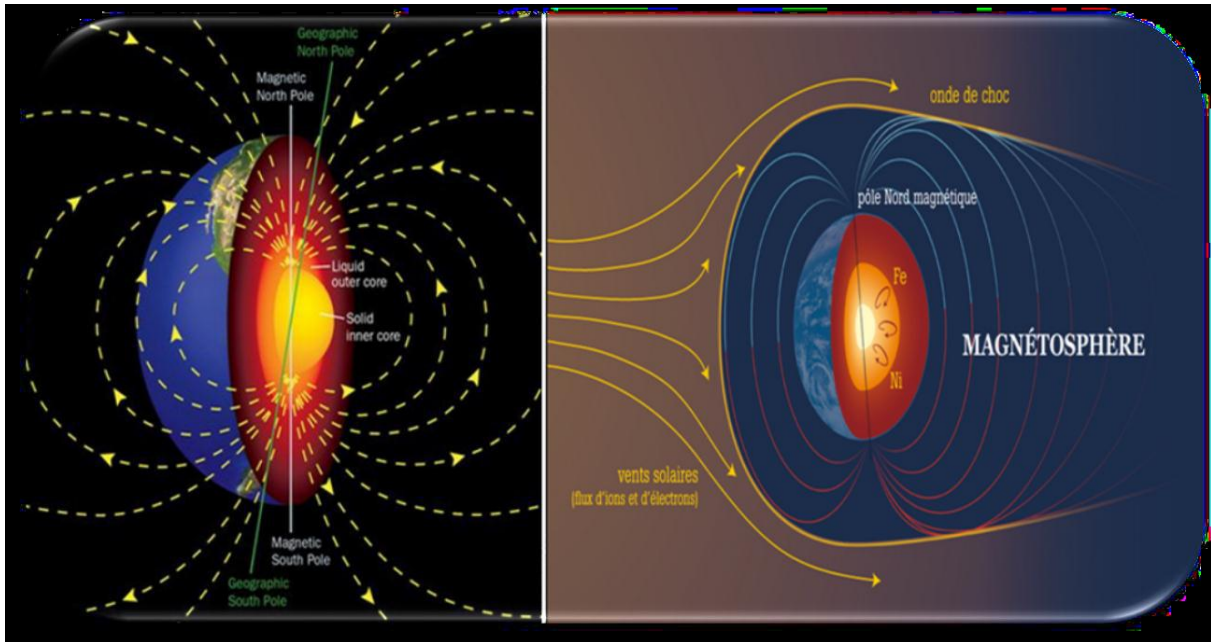


Figure 1.2. Champ électromagnétique terrestre assimilable à celui d'un dipôle

### I.3.2. Sources d'origine artificielle

Dans l'environnement électromagnétique de basse fréquence, on distingue deux sources principales de champs :

- Les réseaux de haute tension, qui génèrent principalement des champs électriques.
- Les appareils industriels et domestiques, qui sont les sources prédominantes de champs magnétiques.

La figure 1.4 représente les sources et les limites supérieures des champs extrêmement basse fréquence qu'on rencontre souvent dans l'environnement général, domestique et sur les lieux de travail [3].

#### I.3.2.1. Dans l'environnement général

Le transport de l'énergie électrique depuis les centrales de production vers les zones urbaines s'effectue via des lignes à haute tension. À l'approche des agglomérations, cette tension est réduite par des transformateurs qui alimentent ensuite les réseaux de distribution locale.

Sous les lignes aériennes, l'intensité des champs électromagnétiques peut être considérable :

- Le champ électrique peut atteindre jusqu'à 12 kV/m
- Le champ magnétique peut s'élever à 30  $\mu$ T

A proximité des centrales et des sous-stations, les champs électriques peuvent atteindre 16 kV/m et les champs magnétiques 270  $\mu$ T.

### **I.3.2.2. Dans l'environnement domestique**

Dans tous les environnements industriels, les équipements électriques et les câbles conducteurs génèrent des champs électriques et magnétiques. Ces champs sont particulièrement intenses autour des infrastructures de transport et de distribution d'électricité.

Le personnel chargé de la maintenance de ces réseaux électriques est particulièrement exposé à ces champs de forte intensité. Cette exposition professionnelle présente des caractéristiques spécifiques.

Dans les centrales électriques et sous-stations les champs électriques peuvent excéder 25 kV/m et champs magnétiques peuvent dépasser 2 mT (milliteslas). Dans les postes de soudage les soudeurs peuvent être exposés à des intensités atteignant 130  $\mu$ T (microteslas).

## **I.4. Influence des champs électromagnétique sur la santé humain**

### **I.4.1. Effets sur la santé**

Les champs électriques et magnétiques peuvent influencer le corps humain, et des recherches scientifiques tentent de déterminer si ces influences ont des impacts sur la santé. Un champ électrique externe génère des courants électriques qui circulent à la surface du corps, tandis qu'un champ magnétique externe produit des courants qui traversent tout le corps.

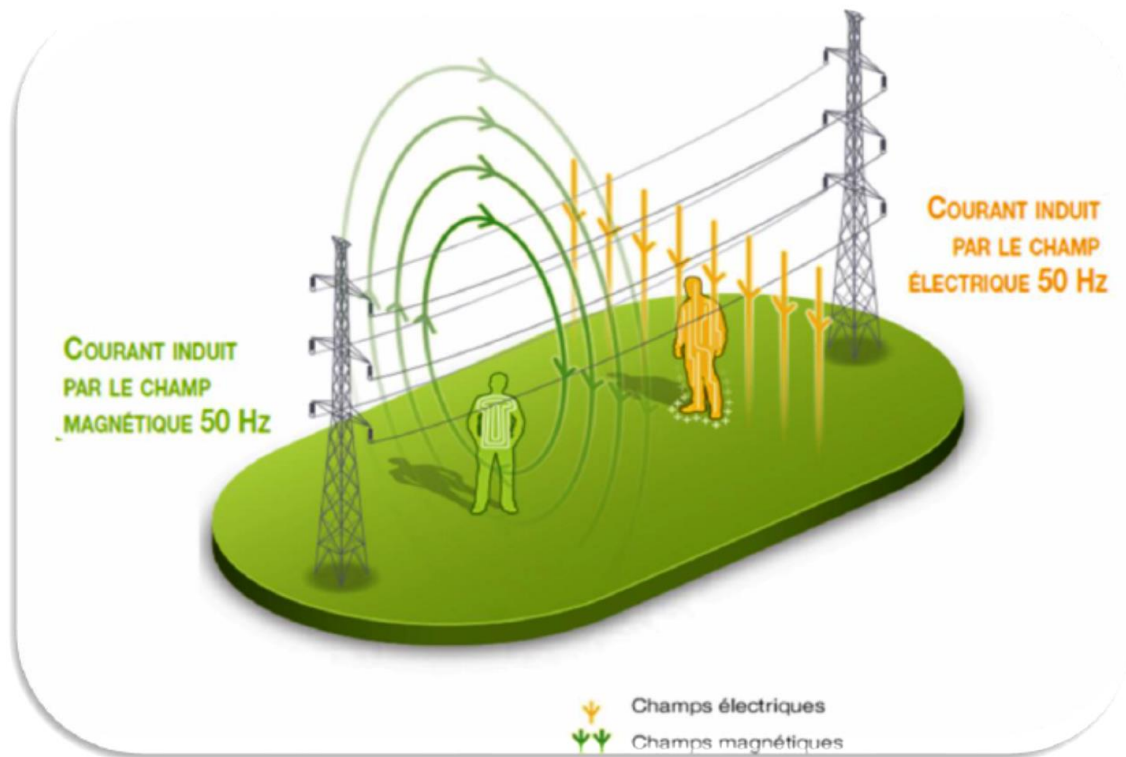
La distribution spatiale de ces courants induits dans les tissus biologiques dépend des propriétés des tissus, en particulier de leur conductivité électrique (capacité à laisser passer le courant). Des modèles mathématiques permettent de décrire la relation entre l'intensité des champs externes et la densité des courants induits dans l'organisme. Ainsi, ces modèles aident à comprendre et quantifier les effets des expositions aux champs électromagnétiques sur le corps humain, fournissant des données essentielles pour évaluer les éventuels risques sanitaires [2]

### **1.4.2-Effets sur le corps humain**

Un champ électrique externe induit des charges électriques à la surface du corps exposé, provoquant ainsi la circulation de courants entre le corps et la terre. Des études ont montré que le seuil de perception tactile de ce courant varie selon les individus : 5 % des personnes peuvent ressentir un courant induit par un champ électrique de 5000 V/m à 50 Hz. Ces charges superficielles génèrent également des courants induits à l'intérieur de l'organisme..

À la fréquence de 50 Hz typique, le courant induit dans le corps est environ 100 millions de fois plus faible que le champ électrique externe l'ayant provoqué. Concernant le champ magnétique, son intensité dans les tissus est la même que celle du champ magnétique extérieur appliqué, le corps humain ne perturbant pas de manière significative ce champ [2].

La principale interaction des champs magnétiques est l'induction de courants électriques dans les tissus biologiques.



**Figure I.3.** Effets sur le corps humain des champs

### **I.5. Normes Internationales**

La Commission internationale de Protection contre le Rayonnement non ionisant (voir : [www.icnirp.org](http://www.icnirp.org)) s'est intéressée à l'exposition aux champs magnétiques statiques. Concernant l'exposition professionnelle, les limites actuelles sont basées sur la nécessité d'éviter les sensations de vertiges et de nausées provoquées par le déplacement dans un champ magnétique statique. Les limites recommandées sont une moyenne pondérée en fonction du temps de 200 mT pour l'exposition professionnelle au cours d'une journée de travail, avec une valeur maximale de 2 T. Une limite de 40 mT est fixée pour l'exposition continue du grand public [4].

#### **I.5.1. Réponse de l'OMS**

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a joué un rôle clé dans l'évaluation des problèmes sanitaires potentiellement liés à l'exposition aux champs électromagnétiques (CEM) dans la gamme de fréquences de 0 à 300 GHz. En 2002, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a évalué la cancérogénicité des champs statiques. Plus récemment, le projet

international CEM de l'OMS a procédé à une évaluation approfondie des risques présentés par ces champs (Critères d'Hygiène de l'Environnement, 2006), identifiant certaines lacunes dans les connaissances actuelles.

À l'issue de cette évaluation, un programme de recherche pluriannuel a été mis en place afin de combler ces manques et guider les futures évaluations des risques liés aux CEM. L'OMS coordonne ainsi des efforts internationaux visant à mieux comprendre et caractériser les éventuels impacts sanitaires de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques, dans un objectif de protection de la santé publique [4].

### **I.6.Description d'un coup de foudre**

Depuis toujours, la foudre a impressionné l'être humain, apparaissant régulièrement dans de nombreuses mythologies. Ce phénomène est à la fois effrayant, en raison de son potentiel mortel, et entouré de mystère. De nombreux mythes se sont construits autour de la foudre, mêlant réalité et fantasme, symbolisant l'impuissance de l'homme face à une nature spectaculaire et capricieuse. À une époque où ce phénomène était incompris, l'homme cherchait à l'interpréter pour calmer ses peurs et apaiser ses frayeurs. Pour certains, le tonnerre était un mauvais présage, tandis que pour d'autres, il était associé à la fertilité et à la fécondité.



**Figure I.4.** La décharge électrique (La foudre)

#### **I.6.1.Origine de la foudre**

La formation des nuages dans l'atmosphère suit des étapes complexes, essentielles à comprendre en météorologie. Le cumulonimbus, un imposant nuage orageux, représente le stade ultime de développement lorsqu'un courant d'air chaud et humide s'élève et rencontre de l'air froid et sec. Sa structure en forme d'enclume, avec un sommet atteignant le haut de la

troposphère, et sa taille massive sont des signes annonciateurs d'un orage imminent. La formation d'un cumulonimbus résulte de conditions atmosphériques spécifiques, menant à la création d'un grand nuage convectif, précurseur des phénomènes orageux [5].

Le gradient de température, l'humidité ainsi que la présence de masse d'air chaud sont des facteurs indispensables à la formation des cumulonimbus si l'un deux venait à manquer dans les régions désertiques par exemple, les orages ne se produiraient qu'occasionnellement.

Durant la formation du nuage, les charges électriques se séparent pour former un gigantesque dipôle voir un tripôle électrique (Figure I.5). Ces charges électriques sont générées par les collisions entre les petits cristaux de glace, qui acquièrent une charge positive, et les grosses gouttes d'eau liquide en surfusion, formées en sphéroïdes de dimensions centimétriques, qui se chargent négativement. Les petits cristaux de glace sont portés vers le haut par les courants ascendants, tandis que les grosses gouttes liquides négatives descendent sous l'effet de la gravité [5].

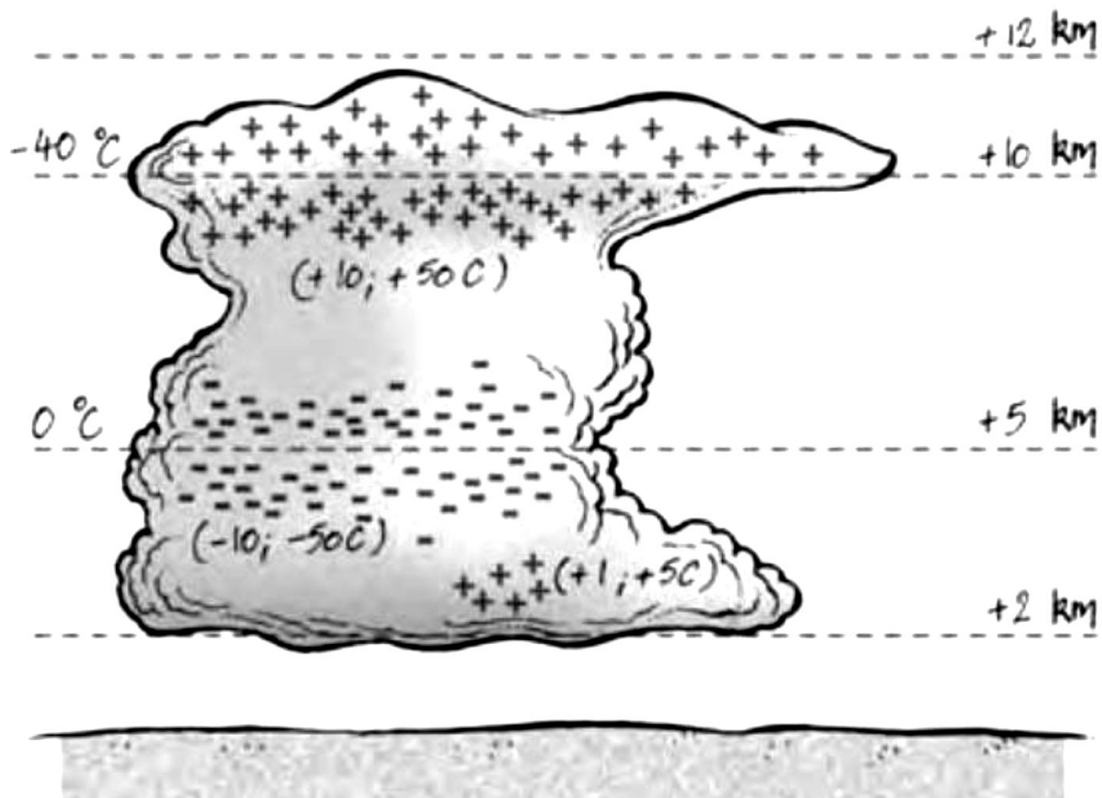


Figure I.5 .Répartition des charges électriques dans un cumulo-nimbus isolé (tripôle).

### I.6.2. Types de coups de foudre

Les décharges électriques dans les nuages d'orage se manifestent sous plusieurs formes :

- La décharge intranuage : C'est le type le plus courant, se produisant à l'intérieur même du cumulonimbus (Figure 6.2 ①).
- La décharge dans l'air : Moins fréquente, elle débute dans le nuage mais s'interrompt dans l'air environnant sans atteindre le sol (Figure 6.2 ②).
- La décharge internuage : Elle se produit lorsqu'une décharge initiée dans un cumulonimbus atteint un autre nuage voisin de charge opposée (Figure 6.2 ③).
- La décharge au sol : Bien que moins fréquente, elle est particulièrement notable. Elle s'amorce généralement dans la partie inférieure du nuage, où persiste une petite charge positive (Figure 6.2 ④). Cependant, elle peut aussi provenir de la zone médiane à charge négative ou, plus rarement, de la région supérieure à charge positive.

Cette diversité de décharges illustre la complexité des phénomènes électriques se produisant lors des orages.

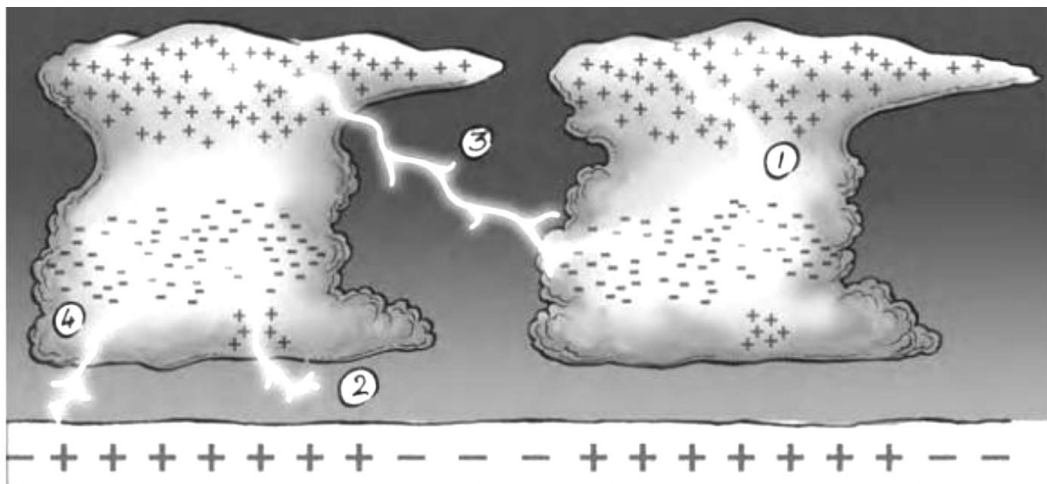


Figure 1.6. Divers types de décharges de foudre : ① décharge intra nuage ; ② décharge dans l'air ; ③ décharge internuage ; ④ décharge au sol [5].

#### 1.6.2. 1. Classification des décharges au sol

#### I.6.3.2 Le coup de foudre descendant

Une décharge au sol est souvent précédée par une décharge préliminaire à l'intérieur du nuage orageux. Selon Karl Berger, quatre types de décharges au sol sont distingués (Figure 1.3), en fonction de la polarité de la charge électrique du nuage d'où provient ou vers lequel converge une pré-décharge pilote, peu lumineuse (invisible à l'œil nu), également appelée précurseur, traceur ou leader. En terrain plat, le traceur négatif descendant est le plus fréquent (90 % dans

les régions tempérées), tandis que le traceur positif descendant (observé lors d'orages hivernaux) est moins fréquent, généralement associé à des structures élevées et effilées. Il peut également apparaître occasionnellement un traceur positif ascendant ou, plus rarement, un traceur négatif ascendant.

Le coup de foudre, caractérisé par son arborescence descendant vers le bas, est le plus courant. Il comporte une phase initiale où une pré-décharge, appelée traceur, se propage par bonds successifs du nuage vers le sol. À l'extrémité de ce traceur, le champ électrique devient extrêmement intense, augmentant localement de manière significative l'intensité du champ électrique au niveau du sol.

Autrement dit, dans le cas de la foudre descendante, une décharge électrique partielle se forme d'abord à l'intérieur du nuage et progresse par à-coups vers la surface terrestre, créant une zone de champ électrique très intense à son extrémité. Cette concentration du champ au sol favorise ensuite le déclenchement de la décharge principale, établissant ainsi une connexion entre le nuage et le sol.

Dès que la pointe du traceur approche du sol, des pré-décharges ascendantes vont se développer à partir du sol. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité.

### **I.6.3.3. Le coup de foudre ascendant**

Le coup de foudre ascendant se caractérise par une arborescence ouverte vers le haut. Ce type de foudre se produit notamment dans le cas de structures élevées comme les pylônes de grande hauteur ou les tours. L'effet couronne, causé par la concentration importante du champ électrique au sommet de ces structures, peut créer une décharge électrique partielle partant du sol et se développant suffisamment loin pour atteindre le nuage chargé. Dès qu'un canal conducteur reliant le sol au nuage est ainsi formé, les charges électriques accumulées dans le nuage vont pouvoir s'écouler vers la terre.

### **I.6.3.4 Le coup de foudre positif**

Le bas de nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant une durée de 0.1 à 0.2 s. La durée d'impulsion varie entre 20 $\mu$ s à 50 $\mu$ s et l'amplitude du courant des coups positifs est généralement supérieure à celle des coups de foudres négatifs.

### I.6.3.5 Le coup de foudre négatif

Le coup de foudre négatif Le bas de nuage est charge négativement. Les décharges sont multiples et variées. Une première décharge partielle de durée de front de  $10\mu\text{s}$  à  $15\mu\text{s}$ , succède des décharges d'attaque plus raides et de descente plus douce.

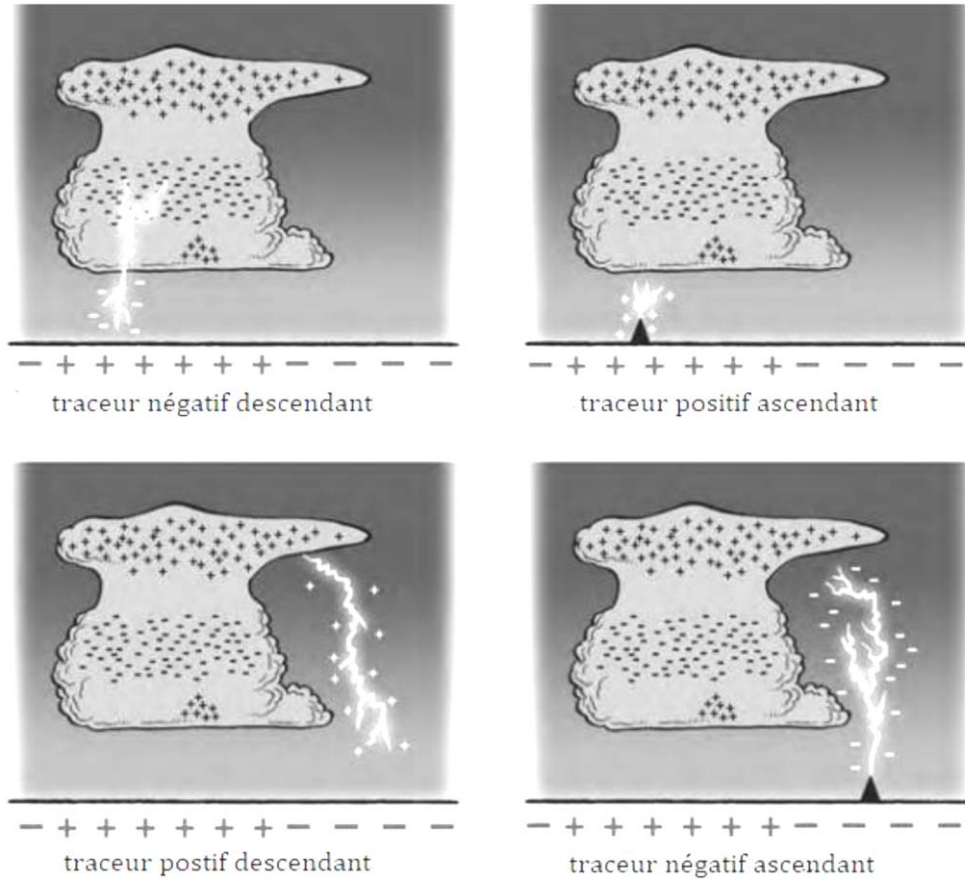


Figure I.7. Classification des décharges au sol

### I.6.4. Mécanisme du coup de foudre

Les chercheurs ont montré que 85 à 90 % des éclairs sont négatifs et que seuls 10 à 15 % des éclairs sont descendants. Le déroulement d'un coup de foudre négatif implique une série d'impulsions, représentée schématiquement sur la figure (I.8). La première impulsion commence par une série de pré-décharges, qui tracent un chemin préférentiel (précurseur par pas) du nuage vers le sol sous la forme d'un canal ionisé. Une fois ce chemin établi entre le nuage et le sol, la décharge principale se produit du sol vers le nuage (arc en retour). Cette première impulsion est généralement la plus longue et fournit plus d'énergie au sol que les suivantes . [6].

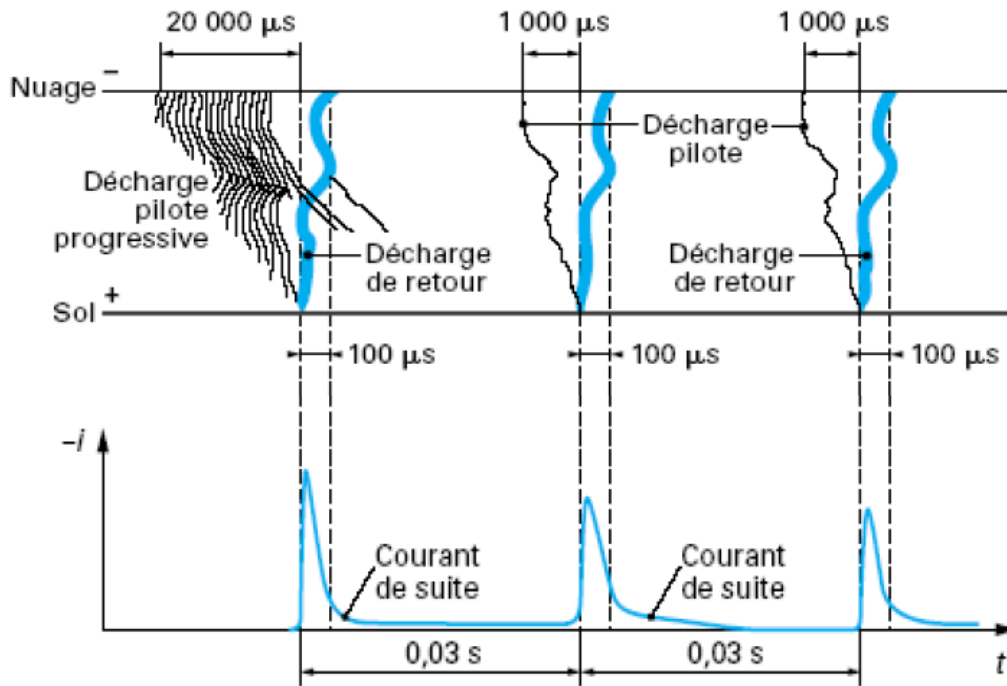


Figure I.8. Mécanisme du coup de foudre

### I.6.5. Schéma électrique équivalent

Le schéma équivalent pour les décharges est illustré à la Figure (I.9). Les valeurs de la résistance ( $R$ ) et de l'inductance ( $L$ ) varient en fonction du chemin suivi par le courant de décharge ( $i$ ). La différence de potentiel correspondante, exprimée par la formule  $u = R \cdot i + L \cdot (di/dt)$ , n'est donc pas une caractéristique intrinsèque du coup de foudre, qui ne peut être défini que par son courant, c'est-à-dire par une surintensité.

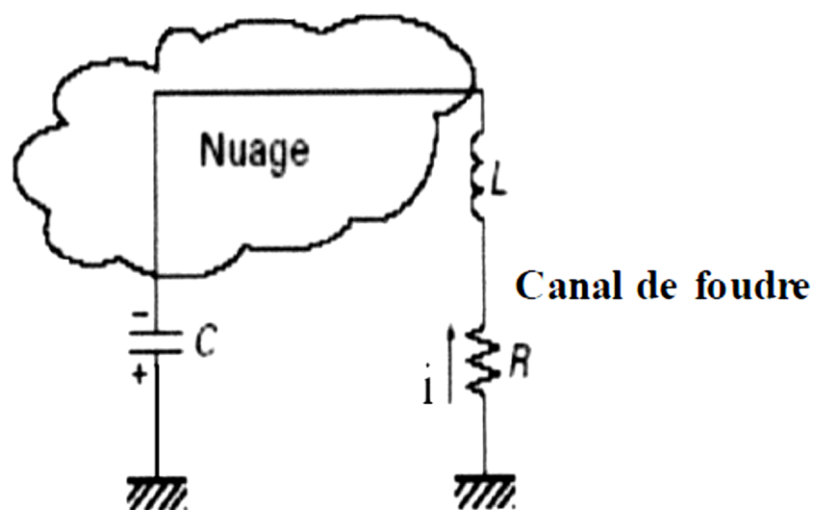


Figure I.9. Surtensions provoquées par la foudre

Dans tous les circuits électriques qui se trouvent près du canal de la foudre, une tension sera créée en fonction du courant de foudre et de l'inductance mutuelle entre le circuit et le canal de la foudre. La foudre a un impact direct sur les réseaux d'énergie électrique, que ce soit dans les conducteurs, les fils de garde ou les pylônes des lignes. Examinons les trois cas suivant :

**a) Impact direct dans le conducteur d'une ligne aérienne**

Le courant de foudre se divise en quatre et se propage comme onde de courant dans la ligne avec une vitesse proche de celle de la lumière soit 300000Km/s. D'après la théorie des lignes, l'onde de courant est combinée avec une onde de tension de même forme, avec une valeur de crête  $\hat{u}$  qui correspond au produit d'un quart de courant de foudre fois l'impédance spécifique de la ligne  $Z$ .

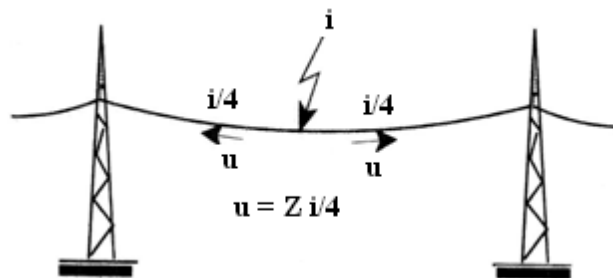


Figure I.10. Coup de foudre dans les conducteurs d'une ligne.

**II.7. Définition de la CEM**

La compatibilité électromagnétique d'un équipement ou d'un système désigne sa capacité à fonctionner correctement dans un environnement électromagnétique, sans générer de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement des autres éléments présents dans cet environnement.

**II.7.1. Acteurs de la CEM**

Les acteurs qui soulignent la CEM comprennent : la source, le couplage et la victime. Dans la figure II.1, on peut observer la position de ces acteurs dans un processus d'étude de la CEM.



Figure I .11 .Transmission des perturbations

## **I.7.2. Source**

### **I.7.2.1.Définition**

La source est tout appareil qui produit une perturbation électromagnétique. La distribution d'énergie électrique, les ondes hertziennes, les décharges électrostatiques et la foudre sont parmi les principales causes de perturbations. [7].

### **I.7.2.2.Réseaux électriques comme source**

Les champs électrique et magnétique sont produits respectivement par la tension et le courant. En raison de la basse fréquence du transit de l'énergie impliquée, les champs électrique et magnétique sont donc distincts ; il s'agit des champs proches où le calcul se fait de manière distincte.

Les champs électriques et magnétiques à haute fréquence sont créés par des coupures brèves d'énergie ( $dV/dt$  ou  $dI/dt$ ), ce qui est appelé champ lointain, où les champs électrique et magnétique sont étroitement liés par une onde électromagnétique.

## **1.7.3 Les modes de couplage**

En termes de CEM, on distingue principalement deux types de couplages :

- Le mode de couplage galvanique (ou par conduction) : La particularité de ce mode de couplage réside dans le fait que le signal perturbateur se propage de la source vers la victime grâce à une connexion physique. Les perturbations conduites, causées par couplage par impédance commune, sont encore différenciées dans cette catégorie. Il est possible que le signal soit une tension ou un courant.
- Le mode de couplage rayonné : Dans ce cas, la source et la victime ne sont pas liées physiquement. L'énergie est transférée par couplage capacitif, inductif ou par rayonnement. Le signal perturbateur peut être un champ électrique, un champ magnétique ou une onde électromagnétique, en fonction de la nature du couplage..

Les principaux mécanismes de couplage sont résumés dans la figure 1.6. Le comportement global des sources de rayonnement électromagnétique est étroitement lié à l'interprétation de ces trois modes de couplage. [8].

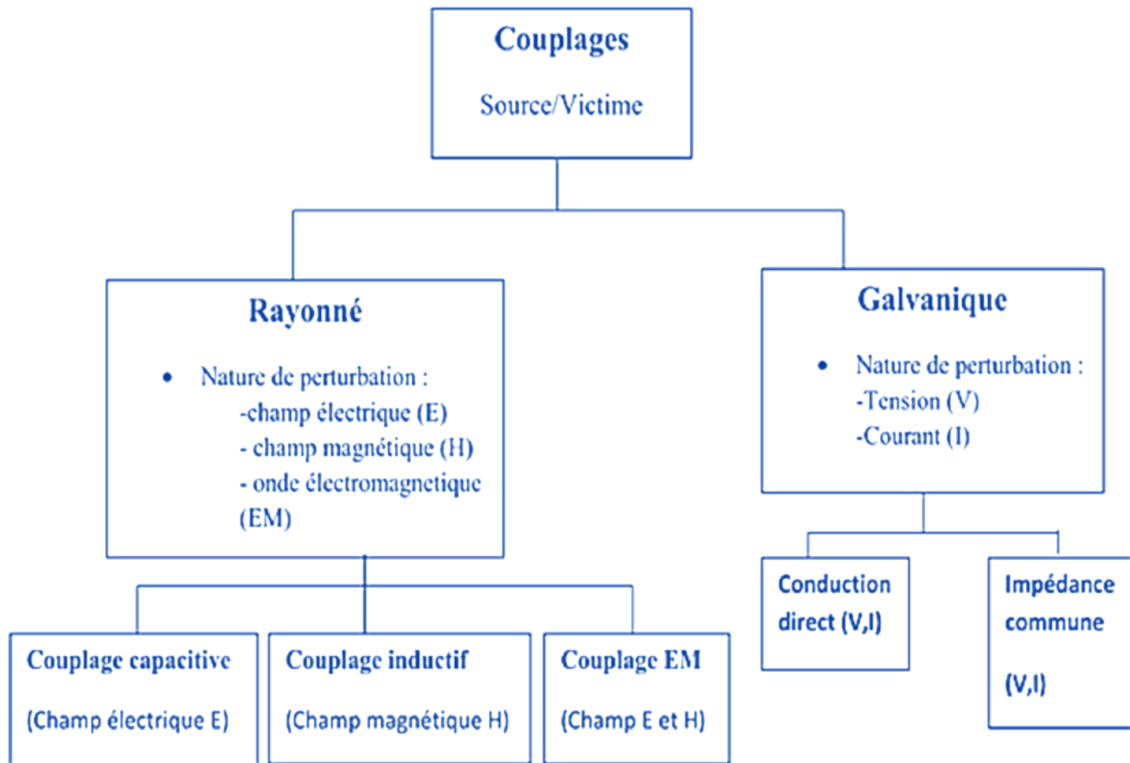


Figure I.12 Classification des modes de couplages

### I.8. Conclusion

L'exposition aux champs électromagnétiques peut provoquer une surintensité, une surtension, ou les deux simultanément dans un dispositif électrique. Ces champs peuvent également entraîner des maladies chez les êtres vivants. Le calcul des champs électromagnétiques est donc essentiel pour évaluer les perturbations sur les dispositifs électriques et leurs effets sur les organismes vivants. Nous consacrerons le deuxième chapitre à la modélisation des lignes .



## **CHAPITRE II**

### **Généralisés sur les réseaux électriques**

## II.1. Introduction

La composante principale des grands réseaux de transport d'électricité est la ligne à haute tension, qui transporte l'électricité de la centrale électrique jusqu'au consommateur. Ces lignes peuvent être aériennes, souterraines ou sous-marines, bien que les professionnels réservent généralement le terme "ligne à haute tension" aux liaisons aériennes.

Les lignes aériennes à haute tension sont constituées de câbles conducteurs, souvent en alliage d'aluminium, suspendus à des supports tels que des pylônes, des poteaux ou des structures. Ces supports peuvent être fabriqués en bois, en acier, en béton, en aluminium, ou parfois en plastique renforcé.

Les lignes à haute tension forment le cœur des réseaux de transport d'électricité, qu'elles soient aériennes, souterraines ou sous-marines, bien que ce terme soit généralement utilisé par les professionnels pour désigner les liaisons aériennes. Elles transportent l'électricité sur de longues distances depuis les centrales électriques et permettent l'interconnexion des réseaux électriques[2].

## II.2. Rôle des réseaux électriques

L'électricité, générée à partir de diverses sources d'énergie primaires telles que l'énergie hydraulique, les énergies fossiles, l'énergie solaire et l'énergie géothermique, est acheminée des centrales de production aux consommateurs via des réseaux électriques.

Un réseau électrique est un réseau de structures qui permettent de transporter de l'énergie électrique des sources de production vers les utilisateurs. Sa structure est composée de lignes électriques utilisées à divers niveaux de tension, reliées entre elles par des postes électriques. Les transformateurs électriques sont utilisés pour répartir l'électricité et la faire passer d'une tension à l'autre. Il a également pour responsabilité de garantir une gestion dynamique de l'ensemble de la production, du transport et de la consommation, en mettant en place des réglages visant à garantir la stabilité de l'ensemble. [3].

Le « système réseau électrique » met donc en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique [3].

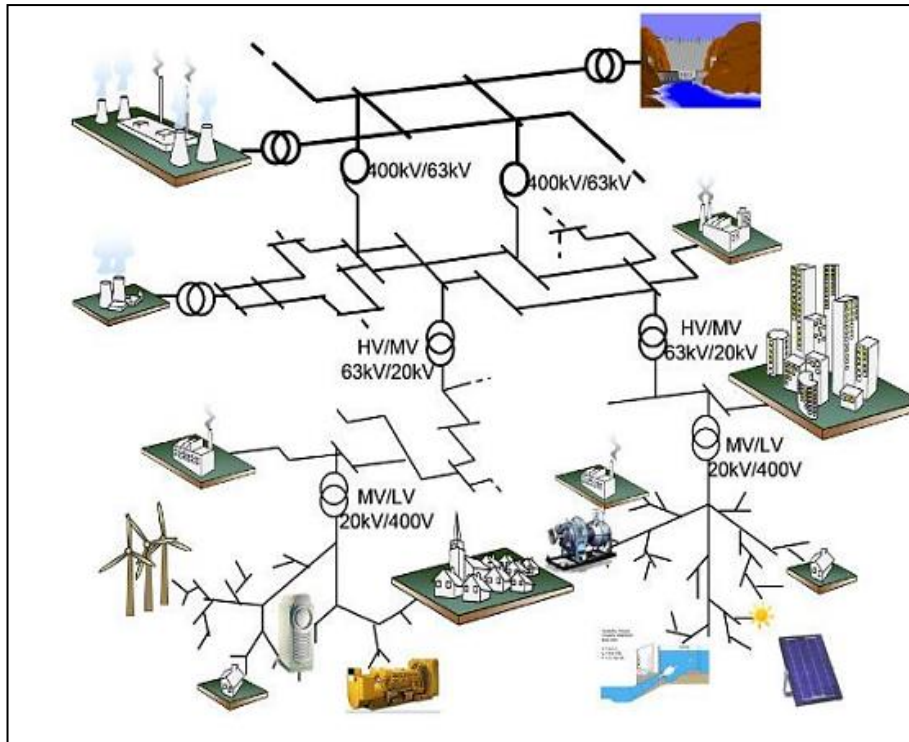


Figure II.1. Structure d'un réseau électrique.

### II.3. Architecture de réseaux haute tension

Le réseau électrique a pour objectif de connecter les utilisateurs et les producteurs d'électricité, dans le but de garantir la sécurité d'approvisionnement, d'optimiser les investissements et de réduire les coûts de fonctionnement [4].

### II.4. Les niveaux de tension des réseaux électriques

#### II.4.1. Tensions normalisées

Les réseaux électriques sont classés selon le niveau de tension (tension composée) donné par la norme française UTE C 18-510 en cinq domaines qui sont illustré dans le tableau ci-dessous

Tableau II.1. Tensions normalisées

	TBT	BTA	BTB	HTA	HTB
Alternative	$U < 50$	$50 < U < 500$	$500 < U < 1000$	$1000 < U < 50000$	$U > 50000$
Continue	$U < 120$	$120 < U < 750$	$750 < U < 1500$	$1500 < U < 75000$	$U > 75000$

### II.4.2. Tension et puissance du réseau électrique

L'objectif des réseaux est de transmettre l'énergie de la centrale génératrice à l'appareil d'utilisation. Cependant, les conditions de ce transit diffèrent considérablement d'un bout à l'autre de la chaîne des installations requises. Les puissances en jeu et les conséquences de chaque incident sont différentes, ce qui permet de définir des fonctions particulières.

La recherche de la tension à adopter pour un réseau est fortement conditionnée par ce qui préexiste, et qui a fait l'objet de normalisation. En effet, à l'intérieur d'une très large gamme qu'il faut faire porter la décision, gamme qui va d'environ 125 V à environ 730 kV. L'utilisation d'une gamme aussi large est liée à l'existence d'un vaste domaine de puissances : environ 10 W pour le rasoir électrique à environ 2 milliards de watts pour les centrales électriques les plus puissantes. Les raisons du choix sont essentiellement économiques, car le coût annuel d'exploitation est influencé par la tension du réseau. On peut le constater dans le tableau suivant où figure les puissances que peuvent transiter les lignes.

**Tableau II.2.** Les puissances transitées dans les lignes électriques en fonction de la tension du réseau [4]

Tension (kV)	Puissance (MW)	Distance (km)
63	20	80
150	80	100
225	200	200
400	700	400
	1200	1000
750	2500	2000
	10000	3000

### II.5. Différents types des réseaux électriques

#### II.5.1. Le réseau de transport THT

En général, c'est le réseau qui assure le transport de l'énergie des centres de production éloignés vers les zones de consommation. Les centrales de grande puissance (> 300 MW) sont normalement connectées au réseau à haute tension (THT).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [5]



**Figure II. 2:** Réseau HTA aérienne.

### II.5.2. Le réseau de transport Haute tension

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.

### II.5.3. Le réseau de répartition moyenne tension

Les utilisateurs peuvent être regroupés de manière dense, comme dans les villes, ou séparés par des distances plus ou moins importantes, comme dans les zones rurales. Ils sont alimentés par un réseau de distribution connecté à un poste de répartition qui reçoit l'énergie en provenance de centrales distantes via le réseau de transport.

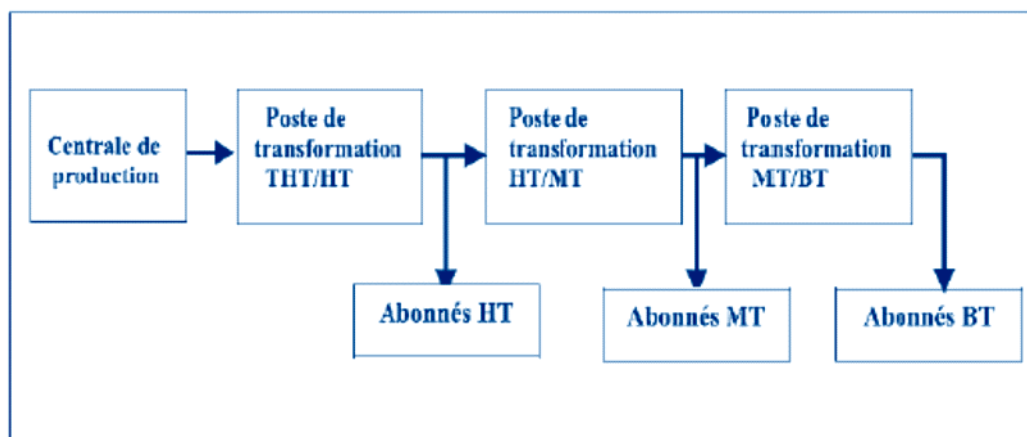
Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements. [6]

### II.5.4. Le réseau de distribution basse tension

Le réseau auquel nous sommes habituellement confrontés est celui de la tension 220/380 V en Algérie. Nous le retrouvons dans nos foyers à travers les composants tels que le compteur, le disjoncteur et les fusibles (micro-disjoncteurs).

Ce réseau a pour but de transporter l'électricité du réseau de distribution moyenne tension (MT) vers les points de faible consommation dans les espaces publics, avec un accès aux abonnés basse tension (BT). Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. [7].

L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final [4].



**Figure II.3.** Schéma d'un réseau électrique.

## II.4. Différents types de structures des réseaux

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures [6] :

### II.4.1. Structure maillée

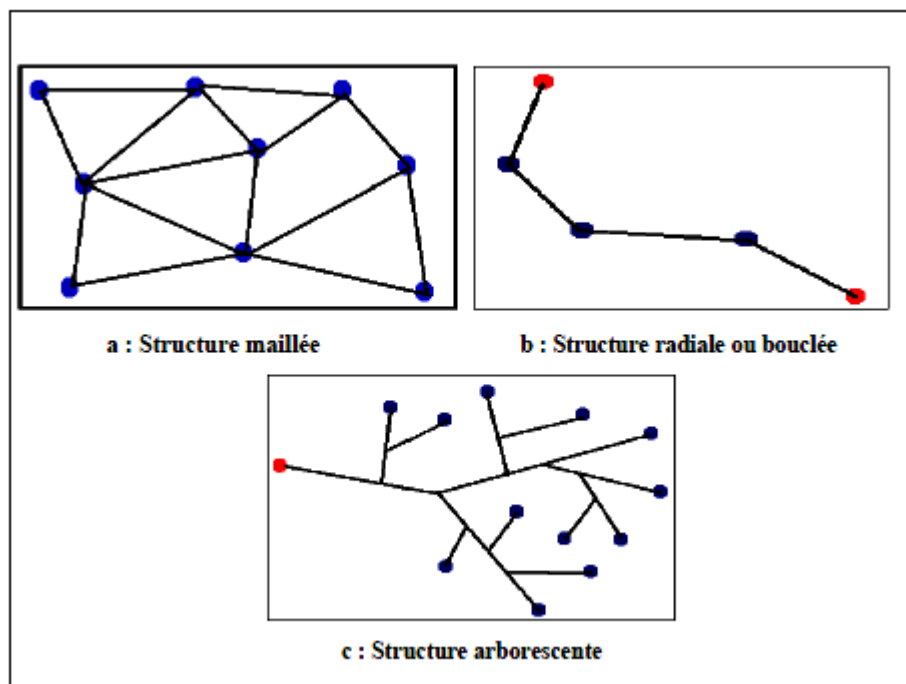
Il existe de nombreuses lignes électriques reliant les postes électriques entre eux (Figure : II.4.a), ce qui garantit une grande sécurité d'alimentation.

### II.4.2. Structure radiale ou bouclée

La stabilité de l'alimentation, même si elle est moins élevée que celle de la structure maillée, demeure élevée (les postes rouges dans la Figure II.4.b illustrent les apports énergétiques).

### II.4.3. Structure arborescente

La sécurité de l'alimentation est insuffisante car un problème sur la ligne ou sur le poste rouge peut couper tous les clients en aval, comme illustré dans la Figure I.3c, (les postes rouges représentent les flux d'énergie).



**Figure.II.4** Schéma de différents types des réseaux

## II.2. Définition des lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. [1]



**Figure II.5** Photo des lignes aériennes [12]

#### **II.4. Utilisation des lignes selon le type de réseau électrique**

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

- Puissance active à transporter
- Distance de transport
- Coût
- Esthétique,
- encombrement et facilité d'installation

Nous distinguons quatre types de lignes :

##### **II.4.1. Lignes de distribution à basse tension (TBT) [13]**

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.

##### **II.4.2. Lignes de distribution à moyenne tension (TMT)**

Il s'agit de lignes reliant les clients MT aux postes de transformation HT/MT de la société de distribution électrique. Ils ont une tension allant de 1 kV à 50 kV.

##### **II.4.3. Lignes de transport à haute tension (THT)**

L'électricité est fournie sur des distances plus courtes par les lignes hautes tension, qui relient les régions et les agglomérations entre elles à des tensions allant de 50 à 150 kV.

#### II.4.4. Lignes de transport à très haute tension (TTHT)

Les lignes THT offrent la possibilité de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances sans subir de pertes significatives. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux et de nourrir directement certaines grandes zones urbaines. Elles opèrent à des tensions pouvant atteindre 765 kV.

#### II.5. Composantes d'une ligne

##### II.5.1. Supports

Ces dispositifs ont pour objectif de supporter le poids des conducteurs et des charges extérieures (vent, neige) tout en maintenant les conducteurs à une distance et à des hauteurs requises par des normes variées en fonction du poids et de la tension de la ligne. Ces supports assurent le maintien des conducteurs soit en nappe horizontale (drapeau) soit en triangle.

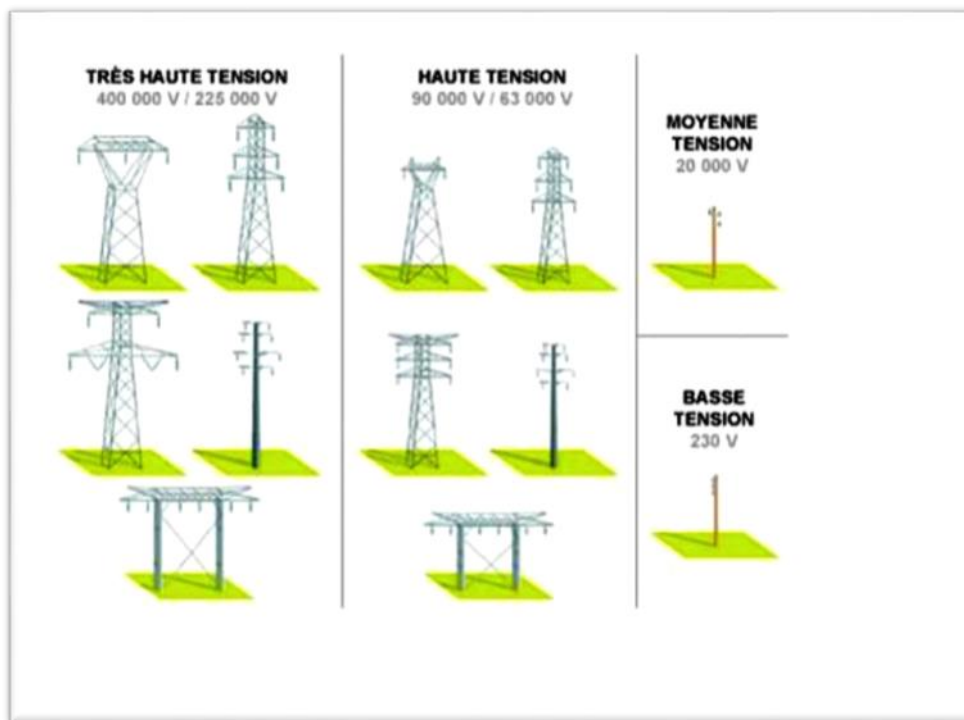


Figure II.6. Types de pylônes

##### II.5.2. Conducteurs

Les conducteurs sont des câbles fabriqués à partir de brins toronnés de cuivre ou d'aluminium, ou d'alliages spécifiques d'aluminium résistants mécaniquement. Ils présentent une surface extérieure presque cylindrique, avec des rainures hélicoïdales. Ces avantages incluent une diminution du diamètre à section utile égale et une diminution du coefficient de traînée.

L'aluminium est souvent associé à l'acier sous forme de câbles aluminium-acier. On emploie également des câbles constitués par des brins ayant chacun une âme d'acier recouverte d'une couche conductrice de cuivre ou d'aluminium [6]

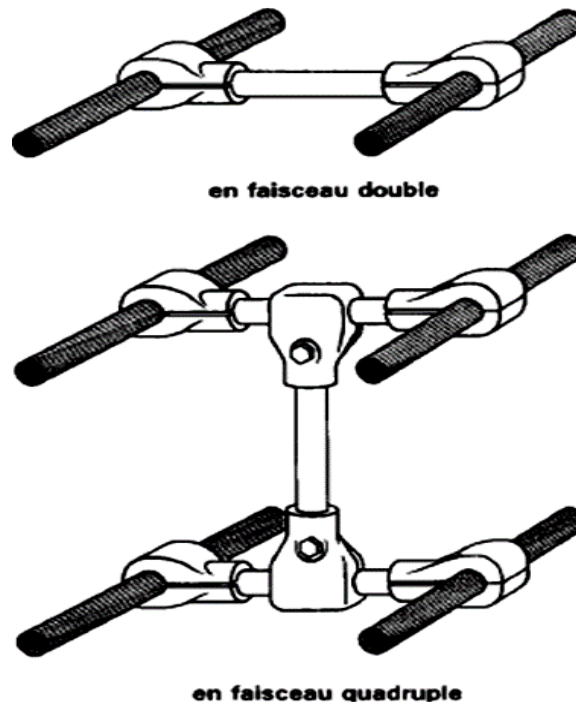


Figure II.7. Ligne triphasée

Le conducteur d'une phase peut être réalisé en faisceau double, triple ou quadruple de conducteurs maintenus à distance par des entretoises ; comme indiqué sur la figure (II.7).

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige.

Les isolateurs ont deux fonctions principales [11] :

- Ils empêchent le courant électrique qui circule dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes.
- Ils accrochent les conducteurs de phase au pylône



**Figure II.8.** Chaine d'isolateurs.

### II.5.3. Câble de garde

.Les câbles de garde ne sont pas capables de transporter le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs, ils sont plus tendus que ceux-ci afin de garantir une protection efficace contre la foudre. Les câbles de garde comportent toujours une section importante d'acier et, autour de l'âme d'acier, une couche ou exceptionnellement deux couches de fils d'alimentation électrique [13].

Deux types de câbles de garde sont utilisés :

- des câbles almélec-acier normaux ;
- des câbles almélec-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication.

### II.6. Modélisation des lignes HT

Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal.

Une ligne de transmission par phase peut être considérée comme un réseau à deux ports, dans lequel la tension d'émission  $V_s$  et le courant  $I_s$  (source) sont liés à la tension de réception  $V_r$  et le courant  $I_r$  par le biais des constantes A, B, C, D tel que :

$$V_s = AV_r + BI_r \text{ (V)} \quad (\text{II.1})$$

$$I_s = CV_r + DI_r \text{ (A)} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

A, B, C et D sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission R, L, C et G. Les paramètres ABCD sont, en général, des nombres complexes. A et D sont sans dimensions. B a l'unité en Ohm et C a l'unité en Siemens. Dans ce qui suit, nous allons identifier les paramètres A, B, C et D. Pour éviter la confusion entre l'impédance série totale et l'impédance série par unité de longueur, la notation suivante est employée :

$z = \gamma + j \omega \cdot L$  ( $\Omega m$ ), Impédance série par unité de longueur ;

$y = G + j \omega \cdot C$  ( $S m$ ), admittance shunt par unité de longueur ;

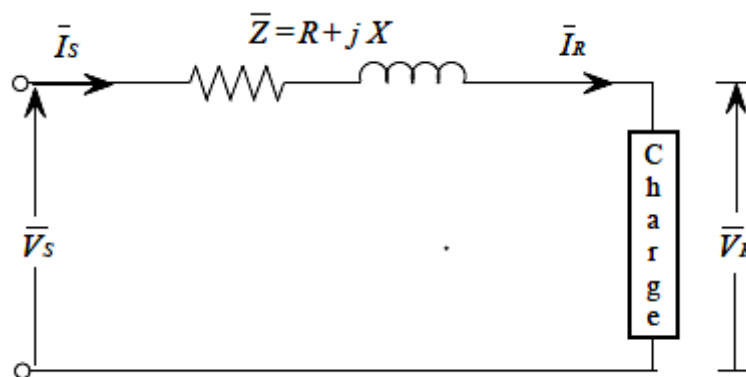
$Z = zl$  ( $\Omega$ ) impédance série totale ;

$Y = yl$  (S) admittance shunt totale;

$l$  (m) longueur de la ligne.

### II.6.1. Ligne de transmission courte

La capacité peut être ignorée sans beaucoup d'erreur si les lignes sont de moins de 80 kilomètres de long ou si le niveau de tension ne dépasse pas 66 kV. Le modèle de ligne courte par phase est illustré par la figure II.9



**Figure II.9.** Schéma de modèle d'une ligne/

C'est un circuit série simple. Le rapport entre les courants et les tensions de chaque extrémité de la ligne (entre la source et la charge) peut être écrit comme

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

En comparant (2.1) et (2.2), les paramètres ABCD pour une ligne courte sont

A= D =1 sans unité

B =Z (Ω)          C= 0 (S)

### II.6.2. Ligne de transmission moyenne

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit : A partir de la (Figure III.9), le courant dans l'impédance série désigné par  $I_l$ , est

$$I_l = I_r + \frac{Y}{2} V_r \quad (\text{II.3})$$

La tension à la source est exprimée comme :

$$V_s = V_r + Z I_l \quad (\text{II.4})$$

Des équations (II.3) et (II.4), on trouve,

$$V_s = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_r + Z I_r \quad (\text{II.5})$$

Le courant à la source est,

$$I_s = I_r + V_r \frac{Y}{2} + V_s \frac{Y}{2} \quad (\text{II.6})$$

Des équations (II.3), (II.5) et (II.6), on trouve,

$$I_s = I_r + \frac{V_r Y}{2} + \left[\left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_r + Z I_r\right] \frac{Y}{2} \quad (\text{II.7})$$

$$= \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) I_r$$

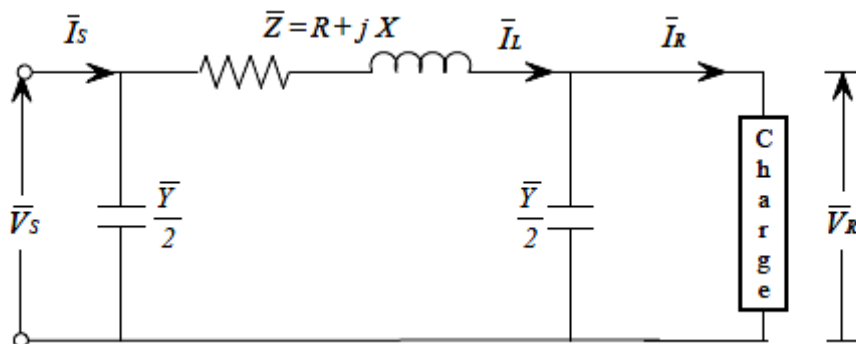


Figure II.10 Ligne de longueur moyenne, représentation en  $\pi$

Les équations (II.5) et (II.7) peuvent être écrites sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \frac{YZ}{2}) & Z \\ Y(1 + \frac{YZ}{4}) & (1 + \frac{YZ}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \tag{II.8}$$

$$A=D= 1+\frac{YZ}{2} \text{ sans unité} \quad B=Z (\Omega) \quad C=Y (1+\frac{YZ}{4}) (S)$$

### II.6.3. Ligne de transmission longue

Pour les longueurs de lignes courtes et moyennes, les modèles ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km, pour des solutions plus précises, les paramètres doivent être donnés comme une distribution uniformément répartie le long de la longueur. Dans ce cas, les tensions et les courants varient d'un point à l'autre sur la ligne. La (Figure II.5) illustre un schéma unifilaire en  $\pi$  d'une ligne par unité de longueur [8]

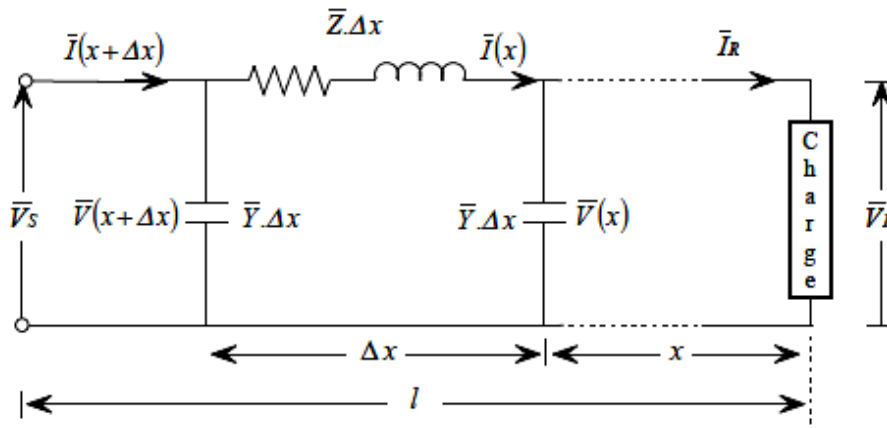


Figure II.11 Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur.

Les expressions de la tension et le courant en un point  $x$  de la ligne sont :

$$\begin{cases} V(x) = \cosh(yx)V_r + Zc \sinh(yx)I_r \\ I(x) = \sinh(yx)V_r + \cosh(yx)I_r \end{cases} \tag{II.8}$$

Cependant, quand  $x = l$ , l'expression (II.8) permet de trouver les grandeurs courant et tension à la source, avec  $v_s = (l)$  et  $I_s = (l)$  ; le résultat est :

$$\begin{cases} V(l) = \cosh(y l) V_r + Z_c \sinh(y l) I_r \\ I(l) = \frac{1}{Z_c} \sinh(y l) V_r + \cosh(y l) I_r \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Cependant, les constantes ABCD sont

$$A = D = \cosh(y l), \quad B = Z_c \sinh(y l), \quad C = \frac{1}{Z_c} \sinh(y l)$$

C'est possible maintenant de trouver le modèle équivalent en  $\pi$  très précis pour une ligne de transmission longue. D'une manière similaire aux expressions obtenues pour modèle équivalent en  $\pi$ , nous avons

$$A = D = 1 + \frac{Y' Z'}{2} \quad \text{Sans unité}$$

$$B = Z' \quad (\Omega)$$

$$C = Y' \left(1 + \frac{Y' Z'}{4}\right) \quad (\text{S})$$

$$\begin{cases} V_s = \left(1 + \frac{Y' Z'}{2}\right) V_r + Z' I_r \\ I_s = Y' \left(1 + \frac{Y' Z'}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{Y' Z'}{2}\right) I_r \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

## II.7 .Conclusion

Le réseau électrique est un système complexe comprenant la production, la transmission, la distribution et la consommation d'énergie électrique. Ce chapitre a été consacré à un rappel sur les généralités des lignes électriques. Les lignes aériennes sont composées de pylônes (fondations, supports, de câble conducteurs et d'isolateurs) et des champs électromagnétiques au voisinage des lignes.

## **Chapitre III**

Calcul de champs électromagnétique dans les lignes de haute tension

### **III.1 Introduction**

Les lignes électriques aériennes à haute tension créent des champs électromagnétiques. Ces champs sont générés par le courant électrique qui circule à travers les lignes et peuvent avoir un effet sur l'environnement et la santé humaine.

L'objectif de ce chapitre est le calcul des champs créés par les lignes à haute tension ainsi que l'étude de l'influence de l'effet couronne et la compatibilité ;

### **III.2- Modélisation analytique des champs électromagnétiques 50 Hz**

Les modèles mathématiques actuels pour l'analyse des champs électromagnétiques près des lignes haute tension se basent sur deux principes fondamentaux ; les équations de Maxwell pour décrire les phénomènes électromagnétiques et l'équation de Laplace pour caractériser la distribution du potentiel électrique.

Dans la pratique, ces modèles présentent des limitations pour le calcul des champs électromagnétiques autour des lignes électriques dans la précision ; d'où la nécessité d'un modèle mathématique plus simple, offrant des résultats proches des valeurs réelles.

Bien que les champs électriques et magnétiques générés par les lignes électriques soient couplés, dans le régime quasi statique et en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices, ces champs peuvent être calculés indépendamment. Ainsi, en raison des variations lentes des champs électromagnétiques basse fréquence, les équations de Maxwell se transforment en équations électrostatiques et magnétostatiques [14].

Le calcul des champs électromagnétiques près des lignes haute tension pose un défi particulier en raison des dimensions du système énergétique.

Pour relever ce défi, une double approche est adoptée, Méthodes numériques qui sont privilégiées pour traiter la complexité globale du système. Ces techniques permettent de modéliser les interactions à grande échelle tout en tenant compte des détails géométriques fins et solutions analytiques qui jouent un rôle complémentaire essentiel, elles définissent les conditions aux limites pour les calculs numériques.

L'analyse des champs électromagnétiques générés par les équipements électriques s'appuie de plus en plus sur des méthodes numériques. Ces approches reposent généralement sur la

discrétisation des équations intégrales dérivées de la loi de Biot et Savart. Parmi les techniques numériques les plus couramment utilisées, on peut citer :

- La méthode de simulation de charge (CSM)
- La méthode des éléments finis (FEM)
- La méthode des différences finies (FD)
- La méthode des éléments de frontière (BEM)
- La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)

Ces méthodes offrent des solutions efficaces pour résoudre des problèmes complexes liés aux champs électromagnétiques dans diverses configurations pratiques. Chacune de ces techniques présente des avantages spécifiques selon la nature du problème à résoudre, permettant ainsi une analyse précise et adaptée des champs électromagnétiques dans différents contextes industriels et scientifiques.

### **III.2.1- Equations de Maxwell**

La propagation des ondes électromagnétiques dans un espace vide, caractérisé par son uniformité (homogénéité) et son indépendance directionnelle (isotropie), est décrite par les équations de Maxwell:

$$\operatorname{rot}E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{III.1})$$

$$\operatorname{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

$$\operatorname{div}D = P_v \quad (\text{III.3})$$

$$\operatorname{div}B = 0 \quad (\text{III.4})$$

$E$  : vecteur champ électrique.

$B$  : vecteur induction magnétique.

$H$  : vecteur champ magnétique.

$J$  : vecteur densité de courant.

$D$  : vecteur induction électrique.

$P$  : densité volumique de charge.

A partir de l'équation 3.4 on peut déduire qu'il existe un potentiel vecteur magnétique  $A$  tel que

$$B = \text{rot}A \tag{III.5}$$

Le champ magnétique H s'écrit alors :

$$H = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}A \tag{III.6}$$

De même, le champ électrique E s'exprime en fonction du potentiel vecteur magnétique A et du potentiel scalaire électrique  $\phi$ .

$$E = -\text{grad}\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \tag{III.7}$$

Ainsi, connaissant A et  $\phi$ , on peut calculer le champ électrique et magnétique en tout point de l'espace

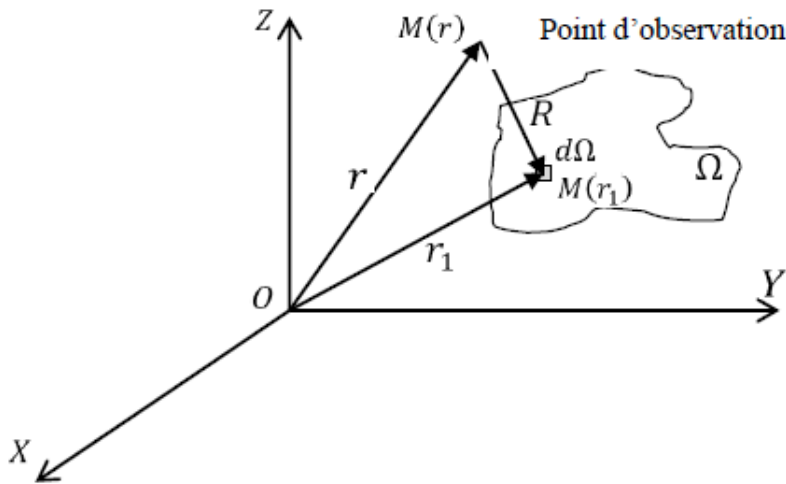
### III.2.2. Détermination du vecteur potentiel magnétique

En utilisant la jauge de Lorentz

$$\text{div}A = -\epsilon_0\mu_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{III.8}$$

Et les équations de Maxwell ensemble projeté dans le plan fréquentiel, on obtient l'équation différentielle régissant le potentiel vecteur magnétique A.

$$\Delta A + \mu_0\epsilon_0\omega^2 A = -\mu_0 J. \tag{III.9}$$



**Figure III.1.** Disposition du calcul du champ électromagnétique.

D'après la figure III .1, la solution en un point  $M(r)$ , de cette équation est sous forme :

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} J(r_1) \frac{e^{-j\beta R}}{R} d\Omega \quad (\text{III.10})$$

Les différents termes de l'équation sont définis comme suit :

$\Omega$  représente le volume dans lequel circule le courant  $J$ .

$R = (r - r_1)$  est la distance entre deux points spécifiques :

- Le point d'observation  $M(r)$
- Le point  $M(r_1)$  où circule le courant (illustré dans la figure III.1),  $\beta = 2\pi/\lambda$  est le nombre d'onde, où :
- $\lambda = c/f$  est la longueur d'onde,  $c$  c'est la vitesse de la lumière  $f$  est la fréquence d'excitation

Le potentiel scalaire électrique  $\phi$  est alors égale a :

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \rho \frac{e^{-j\beta R}}{R} dS \quad (\text{III.11})$$

Le terme  $e^{-j\beta R}$  représente l'effet de propagation de l'onde électromagnétique. Lors du calcul en champ proche, ce terme est souvent pris égal à 1. En effet, en champ proche, la distance  $R$  entre le point d'observation et le point où circule le courant est négligeable comparée à la longueur d'onde ( $R \ll \lambda$ ).

### III.3- Calcul analytique du champ électrique rayonné par une ligne Haute tension

#### III.3.1- Grandeurs de l'électrostatique

Dans ce chapitre, nous allons présenter de manière démonstrative les grandeurs essentielles de l'électrostatique. Pour plus amples informations, il existe une abondante littérature [15].

##### III.3.1.1- Force électrique

Il a été établi expérimentalement par Coulomb qu'une particule témoin subit une force d'intensité  $F$  proportionnelle à sa charge  $q$  lorsqu'elle est placée à proximité d'une ou plusieurs charges électriques  $Q_i$ , dans un milieu de permittivité  $\epsilon$  (permittivité du champ électrique), exprimée par :

$$\vec{F} = q \left( \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_I \frac{Q_i}{\|\vec{r} - \vec{r}_i\|} (\vec{r} - \vec{r}_i) \right) \quad (\text{III.12})$$

Où  $r_i \vec{r}$  est le vecteur position d'une charge témoin .

### III.3.1.2. Équations locale du potentiel et du champ électrique

Dans les états stationnaires, le champ électrique est appelé champ électrostatique. La notion de champ électrique a deux significations :

- **Au sens qualitatif** : C'est la région de l'espace où existe un état électrique susceptible de générer des forces.
- **Au sens quantitatif** : C'est le vecteur dont la magnitude est égale au quotient de la force exercée sur une charge par la valeur de cette charge. Ce rapport est invariant et la direction du vecteur est celle de la force exercée [3].

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} \quad [\text{V /m}] \quad (\text{III.13})$$

### II.3.1.3. Les équations locales du champ électrique

#### a. Rotationnel

En régime stationnaire, l'équation de Maxwell- Faraday s'écrit : Si on prend le rotationnel de l'expression  $\vec{E} = -\overrightarrow{grad} v$  , et sachant que le rotationnel d'un gradient est toujours nul, on obtient l'équation locale  $rot \vec{E} = \vec{0}$  vérifiée en chaque point. Cette relation est valable pour une distribution quelconque de charges et on a :

$$rot \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{III.14})$$

Le champ électrique est donc un champ à rotationnel nul. Si on calcule le flux du vecteur  $r o$  , à travers une surface (S), s'appuyant sur une courbe (C) fermée quelconque on a :

$$\iint_S rot \vec{E} \cdot \vec{dS} \quad (\text{III.15})$$

Or d'après le théorème de stockes :

$$\iint_S rot \vec{E} \cdot \vec{dS} = \oint \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (\text{III.16})$$

On en déduit que :

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\text{III.17})$$

La circulation du vecteur E le long d'un circuit fermé est nulle.

**b. La divergence**

Si on applique le théorème de Green- Ostrogradski au champ électrique :

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \text{div } \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (\text{III.18})$$

Et sachant que, pour une distribution volumique de charges, le théorème de Gauss est:

$$\Phi = \iiint_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dv \quad (\text{III.19})$$

On obtient

$$\iiint_V \left( \text{div } \vec{E} - \frac{\rho}{\epsilon_0} \right) dv = 0 \quad (\text{III.20})$$

Cette expression est valable quel que soit le volume  $dv$ , on a donc :

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{III.21})$$

Cette expression représente la forme locale du théorème de Gauss. Elle est appelée aussi équation de Poisson pour le champ. Lorsqu'il n'y a pas de charges au point considéré,  $\text{div } \vec{E} = 0$ , le champ  $\vec{E}$  à flux conservatif

**III.4.Méthodes de calcul du champ électrique**

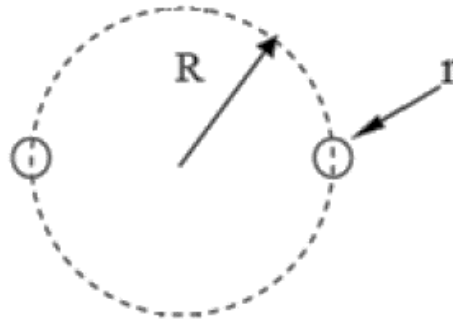
**III.4.1. Formulation mathématique du champ électrique en deux dimensions**

Le calcul du champ électrique à proximité d'une ligne de transmission d'énergie suppose l'absence de charges libres dans l'espace. Le sol est considéré comme parfaitement conducteur, car le temps nécessaire aux charges à sa surface pour se redistribuer sous l'effet du champ électrique (temps de relaxation) est très court (de l'ordre de 0.1 à 10 nanosecondes), comparé à la période de la fréquence industrielle. La permittivité de l'air est pratiquement constante indépendamment des conditions climatiques et équivaut à la permittivité du vide, notée  $\epsilon_0 = (1/36\pi \cdot 10^9) \text{ F. m}^{-1}$ .

Chaque conducteur de la ligne est décrit par une tension complexe  $V = V_r + jV_i$  et un rayon. Pour les faisceaux de conducteurs symétriques, lorsque l'on s'éloigne de la surface des conducteurs,

il est approprié de considérer le faisceau comme un conducteur unique avec un rayon équivalent :

$$r_{eq} = R \sqrt[n]{\frac{nr}{R}}$$



**Figure III.2.** Constitution d'un faisceau de deux conducteurs n=2.

Le rayon R correspond au rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs du faisceau. n représente le nombre de conducteurs élémentaires par faisceau, et r est le rayon des conducteurs élémentaires du faisceau. Cette approximation reste valide lorsque le rayon du faisceau est bien inférieur à la distance entre les phases. Pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire, on utilise généralement l'équation matricielle suivante :

$$\gamma = [C][V] \tag{III.23}$$

Les matrices  $[\gamma]$  et  $[V]$  représentent respectivement les vecteurs colonnes des charges et des potentiels des conducteurs (avec le sol à potentiel nul). Pour commencer, on calcule d'abord les coefficients de potentiel de la ligne  $[P]$ . Ces coefficients sont déterminés en appliquant la théorie des images : on remplace le sol, considéré comme un plan à potentiel nul, par les images des conducteurs par rapport à ce plan. En désignant par i, j les conducteurs situés au-dessus du sol, et par i', j' leurs images respectives.

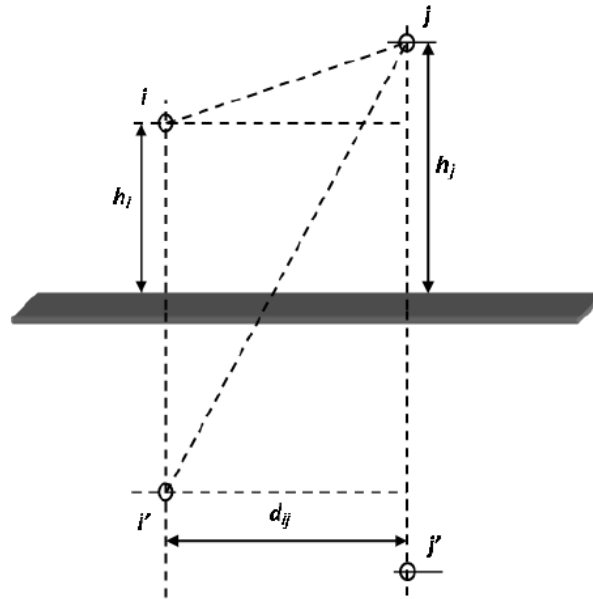


Figure III.3. Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne

▪ Coefficients de potentiel

Les charges au sol étant toujours supposées concentrées à sa surface, on calcule les coefficients de potentiel  $\lambda_{ii}$  et  $\lambda_{ij}$  par la théorie des images électriques. On a :

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[ \frac{2h_i}{R_i} \right] \dots \quad (\text{III.24})$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[ \frac{\sqrt{(h_i+h_j)^2 + d_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i-h_j)^2 + d_{ij}^2}} \right] \quad (\text{III.25})$$

Avec :  $d_{ij}$  : distance horizontale de ces deux conducteurs (distance qui sépare leurs projections sur le sol),  $h_i, h_j$  : hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol.  $\epsilon_0 = (1/36\pi \cdot 10^9) \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  étant la permittivité du vide. En pratique, la hauteur des conducteurs varie le long d'une portée, ainsi que d'une portée à l'autre.

Les hauteurs à introduire dans les calculs du champ sont les hauteurs moyennes définies par :

$h$  = hauteur d'accrochage. A l'aide des coefficients de potentiel ainsi obtenus, on forme la matrice carrée :

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \dots & \lambda_{1i} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{j1} & \dots & \lambda_{ij} & \dots & \lambda_{jn} \\ \lambda_{n1} & \dots & \lambda_{ni} & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Par inversion on en déduit enfin la matrice des capacités :

$$[c] = [\lambda]^{-1} \quad (\text{III.27})$$

La matrice [C] permet de calculer les charges linéiques portées par chaque conducteur en fonction de leurs potentiels respectifs, conformément à l'équation

$$\gamma_r = [C][V_r] \quad \gamma_i = [C][V_i] \quad (\text{III.28})$$

Dans le cas des lignes triphasées de transport d'énergie, la charge d'un conducteur, et par conséquent ses champs superficiels, ne sont pas nécessairement maximaux en même temps que la tension du conducteur lui-même. Ce phénomène est dû au déphasage entre les tensions du système triphasé.

Soit un conducteur (phase) de charge Q on va calculer le champ électrique  $E \rightarrow$  généré par ce conducteur a un point M(x,y) avec la méthode des image figure

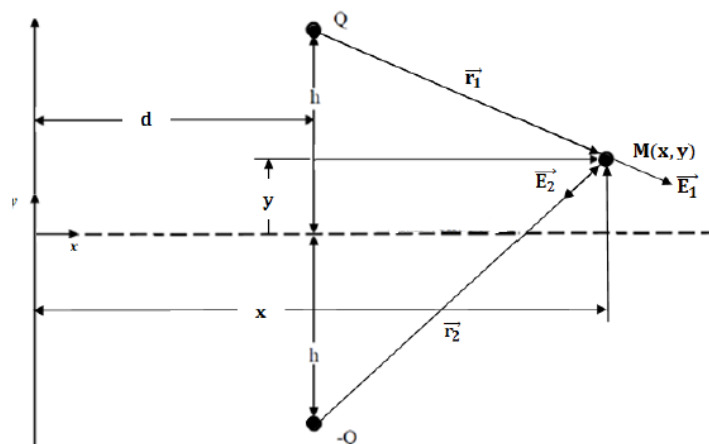


Figure III.4. Détermination le champ électrique pour une phase.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (\text{III.29})$$

$$(\text{III.30})$$

$$(\text{III.31})$$

$$\vec{E}_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_1^2} \cdot \vec{r}_1$$

$$\vec{E}_2 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_2^2} \cdot \vec{r}_2$$

$$\vec{r}_1 = (x - d)\vec{i} + (h - d)\vec{j} \tag{III.32}$$

$$\vec{r}_1 = -(x - d)\vec{i} - (h + d)\vec{j} \tag{III.33}$$

$$r_1^2 = (x - d)^2 + (h - y)^2 \tag{III.34}$$

$$r_1^2 = (x - d)^2 + (h + y)^2 \tag{III.35}$$

De même façon ce fait le calcul du champ électrique des deux phases de la ligne.

Le champ électrique d'une charge électrique en coordonnées cartésiennes peut donc s'écrire est :

$$\hat{E}_{x,i} = \frac{\gamma_i}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(x_i - d_i)}{(x_i - d_i)^2 + (h_i - y_i)^2} - \frac{(x_i - d_i)}{(x_i - d_i)^2 + (h_i - d_i)^2} \right] \tag{III.36}$$

$$\hat{E}_{y,i} = \frac{\gamma_i}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(y_i - d_i)}{(x_i - d_i)^2 + (h_i - y_i)^2} - \frac{(y_i - d_i)}{(x_i - d_i)^2 + (h_i - d_i)^2} \right] \tag{III.37}$$

Les composantes du champ électrique Horizontales  $\hat{E}_x$  , et verticales  $\hat{E}_y$  sont calculées par la somme des contributions de tous les conducteurs.

$$\hat{E}_y = \sum_{i=1}^n \hat{E}_{y,i} \quad \hat{E}_x = \sum_{i=1}^n \hat{E}_{x,i} \tag{III.38}$$

### III.5. Calcul analytique du champ magnétique rayonné par une ligne Haute tension

#### III.5.1- Champ magnétique génère par un fil rectiligne

Les composantes dans l'espace du vecteur potentiel magnétique généré par un fil rectiligne de Longueur infinie représenté sur la figure III.5, sont données par :

$$\mathbf{A}_x = 0; \quad \mathbf{A}_y = 0 \text{ et } \mathbf{A}_z = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \ln r' \tag{III.39}$$

L'induction magnétique correspondante est :

$$B_x = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{y}{r'^2}; \quad B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{x}{r'^2} \quad \text{et} \quad B_z = 0 \quad (\text{III.40})$$

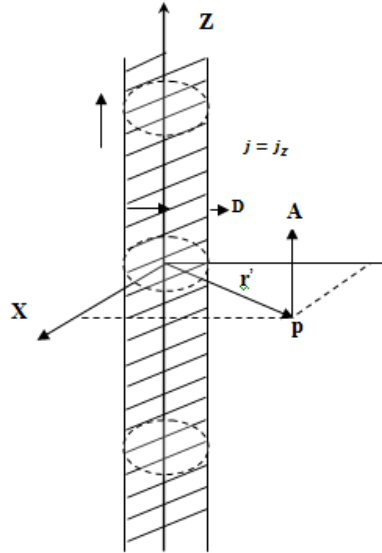


Figure III.5. Champ magnétique rayonné par un fil de longueur infinie

### III.6 Effet couronne et processus de la décharge couronne

#### III.6.1. Définition de l'effet couronne

C'est un phénomène de décharge électrique partielle induit par l'ionisation de l'environnement autour d'un conducteur. Il survient lorsque le champ électrique dépasse un seuil critique. Ce phénomène se caractérise par l'apparition de points lumineux bleuâtres (sur des surfaces métalliques rugueuses), de lignes lumineuses, voire par la formation d'une longue "gaine lumineuse" autour des conducteurs aériens transportant un courant à haute tension (voir Figure III.6) [16].



**Figure III.6.** Effet de couronne sur un éclateur

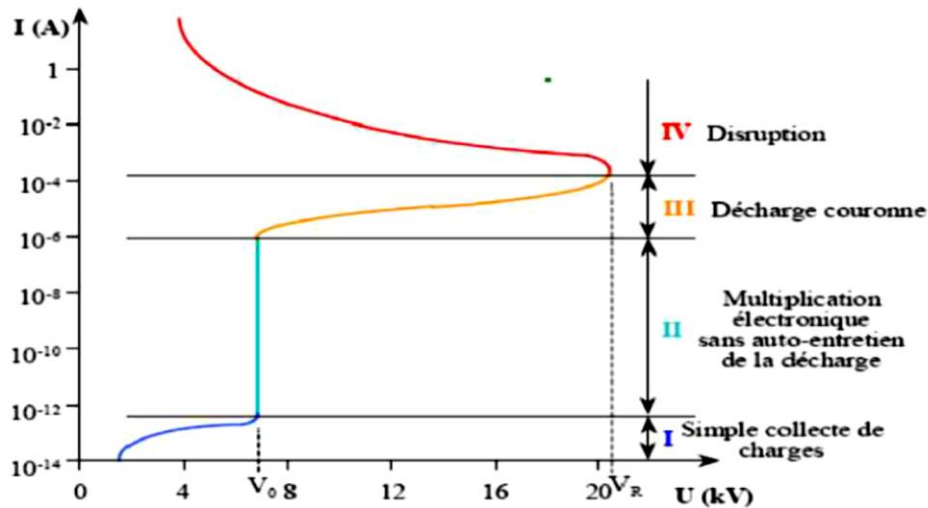
### III.6.2. Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées selon deux modèles distincts [17] :

- Le premier modèle, la décharge de Townsend, concerne les décharges à long rayon d'action impliquant l'intervalle de décharge entier et notamment les effets secondaires à la cathode.
- Le deuxième modèle, la décharge par Streamers, a été développé pour expliquer la rapidité des phénomènes liés aux décharges à court rayon d'action, en tenant compte de la situation locale. c'est la décharge par Streamers.

### III.6.3. Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)

L'analyse de la figure III.7 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. Et permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne [5].



**Figure III.7.** Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan)

- Le premier régime consiste à collecter les espèces chargées naturellement présentes dans le milieu. Ces espèces sont générées 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 entre les électrodes.
- Le second régime commence à partir d'une tension seuil  $V_0$  où débute l'avalanche électronique de Townsend, mais il ne satisfait pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge. Cette décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour générer les électrons initiaux. Durant cette phase, le courant augmente de manière significative pour une variation très faible de la tension appliquée.
- Le troisième régime se caractérise par une ionisation suffisante du gaz par la décharge, ne nécessitant plus de phénomènes d'ionisation externes. La décharge devient auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où des dards, également appelés streamers, apparaissent et sont responsables 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 électrique  $E$  est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique

### III.7 Modes de décharge par effet couronne

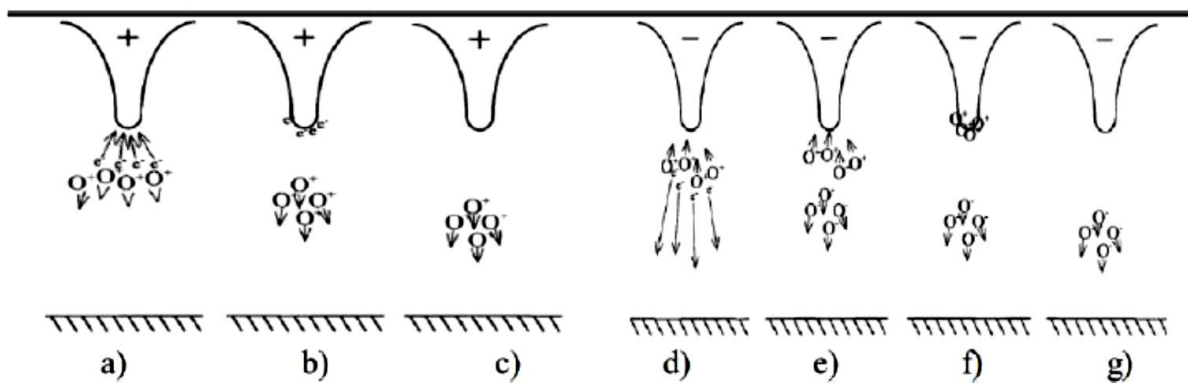
Selon la polarité et l'intensité du champ électrique, on distingue plusieurs modes de décharges couronne :

**III.7.1. Effet couronne en tension continue positive**

Sous tension positive, les électrons libres naturels ainsi que ceux générés lors des avalanches électroniques se dirigent vers l'anode, où le champ électrique est le plus intense comme illustré dans la Figure III.8.a. Ces électrons sont rapidement captés par l'anode en laissant les ions positifs dans l'espace entre les électrodes, qui sont également produits par les avalanches électroniques (Figure III.8.b). Les ions positifs sont plus lourds et plus lents que les électrons. Ces ions positifs forment la charge d'espace positive qui se déplace vers la cathode, où le champ électrique est moins intense (Figure III.8.c). Dès que la tension appliquée dépasse la valeur critique de l'effet couronne, les effluves ou les streamers se forment avec un canal radial fortement ionisé et avec de multiples dérives de moindres intensités. Ces dernières se situent dans une zone où le champ électrique est relativement modéré [5].

**III.7.2. Effet couronne en tension continue négative**

Les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques sont repoussés par la cathode vers la zone de champ électrique plus faible tel qu'illustré à la (Figure III.8.d). Ceux-ci se recombinent rapidement avec les molécules neutres et forment des ions négatifs (Figure III.8.e). Pendant ce temps, les ions positifs créés lors des avalanches électroniques s'approchent de la cathode dans la zone de champ intense (figure III.8.f). Ils sont captés avant que les ions négatifs ne s'éloignent suffisamment de la cathode pour ne plus modifier le champ électrique dans la zone active. Les ions négatifs forment alors la charge d'espace négative (Figure III.8.g).



**Figure III.8.** Effet de couronne en tension positive et négative

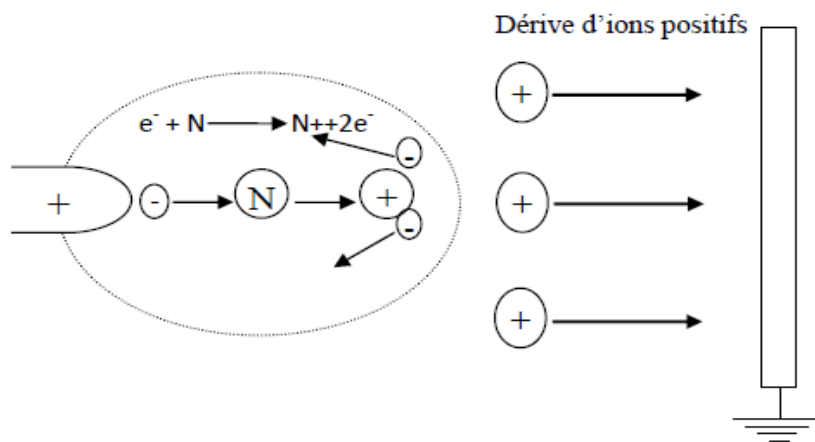
**III.8. Décharge couronne dans les lignes électriques**

À proximité d'un conducteur d'une ligne électrique, les surfaces équipotentielles sont très courbées et le champ électrique diminue rapidement avec la distance au conducteur, il n'y a

avalanche de charges que si le champ à la surface du conducteur dépasse 30 kV/cm, valeur d'autant plus élevée que le rayon du conducteur est petit, ce champ de surface est appelé champ critique ou intensité critique du champ électrique électromagnétique EC.

**III.8.1 Décharge couronne dans les lignes à courant continu**

- a- **En polarité négative du conducteur,** L'avalanche de charges se déplace du conducteur vers l'extérieur, mais s'arrête à une distance où le champ n'est plus adéquat pour maintenir l'effet multiplicateur, soit environ 26 kV/cm. Ainsi, le processus d'ionisation est restreint à une couronne d'épaisseur précise. [5].



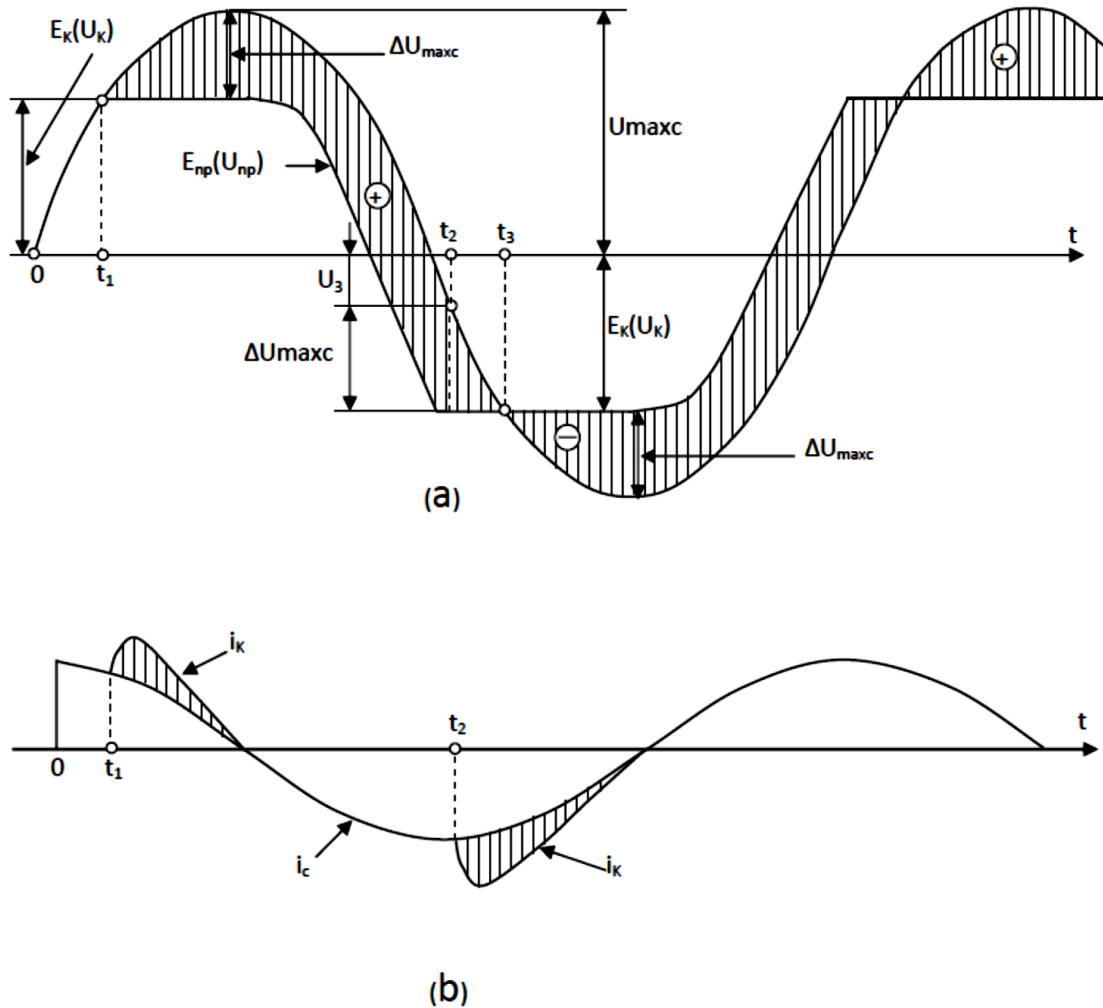
**Figure III.9.** Descriptif de la décharge couronne négative

- b- **En polarité positive du conducteur,** Au contraire, l'avalanche de charges commence dans l'espace environnant et se développe vers le conducteur, absorbant les électrons, laissant derrière eux un nuage d'ions positifs, beaucoup moins mobiles, comme si le conducteur était prolongé par une pointe positive, ce qui permet la formation d'une nouvelle avalanche légèrement en avant de la précédente, processus d'ionisation qui se propage autour du conducteur bien plus loin que les avalanches de polarité négative et qu'on appelle « streamer ».

**III.8.2 Décharge couronne dans les lignes à courant alternatif**

En tension alternative, il est physiquement possible de voir apparaître tous les modes de décharge couronne observés en tension continue. Les alternances positives et négatives peuvent produire leurs modes de décharge respectifs. Cependant, pour prévoir les modes possibles pendant une alternance suivante, il faut prendre en compte le temps d'évacuation des charges d'espace formées pendant l'alternance précédente. La distance entre les électrodes et le gradient

de tension déterminent le temps de migration des ions et 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, ils réduiront le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante. Par conséquent, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue [5].



**Figure III.10** Tension et courant dans une 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 :

$$U_{ph} = U_k \quad (III.41)$$

Après l'apparition de la couronne autour du conducteur, des charges de même polarité que celle du conducteur s'accumulent. Ces charges stabilisent l'intensité du champ à la surface du conducteur à la

valeur ( $E_k$ ). Ainsi, après l'apparition de la couronne, les courbes de tension et d'intensité divergent : la tension continue à varier selon une sinusoïde, tandis que l'intensité reste constante.

$$U_{cond} = \frac{q_{cond}}{C} \quad (III.42)$$

$$q_{cond} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 r E_k \quad (III.43)$$

La différence de tensions, représentée sur la figure II.5.a par la partie hachurée, est maintenue par l'accumulation de charges jusqu'à atteindre la valeur de  $\Delta U$  et par l'augmentation de la tension. Les charges totales se composent des charges sur le conducteur et de celles présentes dans l'espace environnant. Lors de la même tension, en l'absence de couronne, les charges dans l'espace environnant sont plus importantes que celles à la surface du conducteur ( $qU.C$ ). Ainsi, la formation de la couronne s'accompagne d'une augmentation des charges et des capacités de la ligne au-delà de la capacité géométrique usuelle, jusqu'à une valeur équivalente donnée par la formule suivante

$$C_{eq} = \frac{q_{tot}}{U_{ph}} \quad (III.44)$$

:

Lorsque la tension de la source atteint son maximum, les charges totales  $q$  commencent à diminuer. Étant donné que les charges d'espace sont lourdes, ce sont celles du conducteur qui se réduisent en premier, entraînant ainsi une diminution de l'intensité et l'extinction de la couronne. Pendant la période suivante, la couronne s'allume dès que la valeur absolue de l'intensité du champ électrique sur le conducteur atteint  $E_k$ . À ce moment-là, il reste encore des charges de polarité inverse de la demi-période précédente dans l'espace. Par conséquent, la valeur instantanée de la tension  $U$  sera beaucoup plus faible que la tension initiale, comme illustré dans la figure II.5.a.

$$U_k = U_3 + \Delta U_{Max} \quad (III.45)$$

$$\Delta U_{Max} = U_{Max} - U_k \quad (III.46)$$

Lors de l'allumage de la couronne pendant la demi-période négative, des charges négatives se forment autour du conducteur, compensant progressivement les charges résiduelles de la demi-

période précédente. À l'instant  $t_3$ , les charges positives sont complètement neutralisées, et lorsque la tension atteint son maximum, les charges négatives égalent les charges maximales de la demi-période précédente. Ce processus se répète ensuite.

La figure I.5.b montre la courbe du courant des conducteurs couronnés de la ligne. En présence de la couronne, ce courant dépasse la valeur de la capacité de couronne, qui est déterminée par la capacité géométrique de la ligne et la tension de la source.

### **III.9 Utilisation et conséquences de l'effet de couronne**

L'effet de couronne présente des applications industrielles potentiellement bénéfiques. Il contribue positivement à l'atténuation des surtensions atmosphériques. Cependant, il peut également avoir des effets indésirables sur les composants des lignes à haute tension.

#### **III.9.1 Utilisation de l'effet de couronne**

La génération de charges électriques dans le phénomène d'effet de couronne est exploitée dans divers procédés industriels tels que la précipitation électrostatique et la vaporisation électrostatique. En utilisant les charges électriques produites par l'effet de couronne, on peut collecter les particules indésirables avant leur libération dans l'air (par exemple, dans les précipitateurs), ou encore disperser des particules fines (comme la peinture) à un débit précis et constant (dans les vaporisateurs).

Les surtensions atmosphériques qui se propagent le long des conducteurs sont altérées par l'effet de couronne, où l'ionisation de l'air autour du conducteur provoque des pertes significatives pour les tensions supérieures à 1 MV. Cela se traduit par une réduction de leur amplitude et de la raideur de leur front d'onde. À une distance approximative de 1,5 km, les surtensions atmosphériques ne représentent plus de danger significatif pour les installations.

#### **III.9.2 Conséquences négatives de l'effet de couronne**

Dans le domaine du transport de l'énergie électrique, l'effet de couronne constitue l'une des sources majeures de pertes électriques, d'interférences radiophoniques, téléphoniques et télévisuelles, de bruits audibles, de détérioration de l'état de surface des composants et de vibrations mécaniques. De plus, les effets secondaires de l'effet de couronne dans les isolants

de certains disjoncteurs (SF6) et transformateurs (huile) entraînent une diminution de leur pureté et de leurs propriétés isolantes. Réduire l'impact de l'effet de couronne reste un défi majeur dans la conception des composants haute tension. Les décharges électriques dans l'air engendrent également de l'ozone, un gaz irritant.

### III.10 .Loi De Peek

#### III.10.1Définition

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet couronne est caractérisé par l'apparition soudaine d'une conductivité importante de l'air dans son voisinage immédiat. L'aspect général de l'effet couronne varie en fonction de la taille du conducteur. Pour un fil très fin, l'effet est très régulier, manifesté par une gaine lumineuse autour du fil. En revanche, pour des rayons de courbure plus grands ( $r > 2$  mm), l'effet couronne se concentre en certains points, perdant sa symétrie et devenant plus instable. Ces instabilités sont à l'origine des diverses formes d'émission de couronne observées.

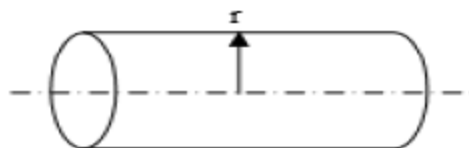
En tension alternative, le seuil critique apparaît principalement en polarité négative. Peek a observé que l'apparition de la couronne dépendait du champ électrique superficiel, du rayon du conducteur et de la densité de l'air. Il a formulé empiriquement sa loi selon laquelle

$$E_{cr} = E_p \delta \left[ 1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right] \quad (\text{III.47})$$

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

#### ➤ Conducteur lisse

$$E_{cc} = E_s \delta \left( 1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} \left( \frac{kV}{cm} \right) \right). \quad (\text{III.48})$$



Pour une tension continue :  $E_{cc}$  en valeur efficace ;

Pour une tension alternative :  $E_{cc}$  en valeur max ou amplitude

$E_s = 30 \text{ kV/cm}$  ;

$P$  (cm Hg) : pression en cm de mercure

$r$  (cm) : rayon du conducteur

$k = 0,308$ .

Conditions normales  $P = 76 \text{ cm}$  et  $t = 25^\circ\text{C} \Rightarrow \delta = 1$

avec  $\delta = 3.92P / (273 + t)$

densité relative de l'air

### ➤ 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 :

$$E_0 = m \cdot E_{cc} \quad (\text{III.49})$$

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

### ➤ 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)

$$U_c = E_d \cdot k m \left( 1 + \frac{0.03}{\sqrt{k \cdot R_1}} \right) R_1 \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right) [V]. \quad (\text{III.50})$$

Facteurs de corrections climatiques :

$$K = \delta \cdot K. \quad (\text{III.51})$$

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

(III.52)

$$m = m_g \cdot m_p.$$

### III.10.2. Obtention de la loi de Peek

Si  $\rho$  est l'abscisse le long d'une ligne de champ issue d'un conducteur de rayon  $r$  Le champ électrique en fonction de  $\rho$  est donné par [18]:

$$E(\rho) = E_m \cdot \frac{r}{\rho} \quad (\text{III.53})$$

$E_m$  : champ maximal à la surface du conducteur.

$$E_m = E_0 \left[ 1 + \frac{k}{\sqrt{r}} \right] \quad (\text{III.54})$$

$K$  : coefficient de Peek.

$E_0$  = la tension disruptive de l'air 31 kV/cm.

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

$$E_{cr \max} = 303. m. \delta. \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta.r}} \right) \quad [KV/cm] \quad (\text{III.55})$$

**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  $U > U_c$  r il y a effet couronne

Si  $U \leq U_{cr}$  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 :

$$U_{crit/milieu} = 84. m. m_a \delta. r. \log \left( \frac{M_{MG}}{r} \right) \quad [KV] \quad (\text{III.56})$$

$$U_{crit/milieu} = 0,96 U_{crit}$$

$$U_{crit/extérieur} = 1,06 U_{crit}$$

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

$m_a$  : Coefficient tenant compte des conditions atmosphérique.

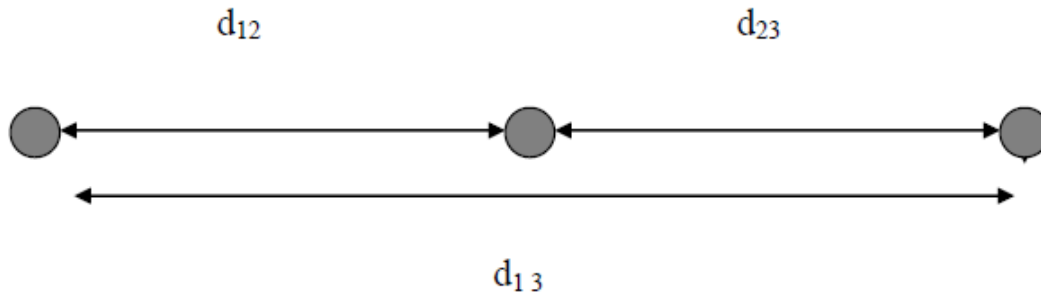
$m_a=1$  pour beau temps

$m_a=0,8$  pour mauvais temps

$r$  : rayon de conducteur en cm.

DMG : distance moyenne géométrique entre les conducteurs de phases

$$D_{MG} = \sqrt[3]{d_{12}.d_{13}.d_{23}} \quad (\text{III.57})$$



On a :  $d_{12} = d_{23}$   $d_{13} = 2d_{12} = 2d_{23}$

donc :

$$D_{MG} = \sqrt[3]{d \cdot 2d \cdot d} = \sqrt[3]{2d^3} = 1,26d \quad (\text{III.58})$$

### III.11 lignes de conducteurs en faisceaux

#### III.11.1 Définition d'un faisceau conducteur

Une technique récente pour réduire l'effet de couronne consiste à remplacer un seul conducteur par plusieurs conducteurs maintenus à une distance fixe par des entretoises conductrices. La section totale de ces conducteurs multiples est équivalente à celle du conducteur unique. Cette approche est particulièrement utilisée dans les lignes à très haute tension (supérieures à 300 kV). En plus de réduire l'effet de couronne, cette configuration permet de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des niveaux acceptables.

##### III.11.1.1 Caractéristiques d'un faisceau

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes :

$$A = 2R \sin \frac{\pi}{n} \quad (\text{III.59})$$

$$r_e = R \sqrt[n]{\frac{nr}{R}} \quad (\text{III.60})$$

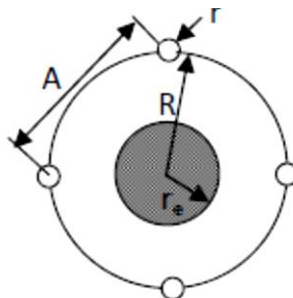


Figure III.11 Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteur

$r$  : rayon des conducteurs élémentaires [cm].

$n$  : nombre de conducteurs élémentaires.

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

$A$  : distance entre deux conducteurs consécutifs [cm].

$r_e$  : rayon équivalent. C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants [cm].

### III.11.1.2 Champ électrique dans un faisceau conducteur

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

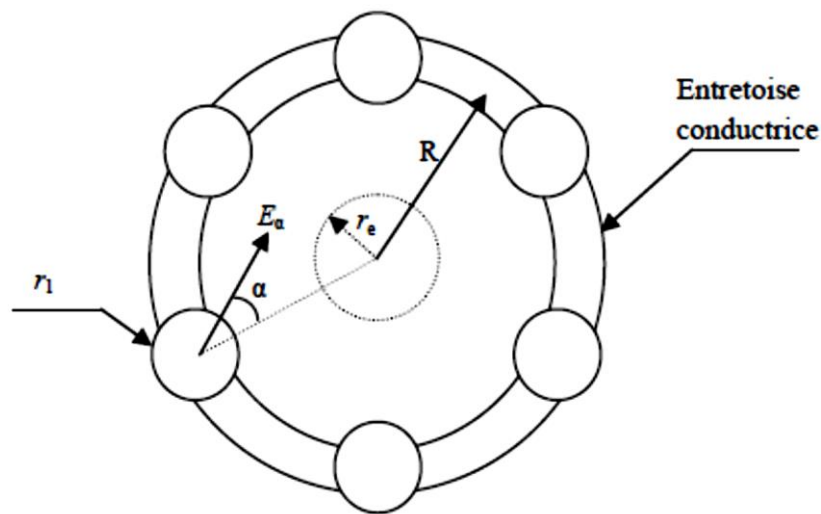


Figure II.12. Une phase en faisceau

$$E_{\alpha} = \left[ 1 - (n - 1) \frac{2r_1}{R} \cos \alpha \right] E_m \quad (\text{III.61})$$

Avec :

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

$n$  : nombre de conducteurs élémentaires de faisceau.

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

$E_m$  : valeur moyenne du champ électrique sur le contour du conducteur.

$$E_m = \frac{U}{nr_1 \ln \frac{R}{r_e}} \quad (\text{III.62})$$

$U$  : tension du faisceau contre terre.

$r_e$  : 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.

$$r_e = r_1 \sqrt[n]{n \left( \frac{R}{2r_1} \right)^{n-1}} \quad (\text{III.63})$$

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

$$\frac{dE_\alpha}{d\alpha} = 0 \quad (\text{III.64})$$

-Maximum pour

$$\alpha = [2K + 1].\pi \quad (\text{III.65})$$

-Minimum pour

$$\alpha = 2K.\pi \quad (\text{III.66})$$

### III.12. Mécanisme de formation des pertes couronne

Quel que soit le mode de propagation des charges, le processus fondamental reste la dissociation des atomes en électrons et en ions positifs. Les ions de charge opposée à celle du conducteur sont immédiatement attirés vers celui-ci, tandis que les ions de même charge sont repoussés vers l'extérieur par le champ électrique environnant. Étant donné que les électrons se combinent rapidement avec des atomes neutres pour former des ions négatifs, du point de vue de l'électrotechnicien, il semble que le conducteur émette, sous l'effet de l'ionisation, des ions lourds de la même polarité que lui.

#### III.12.1. Pertes en régime localisé

Dans ce mode de fonctionnement, l'établissement de lois pour calculer les pertes devient très difficile, car la variation de l'état de surface masque largement l'influence des paramètres électriques et géométriques du conducteur. Les grandes aspérités du conducteur initient l'ionisation bien avant que le champ électrique critique ne soit atteint. La quantité de charges produites par ces aspérités augmente avec l'augmentation du champ appliqué. À mesure que le champ superficiel du conducteur augmente progressivement, même de petites aspérités commencent à contribuer en générant des charges à leur tour. Ces aspérités créent des aigrettes de plus en plus intenses alors qu'elles se développent dans un champ plus fort et libèrent davantage de charges.

### **III .12.2 Pertes en régime généralisé**

Dans ce régime, les charges d'espace deviennent suffisamment denses pour influencer les charges portées par le conducteur, modifiant ainsi le champ électrique superficiel. Ce processus d'émission est régulé par un mécanisme où chaque nouvelle propagation de charges augmente la charge de signes opposés induite sur le conducteur, ce qui diminue le champ superficiel et ralentit l'émission. La propagation des charges ne dépend plus des caractéristiques des sources d'ions, mais de la quantité et du mouvement des charges déjà émises. Dans ces conditions, le calcul des pertes devient relativement plus simple.

### **III.12.3. Calcul des pertes**

Les pertes de puissance active par phase dû à l'effet couronne peuvent être estimées approximativement pour une ligne triphasée symétrique par la formule suivante :

$$P_c = 2.41 \frac{f+25}{\delta} \sqrt{\frac{r}{d} (V_s - V_c)^2} \quad (\text{III.67})$$

Avec :  $f$  : fréquence du réseau]

$d$  : distance entre deux conducteurs de lignes.

$V_s$  : tension simple du réseau triphasé symétrique en KVe<sub>eff</sub>

$V_c$  : tension simple d'appariation d'effet couronne en KVe<sub>eff</sub>

$r$  : rayon du conducteur en centimètre.

$\delta$  : densité de l'air.

Remarque : Cette formule est valable pour  $\geq 0$  et pour des fréquences proches des fréquences industrielles [6]. Le tableau suivant représente les pertes par effet couronne pour différentes tensions de service en fonction de la section du conducteur.

Section du conducteur (mm <sup>2</sup> )	Nombre de conducteurs par phase	Champ électrique KV/Cm	$\Delta P_{\text{couronne Max}}$ KV/Km	$\Delta P_{\text{couronne Min}}$ KV/Km
<b>Tension de service 220 KV</b>				
240	1	25.2	2.7	1.2
300		23.5	2.0	0.8
400		20.7	1.0	0.4
500		19.0	0.7	0.3
<b>Tension de service 330 KV</b>				
240	2	25.7	6.3	2.7
300		23.9	4.6	1.9
400		21.2	2.5	1.0
500		19.3	1.6	0.5
<b>Tension de service 500 KV</b>				
240	3	25.4	11.5	4.9
300		24.0	12.2	5.2
400		21.8	7.5	3.0
500				

### III.13 Perturbations radioélectriques

L'effet couronne provoque des perturbations radioélectriques qui perturbent la réception des programmes radiophoniques et télévisuels. Ce sont des barrières entre les lignes aériennes de transport d'énergie et les installations de réception voisines. Ces perturbations sont accompagnées d'autres phénomènes désagréables, comme :

- La pollution de l'air.
- Le bruit acoustique émis par les conducteurs.
- L'altération du son et de l'image des récepteurs radio et TV due aux champs intenses captés par les antennes.

Ces parasites peuvent provenir d'étincelles ou d'arcs électriques, et des tensions et courants peuvent être injectés dans les réseaux basse tension qui alimentent ces appareils.

Les perturbations dues aux lignes haute tension peuvent être générées sur une large bande de fréquence par :

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

### **III.14 Conclusion**

Les pertes d'énergie et les perturbations radioélectriques sont les principales perturbations liées à l'effet couronne. Les pertes causées par l'effet couronne découlent de la décharge du courant dans le faisceau de conducteurs et l'espace environnant.

Les odeurs, composées de petites décharges, émettent des impulsions de courant dans les conducteurs sur une large plage de fréquences. En fonction de la tension de la ligne (moyenne, haute ou très haute), ces impulsions peuvent altérer le son de la radio ou l'image de la télévision dans la même plage de fréquences.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés sur le calcul du champ électromagnétique généré par les lignes à haute tension.



Conclusion générale

L'apparition de la décharge couronne dans les lignes de transport d'énergie électrique engendre des perturbations qui affectent non seulement le fonctionnement des réseaux électriques, mais aussi celui des réseaux de communication. Ce phénomène augmente significativement les pertes de puissance, qui peuvent égaler, voire dépasser, les pertes par effet Joule dans les conducteurs. Pour les réseaux de tension nominale de 330 kV et plus, ces pertes dues à l'effet couronne peuvent atteindre plusieurs centaines de kilowatts par kilomètre.

De plus, l'effet couronne est associé à la production d'harmoniques dans les réseaux électriques. Cette pollution harmonique est l'un des phénomènes les plus perturbateurs, entraînant une dégradation notable de la qualité de l'énergie électrique.

Dans le cadre de cette étude, l'accent a été mis sur l'analyse de l'influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs haute tension. Ces surtensions représentent un défi majeur pour la gestion et la fiabilité des réseaux électriques à haute tension.

L'objectif de notre travail est de calculer le champ électromagnétique créé par un conducteur réel et un conducteur en faisceau ;



## Références bibliographiques

## Références

[1] <https://hal.science/ce1-01474998/document>

[2] C.Berrdjem, L. Boudjerada « Modélisation analytique des champs électromagnétiques rayonnés par une ligne électriques HT 400 KV » Mémoire de master, université Badji Mokhtar. Annaba. Promotion 2017

[3] Aide-mémoire <https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2023/07/5stat-Aide-memoire-299-Champs-statiques-mars2006.doc.pdf>

[4] H. BAKIR « Modélisation de l'Impact Direct de la Foudre sur un Pylône THT : Analyse des Courants de Contournement » Mémoire de master ; Université de Jijel, promotion 2017.

[5] B.OUMEZZAOUCHE, S.RAHMANI « Influence du câble sur les surtensions dans un système ligne - câble – transformateur » Mémoire de master, université de Tizi-Ouzou, 2009.

[6] I. AHMIL, A.BELDI « Modélisation analytique des champs électromagnétiques en vue d'estimation de l'exposition publique et professionnelle basse fréquence » mémoire de master, université de Annaba, 2019

[7] B.A.RACHEDI « Compatibilité électromagnétique : Etude de l'environnement électromagnétique généré par les lignes haute tension » thèses de doctorat ; université de Guelma, 2016.

[8]M. MOUZAIA, S. IDIRI « Etude de la variation de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau de distribution » mémoire de master, université de Bejaia, promotion 2013.

[9] K, Douis, B. Labreche Z.Melik « Simulation et conception de ligne électrique à haute tension, (caractéristiques électriques de lignes) » mémoire de master ; Université Hamma Lakhdar. El Oued promotion 2022.

[10] L.HADDAD, KH. HABI. « Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées » mémoire de master, université de Bejaia, promotion 2015.

[11] N.MEKHAISSI A.BELHOUL « Etude du champ électromagnétique au voisinage des lignes transmission HVDC et HVAC » Mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, promotion 2022

[12] Ouddane Abdellatif Kherroubi Oussama « Etude de la pollution magnétique générée par les câble de puissance » mémoire du master, université kasdi Merbah Ouargla ; promotion 2023.

[13]K. Douis , B. Labreche ; Z. Melik « Simulation et conception de ligne électrique à haute tension, (caractéristiques électriques de lignes) » mémoire de master Université Hamma Lakhdar. El Oued ; promotion 2022

[14] C. Berrdjem, L. Boudjerada « Modélisation analytique des champs électromagnétiques rayonnés par une ligne électrique HT 400 KV » Mémoire de master, université Badji Mokhtar. Annaba. Promotion 2017

[15] I. AHMIL, A. BELDI « Modélisation analytique des champs électromagnétiques en vue d'estimation de l'exposition publique et professionnelle basse fréquence » mémoire de master, université de Annaba, 2019

[16] O. DEGHA, O. MAMERI « Calcul du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie électrique THT » mémoire du master université Kasdi Merbah Ouargla. 2023

[17] S. KHELIFI ; R. DJOUDI « analyse de l'effet couronne en régime alternatif » mémoire du master ; 2021; université badji mokhtar- annaba

[18] S. BEN CHABANE « Modélisation de l'effet couronne permettant d'étudier son influence sur surtensions dans les lignes de haute tension » université de tizi ousou, promotion, 2011