UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Etude de la protection des installations de télécommunication contre la foudre : Cas du nœud hertzien de Mugongo

Manirakiza, Thérence; Sous la direction de : Ir Ntarwirumugara, Christian

2007-07
UB, ITS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2431

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI
INSTITUT TECHNIQUE SUPERIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTROMECANIQUE

ETUDE DE LA PROTECTION DES INSTALLATIONS DE TELECOMMUNICATION CONTRE LA FOUDRE : « CAS DU NOEUD HERTZIEN DE MUGONGO. »

Par

Thérence MANIRAKIZA

Sous la direction de :

Ir Christian NTARWIRUMUGARA

Projet de fin d'études présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du Grade d'Ingénieur Industriel en Génie Electromécanique.

Bujumbura, juin 2007

Dédicaces

Au Dieu Seigneur tout puissant,
A mon regretté père,
A ma chère mère,
A mes frères et sœurs,
A mes oncles,
A mes cousins et cousines,
A ma tante,
A tous mes amis,

Je dédie ce mémoire.

Thérence MANIRAKIZA.

Remerciements

Notre travail n'aurait pas été accompli sans le soutien de certaines personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation. Qu'elles trouvent ici notre profonde gratitude.

Nous pensons spécialement à l'Ingénieur Christian **NTAGWIRUMUGARA** Directeur de ce mémoire ; ses conseils tant moraux que techniques nous ont été d'une importance capitale. Nous lui témoignons grande reconnaissance d'avoir surpassé ses multiples obligations et occupations et accepter de diriger ce travail.

Que tous les professeurs, dès l'école primaire jusqu'à l'université du Burundi, particulièrement ceux de l'Institut Technique Supérieur, département de Génie Electromécanique, se réjouissent de l'aboutissement de ce travail, qu'ils y trouvent le couronnement de leurs efforts.

A l'Entreprise **REGIDESO,** par le biais de son Directeur Général, nous disons grand merci de nous avoir donné l'autorisation d'y réaliser notre stage .Que tout son personnel, en particulier celui des Directions de l'Eau et d'Electricité plus précisément dans les services Production d'Electricité et Maintenance des Equipements Electromécaniques soit rassuré de notre reconnaissance.

A tous les étudiants du Campus **KIRIRI,** nous leur disons merci d'avoir agrémenté notre séjour à l'Université du **BURUNDI**

A toutes nos familles, nos amis et toute personne qui nous souhaite la réussite, nous leur rendons grand hommage.

LISTE DES ABBREVIATIONS ET SIGLES UTILISES

MT : la moyenne tension
BT : la basse tension
TT : régime de création du neutre du réseau où le neutre de l'alimentation et les masses de l'installation sont mis directement à la terre
IT : régime de création du neutre du réseau où le neutre de l'alimentation est relié à la terre par impédance et les masses de l'installation sont reliées directement à la terre
TN : régime de création du neutre du réseau appelé aussi schéma de mis au neutre scindé en deux types :
- Schéma TNC où le conducteur du neutre et de protection sont confondus en un seul conducteur appelé PEN ;
- Schéma TNS où le conducteur neutre et le conducteur de protection sont séparés.
E.T : équipement électronique
FEM : force électromotrice induite
FEMLI : force électromotrice longitudinale induite
CCITT : Comité Consultatif International des Télégraphies et des Téléphones
NFC : Norme Française en rapport avec l'Electricité
FBS : Federal Bureau of Standards
DC : direct current
PDA : Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage
THT : Très Haute Tension
CEI : Commission Electrotechnique Internationale
IEPF : Installations Extérieures de Protection contre la Foudre
ONATEL : Office Nationale des Télécommunications
REGIDESO : Régie de Production d'Eau et d'Electricité
NFEN : Norme Française générique d'immunités pour les Environnements industriels
PC : Personnal Computer
TGBT : Tableau Générale Basse Tension
L_{BT}: longueur de la ligne basse tension
C : capacité
U : tension ou différence de potentiel
V : potentiel électrique d'un point
v : vitesse
Z : impédance
L : inductance
R : résistance
t : temps
E : champ électrique
ρ : Résistivité du sol
J : densité de courant électrique
I : intensité du courant électrique
M : Coefficient d'induction mutuelle
ω : la pulsation du réseau
δ : degré d'ionisation
Q : la charge en coulomb

q : la charge d'un ion
ε : la permittivité
σ : la conductivité
μ : Mobilité des ions
P : pression
T : température
N : densité des ions
K : constante de Boltzmann
ΔT : variation de température
Y : admittance
g : facteur de qualité
h : constante de Planck
W : énergie électrique
F : estimation du risque de foudroiement
Δt : variation du temps
ε_o : permittivité du vide
K_r : coefficient réducteur
Z_T : impédance de transfert
A_e : surface équivalente de captation
N_d : fréquence attendue de coups de foudre directs
N_c : fréquence acceptée de coups de foudre directs
N_g : densité de foudroiement local
M_o : molybdène
R_P : rayon de protection du paratonnerre PREVECTRON
R_{iso} : résistance d'isolement
I_{CC} : courant électrique de court-circuit admissible
U_C : tension maximale de régime permanent du parafoudre
U_P : niveau de protection
I_d : courant électrique de défaut

Liste des figures

Figure 1.1 : Couplage par induction électrique 5
Figure 1.2 : Remontée de potentiel par terre 6
Figure 1.3 : Ligne électrique isolée intercalée entre le nuage et la terre 8
Figure 1.4 : forme de surtension foudre sur une ligne électrique 9
Figure 1.5 : L'électrode de terre dans le sol 11
Figure 1.6 : Variation du potentiel sol en fonction de la distance 12
Figure 1 .7 : Variation du potentiel du sol sur les prises de terre en défaut. 12
Figure 2.1 : Influence de la couche ionisée de HEAVISIDE 16
Figure 2.2 : Méthode directe de mesure des champs électriques atmosphériques 18
Figure 2.3 : Méthode de Wilson pour mesurer le champ atmosphère 19
Figure 2.4 : Polarisation du nuage lors de la chute des particules d'eau 20
Figure 2.5 : polarisation du nuage dans le cas de congélation 21
Figure 2.7.a : Coup de foudre descendant (terrain plat) 23
Figure 2.8: apparition d'un canal ionisé à la base du nuage en direction de la terre 24
Figure 2.9 : foudre ascendante positive (canal ionisé positivement, courant foudre négatif).. 26
Figure 2.10 : foudre ascendante négative (canal ionisé négativement donc courant foudre positif) 27
Figure 2.11 : foudre descendante positive (canal ionisé positivement donc courant foudre négatif) 27
Figure 2.12 : foudre descendante négativement (canal ionisé positivement donc courant foudre négatif) 28
Figure 3.1 : Méthode de mesurer l'impédance directe ou inverse d'une ligne. 33
Figure 3.2 : position relative des conducteurs de phase dans l'espace 34
Figure 3.3 : méthode de mesurer l'impédance homopolaire d'une ligne 35
Figure 3.4 : Ligne complète avec ses capacités entre phase et phase –terre. 38
Fig. 3.5 : Méthode pratique de mesurer la capacité homopolaire. 39
Figure 4.1 : Paramètres intervenants dans le calcul pratique du potentiel du sol sur une prise de terre 47
Figure 4.2. Schéma de principe de couplage entre prise de terre 51
Figure 4.3 : Variation de l'impédance des prises de terre Z en fonction de la fréquence des courants de la foudre 54
Figure 4.4 : Méthode de deux électrodes de terre pour mesurer la résistivité du sol. 60
Figure 4.5 : Mesure de la résistivité du sol par quatre sondes 61
Figure 4.7.a. Système à ohmmètre 66

Figure 4.7.b. Système à équilibrage par zéro 66
Figure 4.7.c. Système mixte à ohmmètre et à équilibrage à zéro..... 67
Figure 4.7.d. Système à comparateur de résistance..... 67
Figure 4.8. Mesure de la résistance de terre par la méthode de chute de potentiel..... 70
Figure 5.1. Transfert du courant de la foudre dans l'enveloppe 73
Figure 5.2. Transmission du courant foudre dans l'enveloppe 74
Figure 5.3 : Elévation du potentiel du sol en cas de foudre directe sur l'antenne et support d'antenne 76
Figure 5.4 : Technique d'utilisation du fil écran à proximité des arbres 79
Figure 5.5 : Principe de protection externe au bâtiment 80
Figure 5.6 : surface de captation d'une structure 82
Figure 5.7 : Le paratonnerre ionisant PREVECTRON type S_6 86
Figure 5. 8 : Le paratonnerre type JUPITER à 4 effets de pointe 89
Figure 5.9 : mise à la terre du pylône et l'interconnexion pylône/shelter 90
Figure 6.1 : Schéma du parafoudre type VGA-haute énergie 95
Figure 6.2. Schéma du parafoudre type DP-haute énergie..... 98
Figure 6.3.Schéma du parafoudre type VA..... 100
Figure 6.4 : Schéma du parafoudre DG et DGT 101
Figure 6 .5 : La déconnexion du parafoudre par un disjoncteur pour le schéma TT 106
Figure 6 .6 : Alimentation MT/BT du nœud hertzien de MUGONGO..... 107
Figure 6.7 : Protection complète d'un poste MT/BT au moyen des parafoudres 109
Figure 6.8 : Disposition schématique du réseau de terre d'un poste MT/BT en zone foudroyée et sur terrain de forte résistivité..... 110
Figure 6.9 : Evaluation de la surtension sur l'artère 30KV alimentant le nœud hertzien de MUGONGO 111
Figure 6.10 : Schéma synoptique d'installation des parafoudres..... 113
Figure 6.11 : Protection cascade proposée pour le nœud hertzien de MUGONGO. 114
Figure 6.12 : Protection du bâtiment technique du nœud hertzien de MUGONGO..... 116
Figure 6.13 : Protection des antennes de réception du nœud hertzien de MUGONGO. 117
Figure 6.14 : Protection des antennes d'émission du nœud hertzien de MUGONGO..... 118

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : forme de la prise de terre et la valeur de la résistance correspondante 48
Tableau 4.2 : Influence des eaux souterraines sur la résistivité du sol..... 57
Tableau 4.3 : Influence de la température sur la résistivité d'un sol composé d'un mélange d'argile et de sable avec la teneur en eau de quinze pourcent..... 57
Tableau 4.4 : valeurs typiques de la résistivité de certains types de sol et de l'eau..... 58
Tableau 4.5 : Résistivité des terrains suivants NFC15-100 59
Tableau 5.1 : Coefficient environnemental C_1 83
Tableau 5.2 : Coefficient structurel C_2..... 83
Tableau 5.3 : Coefficient qui tient compte du contenu de la structure C_3..... 84
Tableau 5.4 : Coefficient qui tient compte de l'occupation de la structure C_4 84
Tableau 5.5 : Coefficient qui tient compte des conséquences de foudroiement C_5 84
Tableau 5.6 : Niveau de protection N°1 898
Tableau 5.7 : Niveau de protection N°2..... 898
Tableau 5.8 : Niveau de protection N°3 898
Tableau 6.1 : Caractéristiques techniques du parafoudre VGA 96
Tableau.6.2 : Caractéristiques techniques des parafoudres type DP-haute énergie 97
Tableau 6.3 : Caractéristiques techniques des parafoudres type VA. 99
Tableau 6.4 : Caractéristiques des parafoudres DG ET DGT 102
Tableau 6.5 : Choix du courant de décharge en fonction de l'estimation du risque F 104
Tableau 6 .6 : Les valeurs de δ..... 105

Table des matières

Dédicaces.....i
Remerciements.....ii
Liste des abréviations et siglés utilisés.....iii
Liste des figures.....v
Liste des tableaux.....vii
Table des matières.....viii

INTRODUCTION GENERALE 1

Ière partie : GENERALITES SUR LES SURTENSIONS..... 2

CHAPITRE I : APERCU GENERAL SUR LA FOUDRE ET LES COUPLAGES FONDAMENTAUX..... 2

1.1. Introduction 2
1 .2 . Origines des surtensions 2
1 .2 .1 . Surtensions d'origine interne..... 2
1 .2.2. Surtensions d'origine externe 4
1.2.2.1. Couplage par induction électrique..... 5
1.2.2.2. Couplage galvanique. 11
1.2.2.3. Couplage par induction magnétique..... 13
1.2.3. Aperçu sur les effets des surtensions..... 14
1.2.3.1. Notion sur les claquages..... 14
1.2.3.2. Destruction des composants électroniques..... 14

CHAPITRE II : PHENOMENE DE CHARGE ET DE ATMOSPHERIQUE..... 15

2.1. Introduction 15
2 .2. Etude du processus de l'électricité atmosphérique..... 16
2.2.1. Causes de l'électricité atmosphérique par beau temps 16
2.2.2. Méthodes de mesures des champs électriques atmosphériques..... 18
2.2.3. Causes de l'électricité atmosphérique par temps d'orage 20
2.2.4. Mécanismes de la décharge orageuse (foudre)..... 22
2.2.5. Etude du développement de la prédécharge foudre..... 23
2.2.6. Notion sur la foudre ascendante et descendante..... 25
2.2.7. Effets de la foudre..... 28

CHAPITRE III. PERTURBATIONS DE LA FOUDRE SUR LE RESEAU TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION D'ENERGIE 30

3.1. Introduction 30

3. 2. Notion d'impédances des lignes 31

3.2.1. Impédance des lignes aériennes 32

3.2.1.1. Impédance directe et inverse des lignes aériennes 32

3.2.1.2. Impédance homopolaire d'une ligne électrique. 35

3.2.2. Capacité directe d'une ligne 37

3.2.3. Capacité homopolaire de la ligne 38

3 .2.4. Evaluation du courant de défaut à la terre 40

3.3. Limites admissibles par la CCITT 43

IIème PARTIE : PROTECTION DES INSTALLATIONS DE TELECOMMUNICATION DU NŒUD HERTZIEN DE MUGONGO CONTRE LES SURTENSIONS 45

CHAPITRE IV. PRINCIPES DE CONCEPTION ET DE REALISATION DES PRISES DE TERRE 45

4.1.Introduction 45

4.2. Réalisation des prises de terre 47

4.2.1. Principes physiques de conception des prises de terre 47

4.2.2. Calcul de la résistance équivalente de couplage entre les prises de terre 51

4.2.3. Etude de la réalisation pratique des prises de terre 55

4.3. Etude de la résistivité du sol 56

4.3.1. Généralités 56

4.3.2. Méthodes de mesurer la résistivité du sol 59

4.3.2.1. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de deux électrodes de terre 60

4.3.2.2. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de quatre électrodes de terre 61

4.3.2.3. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de WINNER 63

4.3.2.4. Généralisation de la méthode à quatre électrodes de terre 64

4.3.2.5. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de SCHUMBERGER 65

4.3.3. Appareils utilisés dans la mesure de résistivité avec la méthode à 4 sondes 65

4.3.4. Facteurs qui influent sur la précision des mesures de la résistivité..... 68
4.4. Mesure de la résistance des prises de terre..... 69

CHAPITRE V : ANALYSE DES RISQUES SUR LES INSTALLATIONS DE TELECOMMUNICATION ET LES SOLUTIONS DE PROTECTION 71
5.1. Introduction 71
5.2. Risques et effets de couplage sur les installations de télécommunication 72
5.2.1 Lignes aériennes 72
5.2.2. Lignes souterraines 73
5.3. Analyse des solutions de protection contre les surtensions 77
5.3.1. Etude de la protection des lignes 77
5.3.2. Etude de la protection des bâtiments 80
5.3.2.1. Calcul de la fréquence équivalente de captation de la foudre sur un bâtiment 81
5.3.2.2. Calcul de la surface attendue de coups de foudre directs sur une structure 83
5.3.2.3. Calcul de la fréquence acceptée de coups de foudre directs sur une structure..... 83
5.3.3. Notion de protection contre les effets directs de la foudre 84
5.3.3.1. Aspect sur les paratonnerres à tige et leurs modes de fonctionnement 85
5.3.3.1.1. paratonnerres ionisants PREVECTRON 85
5.3.3.1.2 Paratonnerres à tige simple 89
5.3.3.2 Paratonnerres à cage maillée 90
5.3.4 Protection des sites radioélectriques 90

CHAPITRE VI. AMELIORATION DE LA PROTECTION DU NŒUD HERTZIEN DE MUGONGO 92
6.1. Introduction. 92
6.2. Méthodes de protection des installations par parafoudres 94
6.2 .1. Protection du réseau électrique BT par parafoudre de la gamme rouge..... 94
6.2.1.1. Description et guide d'installation du parafoudre VGA-haute énergie 95
6.2 .1.2. Protections des installations électriques par parafoudres type DP haute énergie..... 97

6.2.1.3. Protection des installations électriques contre les surtensions par parafoudres type VA, DG et DGT 98
6.2.1.4. Choix d'un parafoudre dans la protection cascade du réseau électrique BT 103
6.2.2. Amélioration de la protection du nœud hertzien de MUGONGO..... 107
6.2.2.1. Description et étude de la protection du nœud hertzien de MUGONGO en énergie 107
6.2 .2.2. Protection du bâtiment technique et des antennes du nœud hertzien de MUGONGO 115
6.2.2.2.1. Proposition de la protection du local hertzien de MUGONGO..... 115
6.2.2.2.2. Proposition de la protection des antennes du nœud hertzien de MUGONGO 116
6.2.2.2.3. Recherche de l'équipotentialité sur le site du nœud hertzien de MUGONGO 119

Conclusion générale 120

BIBLIOGRAPHIE 121

INTRODUCTION GENERALE

Le besoin de l'information est inhérent à tout être humain. La téléphonie est l'une des voies de communication la plus efficace et la plus évolutive. Les sites abritant les équipements de télécommunication doivent être protégés afin que ces derniers restent sains car la transmission de l'information doit rester perpétuelle dans le temps.

Comme les faisceaux hertziens exigent la visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur et compte tenu de la réfraction troposphérique, le nœud hertzien de MUGONGO situé à 2512m d'altitude est un nœud principal au niveau national de l'ONATEL.

Ainsi donc, le nœud hertzien de MUGONGO doit être protégé contre la foudre car tout défaut sur les antennes ou les équipements électriques comme les disjoncteurs, les parafoudres, les paratonnerres, les mises à la terre, les fusibles, les relais, les contacteurs, les capteurs, les climatiseurs, les redresseurs,... engendre la paralysie totale de la transmission des informations.

Par ailleurs, malheureuses sont les conséquences dues à la coupure d'une transmission, d'autant qu'elles se répercutent sur tous les plans de la vie nationale (sécurité, social, financier et politique) et l'entreprise perd sa clientèle et sa crédibilité. Voilà la raison primordiale qui a motivé le choix de ce sujet.

Le présent travail est subdivisé en deux parties à savoir :

- La première partie qui est constituée de trois chapitres traitant des généralités en rapport avec les surtensions ;
- La deuxième partie comporte également trois chapitres et consiste à étudier les protections qu'il faut apporter sur le nœud hertzien de MUGONGO pour le protéger contre les surtensions de la foudre et celles des installations de l'énergie électrique.

Enfin, nous allons terminer ce travail par une conclusion générale et des propositions que nous avons portées à l'intention de l'entreprise ONATEL.

Ière partie : GENERALITES SUR LES SURTENSIONS

CHAPITRE I : APERCU GENERAL SUR LA FOUDRE ET LES COUPLAGES FONDAMENTAUX

1.1. Introduction

Dans les installations électriques, on qualifie comme surtension, toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale. En augmentant les contraintes diélectriques, les surtensions peuvent produire des avaries de matériel par destruction locale de l'isolation. Elles sont à l'origine d'interruption de service et, au cas échéant des incendies et d'accidents de personnes.

Afin de limiter ces risques, le matériel doit posséder un niveau d'isolement à fréquence industrielle et un niveau d'isolement aux ondes de choc ; de plus, il doit être protégé contre les surtensions susceptibles de dépasser son niveau d'isolement aux ondes de choc : c'est le problème auquel nous nous proposons d'affronter en cherchant à réaliser la protection du nœud hertzien de **MUGONGO** contre la foudre et contre les installations d'énergie électrique qui sont la base de ces surtensions.

1.2. Origines des surtensions

1 .2 .1 . Surtensions d'origine interne

Ces surtensions résultent d'un changement de régime en un point d'un réseau, elles sont d'autant plus importantes que le changement est plus rapide.
Les surtensions d'origine interne sont :
- les surtensions de manœuvre ;
- les surtensions résultant de défauts à la terre ;
- les surtensions de résonance.

Pour les surtensions de manœuvre, toute manœuvre qui modifie la configuration d'un réseau provoque des surtensions ; les plus graves sont dues en particulier aux coupures des lignes à vide et des transformateurs. L'amplitude de ces surtensions dépend :

- de la configuration du réseau ;
- des caractéristiques des interrupteurs ;
- du mode de mise à la terre du point neutre du réseau.

Par exemple, sur le réseau à neutre isolé, la valeur des surtensions peut atteindre, dans le cas le plus défavorable, cinq fois la valeur de la tension simple, alors que sur les réseaux dont le neutre est relié à la terre, la valeur des surtensions ne dépasse pas sensiblement le double de la tension de service.

Néanmoins, si on entre en profondeur sur l'origine des surtensions de manœuvre qui engendrent des perturbations électromagnétiques de manœuvre, nous pouvons établir une liste d'appareils qui, lors des commutations peuvent générer des surtensions de manœuvre et ces derniers sont :

- les moteurs puissants ;
- les générateurs à ultrasons ;
- les soudures à arc ;
- les fours micro-ondes ;
- les régulateurs à thyristors ou triacs ;
- les variateurs de vitesse ;
- les disjoncteurs ;
- les transformateurs ;
- les condensateurs de la moyenne ou de la basse tension.

Pour les deux derniers appareils, il est important de savoir que la charge du réseau est variable au cours d'une journée ou d'une année. Cette variation de charge entraîne des variations des chutes de tensions dans les lignes de transport ainsi que des variations de l'énergie réactive. Pour que la tension à l'utilisation (basse tension ou moyenne tension) soit contenue dans une tolérance acceptable par les appareils, le distributeur est contraint d'accepter de livrer à tout instant une tension aussi proche que possible de la tension nominale caractérisant le réseau.

Cette opération s'effectue au niveau des transformateurs en commutant certains enroulements et des batteries des condensateurs. L'importance des surtensions qui en découlent est aléatoire et dépend particulièrement de l'angle de phase de déclenchement. Ces surtensions de « manœuvre» sont aussi appelées des surtensions harmoniques car leur fréquence d'oscillation amortie est très souvent un multiple de la fréquence du réseau.

En ce qui concerne des surtensions résultant d'un défaut à la terre, ce sont des surtensions qui se manifestent lorsque le point neutre d'un réseau est isolé. Ainsi, si le point neutre d'un réseau est isolé, un défaut franc à la terre sur l'une des phases porte les deux autres phases à la tension composée par rapport à la terre.

Par ailleurs, si une fois le défaut est résistant, les arcs à la terre créent à chaque amorçage les trains d'onde à tension élevée atteignant jusqu'à quatre ou cinq fois la tension nominale ; l'arc est alors traversé par le courant de capacité de la ligne ou du câble.

Dans le cas où le point neutre du réseau est relié à la terre, l'arc se traduit au contraire par un court-circuit et son élimination rapide évite des réamorçages. Les surtensions résultant des défauts à la terre, constituent un des graves inconvénients des réseaux à neutre isolé.

Quant aux surtensions de résonance, ce sont des surtensions qui se produisent lorsque les caractéristiques de certains éléments du réseau permettent une résonance à la fréquence du réseau ou plus couramment à une fréquence harmonique .Des ferrorésonances peuvent prendre naissance dans les circuits contenant des bobinages à noyaux ferromagnétiques lorsque les constantes de ces circuits ont certaines valeurs particulières .Ces genres de surtensions sont faciles à éliminer ,il suffit seulement de modifier les constantes de ces circuits.

1 .2.2. Surtensions d'origine externe

Ces surtensions sont indépendantes de la tension de service du réseau. Parmi les surtensions d'origine externe on peut citer :

- Les surtensions résultant des contacts entre réseaux de tensions différentes ;
- Les surtensions résultant des charges électrostatiques ;
- Les surtensions résultant de coups de foudre directs ;
- Les surtensions résultant des coups de foudre indirects.

En ce qui concerne les surtensions de contacts entre réseaux de tensions différentes, ces sont des surtensions qui sont dues à des contacts entre conducteurs actifs ou des défauts entre enroulements des transformateurs. Toutefois, avec la technologie actuelle, les règles de construction des réseaux et des transformateurs permettent de réduire considérablement le risque de telles surtensions.

Parlant des surtensions résultant des contacts entre réseaux de tensions différentes on ne peut pas oublier les surtensions venant du réseau de télécommunication .Ces dernières sont provoquées par la chute d'une ligne d'énergie ou plus fréquemment par couplage inductif ou capacitif entre la ligne d'énergie et la ligne téléphonique.

1.2.2.1. Couplage par induction électrique

Avec ce couplage par induction électrique appelé aussi couplage par influence, on a le problème qui est un peu complexe. On peut se contenter d'une approche simplifiée comme le montre la figure ci-dessous :

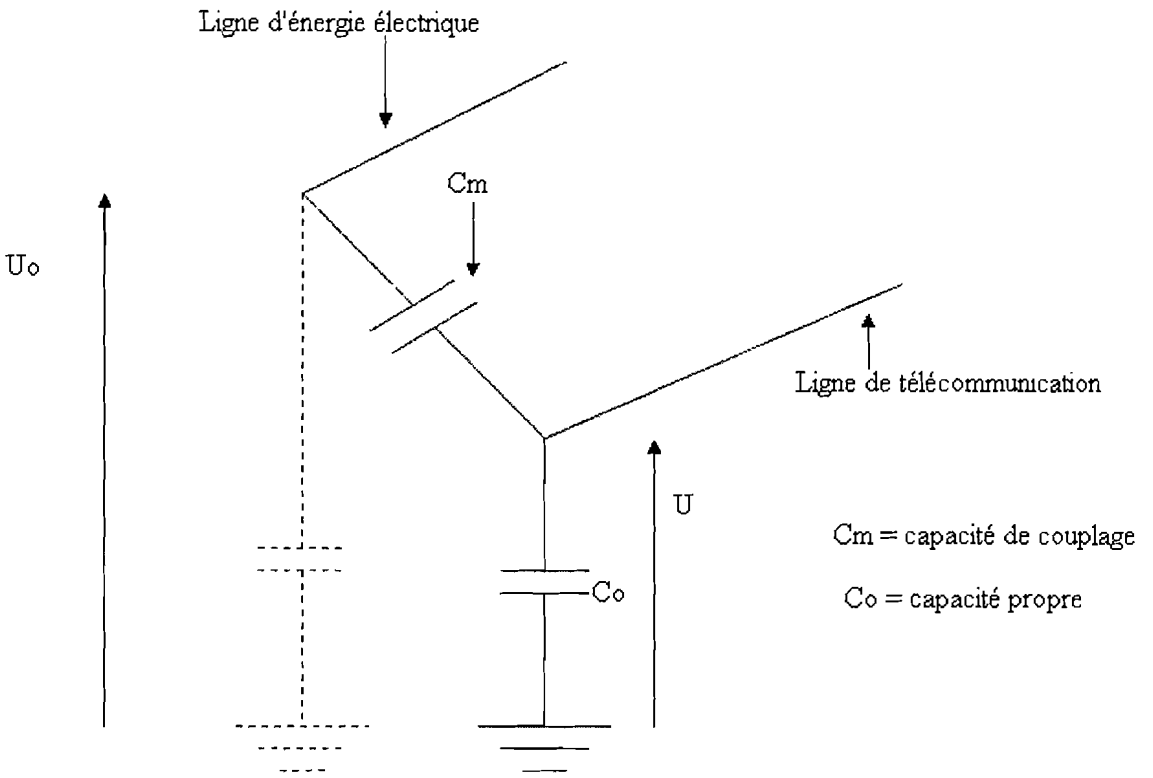


Figure 1.1 : Couplage par induction électrique

En poursuivant la notion de couplage par induction électrique, expliquons le phénomène de couplage capacitif pour une ligne de transmission formée d'un câble multibrins entouré d'une enveloppe métallique comme c'est bien mentionné sur la figure 1.2 avec le câble téléphonique blindé. Cependant, très souvent, la terre est considérée comme équipotentielle et dès qu'un écoulement de courant se produit dans le sol, les différences de potentiel longitudinales entre deux points A et D (voir figure 1 .2) sont régies par des lois où interviennent des facteurs comme l'intensité du courant de défaut à la terre et sa variation dans le temps (di /dt).

L'origine de l'écoulement du courant électrique de défaut à la terre peut être un défaut de la ligne, un coup de foudre sur un pylône de la ligne d'énergie, le fonctionnement d'un paratonnerre, un coup de foudre proche, etc. La figure suivante montre la remontée de potentiel de la terre en fonction de la distance séparant le pylône frappé par la foudre et le dispositif abritant les équipements de télécommunications.

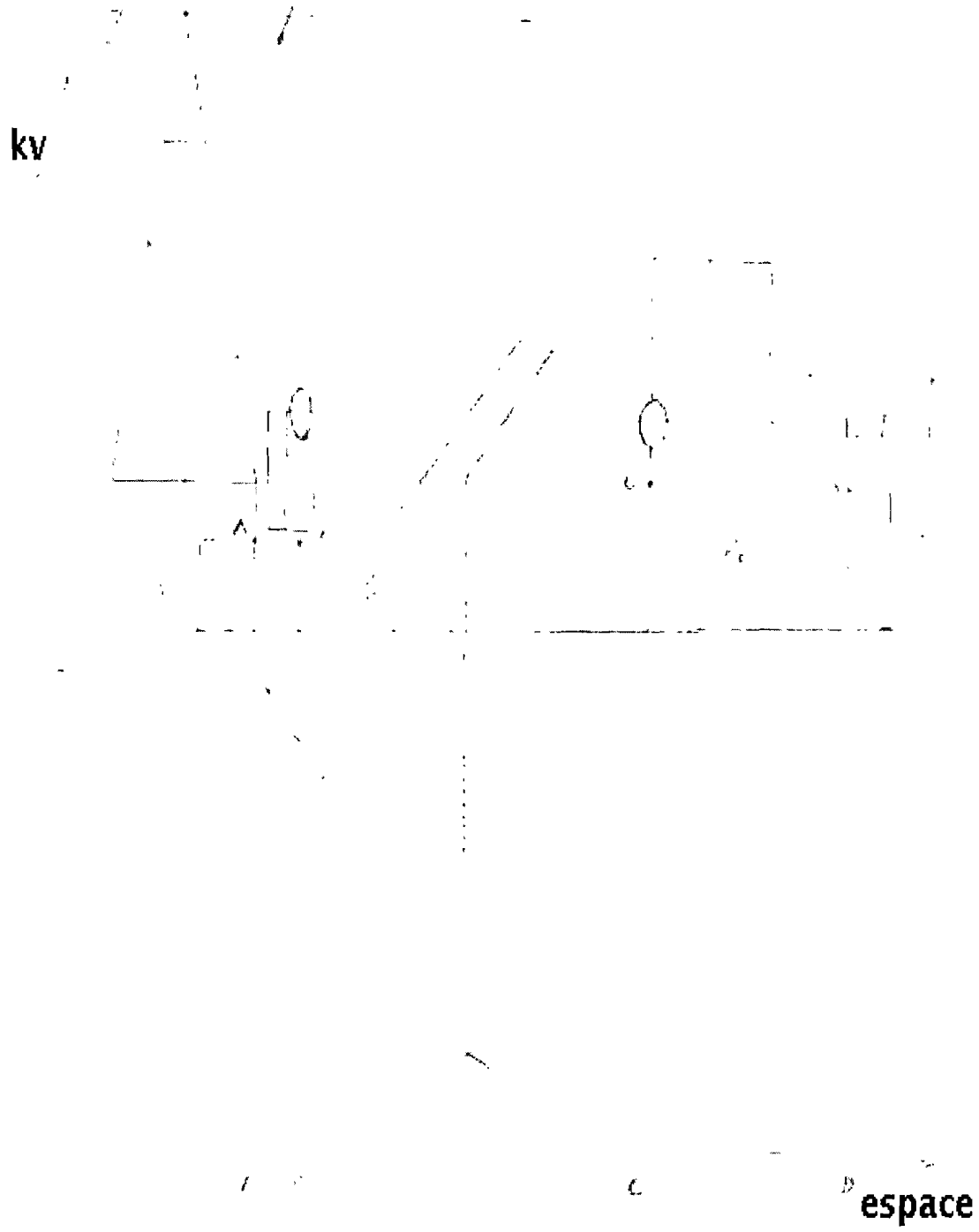


Figure 1.2 : Remontée de potentiel par terre

Légende :

: Condensateur équivalent entre conducteurs actifs et enveloppe isolante

: Conductance équivalente entre conducteurs actifs et enveloppe isolante

Z_A : Impédance entre le pylône support des lignes aériennes et la terre
Z_B : Impédance entre l'extrémité (origine) du câble et la terre
Z_C : Impédance entre l'extrémité (fin) du câble et la terre
Z_D : Impédance entre les équipements de télécommunication et la terre
ET : Equipement de Télécommunication

Sur la figure précédente (figure 1.2), les couplages à la terre pour les points A et B d'une part, et pour les points C et D d'autre part, sont proches (quelques dizaines de mètres), tandis que la distance entre les points B et C est de plusieurs kilomètres. Au moment de l'écoulement du courant de défaut à la terre, la différence de potentielle longitudinale entre les points A et D va être voisine de celle de B et C .Le câble possède une capacité entre conducteurs et enveloppe uniformément répartie que l'on représente pour moitié à chaque extrémité, de même qu'une infinité de conductances représentées également à chaque extrémité (celles-ci sont de très grandes valeurs et interviennent peu).

Il apparaît donc au borne de chaque capacité représentée, une tension $U_{BC}/2$ et celle-ci charge la capacité avec un courant qui a une variation di/dt. Ce courant de charge se retrouve sur les conducteurs actifs. Les phénomènes sont en réalité forts et complexes car chaque di/dt que ce soit dans la terre, dans la gaine ou dans les capacités a une influence sous forme inductive. Il en résulte le passage d'une surtension sur les conducteurs actifs et celle-ci est souvent appelée improprement « remontée de terre».

Pour ce qui est des surtensions résultant des charges électrostatiques, considérons par exemple un nuage orageux chargé négativement. Ce dernier est à l'origine d'un champ électrique dont les lignes de force rejoignent directement la terre. La figure suivante (figure 1. 3), montre une ligne électrique bien isolée intercalée entre le nuage et la terre et cette dernière déforme les lignes de force du champ électrique et des charges égales et de signe contraire à celle des nuages se concentrent sur la ligne dans la zone voisine du nuage.

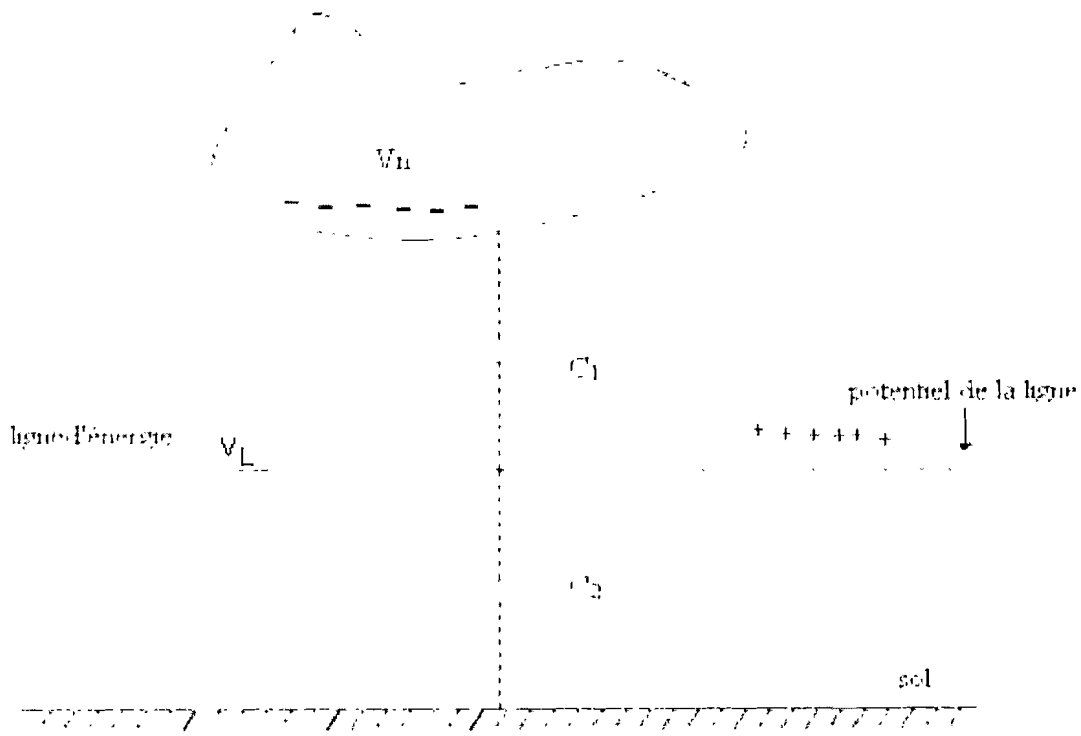


Figure 1.3 : Ligne électrique isolée intercalée entre le nuage et la terre

Si nous désignons par C_1 et C_2 les capacités nuage-ligne et ligne-sol et que nous désignons V_n et V_L les potentiels respectifs du nuage et de la ligne on peut écrire :

$$(V_n - V_L)\cdot C_1 = V_L \cdot C_2 \quad [1] \qquad (1.1)$$

d'où

$$V_L = \frac{C_1}{C_1 + C_2}\cdot V_n \qquad (1.2)$$

Comme C_1 est faible par rapport à C_2, V_L reste modérée et n'atteint que très rarement 100KV.

En abordant les surtensions résultant des coups de foudre directs, on peut saisir que lorsque le champ électrique dû à des nuages électrisés dépasse 500kV/m, une décharge se produit entre le nuage et le sol : il s'agit d'un coup de foudre. Les courants de décharge ont des intensités maximales qui varient de quelques dizaines à quelques centaines de kilo- ampères, mais dont la valeur moyenne est voisine de 50kA.

Lorsqu'un coup de foudre atteint un conducteur de phase d'une ligne électrique, la tension correspondante au courant de décharge I a pour valeur transitoire :

$$U = \frac{Z_C . I}{2} \quad \text{mesurée en V} \qquad (1.3)$$

Avec : Zc : l'impédance caractéristique ou l'impédance d'onde de la ligne.

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{mesurée en } \Omega \qquad (1.4)$$

Avec : L : inductance linéaire de la ligne.
C : capacité linéaire de la ligne.

Lorsqu'un coup de foudre atteint un conducteur de terre ou un support de ligne électrique, la surtension qui prend naissance est proportionnelle à la résistance de terre ; si cette dernière est importante, un amorçage peut se produire aux bornes des isolateurs. Les lignes moyennes tensions sont particulièrement sujettes à ces amorçages car la tension qui se développe aux bornes des isolateurs pour une résistance de terre de 20Ω du support est :

$$U = 20 \times 50 \cdot 10^3 = 1000kV$$

[1] = J FAVAUD, Fonctionnement et protection des réseaux de distribution, Paris, Centre de perfectionnement de Nanterre, 1967, p. 578

Les surtensions dues à la foudre sur une ligne électrique ont la forme représentée par la figure suivante ; la durée du front t_1 est de quelques millisecondes alors que la durée de décroissance jusqu'à la moitié de l'amplitude varie de 20 à 200millisecondes.

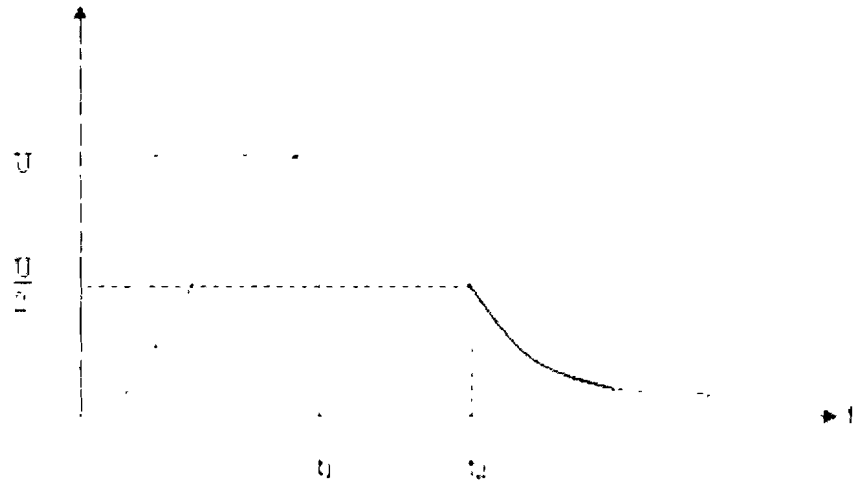


Figure 1.4 : forme de surtension foudre sur une ligne électrique

Si on considère un coup de foudre direct sur des masses métalliques ce qui est le cas relativement fréquent car c'est le processus du paratonnerre sur une masse métallique avec des écoulements élevés à la terre ; la surtension est créée ,soit par rayonnement électromagnétique du pylône de la structure métallique ou éventuellement soit par la montée en potentiel de la masse métallique comme on va le voir sur le couplage inductif avec la remontée de potentiel, soit par le champ magnétique rayonné par l'éclair.

Avec les surtensions résultant d'un coup de foudre indirect, il faut mettre l'accent sur l'induction électromagnétique cette fois-ci, car il s'agit de la production de surtension la plus fréquente et la plus destructrice. Il est important de souligner que la connaissance dans ce domaine est extrêmement récente (1982) et que la compréhension des phénomènes est loin d'être complète.

L'induction électromagnétique engendrée par des champs magnétiques, par des variations des champs électriques, par variation de courant, est complexe. D'une manière générale, ce qu'il faut retenir, c'est la notion de temps car plus celui-ci est court, plus le processus est dangereux.

En effet, c'est la variation rapide qui engendre l'effet à distance et cela surprend ; c'est-à-dire qu'en d'autres termes, c'est l'électrodynamique. La loi d'Ohm (U=RI) ne s'applique plus, il ne s'agit que des équations différentielles introduisant les variations de grandeurs et nous sommes obligés d'insister sur la nouveauté de cette analyse.

Cependant, les ondes de choc à front raide (10kv/μs à 100kv/μs) n'existent pas sur les réseaux, qu'ils soient d'énergie ou de télécommunication, considérant que la résistance des conducteurs, l'inductance linéique, les capacités parasites atténuent ces fronts et leur font perdre la raideur avant qu'ils arrivent aux appareils électroniques. Il n'est absolument rien, car les variations de champ magnétique et de champ électrique se produisent sur une très grande surface autour et dans la zone orageuse. Ces variations se produisent donc tout près des habitations, en ville, etc. On peut illustrer la formule par :

$$U = L\frac{di}{dt} \qquad \text{mesurée en volts} \qquad (1.5)$$

Avec une inductance L très faible, nous suggérons un fait bien connu aux installateurs de paratonnerres en ce qui concerne la liaison du paratonnerre et la terre par le ruban de cuivre. D'abord, l'installateur est obligé de contourner les corniches : s'il s'agissait d'un câble classique, celui-ci épouserait naturellement la forme des corniches. Ensuite, dans le cas de la descente du paratonnerre, l'installateur prend soin de placer les corniches en posant les supports éloignant le câble de l'édifice. Essayons de comprendre que, généralement l'inductance de contournement est de l'ordre de 1μH. Cependant, lors de l'écoulement d'un courant de 100kA pendant 10μs, la différence de potentiel entre le sommet du paratonnerre et l'édifice peut atteindre 10kV. Donc, avec la formule (1.5), on a :

$$U = 10^{-6} \times \frac{100 \cdot 10^{3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 10000V \qquad (1.5)$$

Cette tension très élevée oblige l'installateur à éloigner son câble de la corniche pour éviter le claquage. La solution pratique est de pouvoir percer le balcon. La théorie d'installation des paratonnerres sera développée dans le chapitre concernant la protection contre les surtensions causées par la foudre où nous insisterons sur le type de paratonnerre à installer suivant les caractéristiques du milieu et l'implantation de l'édifice à protéger.

Par ailleurs, lors d'un écoulement du courant important de défaut à la terre dû à la foudre, au fonctionnement d'un paratonnerre, au fonctionnement d'un parafoudre sur une masse métallique (pylône) ; il se produit de différence de potentiel entre les différents points de la terre.

Si une prise de terre se trouve dans le gradient d'élévation, les masses des appareils reliées à cette dernière se trouvent portées à un potentiel élevé par rapport aux réseaux (énergie, télécommunication) qui ont un potentiel fixe. Ceci nous oblige de montrer l'influence du couplage par conduction dans le sol appelé aussi couplage résistive ou galvanique.

1.2.2.2. Couplage galvanique.

En cas de circulation de courant dans le sol, par exemple dans une électrode de terre, le courant se répartit uniformément dans un sol supposé homogène et semi-infini et on parle alors de densité de courant .En appliquant la loi d'Ohm, on a :

$$E = \rho \cdot J \quad \text{mesurée en V /m} \quad (1.6)$$

Avec E : champ électrique en V /m ;
ρ : résistivité du sol en Ωm
J : densité du courant électrique en A /m^2

Si on considère l'électrode de terre très petite ou hémisphérique on peut faire le raisonnement suivant :

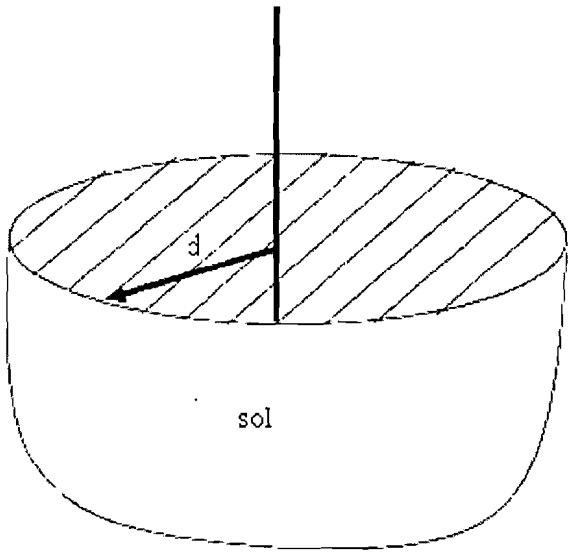


Figure 1.5 : L'électrode de terre dans le sol

En analysant la figure précédente on peut établir la relation suivante :

$$\int_S E.ds = \int_S J.\rho.ds \quad (1.7)$$

En considérant que E = -∂V/∂x, la résolution de cette intégrale démontre que :

$$V_d = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (1.8)$$

Avec d : la distance séparant l'électrode de terre et un point du sol éloigné

NB : V_d est le potentiel du sol mesurée à la distance **d** de l'électrode de terre en un point supposé très éloigné (U_0=0V). A partir de l'équation (1. 8), on peut calculer le potentiel du sol en fonction de la distance **d** comme le montre la figure 1 .6

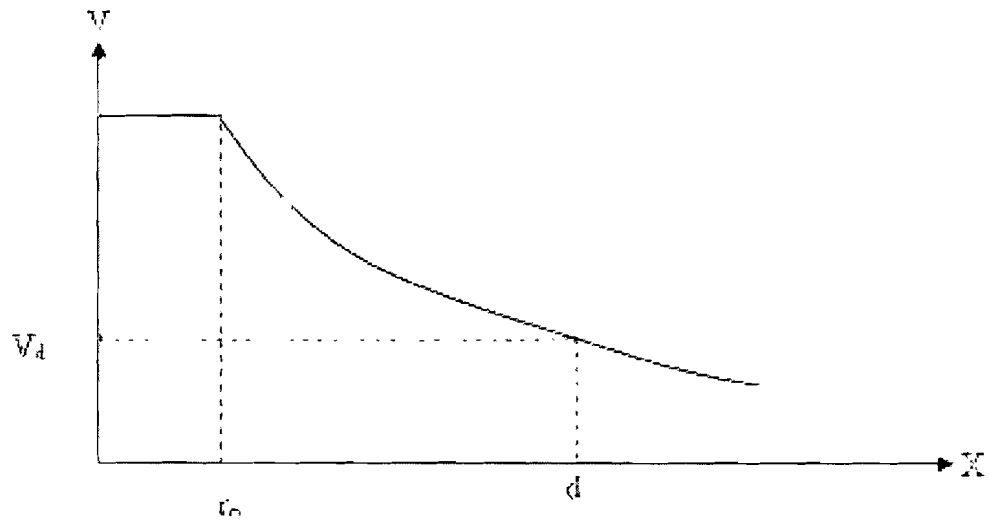
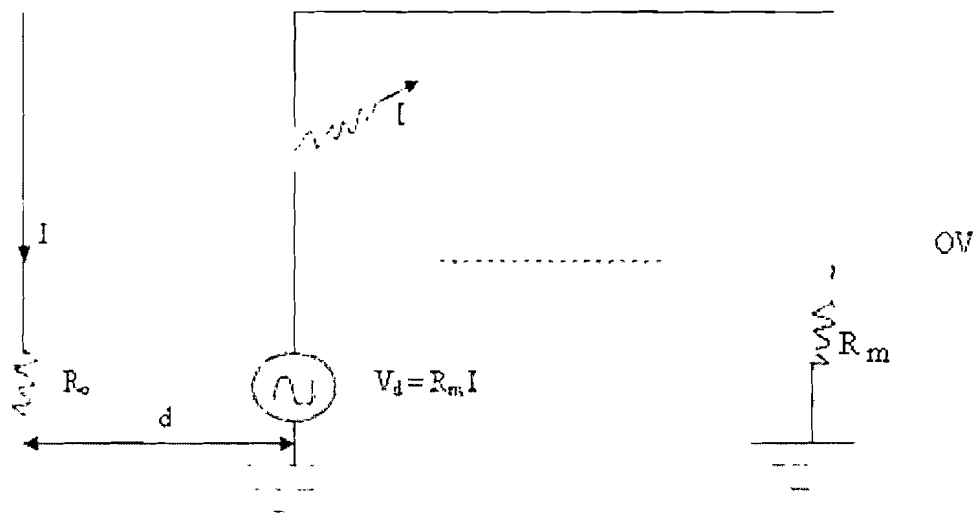


Figure 1.6 : Variation du potentiel sol en fonction de la distance

La figure suivante donne une idée sur la représentation du sol :



Avec ρ : résistivité du sol en Ωm ;

d : distance de l'électrode de terre à un point supposé très éloigné.

Si d = r (limite de l'électrode de terre à l'origine), la résistance mutuelle ou de couplage devient la résistance propre, soit :

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (1.10)$$

N.B : R est la valeur en Ω de la résistance de prise de terre hémisphérique de rayon r.

Ainsi, force est de constater avec ce schéma, le risque du potentiel de sol qui est la circulation de courant entre la prise de terre perturbée et une prise de terre éloignée. Cela veut dire que le risque n'existe que lorsqu'il y a des raccordements filanés métalliques entrant dans le système perturbé. En faisant allusion à la relation physique des composants symétriques, on sait que la composante homopolaire intervient dans le calcul du courant homopolaire de défaut et dans tous les problèmes d'induction entre les lignes de transport d'énergie et les lignes de télécommunications et ceci nous pousse à affronter le couplage par induction magnétique.

1.2.2.3. Couplage par induction magnétique

Le problème fondamental est assez complexe lorsqu'une ligne d'énergie électrique emprunte une voie parallèle à une ligne de télécommunication. Mais en ce qui nous concerne, nous nous contenterons de faire une approche simplifiée du phénomène d'induction magnétique.

L'induction magnétique c'est l'apparition d'une force électromotrice induite (FEM) sur un conducteur perturbé qu'il soit aérien ou souterrain.

Sachant que : $FEM = -j \cdot \omega \cdot \phi = -j \cdot \omega \cdot B \cdot S = -j \cdot M \cdot \omega \cdot I$ (1.12)

Désignons par : $Z_m = -j \cdot M \cdot \omega$ on a : FEM = Z_m.I (1.13)

PS : Z_m est l'impédance de couplage ou mutuelle.

Les calculs théoriques mettent en évidence que la surface à prendre en considération est la surface longitudinale séparant les lignes perturbatrices et perturbées ; c'est pourquoi on parle d'une force électromotrice longitudinale induite (FEMLI).

$$FEMLI = M.L.\omega.I \text{ mesurée en volts} \quad (1.14)$$

I.2.3. Aperçu sur les effets des surtensions

I.2.3.1. Notion sur les claquages

Le phénomène de claquage se produit chaque fois qu'une tension dépasse la tension d'isolement. Très souvent, le claquage se réalise entre un conducteur actif et des masses métalliques reliées à la terre. Le claquage particulier est celui dans l'air qui se manifeste par l'amorçage d'un arc mais conformément aux conditions d'obtention du phénomène de claquage ; il faut absolument avoir le dépassement de la tension d'isolement de l'air.

Très souvent, l'étude des essais sur les phénomènes de claquages a prouvé que les tensions d'isolement et de claquages sont nécessairement supérieures à 1500V mais ces phénomènes sont très facilement identifiables si on utilise des systèmes de protection très efficaces.

I.2.3.2. Destruction des composants électroniques

Les techniques de fabrication des composants électroniques actuels font que ces derniers sont de plus en plus performants, rapides, microscopiques et de plus en plus sensibles aux surtensions. La sensibilité aux fronts raides se situe entre 5000V/μs et100000V/μs.

Pour simplifier, l'évolution de la sensibilité des circuits actifs aux fronts raides est liée à l'augmentation de l'impédance des entrées. Ainsi, les transistors à effet de champ sont plus sensibles que les transistors bipolaires. Comme la surtension écoule son énergie en créant un courant ; lorsqu'elle rencontre une impédance élevée, elle ne peut pas créer le courant nécessaire à l'amortissement du transistor et elle s'écoule donc en totalité à la première jonction qu'elle rencontre.

Ces jonctions ont des dimensions de plus en plus petites (micromètres) et leurs tensions de claquage ont considérablement diminué ces dernières années. Ces explications sont simplistes et la réalité est beaucoup plus complexe, mais elles permettent aux concepteurs de prévoir certains phénomènes.

En particulier, nous pouvons expliquer le fait qu'une surtension par rapport à la terre est dangereuse pour tout appareil connecté au seul et unique fil qui véhicule la surtension, même si l'appareil en question n'est pas connecté à la terre, la surtension va écouler son énergie en traversant les jonctions qu'elle va détruire et en créant un courant de charge de la masse de l'appareil comme dans un condensateur et c'est le même phénomène qui se produit sur les imperfections de fabrication qui mettent tout composant électronique actif à un taux de défaut décroissant durant les cinq cents premières heures. Pour les composants de haute impédance, la fragilisation ne se fait pas tout à fait de la même manière. La description précédente concernant les composants de puissance donne tout de même une idée de processus.

CHAPITRE II : PHENOMENE DE CHARGE ET DE DECHARGE ATMOSPHERIQUE

2.1. Introduction

Dans certaines conditions atmosphériques (humidité, chaleur, etc.), on assiste à la formation des nuages caractéristiques des conditions orageuses. Ces derniers, généralement de type **cumulonimbus** en forme d'enclume, sont constituées par des gouttes d'eau à leur partie inférieure et par des cristaux de glace à leur partie supérieure.

Sous l'effet des courants violents, une séparation des charges électriques de ces particules s'opère, qui aboutit à une charge positive de la partie supérieure de ces nuages tandis que leur base est chargée négativement.

Lorsqu'un nuage orageux se forme au dessus du sol, il constitue avec ce dernier un large dipôle. Sous l'influence des charges négatives de la base du nuage, le léger champ atmosphérique existant en permanence au niveau du sol s'inverse et augmente rapidement pour atteindre des valeurs de 10 à15kV/m et une décharge au sol est alors imminente.

La première phase de coup de foudre est une prédécharge, faiblement lumineuse (traceur) se formant au sein du nuage et progressant par bonds de quelques dizaines de mètres vers le sol. Simultanément, dès que le champ électrique atmosphérique au niveau du sol augmente, on assiste à la création spontanée à la pointe de toute aspérité (pylône, paratonnerre, etc.) une ionisation naturelle manifestée sous forme d'effluves électriques ; c'est l'effet de pointe ou effet corona.

Dès que le «traceur» s'approche du sol, l'ionisation se renforce, et se transforme en décharges ascendantes .Lorsqu'une de ces décharges ascendantes et le «traceur» par bonds se rejoignent, un canal conducteur est créé et permet l'écoulement du courant foudre proprement dit : C'est l'éclair.

Le point de départ de la décharge ascendante déterminera donc le point d'impact de l'éclair. D'une manière générale, le phénomène de charge et de décharge atmosphérique connu sous le nom de foudre est un phénomène plus ou moins complexe, mais nous tenons de détailler le processus foudre dans ce chapitre afin de saisir réellement les moyens utilisées pour le contrôle et la protection contre ces charges et décharges atmosphériques.

2 .2. Etude du processus de l'électricité atmosphérique

Le phénomène de charge et de décharge atmosphérique est un processus de l'électricité atmosphérique dont les causes peuvent être soit par le beau temps, soit par temps d'orage.

2.2.1. Causes de l'électricité atmosphérique par beau temps

Par beau temps on rencontre deux phénomènes, l'un d'influence statique appelé charge et l'autre d'influence dynamique appelé conduction. Le phénomène d'influence statique (charge) est produit par la couche ionisée de Heaviside qui se trouve à une altitude moyenne d'environ 100km du sol. Ainsi, il s'avère nécessaire de calculer la capacité entre la couche ionisée de Heaviside générée par le vent solaire et la surface de la terre en tenant compte que l'atmosphère est un conducteur sphérique.

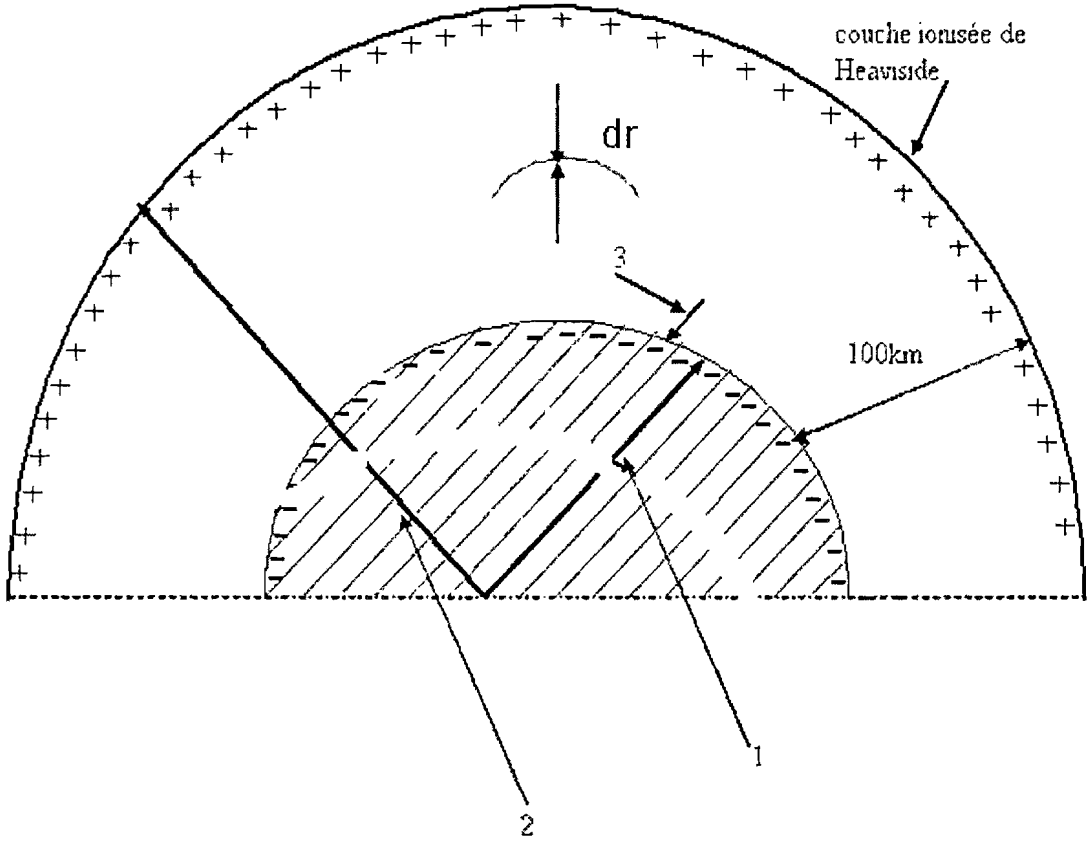


Figure 2.1 : Influence de la couche ionisée de HEAVISIDE

N.B : 1 = Rayon moyen de la terre R_T
2 = Rayon moyen de la couche ionisée de HEAVISIDE R_H
3 = Champ électrique au niveau de la terre E_T
dr = variation du rayon de la terre

En utilisant le théorème de Gauss appliqué à la surface d'une sphère de rayon R ; où $R_T < R < R_H$, on peut obtenir la valeur de la différence de potentiel entre la couche ionisée de Heaviside et la terre calculée par la formule suivante :

$$U = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}\left[\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_H}\right] \quad (2.1)$$

Avec : U : différence de potentiel entre la couche ionisée de Heaviside et la terre mesurée en volts ;

Q : charge totale en coulomb entre la couche ionisée de Heaviside et la terre ;

ε_0: Perméabilité du vide (air) ;

R_T : Rayon moyen de la terre (6367 Km) ;

R_H : Rayon moyen de la couche ionisée de Heaviside (6467Km).

Sachant qu'il existe une relation entre la différence de potentiel est la charge on peut en déduire que :

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_H}} \quad (2.2)$$

Le phénomène dynamique par beau temps appelé conduction atmosphérique est produit par la présence d'ions positifs et négatifs dus aux rayonnements cosmique .sous l'action du champs électrique normal E_T à la surface de la terre qui est de l'ordre de 100 à 400V /m, les ions se déplacent et donnent naissance à un courant continu I dirigé vers la terre et sa densité est donnée par la formule suivante :

$$J = v_+.n_+.q_+ + v_-.n_-.q_- = (\mu_+.n_+.q_+ + \mu_-.n_-.q_-) = (\sigma_+ + \sigma_-)E \qquad \text{en A /m}^2 \quad (2.3)$$

Avec : J : densité du courant de conduction en A/m^2 ;

$V_{+,-}$: vitesse des ions positifs ou négatifs en m/s ;

$n_{+,-}$: densité des ions négatifs ou positifs au niveau du sol =80 à 500 $.10^6$ $/m^3$;

$q_{+,-}$: charge d'un ion positif ou négatif qui est égal à 1,6 $.10^{-19}$C ;

$\mu_{+,-}$: mobilité des ions négatifs ou positifs ;

$\sigma_{+,-}$: conductivité en S/m ;

E : champ électrique en V/m.

N.B La conductivité augmente lorsque l'altitude augmente .Ce phénomène est dû à la présence de rayonnements cosmiques plus intenses.

En pratique, on constate que la charge totale à la surface de la terre se maintient en moyenne à une valeur proche de zéro. Néanmoins on pourrait prévoir un calcul qui ne tiendrait compte des phénomènes de conduction. La présence des cumulonimbus (nuages orages) compense en partie la charge positive à la surface du globe terrestre.

2.2.2. Méthodes de mesures des champs électriques atmosphériques

Pour mesurer les champs électriques atmosphériques, deux méthodes sont utilisées à savoir la méthode directe et la méthode indirecte. La méthode directe consiste à déterminer le champ électrique E_T à la surface du sol en mesurant la différence de potentiel entre un point d'altitude connue A et la terre B aux moyen d'un voltmètre électrostatique.

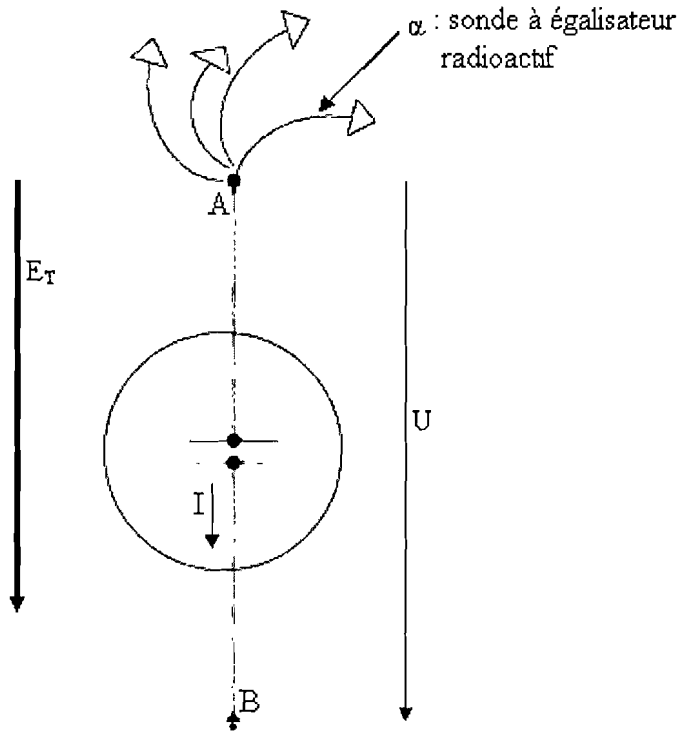


Figure 2.2 : Méthode directe de mesure des champs électriques atmosphériques

Généralement, pour mesurer les champs électriques atmosphériques au cas où il fait beau, on fait recours à une substance émettrice de particule α (noyau d'hélium ${}^{4}_{2}H_{e}$) lourdes et peu pénétrantes générées par des substances telles que l'uranium.

L'égalisateur radioactif a pour but d'augmenter localement la conductivité afin de délivrer un courant de mesure I suffisant, ou en d'autres termes, de permettre à la sonde d'acquérir le potentiel du point auquel elle se trouve :

$$U = V_A - V_B = \int_A^B E_T dr \quad \text{mesurée en volt} \qquad (2.4)$$

d'où $E_T = \dfrac{U}{\overline{AB}}$ mesurée en V/m (2.5)

La méthode indirecte dite méthode de Wilson consiste à déterminer le champ électrique E_{Tm} à la surface du sol, en mesurant les charges électriques Q à la surface de celui-ci.

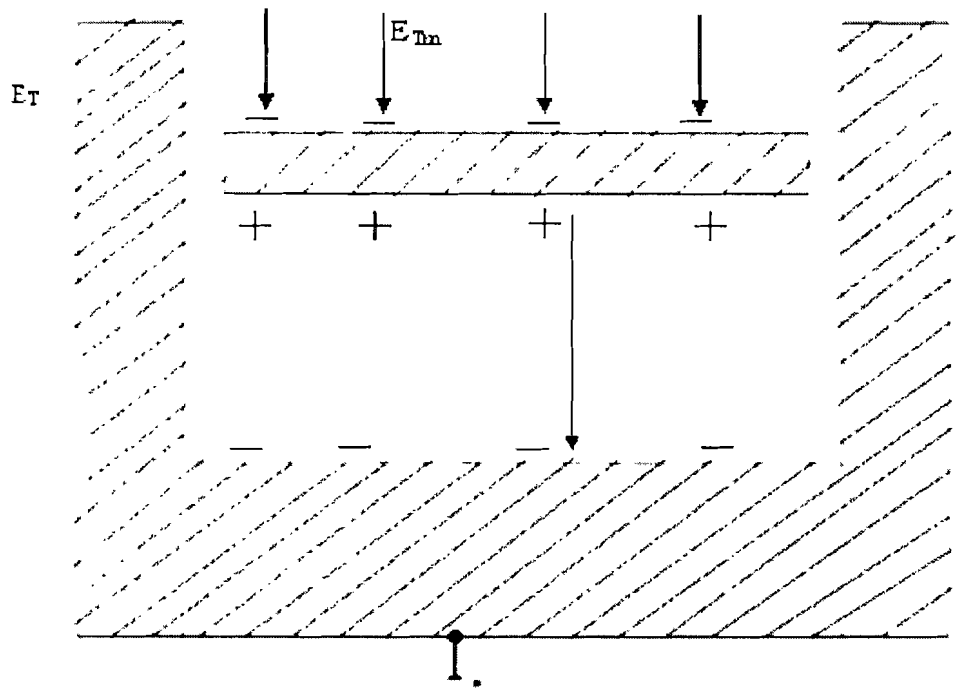


Figure 2.3 : Méthode de Wilson pour mesurer le champ atmosphère

$$E_{Tm} = \frac{C.U}{\varepsilon_0.S} \quad \text{mesurée en V/m} \qquad (2.6)$$

Avec : C : capacité de l'électrode de surface S, contre le boîtier mise à la terre.
E_{Tm} : champ électrique à la surface du sol ;
U : différence de potentiel régnant dans le boîtier ;
ε_0 : perméabilité du vide.

2.2.3. Causes de l'électricité atmosphérique par temps d'orage

Comme dans le cas de l'électricité atmosphérique par beau temps, on distingue par temps orageux deux phénomènes, à savoir les phénomènes statiques et les phénomènes dynamiques. Les phénomènes de charge statique par temps orageux regroupent les mécanismes qui sont à la base de la séparation des charges électriques.

La théorie microscopique qui se préoccupe de la nature des précipitations et se base sur le phénomène de polarisation permet de pouvoir distinguer trois causes essentielles de la charge des nuages à savoir la chute de particule d'eau dans un courant d'air ascendant, le givrage et le clivage par congélation.

Lorsqu'une chute de particule d'eau rencontre un courant d'air ascendant (phénomène qui a été étudié par Lenard, Simpson et Wilson), elle provoque par phénomène de balloélectricité une charge de particules d'eau neutre. Mais il est bien de souligner que ce phénomène ne peut se produire que si réellement la température est supérieure à 0°c.

Néanmoins, pour que l'ionisation positive de la goutte d'eau ne soit pas neutralisée par les ions négatifs il faut que la vitesse des ions positifs soit supérieure à la vitesse des ions négatifs c'est à dire $V_+ \geq V_-$ et comme $V_- = \mu_- E_i$ mesurée en m/s (2.7), une fois que la condition $V_+ \geq V_-$ est remplie, c'est la polarisation du nuage qui s'en suit comme le montre la figure suivante :

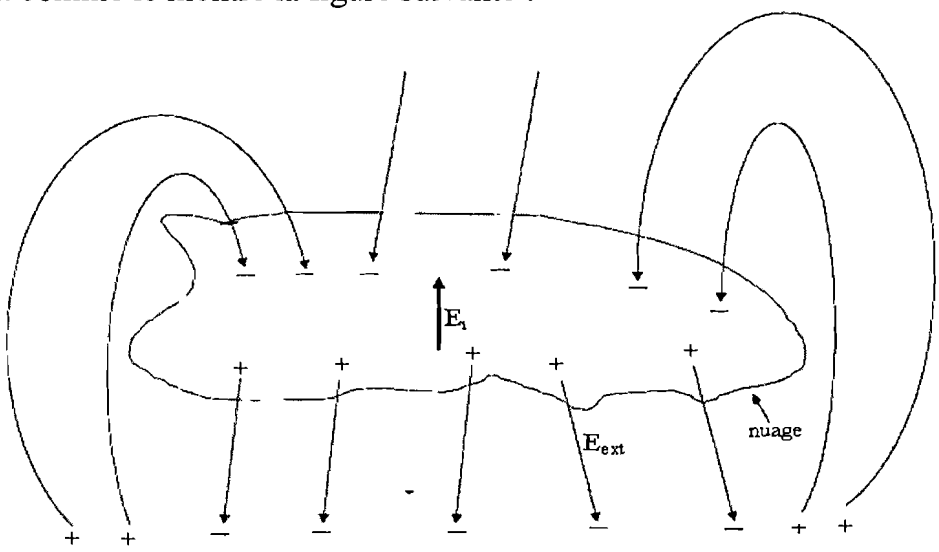


Figure 2.4 : Polarisation du nuage lors de la chute des particules d'eau

La présence des cumulonimbus (nuages orages) compense en partie la charge positive à la surface du globe terrestre.

L'autre cause essentielle de la charge des nuages est le givrage. Les conditions atmosphériques pour que le phénomène de givrage apparaisse sont les suivantes :

- eau chargée de NaCl et $CaCO_3$ (donc ayant effectuée le parcours au dessus des mers) ;
- la température locale inférieure à moins quinze degré Célicius.

Lorsque les particules d'eau contenant du chlorure de sodium et du carbonate de calcium entrent en contact avec une plaque de cuivre ayant une température inférieure à moins quinze degré Célicius, l'apparition de glace est accompagnée d'une dissociation électrique faisant apparaître des charges positives au niveau de la glace et des charges négatives au niveau de la plaque du cuivre. La figure suivante montre la polarisation du nuage dans le cas du givrage.

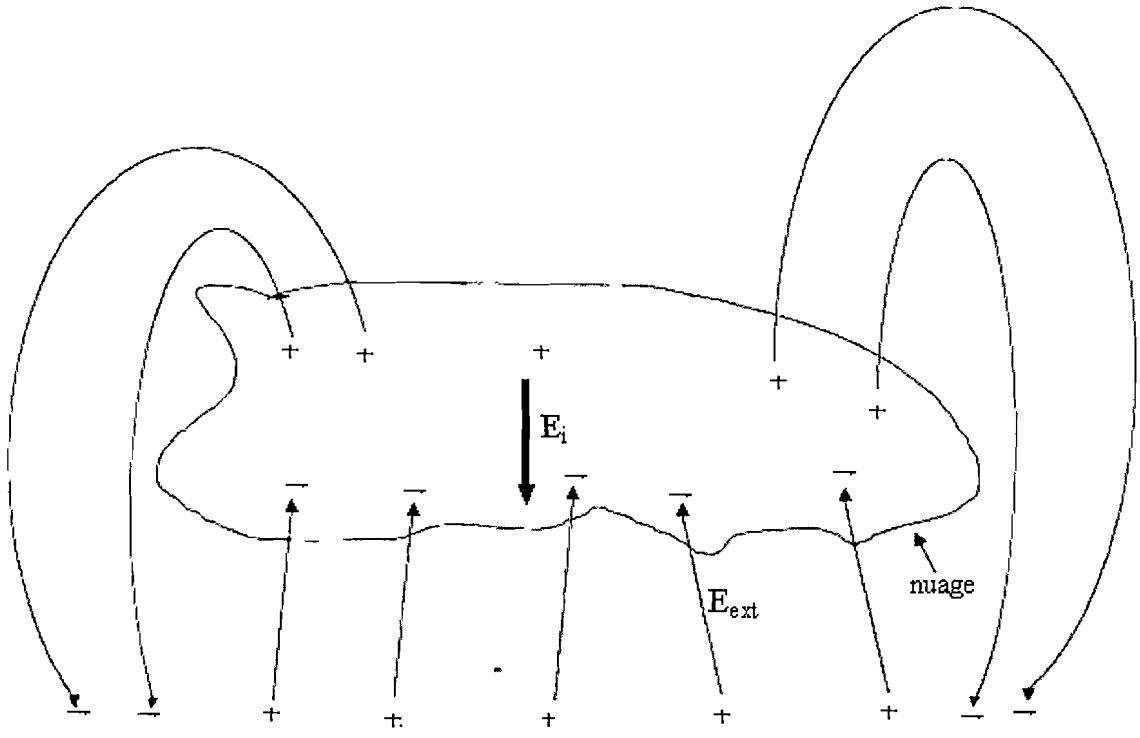


Figure 2.5 : polarisation du nuage dans le cas de congélation

La dernière cause essentielle de la charge du nuage est le clivage des particules de glace. LATHON et MASON ont démontré que l'abaissement de la température sur la face externe d'un cristal de glace provoque des contraintes mécaniques entraînant un clivage.

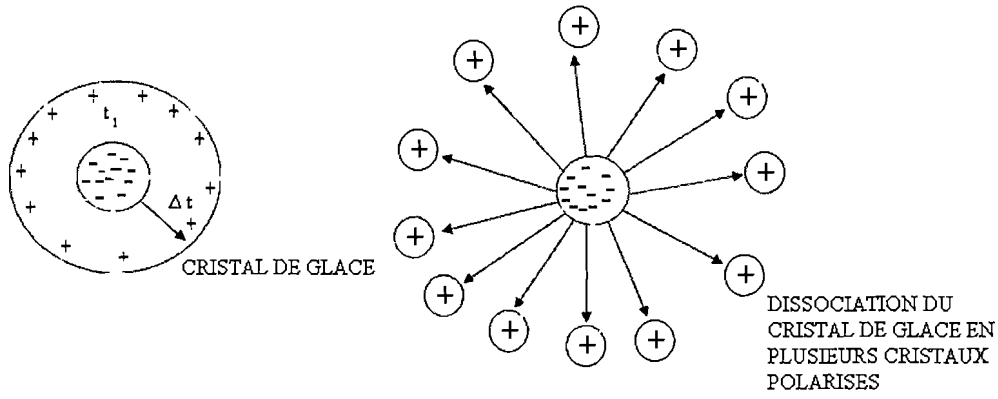


Figure 2.6 : clivage d'un cristal de glace

Toutefois, ce sont des contraintes mécaniques de clivage qui provoquent la dissociation du cristal de glace en cristaux polarisés et la polarisation du nuage dans le cas de clivage est identique à la polarisation du nuage dans le cas de congélation.

2.2.4. Mécanismes de la décharge orageuse (foudre)

Une fois alors que la charge et la polarisation des nuages sont terminées, il s'en suit le phénomène de décharge orageuse qui apparaît si les champs électriques externes ou internes aux nuages dépassent des valeurs limites.

Les décharges de la foudre observées se répartissent souvent en trois types de décharges à savoir :

- les décharges nuage-terre et réciproquement ;
- les décharges entre nuages ;
- les décharges à l'intérieur des nuages.

Dans la suite, nous avons développé fortement les décharges entre nuage et la terre en considérant que le phénomène de coup de foudre comporte deux grandes phases à savoir la première phase qui est le développement d'une prédécharge de foudre(non visible) et la deuxième phase est réellement l'amorçage d'arc empruntant le canal ionisé par la décharge.

2.2.5. Etude du développement de la prédécharge foudre

L'utilisation des caméras photographiques a permis d'observer le développement de la prédécharge foudre dans le temps et dans l'espace comme on peut le voir dans les figures suivantes :

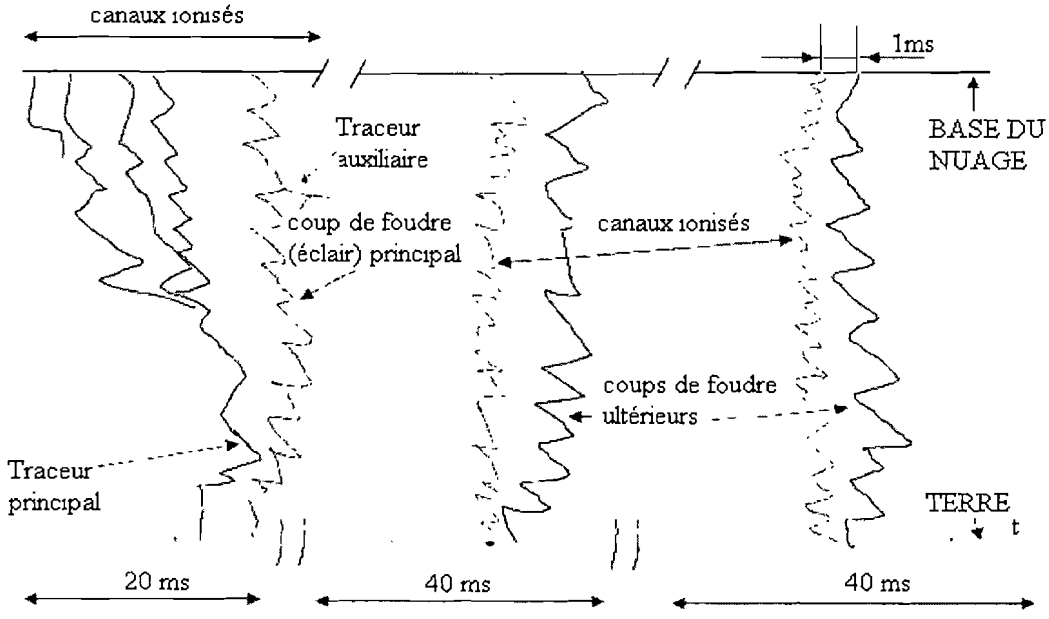


Figure 2.7.a : Coup de foudre descendant (terrain plat)

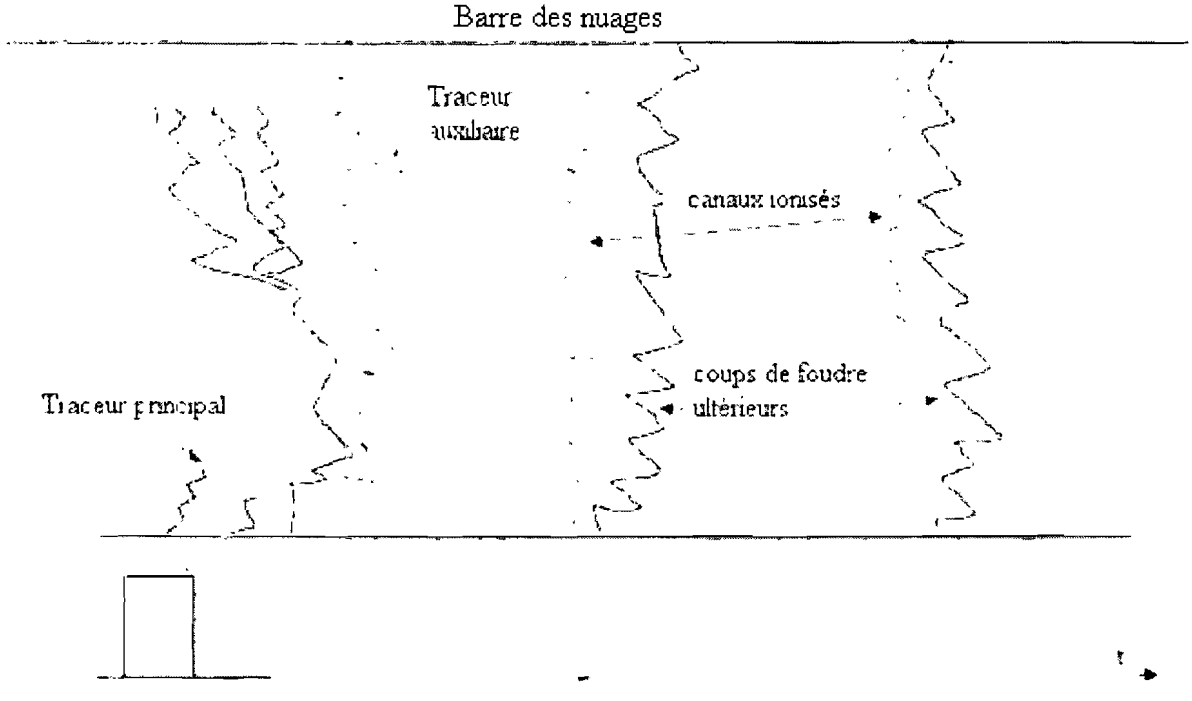


Figure 2.7.b : Coup de foudre ascendant (terrains montagneux)

Ainsi, l'apparition d'un canal ionisé appelé TRACEUR PAR BONDS a lieu sous l'effet du champ électrique élevé régnant sur l'électrode relativement la plus incurvée.

N.B : Ce canal ionisé est positif si l'électrode est positive ou négatif dans le cas contraire. Ce canal croît en direction de l'électrode la plus plane par bonds successifs se traduisant par un filament lumineux suivi de périodes de repos ou le filament s'éteint. La figure suivante relate le phénomène de la prédécharge foudre.

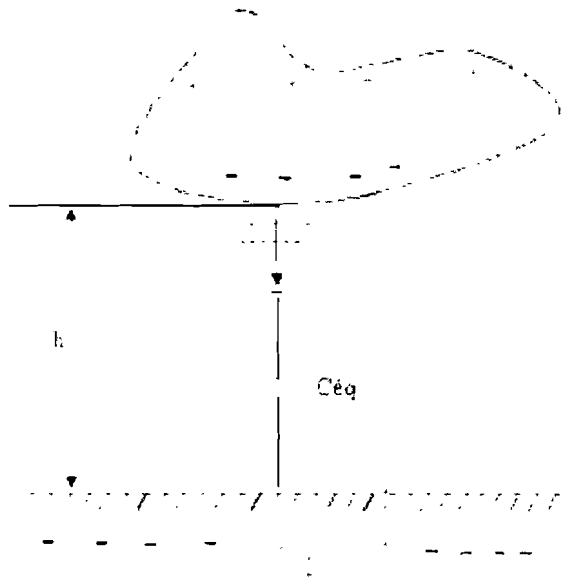


Figure 2.8:apparition d'un canal ionisé à la base du nuage en direction de la terre

La vitesse moyenne de développement du canal ionisé est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{L_P}{\Delta t} \quad \text{mesurée en m/s} \qquad (2.8)$$

Avec V : vitesse moyenne de développement du canal ionisé ;
L_P : longueur entre paliers qui est d'environ 50m

$\Delta t = 100\mu s$: le temps de repos.

$$V = \frac{50m}{100 \cdot 10^{-6} s} = 0{,}5 \cdot 10^{6} m/s = 500 Km/s$$

Le temps du développement du canal ionisé sera :

$$t = \frac{h}{V} \text{ mesuré en seconde} \qquad (2.9)$$

Avec t : le temps du développement du canal ionisé ;
h: la distance séparant la terre et le nuage qui est au environ de 2km ;
V : vitesse moyenne du développement du canal ionisé.

$$t = \frac{2km \cdot s}{500km} = 4ms$$

Cependant, ces valeurs sont explicatives car on remarque que la durée de développement du canal ionisé (phase invisible) est très grande par rapport à la durée de l'éclair dans le cas où celle-ci est évaluée à 4ms alors que la durée d'un seul éclair est de l'ordre de **200.10^{-6}s.**[1]

2.2.6. Notion sur la foudre ascendante et descendante

On définit une foudre ascendante, si le traceur principal prend son essor depuis le sol ; c'est un cas qui se présente souvent lorsque le sol présente des aspérités naturelles comme des collines des montagnes ou artificielles comme les bâtiments, les pylônes, etc.

De la même manière, on qualifie la foudre comme une foudre descendante si le traceur principal prend son essor depuis la base des nuages et dans la plupart des cas ce phénomène se rencontre généralement dans les plaines et sur les étendues d'eau.

Au moment de la rencontre du traceur principal et du traceur d'interception, il apparaît l'éclair si l'énergie contenue dans le nuage orageux est suffisante pour entretenir un canal de plasma. Ceci est dû au fait qu'aux pressions supérieures à1atmosphére le degré d'ionisation δ déterminé par la loi d'action dite de Saha devient très important.

$$p\frac{\delta^2}{1-\delta^2} = 2{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot \exp\left(\frac{-U_i \cdot e}{K \cdot T}\right) \qquad (2.10)$$

Avec δ : degré d'ionisation ;
P : pression
T : température à l'équilibre
U_i : potentiel d'ionisation du gaz ;
n : densité des molécules ioniques ;
K : constante de Boltzmann.

[1] w.w.w.technfoudre.com



Toutefois, l'éclair dont la durée est très brève c'est-à-dire entre 100 et 200microsecondes, contribue à décharger les nuages orageux, mais aussi à rééquilibrer les charges entre divers nuages (par influence). C'est la raison pour laquelle un éclair n'est pas unique, mais se réamorce plusieurs fois, voire plusieurs dizaines, en empruntant le canal fortement ionisé qui lui est offert jusqu'au rééquilibrage des charges.

En ce qui concerne la foudre nuage-terre-nuage qui est notre préoccupation, on définit quatre grandes catégories de foudre en fonction de l'origine du traceur principal et de sa polarité.

N.B : Le signe conventionnel du courant foudre découle des quatre catégories foudre représentées par les figures suivantes où v définit la vitesse de propagation du canal ionisé et i représente le courant de la foudre.

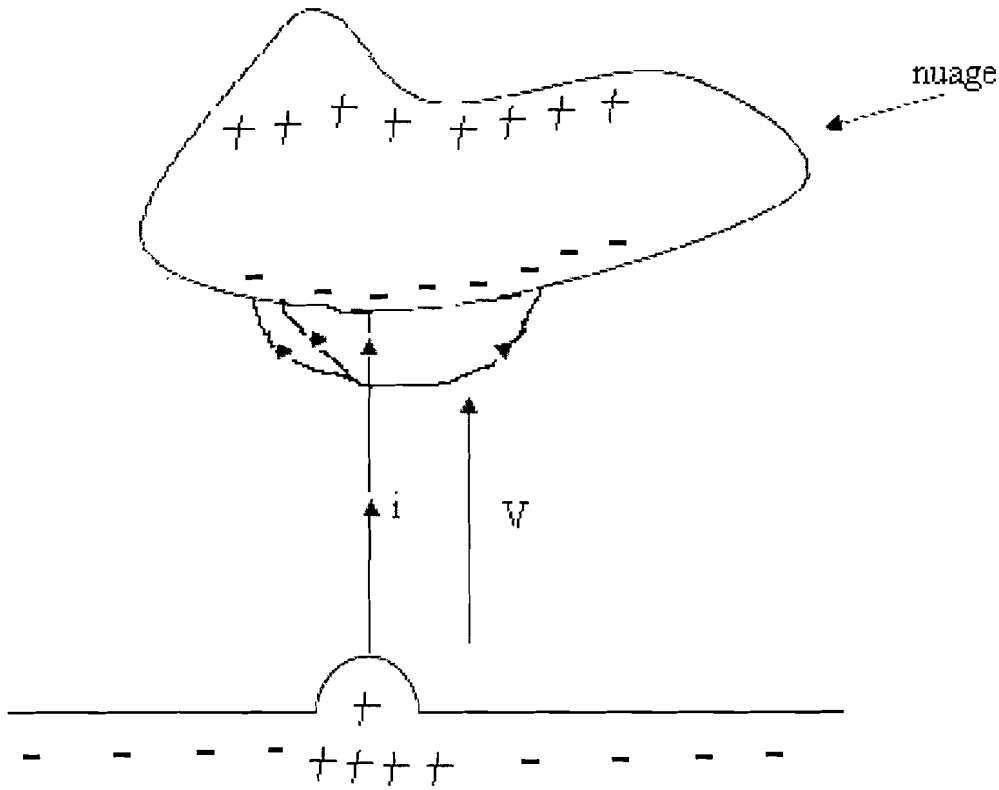


Figure 2.9 : foudre ascendante positive (canal ionisé positivement, courant foudre négatif)

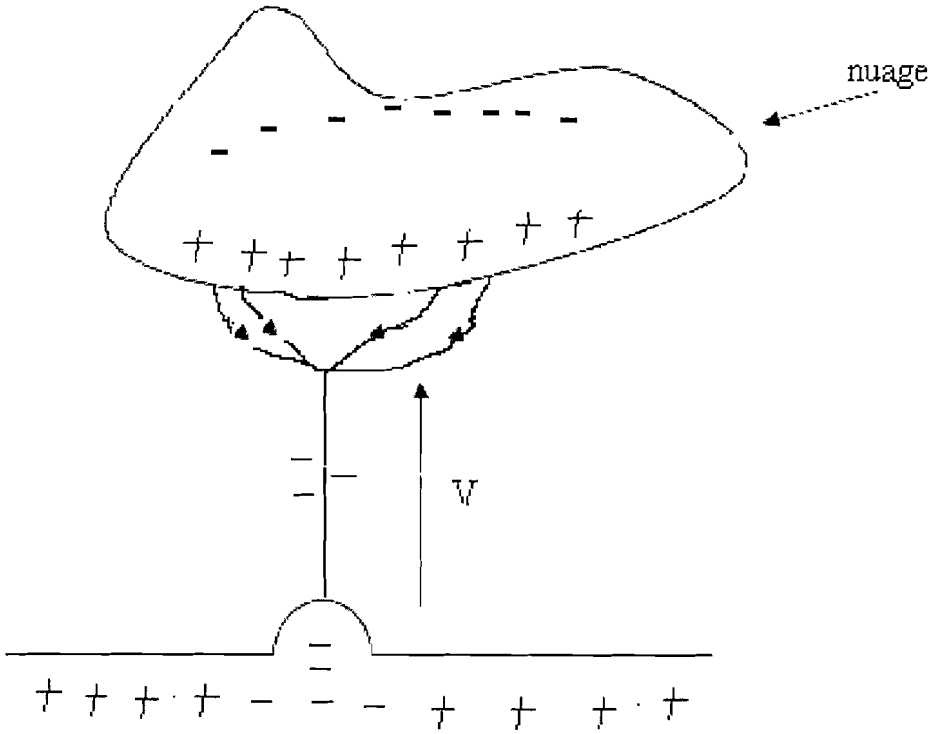


Figure 2.10 : foudre ascendante négative (canal ionisé négativement donc courant Foudre positif)

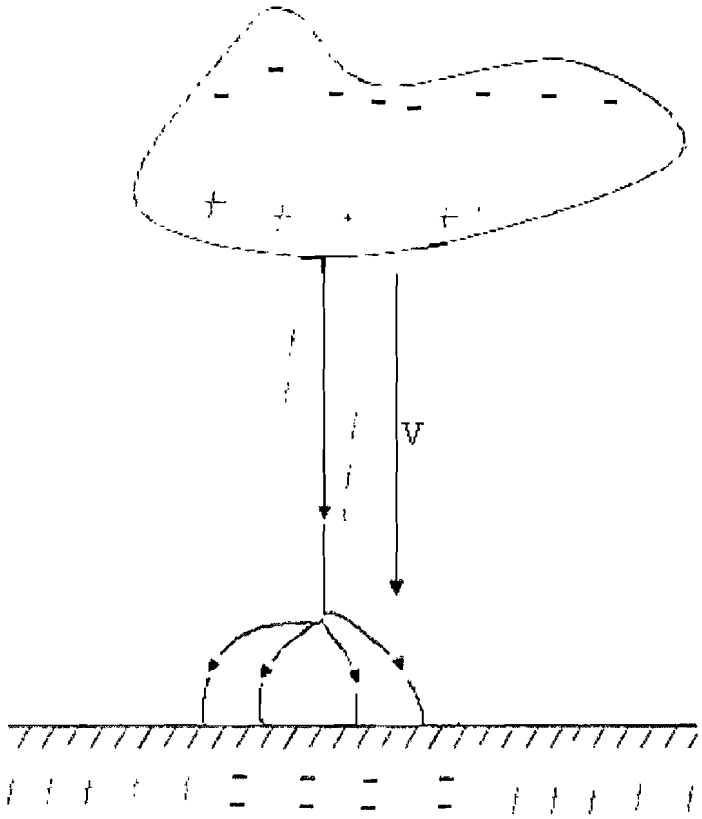


Figure 2.11 : foudre descendante positive (canal ionisé positivement donc courant foudre négatif)

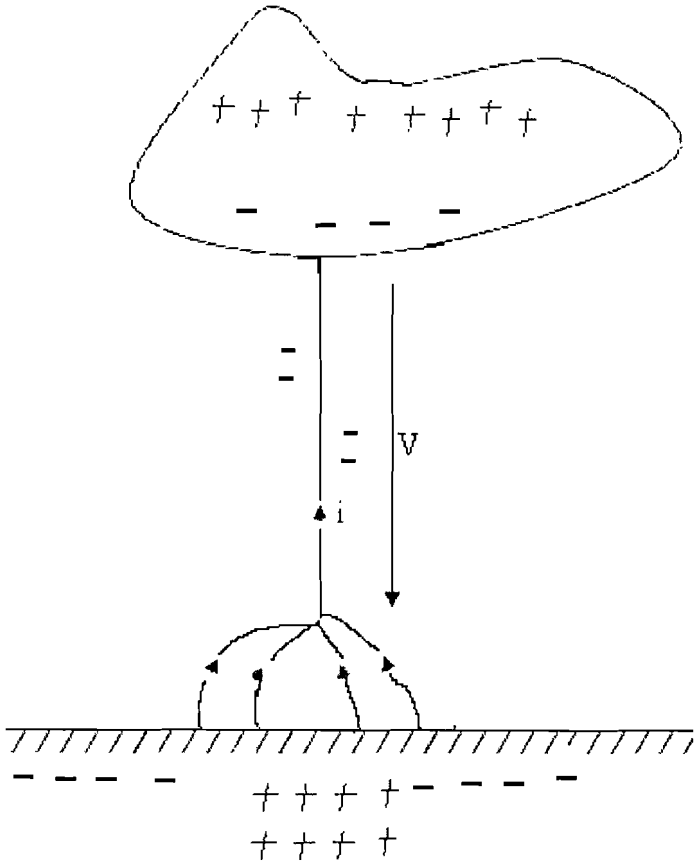


Figure 2.12 : foudre descendante négativement (canal ionisé négativement donc courant foudre positif)

2.2.7. Effets de la foudre

Les effets de la foudre sont liés aux caractéristiques du courant de la foudre et sont du type :

- thermique ;
- dynamique ;
- électromagnétique ;
- acoustique ;
- chimique ;
- rayonnement.

En rapport avec les effets thermiques de la foudre, l'intégration d'action permet de calculer l'énergie libérée dans une charge située au point de chute de la foudre si on connaît sa résistance équivalente et l'intégrale d'action est donnée par la relation suivante :

$$G = \int_{T_i}^{T_f} i^2 dt \qquad \text{mesurée en } A^2s \qquad (2.11)$$

Avec T_i : temps initial du phénomène ;
T_f : temps final du phénomène ;
i : courant de décharge de la foudre.
Avec cette formule, l'énergie libérée par le coup de foudre sera :

$$W = R \cdot G = R \int_{T_i}^{T_f} i^2 dt \qquad \text{mesurée en Joules} \qquad (2.12)$$

Avec : R : la résistance équivalente en ohms

Les effets dynamiques de la foudre sont dus aux efforts électrodynamiques importants régnant lors du passage d'un courant de foudre élevé et aux élévations de température, donc de pression dans le milieu concerné. Pour l'effet électromagnétique de la foudre, celui-ci génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (kHz à MHz) provoquant des perturbations radiophoniques.

Toutefois, les effets acoustiques de la foudre se manifestent par la génération d'une onde sonore cylindrique dont l'axe est le canal de la foudre. Par ailleurs, il faut noter aussi que la foudre contribue à la vie des hommes sur la terre car les expériences biologiques effectuées en 1953 par H Urey S Miller basées sur la mise en présence dans un ballon sous vide, de méthane, d'ammoniac, de la vapeur d'eau et d'hydrogène ont permis de démontrer que l'énergie fournie par une décharge électrique amorcée en permanence dans un milieu provoquait l'apparition d'acides aminés, éléments de base de grandes chaînes d'acides nucléiques à l'origine de toute vie sur la terre. De surcroît, il faut noter aussi la décharge électrique de l'éclair apporte une énergie suffisante pour que la relation chimique ait lieu à partir de l'oxygène de l'air (O_2) ;

$$O_2 + h \cdot v \rightarrow 2O$$

$$2O + 2O_2 \rightarrow 2O_3$$

Où : h est la constante de Planck ($6{,}63.10^{-34}$Js)
v est la fréquence de l'onde lumineuse.

La réaction chimique réalisée fait l'apparition d'ozone (o_3) dont l'odeur piquante Caractéristique accompagne toute décharge électrique.

CHAPITRE III. PERTURBATIONS DE LA FOUDRE SUR LE RESEAU DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION D'ENERGIE

3.1. Introduction

Lorsqu'un coup de foudre frappe un câble de garde ou un pylône du réseau de transport, une surtension de choc se propage sur la ligne. Le premier isolateur rencontré par l'onde de choc peut amorcer et par conséquent la ligne se trouve court-circuitée à la terre du pylône métallique.

Toutefois, la valeur de cette intensité de court –circuit en un point donné d'un réseau est fonction :

- de la nature des éléments qui constituent le réseau à savoir les alternateurs, les transformateurs, les lignes, les câbles, etc.
- de la structure du réseau ;
- du mode d'exploitation du réseau ;
- de la résistance du défaut ;
- du type de défaut à savoir les défauts triphasés, biphasés ou monophasés.

La formule (3.1) suivante permet de fixer l'idée sur la valeur de l'intensité du courant de défaut franc à la terre

$$I_O = \frac{U_n}{Z_O + Z_i + Z_d + 3R_{déf}} \qquad (3.1)$$

Z_0 = L'impédance homopolaire de la ligne
Z_i = L'impédance inverse de la ligne
Z_d = L'impédance directe de la ligne
$R_{déf}$ = Résistance de défaut

Immédiatement, après amorçage foudre, il se produit un courant de suite 50Hz dans le canal ionisé jusqu'au moment où le poste source déclenche (délai 20ms). En plus, sur le réseau de distribution lorsqu'il y a amorçage des éclateurs MT au poste de transformation ; un courant de suite 50HZ circule pendant le temps nécessaire à la disjonction de la ligne.

Ainsi, il s'ensuit immédiatement les phénomènes suivants :

- élévation du potentiel de sol dans le voisinage du poste MT.
- élévation du potentiel de la prise de terre des masses MT

Néanmoins, à la limite, il peut se produire des phénomènes secondaires sur les lignes BT comme couplage entre la terre des masses MT et la terre du neutre BT par conduction dans le sol mais aussi la rupture diélectrique (au niveau du sectionneur-disjoncteur BT) et passage du potentiel des masses MT sur les conducteurs BT.

Dans ce présent chapitre, nous allons essayer de montrer l'influence de l'impact foudre sur le réseau, de la résistance de défaut et sur les courants de défaut à la terre causés par le phénomène de conduction dans le sol ; ce qui est le facteur le plus important dans le manque de l'équipotentialité.

3. 2. Notion d'impédances des lignes

A l'inverse des transformateurs et des machines tournantes, les lignes et les câbles utilisés dans les réseaux de distribution possèdent une résistance souvent non négligeable devant leur réactance. Pour ces éléments du réseau, la résistance en courant alternatif diffère de la résistance en courant continu lorsque les conducteurs sont de section importante et ceci, en raison de deux phénomènes particuliers à savoir : l'effet de proximité des conducteurs et l'effet pelliculaire ou effet Kelvin.

Pour l'effet de proximité, plus la fréquence est élevée, plus les courants alternatifs ont tendance à choisir des chemins d'aller et de retour aussi voisins que possible. Ce phénomène s'observe lorsque le courant fait le retour par le sol et ce dernier suit le tracé de la ligne même si elle n'est pas rectiligne car l'effet de proximité des conducteurs se traduit par une densité de courant plus importante à la périphérie qu'au centre du conducteur, donc par une résistance apparente plus élevée que la résistance en courant continu.

En ce qui concerne l'effet pelliculaire, c'est un phénomène qui s'observe lorsque le champ magnétique variable dans le temps dû à un courant variable dans un conducteur créé par les courants de Foucault qui changent la répartition du courant à l'intérieur du conducteur et cette fois- ci la densité du courant devient plus forte en surface qu'en profondeur.

Cependant, chaque conducteur d'une ligne ou câble constitue avec les conducteurs voisins et la terre (ou gaine de plomb) un condensateur réparti sur toute la longueur de l'élément du réseau considéré. Les capacités phase- phase et particulièrement phase-terre qui en résultent jouent un rôle important dans l'exploitation, la répartition des défauts à la terre, fermeture de la boucle de défaut par les capacités homopolaires ou par les prises de terre du neutre.

3.2.1. Impédance des lignes aériennes

3.2.1.1. Impédance directe et inverse des lignes aériennes

Lors de l'introduction des composants symétriques, les éléments du réseau autres que les machines tournantes présentent au passage des courants équilibrés une impédance dont la valeur est indépendante de l'ordre de succession des phases.

En conséquence, les impédances directes et inverse des transformateurs, des lignes, des câbles et des récepteurs actifs sont identiques ; ce qui permet d'écrire :

$$Z_d = Z_i \qquad (3.1)$$

Avec : Z_d : impédance directe mesurée en Ohm
Z_i : impédance inverse mesurée en Ohm

La procédure pratique de mesurer l'impédance directe ou inverse d'une ligne triphasée s'effectue comme suit :

- on met en court-circuit les extrémités libres de la ligne ;
- on applique successivement une tension U monophasé entre les phases pris deux à deux ;
- on mesure les courants I, correspondant à chacun des trois circuits et on fait la moyenne.

Soit I la valeur de cette intensité, l'impédance directe ou inverse a pour valeur :

$$Z_d = Z_i = \frac{V}{2 \cdot I} \text{ [1]} \qquad \text{mesurée en } \Omega \qquad (3.2)$$

Toutes fois, la loi d'Ohm reste valable comme on peut le voir sur la figure 3.1 puisque le circuit sur lequel on effectue les mesures représente deux fois la longueur d'un conducteur de phase.

[1] = J FAVAUD, Fonctionnement et protection des réseaux de distribution, Paris, Centre de perfectionnement de Nanterre, 1967, p. 52

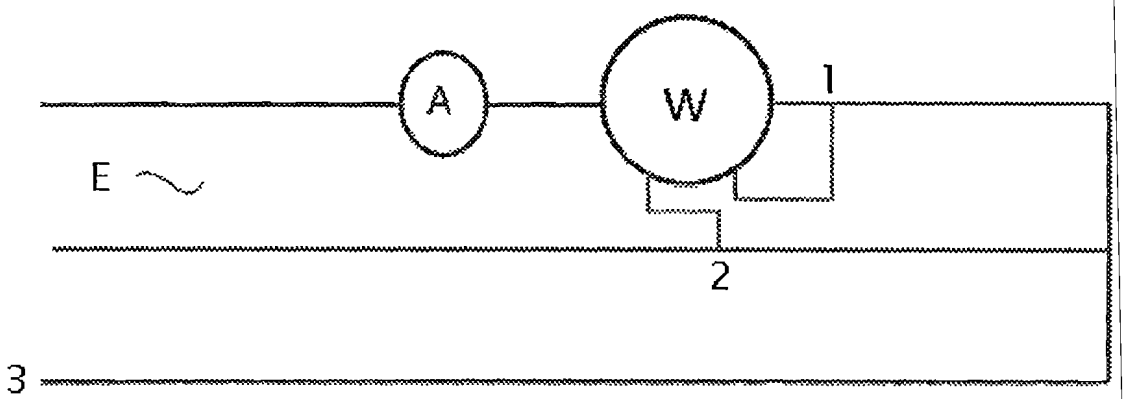


Figure3.1: Méthode de mesurer l'impédance directe ou inverse d'une ligne.

Néanmoins, il y a lieu de noter qu'en plaçant un wattmètre W sur le circuit dont on cherche à déterminer l'impédance, on peut trouver la résistance de la ligne et la réactance de la ligne avec les relations suivantes :

$$R = \frac{W}{2 \cdot I^2} \qquad (3.3)$$

$$L.\omega = \sqrt{Z_d^2 - R^2} \qquad (3.4)$$

La réactance d'une ligne dépend de la position relative de ses conducteurs dans l'espace et du rayon d'un conducteur. Soient 1, 2, et 3 les positions relatives des conducteurs d_{12}, d_{23}, et d_{13}, les distances respectives de ces conducteurs et r le rayon d'un conducteur comme on peut le voir sur la figure 3.2 suivante :

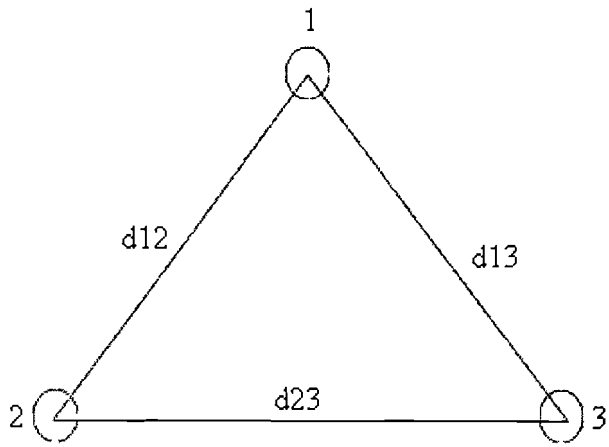


Figure 3.2 : position relative des conducteurs de phase dans l'espace

La relation donnant l'inductance de la ligne est la suivante :

$$L = \left[0{,}5 + 4{,}6 \log \frac{D}{r} \right].10^{-4} \quad [1] \quad \text{mesurée en H/Km} \qquad (3.5)$$

$$D = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}}$$

r = rayon du conducteur.

La réactance L.ω devient alors :

$$L \cdot \omega = \left[0{,}5 + 4{,}6 \cdot \log \frac{D}{r} \right] \omega \cdot 10^{-4} \quad \text{mesurée en } \Omega \text{ /Km} \qquad (3.6)$$

La valeur pratique de L.ω est sensiblement voisine de 0,4Ω /Km pour une ligne MT et c'est pourquoi dans les chapitres suivants, il nous sera bénéfique d'utiliser cette valeur. Ainsi donc, si on désigne par R la résistance de la ligne, l'impédance Z_d ou inverse Z_i est égale à :

$$Z_d = R + j\omega \left[0{,}5 + 4{,}6 \cdot \log \frac{D}{r} \right] \cdot 10^{-4} \quad \text{mesurée en } \Omega \text{ /Km} \qquad (3.7)$$

[1] = J FAVAUD, Fonctionnement et protection des réseaux de distribution, Paris, Centre de perfectionnement de Nanterre, 1967, p. 52

3.2.1.2. Impédance homopolaire d'une ligne électrique.

L'impédance homopolaire d'une ligne électrique est celle qui va participer à déterminer la composante du courant homopolaire laquelle est un paramètre essentiel qui intervient beaucoup dans les calculs de potentiel de sol et d'induction électrique dans le sol

En ce qui concerne la mesure de l'impédance homopolaire d'une ligne triphasée, la procédure la plus utilisée est la suivante :
- on met en court circuit et à la terre les extrémités libres de la ligne ;
- on met en court-circuit à leur origine les trois conducteurs de la ligne et on intercale entre ce point origine et la terre un générateur monophasé de tension V comme l'indique la figure 3.3 suivante :

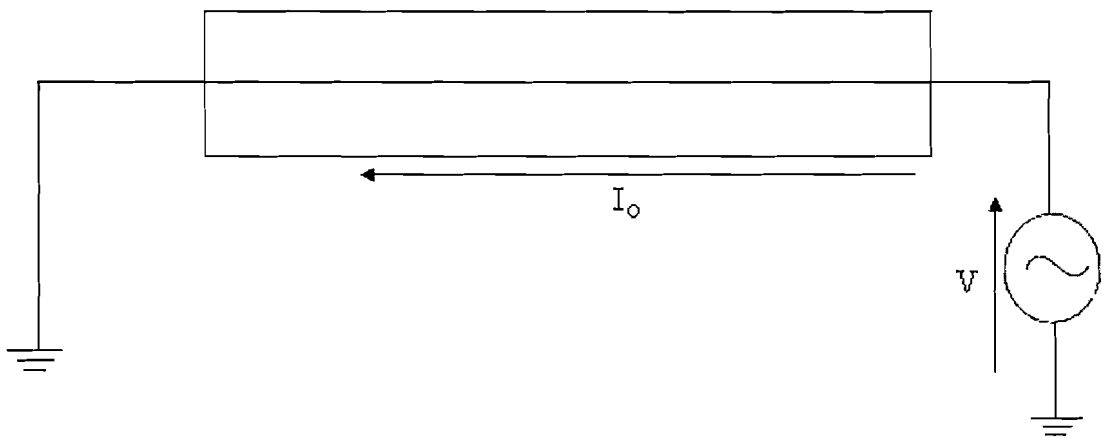


Figure 3.3 : méthode de mesurer l'impédance homopolaire d'une ligne

Sur cette figure I_0 est la valeur de l'intensité du courant dans chaque phase et elle est appelée composante homopolaire. Le rapport de la tension du générateur sur la valeur de cette intensité de courant définit donc l'impédance de la ligne.

Cependant, on voit qu'avec le même principe de mesurer l'impédance homopolaire de la ligne on met aussi en jeu la résistivité du sol puisque le retour des courants s'effectue toujours par la terre. L'impédance homopolaire par phase d'une ligne triphasée est donnée par la formule de Carson :

$$Z_O = R + 3\left[\left(\frac{\pi.\omega}{2} + j4{,}6.\omega.\log\frac{K}{\sqrt[3]{r'D}}\right)\cdot 10^{-4}\right] \text{ en } \Omega/\text{Km} \qquad (3.8)$$

$$D = \sqrt[3]{d_{12}\cdot d_{23}\cdot d_{13}}$$

r' : rayon géométrique équivalent du conducteur.

$$K = \frac{0{,}522}{\sqrt{\sigma\cdot\omega}}$$

σ : la conductivité du sol exprimée en siemens

ω : la pulsation du réseau en rad/s

Le sens physique de la distance K figurant dans la relation de Carson correspond à la profondeur dans le sol d'un conducteur fictif assurant le retour du courant, cette distance est liée à la conductivité du sol dont la valeur dépend de la nature des terrains ; les valeurs approximatives pour K sont les suivantes :

K : 300m sur le terrain argileux ;
K : 500m sur le terrain sédimentaire ;
K : 800m sur le terrain calcaire ;
K : 1200m sur le sol granitique.

La formule simplifiée de Carson donne :

$$Z_0 = R + \frac{3.\pi.\omega}{2}10^{-4} + 3\,j.L.\omega = (R + 0{,}15) + 3.j.L.\omega \text{ en } \Omega/\text{km} \quad (3.9)$$

N .B : La relation de Carson ne comporte plus le terme constant 0,5 figurant dans l'expression de la réactance directe ; ce terme a, en effet, été englobé sous le logarithme en posant :

$$0{,}5 + 4{,}6\log\frac{D}{r} = 4{,}6\log\frac{D}{r'} \quad \text{soit :} \quad \frac{1{,}283}{r} = \frac{1}{r'}$$

3.2.2. Capacité directe d'une ligne

Une capacité existe ente les trois conducteurs d'une ligne pris deux à deux ; une autre capacité existe entre chaque conducteur et le sol.

La capacité directe ou capacité de service est celle qui est définie par la relation :

$$C_d = \frac{I_V \cdot \sqrt{3}}{U \cdot \omega} \quad (3.10)$$

Avec : U : la tension entre phase ;
I_V : le courant capacitif d'une ligne à vide ;
ω : la pulsation du réseau.

Il existe aussi une relation qui permet de calculer la capacité directe à partir des caractéristiques géométriques d'une ligne triphasée à savoir :

$$C_d = \frac{1}{41{,}4 \log \frac{D}{r}} \quad \mu F/km \quad (3.11)$$

D est toujours la distance géométrique équivalente entre les trois conducteurs et r est le rayon de ces conducteurs.

3.2.3. Capacité homopolaire de la ligne

La capacité homopolaire qui est la capacité qui existe entre la phase et la terre est un paramètre essentiel dans le courant de défaut à la terre parce que lorsque la foudre frappe une ligne de transport ou à proximité de la ligne , c'est bel et bien la capacité homopolaire et la prise de terre du point neutre qui ferment la boucle de défaut par le phénomène de conduction dans le sol (couplage galvanique)

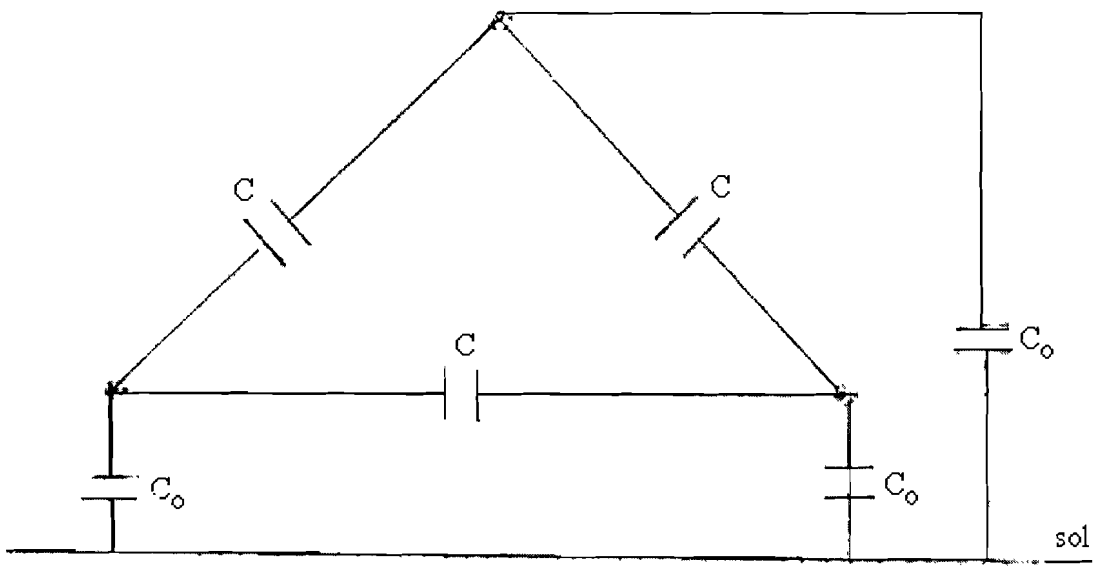


Figure 3.4 : Ligne complète avec ses capacités entre phases et phase –terre.

C_o est la capacité homopolaire existant entre chaque conducteur et le sol

En cas de défaut entre phase et terre (cas de la foudre directe sur la ligne), chacune des capacités C_0 dérive vers ce dernier un certain courant qui croît avec l'étendu du réseau : C_0 équivalent à une résistance de fentes. En pratique, la mesure de C_o s'effectue en mettant la ligne en court – circuit à chacune de ses extrémités et en intercalant entre l'un des points ainsi obtenus et la terre une source monophasée. La figure suivante montre la technique de mesurer pratiquement la valeur de la capacité homopolaire d'une ligne triphasée.

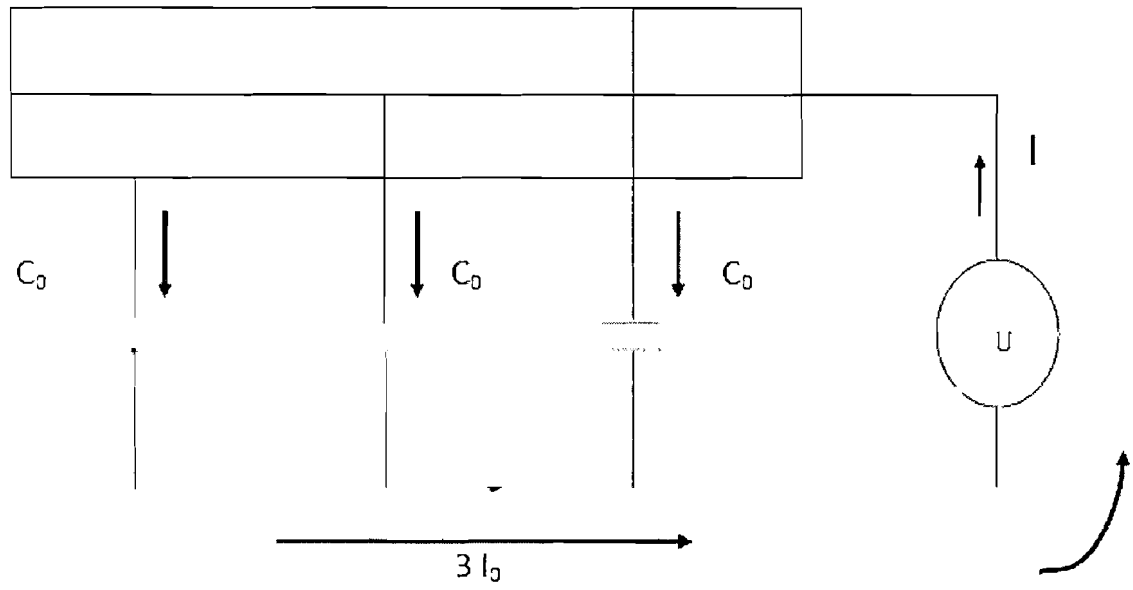


Fig. 3.5 Méthode pratique de mesurer la capacité homopolaire.

Si on note le courant I passant dans le circuit, les capacités C_0 étant en parallèle,

on peut écrire : $I = 3 \cdot C_o \cdot U \cdot \omega$ mesurée en A (3.12)

Par cette formule, on peut tirer que :

$$Co = \frac{I}{3 \cdot U \cdot \omega} \quad (3.13)$$

La relation suivante permet de calculer C_0 à partir des caractéristiques géométriques d'une ligne triphasée.

$$Co = \frac{1}{124{,}2 \log \frac{2h}{\sqrt[3]{rD^2}}} \ \mu F/Km \quad (3.14)$$

Avec : r : rayon de conducteur de phases ;
D : distance géométrique entre phases ;
h : la hauteur moyenne géométrique.

3 .2.4. Evaluation du courant de défaut à la terre

Lors de l'introduction de ce présent chapitre, on a vu que la foudre peut frapper soit le câble de garde, soit le pylône ou la ligne si celle –ci ne possède pas de câble de garde.

Normalement, les mécanismes perturbateurs sont les suivants :

- **à l'endroit du défaut** : le pylône ayant une résistance de mise à la terre R_P, il s'en suit une élévation du potentiel de sol soit :

$$U_0 = R_P \cdot I_{Pyl} \quad \text{mesurée en V} \qquad (3.15)$$

$$Ud = \frac{\rho.Ipyl}{2\pi d} \quad \text{mesurée en V} \qquad (3.16)$$

Avec : U_0 : élévation du potentiel du sol ;
R_P : résistance de mise à la terre du pylône ;
I_{Pyl} : courant induit par la foudre dans le pylône ;
ρ : résistivité du sol dans l'endroit de défaut ;
d : distance séparant le générateur perturbateur à la prise de terre du pylône ;
Ud : générateur perturbateur.

Si le pylône possède le câble de garde, en pratique on a souvent une réduction de 90% sur I_{Pyl} apporté par le câble de garde.

- **le long de la ligne** : on observe le couplage magnétique avec des lignes présentant des parallélismes ou rapprochement obliques et une force électromotrice longitudinale induite équivaut à :

$$FEMLI = M \cdot L \cdot \omega \cdot K_r \cdot 3 \cdot I_0 \quad \text{mesurée en V} \qquad (3.17)$$

Avec : M : coefficient d'induction mutuelle en Henry ;
L : longueur de rapprochement ou parallélisme (en mètres) ;
ω : pulsation (en rad /S) ;
K_r : coefficient réducteur de l'ordre de 0,7 ;
I_0 : courant homopolaire qui est le courant perturbateur.

En introduisant les composantes symétriques, on a :

$$\begin{cases} I_1 = I_d + I_i + I_0 & (1) \\ I_2 = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_0 & (2) \\ I_3 = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_0 & (3) \end{cases}$$

Avec : I_1 : Courant électrique dans la phase 1
I_2 : Courant électrique dans la phase 2
I_3 : Courant électrique dans la phase 3
I_d : composante de courant direct ;
I_i : composante de courant inverse ;
I_0 : composante de courant homopolaire.

Delà, on déduit par inversion de la matrice les composantes que :

$$I_I + I_2 + I_3 = 3 \cdot I_0 \qquad (3.18)$$

Ainsi, nous voyons que la composante homopolaire est le paramètre essentiel qui intervient dans les calculs de potentiel de sol et d'induction et c'est pourquoi dans l'évaluation du courant de défaut à la terre, il s'avère nécessaire et impératif d'exécuter avec des moyens de protection approprié la limitation du courant de défaut franc à une valeur assez faible afin de réduire :

- les contraintes électrodynamiques du matériel car les défauts entre phase et terre sont fréquents lors d'un coup de foudre sur une ligne aérienne ;
- les phénomènes d'induction créés sur les lignes de télécommunication par la circulation des courants de défaut entre phase et terre et l'élévation du potentiel de la prise de terre en cas d'amorçage du poste MT/B T.

Par contre, on est amené à adopter une valeur trop faible dans le but de réaliser des protections sensibles au plus grand nombre de défauts, pouvoir utiliser des indicateurs de défaut comme les relais détecteurs de défaut sur phase sans oublier la réduction des surtensions provoquées par l'élimination des défauts biphasés ou monophasés à la terre en cas de mise à la terre inductive.

Par ailleurs, en faisant l'évaluation du courant à la terre, on ne peut pas mettre de côté les mécanismes perturbateurs occasionnés par un coup de foudre direct au sol car lorsqu'un coup de foudre s'amorce au sol, on a un champ électrique au point d'impact de la foudre qui atteint des valeurs élevées telles qu'il ya claquage électrique du sol et diminution de résistivité. Le champ électrique critique E_0 de claquage a les valeurs suivantes pour des résistivités différences :

La résistivité du sol mesurée en Ωm	Le champ électrique critique mesuré en kV/m
100	250
1000	500
10000	1000
>10000	-

En analysant la valeur de 10000Ωm qui est la valeur de la résistivité du site hertzien de **MUGONGO**, celle-ci occasionne un champ critique de claquage très effrayant. Le claquage du sol en surface crée un disque dont le rayon et la résistance ont pour expression :

$$r_o = \sqrt{\frac{\rho \cdot I}{4E_o}} \quad \text{exprimé en m} \qquad (3.19)$$

$$R_o = \sqrt{\frac{\rho \cdot E_0}{4\mathrm{I}}} \quad \text{exprimée en } \Omega \qquad (3.20)$$

Le potentiel de sol à une distance d du point d'impact peut être approximé à :

$$Usol = I(t)\frac{\rho}{2\pi}\left[\frac{1}{d} - \frac{1}{\sqrt{d^2 + z^2}}\right] \qquad (3.21)$$

I (t) : courant de foudre

Z : hauteur du canal foudre

Mais comme Z est très supérieur à d on a le plus souvent :

$$Usol = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} \qquad (3.22)$$

Soit par exemple si on considère la distance d égale à 100m, le courant de décharge foudre équivalent à 100KA et la résistivité du terrain abritant le nœud hertzien de **MUGONGO** étant de 10000Ωm le potentiel au niveau du sol sera évalué à 1592,35KV si on applique la formule (3.22).

L'analyse montre que cette valeur de potentiel de sol est très dangereuse et en plus de l'élévation de potentiel de sol, il faut tenir compte éventuellement de l'induction sur les parties métalliques comme les pylônes, les haubans, etc. Un autre mécanisme perturbateur c'est la variation rapide du champ électrique au niveau du sol. Les vitesses de variation du champ électrique pendant l'arc de retour sont grandes ; cela va engendrer des courants et des tensions sur les conducteurs placés dans le voisinage.

Néanmoins, d'autres mécanismes perturbateurs causés par la foudre s'observent lorsque la foudre attaque soit un conducteur métallique enterré, soit un bâtiment ou autre structure métallique. Pour un conducteur métallique vertical, la chute de potentiel engendrée par de la foudre sera :

$$U = L \cdot \frac{dE}{dt} \qquad (3.33)$$

Pour une structure plus complexe, il faut tenir compte des impédances mutuelles entre les conducteurs. En fait, on s'aperçoit que l'impédance totale diminue avec le maillage de la structure ce qui conduit à diminuer la chute de potentiel dangereuse. En ce qui concerne les bâtiments de télécommunication la chute de potentiel à l'intérieur du bâtiment est calculée à partir de l'impédance de transfert.

3.3. Limites admissibles par la CCITT

Dans l'introduction de ce chapitre, on a parlé que lorsqu'il y a amorçage des éclateurs MT au poste de transformation, un courant de suite 50Hz s'observe et crée des phénomènes comme :

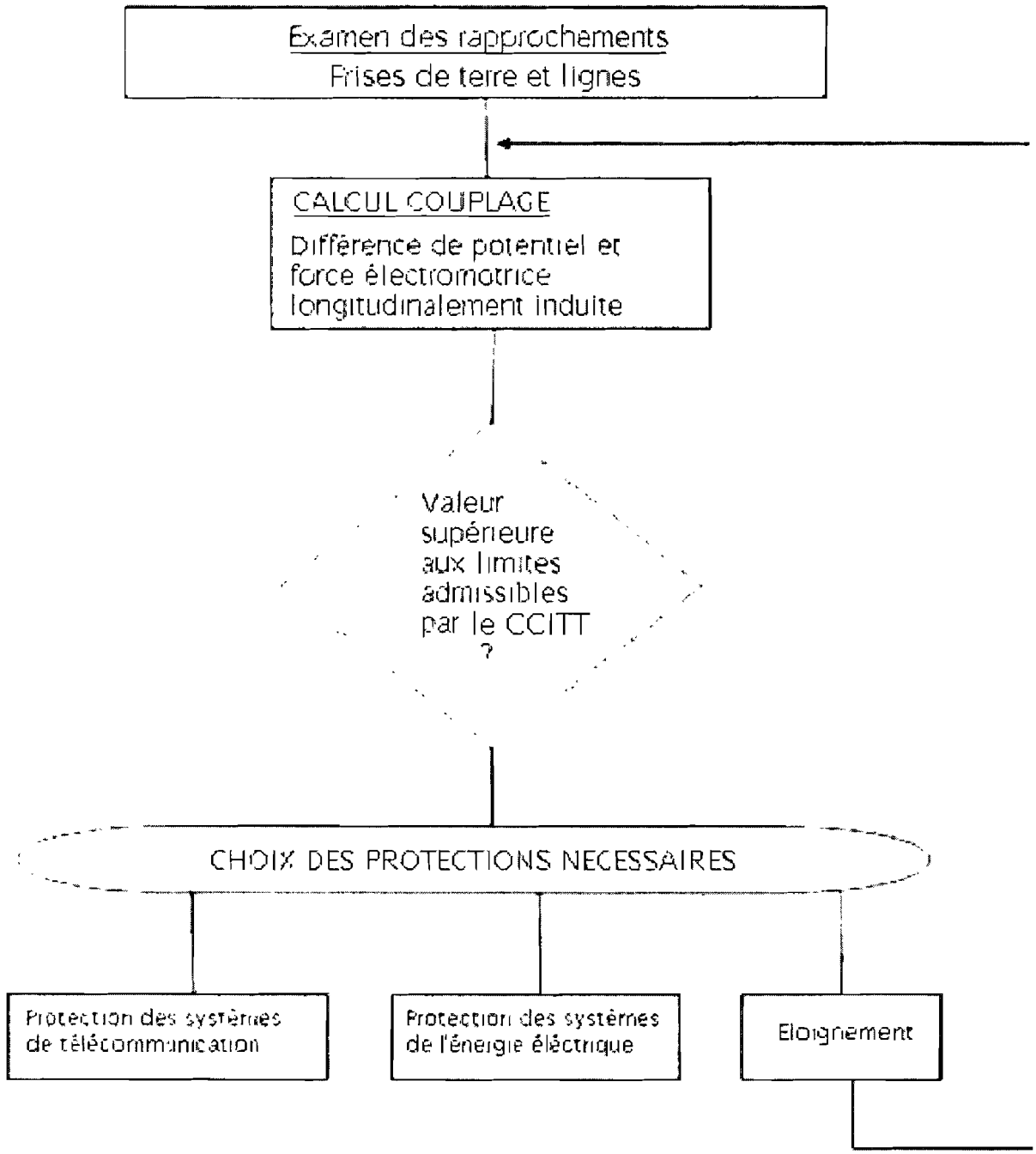
- élévation du potentiel de sol dans le voisinage du poste MT ;
- élévation du potentiel de la prise de terre des masses MT ;
- couplage entre la terre des masses MT et la terre du neutre BT par conduction dans le sol.

Cependant, face à ces phénomènes, le comité consultatif International des Télégraphies et des Téléphones en abrégé le CCITT a fixé des valeurs admissibles. Pour le régime de défaut, le CCITT admet une valeur équivalente à 430Vcomme force électromotrice maximale que ce soit pour un couplage par conduction dans le sol ou un couplage magnétique. Par ailleurs, si la ligne est à grande sécurité de service la limite admissible par le CCITT est de 600V et le courant maximal est de 15mA pour le couplage capacitif. En ce qui concerne le régime normal, la force électromotrice induite maximale admissible par le CCITT est de 60V et la valeur du courant maximal est égale à 15mA.

Toutefois, ces limites sont des limites de danger humain et par conséquent, cela implique que les tensions inférieures à ces limites ne peuvent pas endommager le matériel et les problèmes de fonctionnement doivent être réglés par une désensibilisation des systèmes de protection par exemple, l'amélioration de la symétrie ou suppression des moyens de transmission de mode commun.

Avec ces valeurs admissibles par le CCITT, nous remarquons que ces valeurs admettent des appareils de protection des effets de la foudre de très haute sensibilité avec le temps de réponse aussi très court que possible.

Néanmoins, les couplages dus aux lignes d'énergie étant localisés aux points singuliers (prises de terre) et répartis le long de la ligne, on peut prévoir les effets sur les systèmes de télécommunication.



L'analyse des perturbations sur le réseau de transport et de distribution d'énergie électrique causées par la foudre conduit à limiter fortement la valeur du courant de défaut à la terre afin de limiter l'élévation très dangereuse de potentiel sol. Le problème n'est pas du tout facile car comme c'est bien mentionné dans l'introduction de ce chapitre. Si la foudre tombe sur la câble de garde ou pylône, le feedback est un courant de court-circuit entre la ligne et la terre et c'est pourquoi dans le chapitre suivant, nous allons essayer de lister tous les risques sur les installations de télécommunication causés par la foudre et les installations d'énergie électrique afin d'en tenir compte lors du choix des dispositifs de protection des bâtiments abritant les équipements de télécommunication.

IIème PARTIE : PROTECTION DES INSTALLATIONS DE TELECOMMUNICATION DU NŒUD HERTZIEN DE MUGONGO CONTRE LES SURTENSIONS

CHAPITRE IV. PRINCIPES DE CONCEPTION ET DE REALISATION DES PRISES DE TERRE

4.1. Introduction

En électricité, il est très utile, d'ailleurs il s'avère nécessaire de rappeler que lors de la conception des réseaux de terre les objectifs prioritaires portent essentiellement sur la sécurité notamment en rapport avec la protection des personnes et des matériels à l'intérieur mais aussi à l'extérieur de l'installation.

Néanmoins, un réseau de terre a également comme mission la réduction des perturbations sur les équipements électriques, électroniques sensibles ou les équipements de télécommunications. Par ailleurs, il est déjà connu par tous les électriciens que la base de toute protection contre les surtensions est le réseau de terre équipotentiel. Ce terme est à prendre au sens large car le réseau de terre idéal est une surface très conductrice en tous points dont la tension serait nulle par rapport au sol lointain.

Cependant, le modèle réseau de terre équipotentiel est théorique car la pratique a montré qu'il est difficile de créer un réseau de terre idéal, mais pour la protection des sites de télécommunications il s'avère nécessaire de créer un réseau de terre qui soit équipotentiel tout en restant dans les conditions techniques et économiques acceptables.

Les disproportions des tensions de tenue au choc des différents matériels installés sur un site de télécommunication notamment le matériel électronique fait qu'une tension résiduelle, qui peut être supportée sans risque par une installation à courant fort, devient extrêmement dangereuse pour les installations électroniques de télécommunication.

Dans les installations électriques, la pratique a révélé qu'il est nécessaire d'éviter dans toute la mesure du possible, les interactions d'une installation sur une autre. Aussi, la protection d'ensemble contre les surtensions doit obligatoirement respecter les principes suivants :

- éviter, par l'installation judicieuse de paratonnerre, que la foudre puisse atteindre directement un élément de l'installation ;
- éviter les phénomènes d'induction par les conducteurs de descente des paratonnerres ;
- éviter la transmission de surtension par induction entre circuits de nature différentes, en effectuant la séparation de ces circuits, leur mise sous écran, et en réalisant des jonctions nombreuses des écrans des câbles au réseau équipotentiel de terre ;
- réduire l'amplitude des surtensions à partir de leur point d'origine, partout où il est possible de s'en protéger de manière à les empêcher d'atteindre les installations électroniques les plus fragiles avec une amplitude et une durée dangereuses ;
- établir pour chaque installation ou groupe d'installations séparée des autres un réseau de terre ayant une impédance très faible assurant la meilleure équipotentialité possible de tout les éléments, quelle que soit la nature du courant à écouler ;
- interconnecter les réseaux de terre locaux afin de réaliser un vaste réseau de terre qui soit aussi équipotentiel possible tant pour l'écoulement des courants de défaut 50HZ que pour des courants hautes fréquences et des courants de choc étant entendu que l'équipotentialité s'entend comme impossibilité d'apparition de potentiel gênante entre deux éléments voisins de l'installation ;
- permettre la limitation des tensions de pas et de toucher pour la sécurité vis-à-vis des personnes.

Finalement, on peut conclure qu'un réseau de terre doit être capable les courants de la foudre et les courants de défaut 50Hz et doit être établi en conséquence. Pour réalisé dans ce cas un réseau de terre équipotentiel, il est conseillé de réaliser l'interconnexion de la totalité des réseaux locaux si on se trouve sur un terrain de forte résistivité.

Cependant, en ce qui nous concerne en rapport avec la conception d'un réseau de terre favorable à notre site de télécommunication (Nœud Hertzien de MUGONGO), il nous serra impératif de procéder à des mesures de résistivité du terrain afin de concevoir le réseau de terre favorable suivant la nature du sol sur lequel est implanté le site

4.2. Réalisation des prises de terre

4.2.1. Principes physiques de conception des prises de terre

Le calcul des prises de terre est plus complexe et se fait par intégrale à partir de la valeur d'une prise de terre infinitésimale supposée dans un milieu homogène infini. La figure 4.1 montre les paramètres intervenants dans le calcul du potentiel du sol mesuré à une distance quelconque de l'électrode de terre.

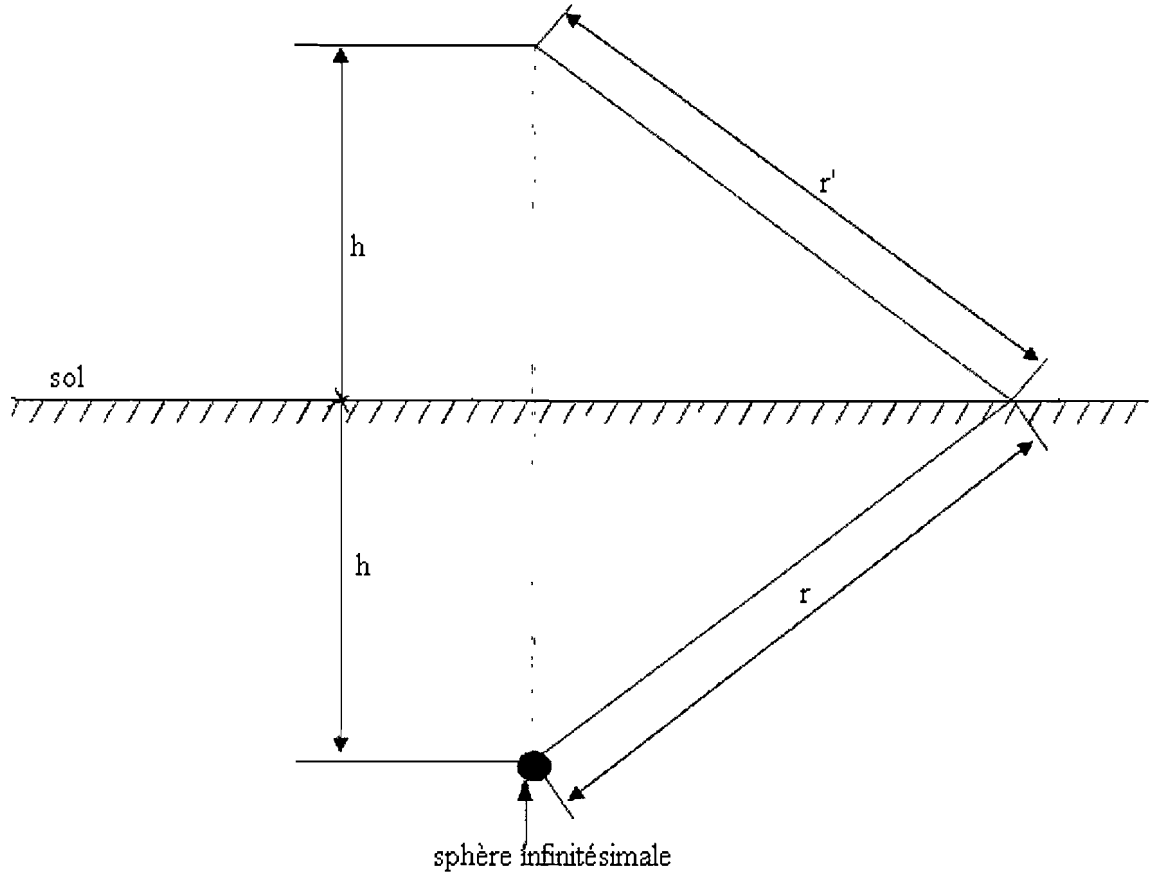


Figure 4.1 : Paramètres intervenants dans le calcul pratique du potentiel du sol sur une prise de terre

Par exemple, considérons une électrode de terre sphérique, on peut écrire l'équation suivante :

$$\int_S E \cdot ds = \rho \int_S J \cdot ds \quad (4.1)$$

En résolvant l'intégrale précédente on aboutit à l'équation suivante :

$$E \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \rho \cdot I \quad (4.2)$$

Avec : E : champ électrique en V /m

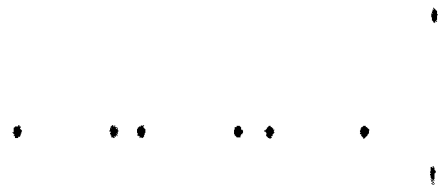
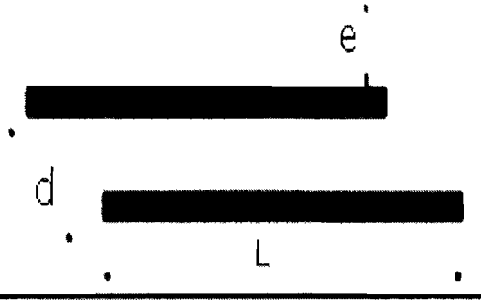
r : la distance de la sphère (électrode) en mètres à un point supposé très éloigné.

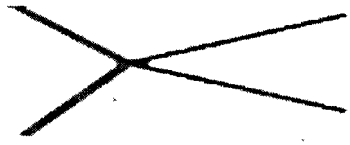
ρ : résistivité du sol en ohmmètre

I : courant de défaut traversant la prise de terre en ampère

Tableau 4.1 : forme de la prise de terre et la valeur de la résistance correspondante

Forme de la prise de terre	Valeur de la resistance
Resistance hemispherique	$R = \frac{\rho}{2 \pi \cdot r}$
Resistance spherique a une profondeur h	$R = \frac{\rho}{4 \cdot \pi}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2 \cdot h}\right)$
Resistance d'une plaque a une profondeur h=a	$R = \frac{\rho}{4 \cdot a}\left(1 - \frac{4 \cdot h}{\pi \cdot a}\right)$
Resistance d'un fil conducteur de longueur l enterre horizontalement a une profondeur h: 	$R = \frac{\rho}{\pi \, l}\left(\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot r \, h}} - 1\right)$

si on a plusieurs piquets espacés de façon que la distance d entre 2 piquets reste supérieure à la profondeur d'enfouissement h 	$$R = \frac{1}{n}\left[\frac{\rho}{2.r.h}\left(ln\frac{4.h}{r} - 1\right) + \frac{\rho}{\pi.d}\left(\frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}\right)\right]$$ NB: n est le nombre de piquets
Deux câbles horizontaux enterrés, proches d'une distance d, de longueur L tel d reste très inférieur à L 	$a = \sqrt{d^2 + 4.e^2}$ si on a: $$R = \frac{\rho}{\pi L}\left(ln\frac{2L}{\sqrt{2.r.e.d.a}} - 1\right)$$

plusieurs câbles rayonnant de longuer L enfouis à la même profondeur e 	$R = \frac{\rho}{n.\pi.L}\left(\ln\frac{2L}{\sqrt{2.r.e}} - 1 + N(n)\right)$ n est le nombre de piquets supposés régulièremnt espacés <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>
Disque	Sur sol D $R = \frac{\rho}{4.D}\left(1 - \frac{4.e}{D}\right)$ Sur isolant D $R = \frac{\rho}{8}\left(\frac{1}{D} + \frac{1}{\pi.e}\right)$
Réseau maillé sperficiel	$R = \frac{2\rho}{P}$ N.B: P= périmètre
Boucle enterrée	$R = \frac{\rho}{2\ \pi^2\ D}\ln\frac{8 \cdot D^2}{e \cdot r}$

Mais avec la connaissance que $E = -gradV$ c'est-à-dire qu'on peut tirer dans la formule 4.2 celle qui donne le potentiel du sol par rapport à l'électrode de terre

$$V = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (4.3)$$

Ainsi, sur la figure précédente le potentiel du sol au point x est égale à :

$$V = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{x^2 + h^2}} \quad (4.4)$$

Le calcul de la résistance des prises de terre est plus complexe que ce soit pour un piquet, un fil conducteur horizontal, car le calcul se fait par intégration à partir de la valeur d'une prise de terre infinitésimale supposée dans un milieu homogène infini.

4.2.2. Calcul de la résistance équivalente de couplage entre les prises de terre

Les expériences réalisées avec les instruments de mesure des grandeurs électriques ont montré que dans la pratique on ne peut oser dire que la résistance équivalente de deux prises de terre mise en parallèle respecte le principe de calcul en ce qui concerne le groupements des résistances car il faut tenir compte du couplage par le sol, c'est-à-dire de la résistance mutuelle.

Pour faciliter l'analyse du problème, il faut résoudre le système en s'appuyant sur le schéma de principe de couplage entre prises de terre repris ci-après :

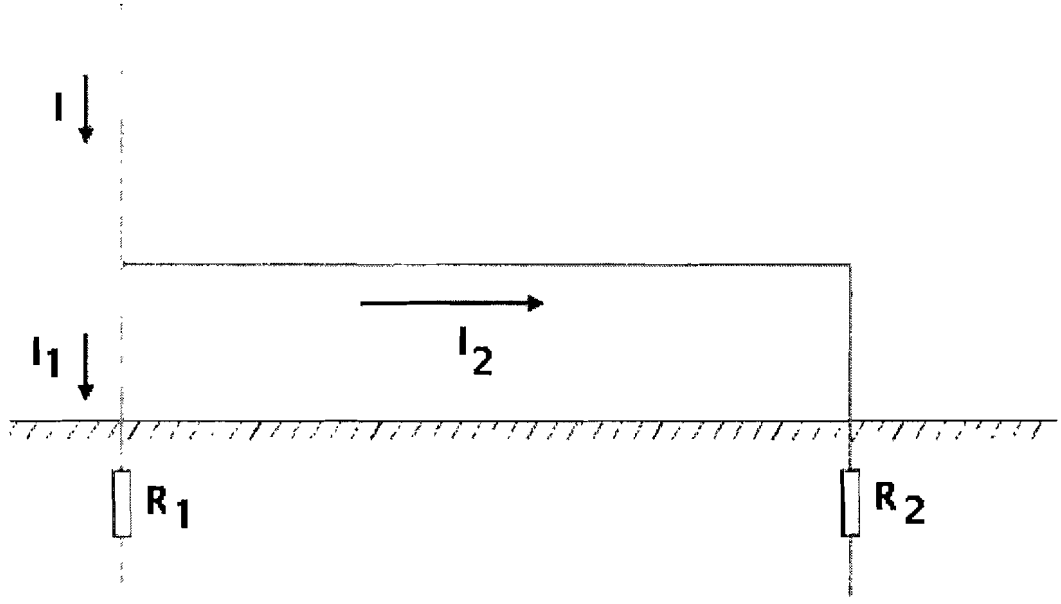


Figure 4.2. Schéma de principe de couplage entre prise de terre

En réalité, le potentiel du sol respecte le système d'équation suivant :

$$U = R_1 \cdot I_1 + R_m \cdot I_2$$
$$U = R_2 \cdot I_2 + R_m \cdot I_1 \qquad \text{N.B :} \qquad I = I_1 + I_2 \quad (4.5)$$

Avec R_m : résistance mutuelle

Nous avons résolu ce système d'équation dans le but de chercher la résistance équivalente qui sera défini par la formule suivante lorsqu'on respecte la loi d'Ohm :

$$R_{éq} = \frac{U}{I} \quad (4.6)$$

$R_{éq}$: résistance équivalente de deux prises de terre en considérant la résistance mutuelle.

I : la valeur de l'intensité de courant avant que celui-ci se scinde à travers les deux prises de terre R_1 et R_2.

U : potentiel du sol

$$U = R_m \cdot I_2 + R_1 I_1 \quad (1)$$

$$U = R_2 \cdot I_2 + R_m \cdot I_1 \quad (2)$$

$$U = R_1 (I - I_2) + R_m \cdot I_2 \quad (1)$$

$$U = R_2 \cdot I_2 + R_m (I - I_2) \quad (2)$$

$$U = R_1 \cdot I - I_2 (R_1 - R_m)$$

(1)

$$U = I_2 (R_2 - R_m) + R_m \cdot I \quad (2)$$

Mathématiquement, l'équation (1) est égale à l'équation (2) et on peut écrire :

$$R_1 \cdot I - I_2 (R_1 - R_m) = I_2 (R_2 - R_m) + R_m \cdot I$$

$$R_1 \cdot I - R_m \cdot I = I_2 (R_2 - R_m) + I_2 (R_1 - R_m)$$

$$I = \frac{I_2}{R_1 - R_m}\left(R_1 + R_2 - 2R_m\right)$$

Injectons donc la valeur de I dans l'équation (2)

$$U = R_2 \cdot I_2 + R_m\left[I_2\frac{\left(R_2 + R_1 - 2R_m\right)}{R_1 - R_m} - I_2\right]$$

$$U = R_2 \cdot I_2 + R_m\frac{\left(I_2 \cdot R_2 - R_m \cdot I_2\right)}{R_1 - R_m} \qquad U = I_2\left[R_2 + R_m\left(\frac{R_2 - R_m}{R_1 - R_m}\right)\right]$$

$$R_{éq} = \frac{U}{I} = \frac{I_2\left[R_2 + R_m\left(\frac{R_2 - R_m}{R_1 - R_m}\right)\right]}{I_2\left(\frac{R_2 + R_1 - 2R_m}{R_1 - R_m}\right)}$$

$$R_{éq} = \frac{U}{I} = \frac{R_2 \cdot R_1 - R_2 \cdot R_m + R_2 \cdot R_m - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_{éq} = \frac{U}{I} = \frac{R_2 \cdot R_1 - R_m^2}{R_2 + R_1 - 2R_m} \qquad (4.7)$$

Le cas particulier apparaisse si est seulement si R_1=R_2=R car l'équation (4.7) devient :

$$R_{éq} = \frac{U}{I} = \frac{R^2 - R_m^2}{2\left(R - R_m\right)} = \frac{R + R_m}{2} \quad (4.8)$$

Mais une fois si le couplage entre électrodes est nul c'est-à-dire R_m=0Ω, on a toujours :

$$R_{éq} = \frac{U}{I} = \frac{R}{2} \quad (4.9)$$

En faisant une analyse approfondie, la valeur de la résistance équivalente n'est plus l'équation respectant la loi d'Ohm pour deux résistances mises en parallèle. Ainsi donc, voilà la raison pour laquelle l'interconnexion des électrodes en parallèle dans le but de diminuer la valeur de la résistance de prise de terre équivalente doit être effectuée en tenant compte du couplage entre les prises de terre.

Toutes fois, d'autres études ont montré également que la valeur des prises de terre dépend aussi de la fréquence. Ainsi, compte tenu du spectre en fréquence des courants directs ou indirects du à la foudre, il faut prendre en compte l'effet en fréquence sur la valeur de la prise de terre.

La figure 4.3 montre la valeur de l'impédance des prises de terre en fonction de la fréquence des courants de foudre sur trois types de prises de terre les plus rencontrées en pratique et ces trois types de prises de terre sont :

- hémisphère de 1m de rayon ;
- Piquet de terre de 6m de longueur et de rayon de 8mm ;
- Câble horizontal de 15m, profondeur 0,6m et de rayon 8mm.

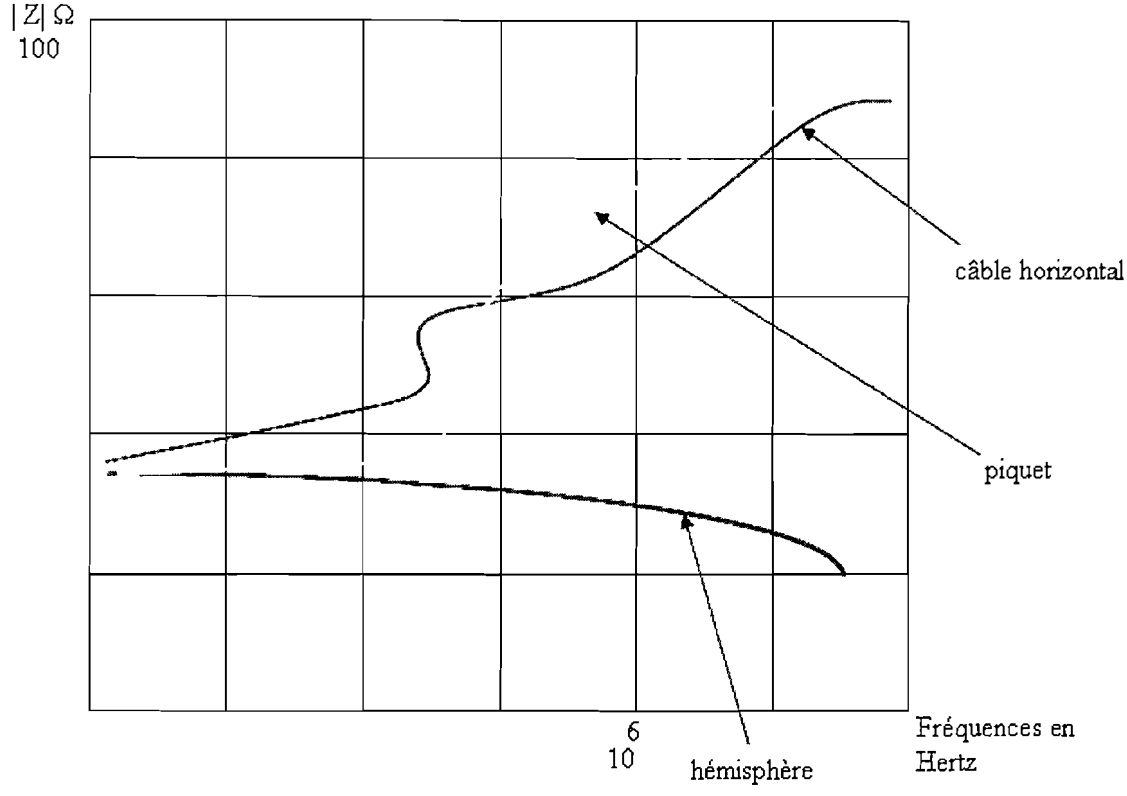


Figure 4.3 : Variation de l'impédance des prises de terre Z en fonction de la Fréquence des courants de la foudre

4.2.3. Etude de la réalisation pratique des prises de terre

Les prises de terre représentent un élément déterminant d'une bonne protection contre les effets de la foudre. La norme Française NFC17-100 spécifie que normalement les prises de terre de protection des effets de la foudre doivent avoir une valeur maximale de 10Ω. Cette spécification doit être interprétée comme suit : « toute prise de terre dont la valeur de la résistance mesurée avec des moyens conventionnels qui est supérieur à 10Ω est inopérante au titre de la protection contre la foudre».

Cependant, la valeur maximale de 10Ω à ne pas dépasser est à comprendre, et doit être contrôlée, avant l'interconnexion de la prise de terre concernée aux autres éléments ou structure également mis à la terre dans l'installation.

Lorsque le système de protection comporte plusieurs prises de terre, interconnectées par un ceinturage spécifique, la résistance de la prise de terre doit être contrôlée avant raccordement de ce ceinturage à d'autres parties mises à la terre ou d'autres prises de terre.

A l'égard des aspects techniques pratiques, pour construire une prise de terre, il faut prendre avec plus de rigueur les dispositions suivantes :

- Diminuer au maximum les résistances d'interconnexion entre électrodes et le système mis à la terre ;
- Assurer un bon contact entre électrodes et le sol environnant ;
- Placer les électrodes dans les couches ayant une faible résistivité.

Néanmoins, la pratique a montré que la résistance du sol qui entoure l'électrode est le facteur important. C'est pourquoi il s'avère nécessaire parfois d'ajouter des produits additionnels artificiels qui augmentent la conductivité du sol autour de l'électrode.

La réalisation pratique des prises de terre a également démontré qu'un autre élément le plus important est l'impédance de choc de la prise de terre et c'est la raison pour laquelle la norme Française NFC17-100 recommande que les électrodes et les fils de connexions y compris ne doivent en aucun cas dépasser une longueur de l'ordre de 20m.

En ce qui concerne l'exploitation des couches à faibles valeurs de résistivité, il est nécessaire de faire des mesures de résistivité du sol apparente afin de décider les procédés techniques de réalisation des prises de terre conformes à la nature du terrain. Pratiquement, la terre de protection en ligne (para- surtensions, porteurs) doit avoir une valeur acceptable comprise entre 20Ω et 50Ω.

En effet, pour y parvenir, la technique de réalisation des prises de terre suggère qu'il faut réaliser et favoriser chaque fois si c'est nécessaire l'utilisation des piquets verticaux mis en parallèle. Si une couche de faible résistivité se trouve à une profondeur de 10 à 20m, on peut envisager d'enfoncer généralement des piquets de terre emboîtables les uns sur les autres.

Si au contraire, la couche de faible résistivité se trouve à la surface (hauteur inférieure à 1m), on utilise souvent la technique du fil acier galvanisé ou méplat enterré horizontalement avec une longueur maximale de 20m avec des mises en parallèle dans plusieurs directions et dans les cas critiques on améliore la résistivité par des produits additionnels.

Cependant, de ce qui est en rapport avec la résistance des prises de terre du site abritant le bâtiment de télécommunication, il faut chercher obligatoirement pour une bonne protection contre les surtensions de la foudre une valeur comprise entre 1Ω et 10Ω. Généralement, les autocommutateurs en milieu urbain ne doivent pas poser trop de problèmes. Le gros problème persiste toujours à la réalisation d'une prise de terre dont la valeur est inférieure à 1Ω (exigences sur les terrains abritant les équipements de télécommunications) sur un site montagneux de résistivité supérieure à 10000Ωm.

4.3. Etude de la résistivité du sol

4.3.1. Généralités

La résistivité du sol est définie comme la résistance entre les faces opposées d'un cube unitaire ; elle se mesure généralement en Ohmmètre. Elle dépend essentiellement de la quantité d'eau retenue dans le sol et de la résistivité de l'eau elle-même. En d'autres termes, la conduction du sol est, dans une grande mesure, la conduction de l'eau contenu dans le sol, et de ce fait elle est en partie en processus électrolytique.

Par ailleurs, avant d'envisager la construction d'une installation électrique, il convient de mesurer la résistivité du sol sur lequel elle va être implantée. L'amélioration d'un réseau de terre ou d'un circuit de terre est difficile et coûteuse si l'installation est déjà réalisée et diverses méthodes pour mesurer la résistivité du terrain seront exposées dans ce présent chapitre.

Néanmoins, il faut signaler que la résistivité du terrain est déterminée par de nombreux facteurs à savoir :

- le type de sol ;
- la composition chimique des sels dissous dans l'eau contenue dans le sol ;
- la concentration des sels dissous dans le sol ;
- le niveau des eaux souterraines ;
- la température (congélation de l'eau contenue dans le sol) ;
- la granulométrie du sol ;
- la compacité et la pression ;
- l'effet corona.

Parmi tous ces facteurs cités, la pratique a démontré que deux facteurs parmi ces derniers sont prépondérants dans la détermination de la résistivité du sol et ces deux facteurs sont la teneur en eaux souterraines et la température du sol. Le tableau 4.2 ci-dessous montre l'influence des eaux souterraines sur la résistivité du sol tandis que le tableau 4.3 témoigne l'influence de la température sur la résistivité d'un sol composé d'un mélange d'argile et de sable avec la teneur en eau estimé à quinze pourcent environ.

Tableau 4.2 : Influence des eaux souterraines sur la résistivité du sol

Teneur en eau en pourcentage	Valeur de la résistivité en Ωm	Valeur de la résistivité en Ωm
Type de sol	Mélange argile-sable	Sable
0	10000000	
2,5	1500	3000000
5	430	50000
10	185	2100
15	105	630
20	63	290
30	42	

Tableau 4.3 : Influence de la température sur la résistivité d'un sol composé d'un mélange d'argile et de sable avec la teneur en eau de quinze pourcent

Température en degré Celsius	Valeur générale de la résistivité en Ωm
20	72
10	99
0(eau)	138
0(glace)	300
-5	790
-15	3300

D'après le tableau 4.3, on constate que la résistivité augmente brusquement à la température de 0°C lors du passage de l'eau à la glace ; on observe également une très forte augmentation de la résistivité avec l'abaissement de la température.

En pratique, il faudra toujours tirer l'attention de placer les électrodes de prise de terre à une profondeur où le gel ne risque pas de se produire. Les chercheurs américains de la FBS « Fédéral Bureau of standards » ont mesuré la résistivité de divers types de sol en prélevant des échantillons en les mesurant à l'aide des appareils spéciaux, ont dressé un tableau qui montre les valeurs typiques de la résistivité de certains types de sol et de l'eau.

Tableau 4.4 : valeurs typiques de la résistivité de certains types de sol et de l'eau

Types de sol ou de l'eau	Résistivité typique en Ohmmètre	Limites normales en Ohmmètre
Eau de mer	2	0,10-10
Argile	40	8-70
Eau souterraine, eau de puits et eau de source	50	10-150
Mélange de sable et d'argile	100	4-300
Ardoise, schiste, grès	120	10-100
Tourbe, limon et boue	150	5-250
Eau de lac et de torrent sable	250	100-400
Gravier morainique	2000	200-3000
Gravier maritime	150000	3000-30000
granit	25000	10000-50000
glace	100000	10000-100000

L'analyse de ces valeurs reprises dans ce tableau démontre l'intérêt de disposer les électrodes de terre dans un sol approprié. Mais ce n'est pas seulement les chercheurs des Etats-Unis qui ont effectué l'étude approfondie sur la résistivité car même la norme Française NFC15-100 présente aussi les résistivités de certains types de terrains et tout cela c'est dans le but de déterminer dans une zone donnée l'emplacement très approprié pour une prise de terre ou un réseau de terre d'une installation de télécommunication.

Tableau 4.5 : Résistivité des terrains suivants NFC15-100

Nature du terrain	Résistivité du sol en Ohmmètre
Terrain marécageux	de quelques unités à 30
Limon	20 à 30
Humus	10 à 100
Tourbe humide	5 à 100
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Marnes du jurassique	30 à 40
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Calcaires tendres	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Schistes	50 à 300
Micaschistes	800
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000
Granits et grès très altérés	100 à 600

4.3.2. Méthodes de mesurer la résistivité du sol

Avant d'implanter un édifice abritant les équipements de télécommunication, la mesure de la résistivité sol s'avère indispensable pour déterminer dans une zone donnée l'emplacement le plus approprié pour un réseau de terre des installations de télécommunication mais aussi, déterminer pour l'emplacement choisi le système d'électrode le plus favorable.

Cependant, pour déterminer l'emplacement, il faut exécuter une série de mesures de résistivités du sol dans la zone donnée jusqu'à déterminer l'endroit caractérisé par des valeurs de résistivités du sol très faibles. De la même manière, pour déterminer le système d'électrodes, il faut réaliser dans le même endroit une série de mesures pour déterminer la résistivité des diverses couches de sol.

Ainsi, au cas où la résistivité de la couche superficielle est supérieure à celle de couches situées en-dessous, on pourra choisir une prise de terre constituée de barres enfoncées verticalement avec des longueurs appropriées. Pour mesurer la résistivité du sol, il faut établir des connexions entre l'appareil de mesure et le sol. Les résistances introduites de ce fait dans le circuit de mesure sont souvent considérables en sorte que l'un des problèmes posés par la mesure de la résistivité du sol est analogue au problème de la mesure de très faibles résistances métalliques dans des points où les résistances de contact sont comparables à la résistance à mesurer.

La solution pratique est généralement la même dans les deux cas et on utilise souvent une méthode à 4 bornes qui se fonde sur la théorie énoncée à l'origine par **FRANK WINNER** dans son ouvrage : « A Method of Mesuring earth resistivity »

4.3.2.1. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de deux électrodes de terre

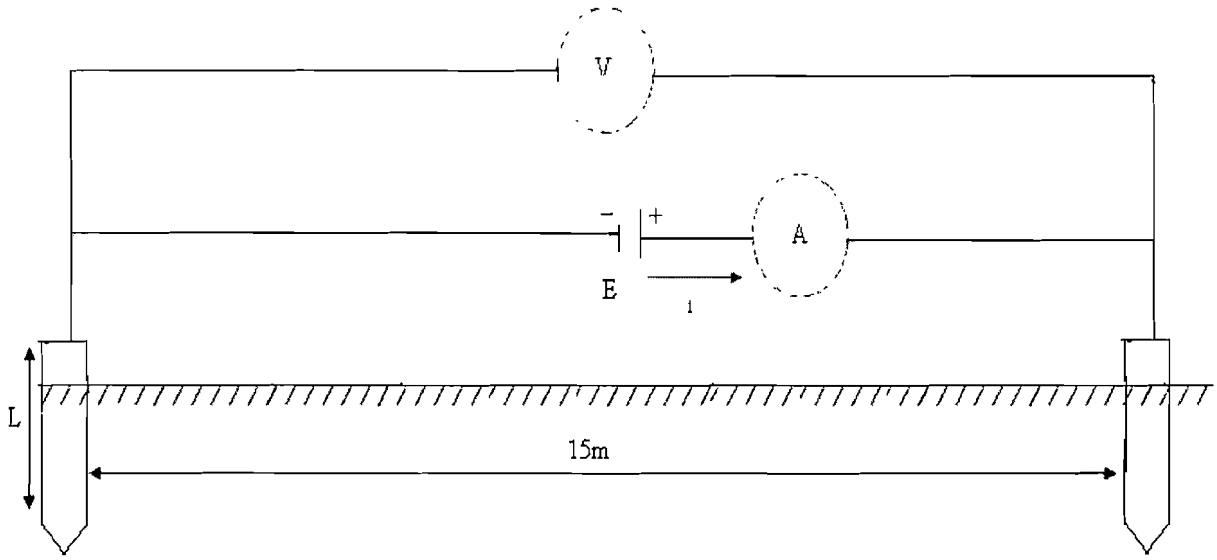


Figure 4.4 : Méthode de deux électrodes de terre pour mesurer la résistivité du sol

Cette méthode simple n'utilisant qu'une source de tension simple (pile ou batterie) est un contrôleur universel et ne donne qu'un ordre de grandeur de résistivité du sol. La méthode de deux électrodes consiste donc à enfoncer dans le sol deux piquets sur une profondeur L, espacés d'au moins 15m. Un voltmètre montre chaque fois la différence de potentiel entre deux électrodes de terre tandis qu'un ampèremètre donne à tout instant la valeur de l'intensité de courant délivrée par le générateur qui est soit une pile soit une batterie.

Comme la résistance d'un piquet de terre est voisine $\frac{\rho}{L}$ donc, on peut écrire :

$$V = \left(\frac{2 \cdot \rho}{L}\right) \cdot i \qquad \text{d'où :} \qquad \rho = \frac{V \cdot L}{2 \cdot i} \quad (4.10)$$

Avec : **ρ** : la résistivité du sol exprimée en Ωm
V : différence de potentiel mesurée entre les deux électrodes de terre.
L : hauteur d'enfouissement du piquet en m ;
i : valeur de l'intensité de courant mesurée par l'ampèremètre délivrée par la batterie.

4.3.2.2. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de quatre électrodes de terre

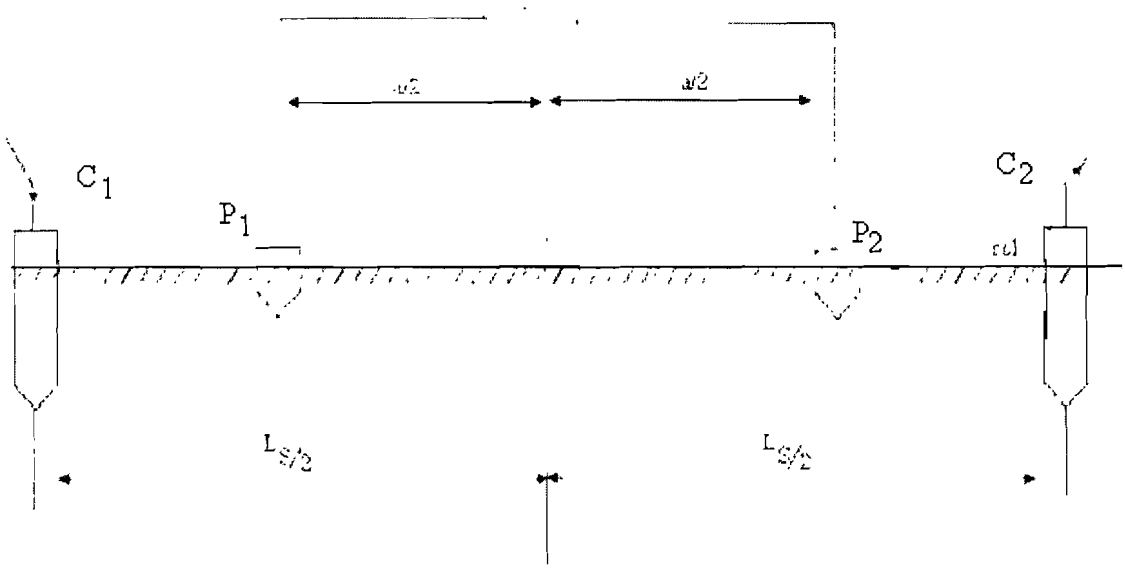


Figure 4.5 : Mesure de la résistivité du sol par quatre sondes

Comme on peut le voir sur la figure 4.5, un courant d'intensité I circule entre une sonde C_1 et une sonde C_2 par l'intermédiaire d'un sol qui, parfois est parfaitement homogènes dans toutes les directions et présentant une résistivité ρ. Deux sondes P_1et P_2 de mesure de la tension complètent le dispositif et sont placés sur la droite qui relie les deux sondes C_1 et C_2.

Le potentiel V à la surface d'une demi-sphère de terre de résistivité ρ, de rayon r au centre de laquelle une source ponctuelle écoule un courant I, est exprimée par :

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (4.11)$$

Sur la figure 4.5, le potentiel au point d'insertion de la sonde P_1 causé par la circulation du courant dans le sol par les sondes C_1 et C_2 est calculé suivant la formule (4.11) en appliquant le principe de superposition.

$$V_1 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi}\left[\frac{1}{\frac{L_S}{2}-\frac{a}{2}} - \frac{1}{\frac{L_S}{2}+\frac{a}{2}}\right] \quad (4.12)$$

$$V_1 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi}\left[\frac{\left(\frac{L_S}{2}+\frac{a}{2}\right)-\left(\frac{L_S}{2}-\frac{a}{2}\right)}{\frac{L_S^2-a^2}{4}}\right]$$

$$V_1 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi}\left[\frac{4\left(\frac{L_S}{2}+\frac{a}{2}-\frac{L_S}{2}+\frac{a}{2}\right)}{L_S^2-a^2}\right]$$

$$V_1 = \frac{\rho \cdot I \cdot 4}{2 \cdot \pi}\left[\frac{a}{L_S^2 - a^2}\right] = \frac{2 \cdot \rho \cdot I \cdot a}{\pi\left(L_S^2 - a^2\right)} \quad (4.13)$$

Ainsi, avec le même principe de superposition, on peut tirer une expression analogue pour le calcul du potentiel V_2 au point d'insertion de la sonde P_2 on a :

$$V_2 = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi}\left[\frac{1}{\frac{L_S}{2} + \frac{a}{2}} - \frac{1}{\frac{L_S}{2} - \frac{a}{2}}\right] \quad (4.14)$$

En résolvant l'équation comme on a déjà fait avec l'expression du potentiel de la sonde P_1 on aboutit à la relation suivante :

$$V_2 = \frac{-2 \cdot \rho \cdot I \cdot a}{\pi\left(L_S^2 - a^2\right)} \quad (4.15)$$

La différence de potentiel entre les deux électrodes (sondes) P_1 et P_2 est par conséquent :

$$U = V_1 - V_2 = \frac{2 \cdot \rho \cdot I \cdot a}{\pi\left(L_S^2 - a^2\right)} - \left[\frac{\left(-2 \cdot \rho \cdot I \cdot a\right)}{\pi\left(L_S^2 - a^2\right)}\right] \quad (4.16)$$

$$U = V_1 - V_2 = \frac{4 \cdot \rho \cdot I \cdot a}{\pi\left(L_S^2 - a^2\right)} \quad (4.17) \quad \text{on a :} \quad \rho = \frac{\pi\left(L_S^2 - a^2\right)}{4 \cdot a} \cdot \frac{U}{I} \quad (4.18)$$

Avec : **ρ** : résistivité du sol en Ωm.

L_S : longueur entre les deux sondes C_1 et C_2 mesurée en m.

a : distance entre les deux sondes. P_1 et P_2

U : différence de potentiel entre les deux sondes P_1 et P_2.

I : valeur de l'intensité de courant s'écoulant dans les sondes C_1 et C_2

Pratiquement, la méthode à quatre électrodes de terre fournit une valeur de la résistivité qui n'est pas affectée par les résistances de terre des sondes d'alimentation car elles ne figurent que dans le quotient du potentiel sol et la valeur de l'intensité de courant. Si par exemple les sondes d'alimentation sont introduites plus profondément dans le sol, ce qui augmente le courant I, la différence de potentiel U entre les sondes de mesure de la tension augmente proportionnellement et par conséquent le rapport du potentiel du sol et le courant reste inchangée.

Les résistances des sondes de mesure de la tension, déterminent la résistance interne la plus faible acceptable par le voltmètre utilisé.

Néanmoins, autant que le sol soit homogène, la configuration des sondes n'affecte pas la résistivité mesurée. Dans le cas d'un sol homogène, le courant I ne sera pas diffusé de façon uniforme mais s'écoulera de préférence par les couches à faibles résistivités et par conséquent le potentiel ne répondra plus à la formule (4.11).

La résistivité mesurée dépendra alors de la configuration des sondes et sera normalement désignée par le terme de résistivité apparente. Bien que le courant de mesure pénètre théoriquement à des profondeurs infinis, on peut pratiquement accepter que la profondeur effective de pénétration du courant soit égale au tiers de la distance entre les sondes d'alimentation ou, en d'autres termes que la résistivité apparente mesurée dépende seulement de la résistivité et de l'épaisseur de diverses couches du sol au dessous d'une profondeur correspondant à un tiers de la distance entre les sondes d'alimentation.

4.3.2.3. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de WINNER

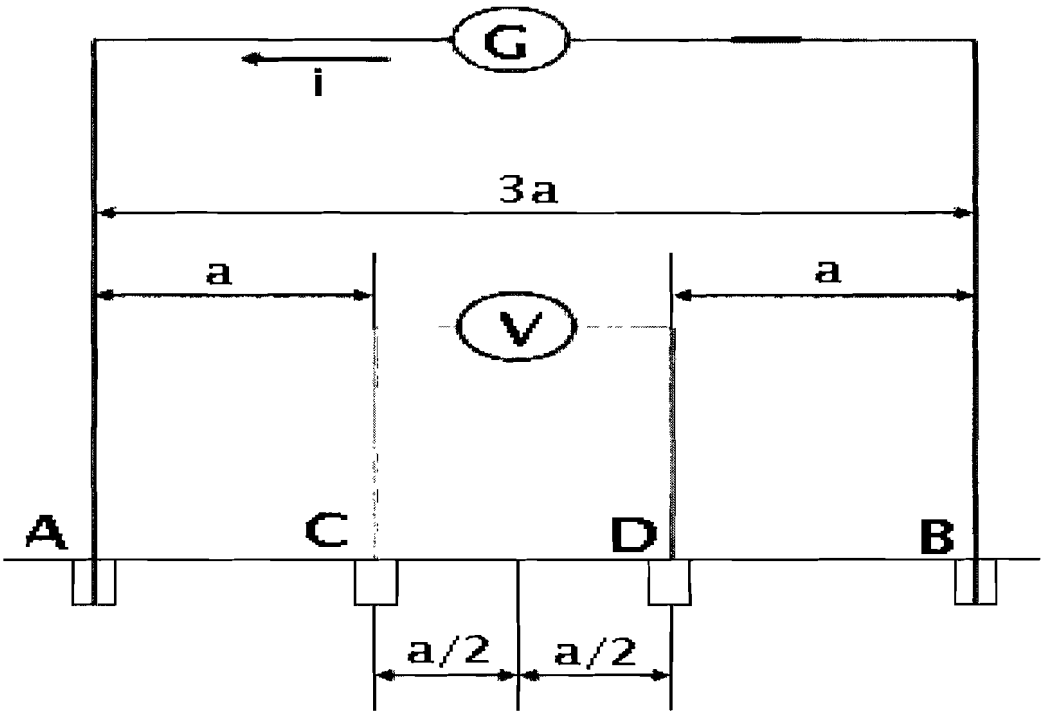


Figure 4.6 : Mesure de la résistivité du sol par la méthode de WINNER

La méthode de **WINNER** utilise elle aussi les quatre électrodes de terre mais la distance L_S entre les sondes d'alimentation A et B est égal à **3a**. Cette méthode de mesure de la résistivité apparente est la plus utilisée en pratique. En plus, dans la méthode de WINNER, les quatre électrodes sont disposées en lignes équidistantes.

L'appareil de mesure est un telluromètre classique. Les deux électrodes extrêmes sont celle d'injection de courant de mesure, les deux électrodes centrales sont celles de mesure du potentiel V comme c'est bien indiqué su la figure 4.6.

Sur la figure 4.6, le point 0 de mesure de résistivité se trouve au milieu d'un système symétrique entre les électrodes de potentiel. La distance **a** entre deux électrodes adjacentes est appelée « base de mesure» et la « ligne d'émission » dans la méthode de WINNER est égale à **3a**. La méthode de WINNER permet une simplification de la formule générale donnant la valeur de la résistivité apparente cumulée des couches des terrains situés sous le point de mesure. La résistivité du sol par la méthode de WINNER est :

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot U}{I} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot L_S \frac{U}{I} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (4.19)$$

Avec : ρ : résistivité apparente cumulée en Ωm.

a : base de mesure en m.

R : valeur en ohms, lue sur le telluromètre pour obtenir l'équilibre du galvanomètre.

L_S : distance entre les électrodes extrêmes d'injection du courant d'alimentation

U : différence de potentiel mesurée entre les deux électrodes de mesure de la tension.

4.3.2.4. Généralisation de la méthode à quatre électrodes de terre

Si le point 0 est situé au milieu de AB, tel que A0 = 0B = x ; la résistivité du sol sous le point 0 est alors donnée par la formule suivante :

$$\rho = \pi \cdot x^2 \cdot \frac{E}{i} \quad (4.20)$$

Le sol étant rarement homogène, la formule exprimant la résistivité apparente des couches cumulées du sol au point 0 jusqu'à la profondeur atteinte par le filet de courant moyen circulant entre les électrodes A et B. En pratique, on détermine le champ électrique E en faisant le rapport entre la différence de potentiel ΔU qui existe entre les sondes de terre C et D disposées symétriquement par rapport à 0, et leur écartement Δl ce qui fait que :

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l} \quad (4.21)$$

La différence de potentiel peut être exprimée en fonction de la distance respective des points C et D par rapport au courant +i et –i on obtient la relation suivante :

$$\Delta U = V_C - V_D = \frac{\rho \cdot i}{2 \cdot \pi}\left[\left(\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB}\right) - \left(\frac{1}{AD} - \frac{1}{DB}\right)\right] \quad (4.22)$$

d'où :

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \frac{\Delta U}{i} \quad (4.23)$$

Pratiquement, voilà la formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols, quels que soit la longueur des segments et en négligeant l'enfoncement des piquets dans le sol.

Le terme $\frac{\Delta U}{i}$ est la résistance R qui est mesurée par un telluromètre à 4 bornes dont le circuit voltmètre est relié aux prises C et D et le circuit ampèremètre aux prises A et B. Dans le cas où le sol est homogène la résistivité apparente est identique à la résistivité réelle.

4.3.2.5. Mesure de la résistivité du sol par la méthode de SCHUMBERGER

La méthode de Schlumberger utilise aussi le principe de 4 sondes mais ces dernières sont également placées sur une droite, mais à des intervalles inégaux et de telle manière que la distance entre les sondes d'alimentation demeure beaucoup plus grande que la distance entre les sondes de mesure de la tension. Dans la configuration de Schlumberger, la distance **a** est tellement faible et ne change pas au cours des mesures successives et $L_S >> \mathbf{a}$. Dans ce cas l'équation (4.18) devient :

$$\rho = \frac{\pi}{4 \cdot a} \cdot L_S^2 \cdot \frac{U}{I} \quad (4.24) \quad \text{Avec} : L_S^2 - a^2 \approx L_S^2$$

La méthode de **SCHUMBERGER** présente l'inconvénient que la tension à mesurer diminue en fonction du carrée de l'augmentation de la distance entre les sondes d'alimentation ; ce qui oblige à utiliser des appareils de mesure réellement très sensibles.

4.3.3. Appareils utilisés dans la mesure de résistivité avec la méthode à 4 sondes

Un grand nombre de constructeurs livre des appareils de mesure appropriés pour la mesure du quotient entre la différence de potentiel U et le courant I. Les figures 4.7.a. Jusqu'à la figure 4.7 d. montrent les schémas de principes des quatre types d'appareils couramment utilisés dans ces systèmes et chacun possèdent ses avantages mais aussi ses inconvénients.

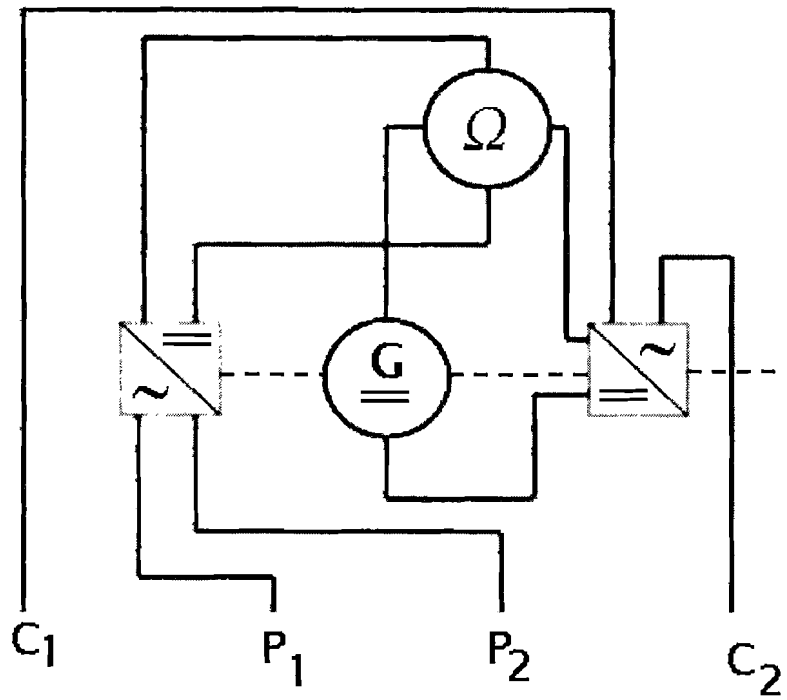


Figure 4.7.a. Système à ohmmètre

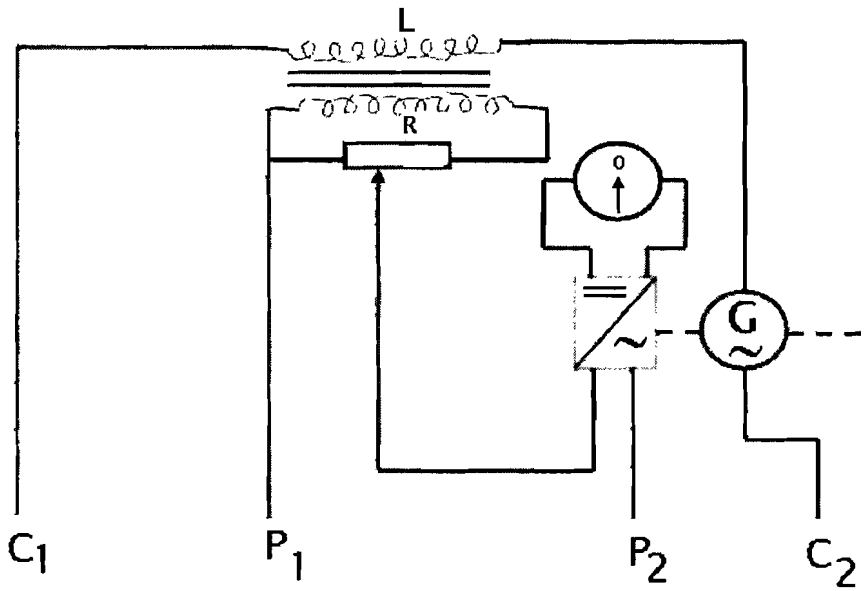


Figure 4.7.b. Système à équilibrage par zéro

Légende :

: Générateur de courant continu

: Générateur de courant alternatif

: Convertisseur transistorisé à batterie

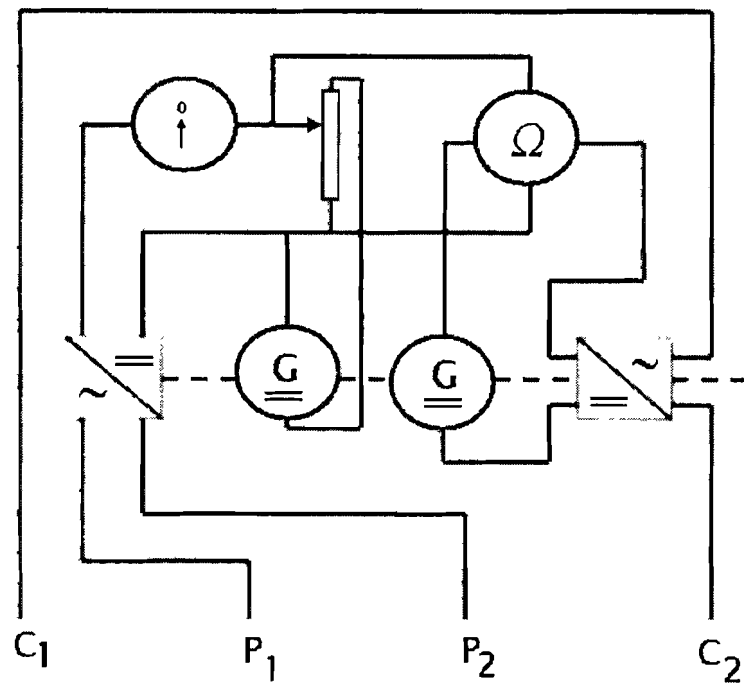
R : Résistance réglable

L : Inductance

: Ohmmètre

C_1 et C_2 : Bornes pour les sondes d'alimentation

P_1et P_2 : Bornes pour les sondes de mesure de la tension



NB : Les appareils de mesure et les dispositifs utilisés sur les figures 4.7.a et 4.7.b sont les mêmes que pour les figures 4.7.c et 4.7.d

Figure 4.7.c. Système mixte à ohmmètre et à équilibrage à zéro.

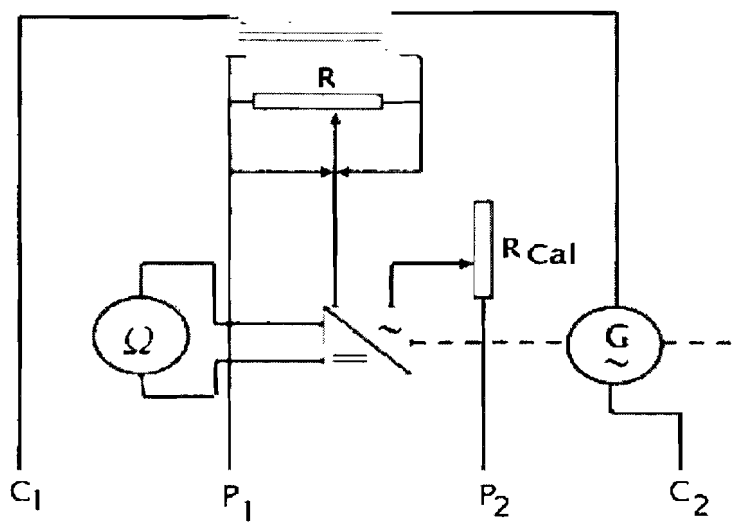


Figure 4.7.d. Système à comparateur de résistance

Dans le système à ohmmètre, la résistance interne du circuit de mesure de la tension est généralement élevée afin de réduire au minimum les effets de résistances de terre des sondes de potentiel mais cette caractéristique tend à rendre l'appareil plus sensible.

Dans la mesure de la résistivité par le système mixte à ohmmètre et équilibrage à zéro, le circuit de mesure de la tension est indépendant de la résistance de la terre des sondes de potentiel ce qui permet de donner à ce circuit une faible résistance interne et d'obtenir ainsi une plus grande sensibilité, de sorte qu'on ne peut mesurer des résistances plus faibles qu'avec le système à ohmmètre.

Dans le système à équilibrage par zéro, les résistances des sondes du circuit de mesure de potentiel sont en série avec l'indicateur à zéro, affectant ainsi la sensibilité de l'équilibrage.

Mais, dans le système à comparateur de résistance, la résistance d'étalonnage R_{Cal} est réglée jusqu'à ce que l'aiguille de l'indicateur dévie au maximum, compensant totalement les résistances des sondes dans les deux circuits d'alimentation et de mesure de la tension. Dès la figure 4.7.a. Jusqu'à la figure 4.7.d, les sources d'alimentation sont des générateurs à main, mais dans de nombreux cas, on utilise des convertisseurs transistorisés à batterie ou vibreurs à batterie.

4.3.4. Facteurs qui influent sur la précision des mesures de la résistivité

Les variations climatiques saisonnières influencent beaucoup sur la résistivité des couches superficielles d'un terrain et il s'avère toujours nécessaire de noter les conditions climatiques lors des mesures de la résistivité (température et humidité) et si possible, renouveler les mesures à des époques différentes de l'année.

Toutes ces conditions sont justifiées dans l'optique que la conduction dans le sol est essentiellement un phénomène électrolytique ; de ce fait, le passage du courant continu de mesure dans le sol provoque l'apparition d'une force contre électromotrice susceptible de causer l'écoulement des courants dans le circuit de mesure et, si on ne prend pas des précautions, d'entraîner des erreurs de mesure.

Cependant, il faut également tenir compte de la présence dans le sol des courants vagabonds d'origine tellurique ou industriel. Etant donné que la tension à mesurer est généralement faible, les tensions étrangères causées par ces courants sont fréquemment gênantes. Les appareils de mesure de la résistivité du sol qu'on trouve dans le commerce comportent normalement un dispositif permettant de réduire l'effet des courants électrolytiques et des courants vagabonds.

Le procédé généralement utilisé consiste à placer un redresseur dans le circuit de potentiel et à faire fonctionner ce redresseur en synchronisme avec le courant de mesure afin de rejeter les courants qui n'auraient ni la même fréquence ni la même phase et il y a donc avantage à faire varier la fréquence du courant de mesure.

L'inductance des conducteurs d'alimentation et de mesure de la tension doit rester aussi faible que possible, à cette fin, ces conducteurs seront au cours des mesures dégagés de leur tambour de transport. Pour diminuer le couplage inductif entre conducteurs d'alimentations et conducteurs de mesure de la tension, il est recommandé de les éloigner les uns des autres autant que possible mais il faut tenir compte aussi de la résistivité du sol en considérant les effets Kelvin dans le sol.

Pus particulièrement, si une fois la résistivité du sol est faible, les mesures faites lorsque les sondes d'alimentation sont très éloignées l'une de l'autre tendent à manquer de précision du fait de l'effet Kelvin dans le sol ; mais l'emploi de grandes distances entre sondes est peu fréquent dans les applications envisagées ici.

La mesure de la résistivité peut être compliquée et fastidieuse par la présence dans la zone prospectée de corps métalliques par exemple des tuyaux, des enveloppes de câbles et des canalisations dénudées et des filons obliques de terrains très résistants ou conducteurs venant affleurer la surface. Le franchissement d'un tel obstacle par l'électrode d'injection produit une modification de cheminement dans le sol des filets de courants et par là même du champ électrique sous le point de mesure.

Pour mettre en évidence les causes perturbatrices toujours possibles ou plus simplement pour vérifier qu'il n'existe pas de variations sensibles dans l'homogénéité du sol étudié, il faut effectuer deux mesures pour un même pont d'investigation suivant deux axes perpendiculaires. Il est également recommandé de confirmer les résultants obtenus en procédant à des mesures en un autre point proche, situé dans la même zone géologique.

4.4. Mesure de la résistance des prises de terre

La résistance de terre d'une électrode de terre est la résistance entre l'électrode et le sol environnant. Etant donné que le sol s'étend sur une distance pratiquement infinie, il est impossible de mesurer cette résistance avec précision mais, heureusement, la plus grande partie c'est-à-dire 98% de cette résistance correspond à une distance limitée. Pour pouvoir écouler par l'électrode de terre le courant de défaut, il existe plusieurs méthodes de mesurer la résistance de terre.

Cependant, il faut insérer une sonde auxiliaire à une distance telle que la résistance mutuelle entre les deux électrodes peut être ignorée. Il est souvent conseillée de prévoir la distance nécessaire de sorte qu'il est recommandé d'appliquer la méthode dite chute de potentiel lorsqu'on procède à cette mesure pour la première fois.

La figure 4.8 représente cette méthode dite chute de potentiel. Sur cette méthode, E est l'électrode de terre qui fait l'objet de mesure et C est l'électrode sonde placée à une distance L_S suffisante par rapport à E. On fait circuler un courant I de valeur connue entre les électrodes E et C et on mesure la différence de potentiel entre E et une sonde P. Par des mesures successives faites en augmentant la distance entre E et P, on peut établir une courbe des potentiels analogue à celle indiquée sur la figure 4.8

Par ailleurs, la résistance de terre est le rapport entre U et I, U étant la différence de potentiel correspondant à la partie horizontale de la courbe du potentiel. Les observations contenues dans les paragraphes 4.3.3 et 4.3.4 au sujet des appareils utilisés dans la mesure de la résistivité et des facteurs qui affectent la précision des mesures s'appliquent également à la méthode de chute de potentiel.

Dans le cas des réseaux étendus, le contrôle de la valeur ohmique d'un réseau de terre peut être effectué à l'aide d'un telluromètre à condition que celui-ci soit assez sensible et que le courant de mesure ne puisse pas être perturbé par des courants telluriques et vagabonds. La courbe en pointillée de la figure 4.8 montre l'effet d'une distance trop petite entre E et C. Si la tangente au point d'inflexion est presque horizontale, l'erreur dans l'emploi du rapport de la tension sur le courant faible est la mesure sera valable.

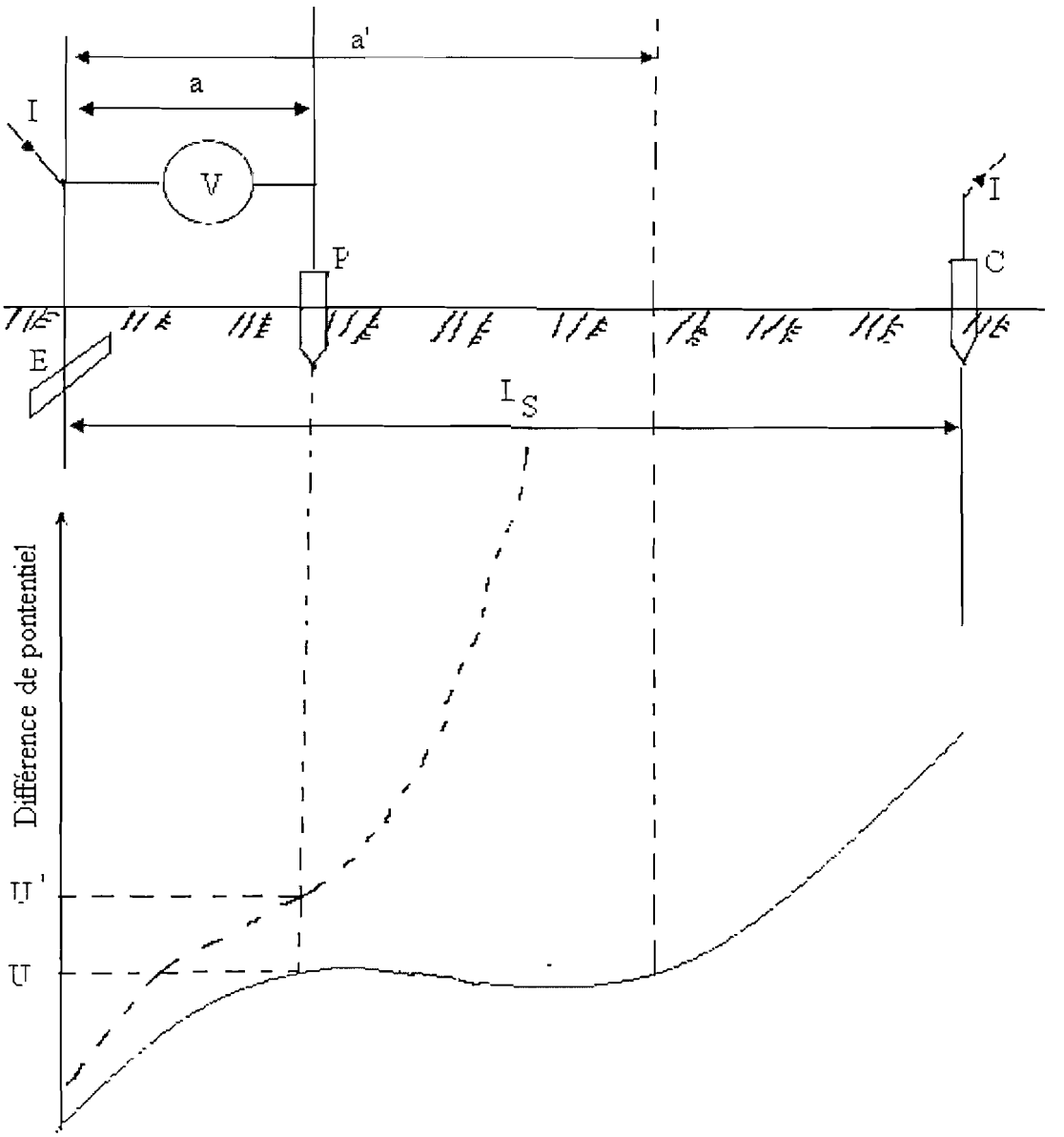


Figure 4.8.Mesure de la résistance de terre par la méthode de chute de potentiel.

CHAPITRE V : ANALYSE DES RISQUES SUR LES INSTALLATIONS DE TELECOMMUNICATION ET LES SOLUTIONS DE PROTECTION

5.1. Introduction

Dans ce présent chapitre, nous nous proposons d'analyser les risques causés par la foudre sur les installations de télécommunication ainsi que les solutions envisagées pour protéger les sites de télécommunication contre les effets directs de la foudre car les procédés utilisés pour la protection contre les effets indirects de la foudre seront traités dans le chapitre VI.

Cependant, il est tout à fait normal qu'un médecin est obligé de diagnostiquer la maladie avant de décider le médicament adéquat à donner à son patient. De la même manière, la mise en évidence de la nature électrique de la foudre grâce à l'expérience d'un cerf volant par **BENJAMIN FRANKLIN** a conduit à l'invention du paratonnerre mais aussi à ce que les autres physiciens et électriciens commencèrent à penser à toutes sortes de dispositifs susceptibles de diminuer, d'atténuer, voire même de supprimer les effets directs de la foudre.

Néanmoins, l'idée de connaître la foudre et comment s'en protéger a été une préoccupation majeure de certains chercheurs depuis 1753 au regard des dégâts occasionnés par la foudre dans le monde entier. Par exemple, 1880, un physicien Belge du nom de **MELLSENS** préconisait de protéger les édifices en les recouvrant par des fils métalliques disposés à la surface du bâtiment, reliés à des pointes en toiture et à plusieurs prises de terre : c'est la connaissance de l'idée de protéger les installations contre la foudre en utilisant des paratonnerres à cage maillée.

Les premiers essais d'amélioration d'un paratonnerre à tige simple par le Hongrois **SZILLARD** en collaboration avec le Français **DOZERE** commencèrent en 1914. Après plusieurs années de recherche et grâce à une meilleure connaissance des phénomènes physiques de la foudre, vers 1986, une nouvelle voie est ouverte ; elle conduit à renforcer l'ionisation à proximité de la pointe grâce à un dispositif électrique, autonome de toute source d'énergie.

La société Française INDELEC dès sa création en 1956, a élaboré ses produits en liaison étroite avec des ingénieurs de hauts et des organismes de recherche internationaux. L'Indelec participe aujourd'hui au plus haut niveau dans l'élaboration des normes en matière de protection contre la foudre et se positionne comme l'un des premiers groupes dans ce domaine en France et finalement cette dernière dispose son premier brevet mondial dans la technologie PREVECTRON®. Immédiatement cette initiative est primée au niveau International par deux distinctions dans le domaine d'innovation.

5.2. Risques et effets de couplage sur les installations de télécommunication

5.2.1 Lignes aériennes

L'analyse a été d'abord portée sur les lignes en fils nus. Les expériences ont montré que lors d'un coup de foudre direct, il y a bien sûr des risques de destruction en ligne ou/et aux extrémités, mais les lignes à fils nus ne sont pas les plus vulnérables compte tenu de la grande rigidité entre fils et du grand diamètre des conducteurs.

La norme Française NFC17-100 mentionne qu'on observe alors des effets distants qui sont bien nombreux à savoir :

- l'induction foudre qui est fonction de la distance du point d'impact ;
- induction énergie qui elle, est fonction des distances de rapprochements ;
- élévation du potentiel du sol sur les systèmes de mise à la terre, mais assez rare sur les systèmes fils nus.

Une autre analyse a été portée sur les lignes en câble. Les études qui ont porté sur les lignes en câble ont révélé que si le câble ne possède pas d'enveloppe métallique, on a les mêmes risques que ceux évoqués sur les lignes en fils nus mais avec une plus grande vulnérabilité du fait de la rigidité diélectrique réduite entre conducteurs actifs et du petit diamètre des gaines protecteurs comme par exemple le câble VVB-F_2.

Néanmoins, si le câble possède une enveloppe métallique avec porteur excentré, on peut citer comme risques la circulation du courant dans l'enveloppe et transfert du courant d'enveloppe en une tension sur les conducteurs intérieurs et ce phénomène a comme conséquence de provoquer le claquage entre enveloppe et conducteurs intérieurs. L'autre risque non négligeable est le risque d'induction par couplage électrique ou couplage magnétique qui s'exerce sur les conducteurs intérieurs comme sur l'enveloppe métallique.

Toutefois, si l'enveloppe métallique est mise à la terre aux deux extrémités, le courant induit résultant exerce un effet réducteur sur les conducteurs qui dépend des caractéristiques de l'enveloppe, des prises de terre d'extrémité et de la longueur soumise à l'induction. Ainsi, le risque d'induction par couplage électrique va donner naissance à une tension induite et la tension de mode commun peut être différente de la force électromotrice induite et par ailleurs, en l'absence du phénomène de surtension (résonance) on a la tension qui reste toujours inférieure à la tension induite.

En électricité, par définition, si on parle de mode commun, on entend soit :
- la surtension entre terre et neutre ;
- la surtension entre phase et terre ;
- la surtension entre conducteurs actifs téléphoniques et terre ;
- la surtension entre deux conducteurs et la terre ; d'une manière générale, c'est la surtension induite entre conducteurs et la terre ou la masse. La tension induite de mode commun engendre les phénomènes suivants :
- dangers pour les personnes et équipements d'extrémité ;
- perturbations des signaux utilisés en mode commun ;
- apparition du bruit dû au transfert de mode commun en mode différentiel.

5.2.2. Lignes souterraines

Lorsqu'on parle des lignes souterraines, il s'agit de câbles avec enveloppe métallique en contact avec le sol ou isolée du sol par une gaine plastique. Cependant, les études portées sur les câbles souterrains avec enveloppe métallique en contact avec le sol montrent que lors d'un coup de foudre au sol très proche du câble, le courant de la foudre s'écoule le long de l'enveloppe comme le montre la figure V.1 ci-dessous.

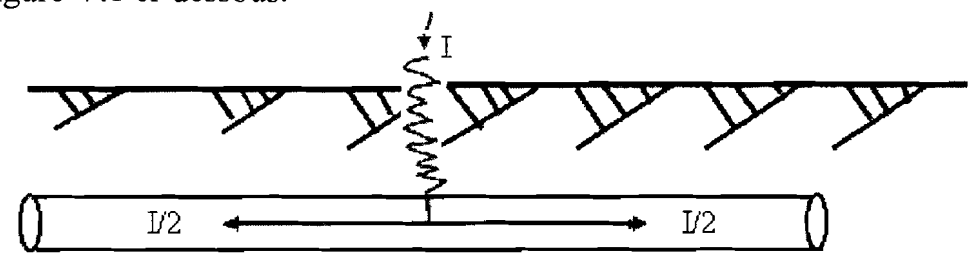


Figure 5.1. Transfert du courant de la foudre dans l'enveloppe

La tension sur les conducteurs intérieurs devient : $U = Z_T \cdot \frac{I}{2}$ (5.1)

Avec : U : la tension sur les conducteurs intérieurs
I : courant d'impact foudre sur le sol
Z_T : impédance de transfert (défaut)

Cette tension peut dépasser la limite de rigidité du câble et provoquer des destructions. On peut analyser le problème par le calcul de transmission du courant de la foudre sur les conducteurs enterrés. L'autre défaut non négligeable est le défaut sur une ligne d'énergie à proximité du câble comme le montre la figure 5.2 reprise ci-dessous.

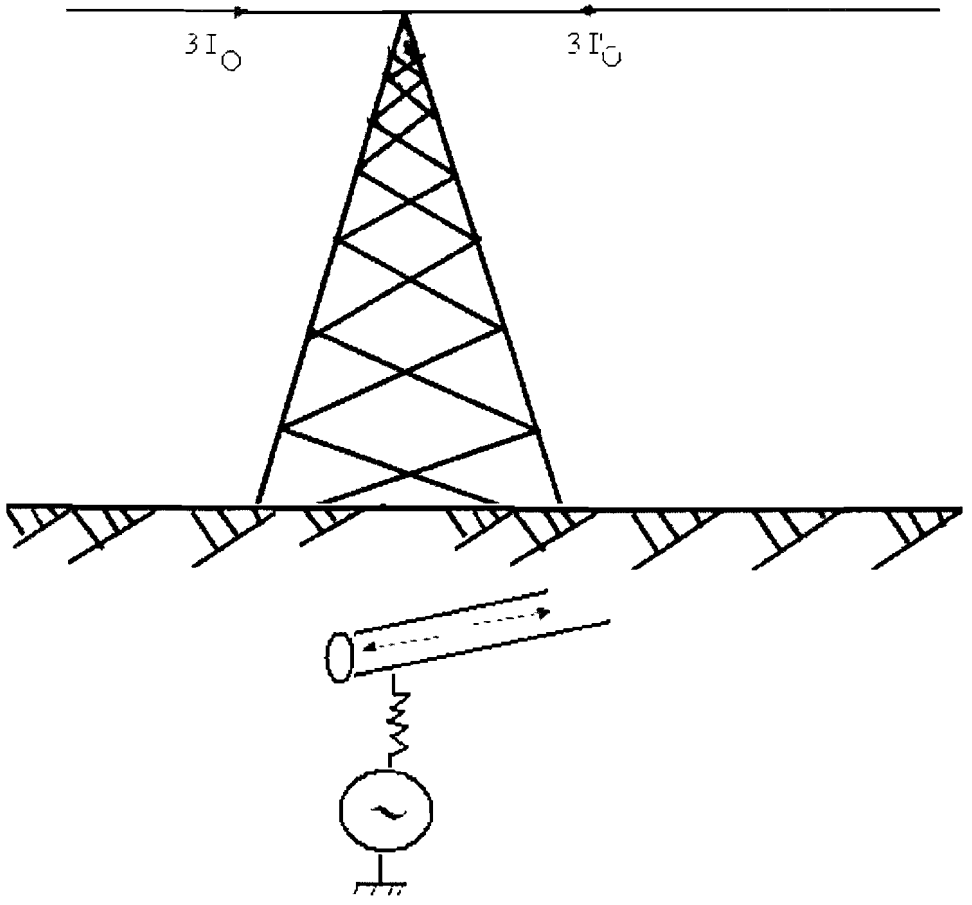


Figure 5.2. Transmission du courant foudre dans l'enveloppe

Légende :

: Générateur perturbateur

: La forme du courant foudre entre le sol et le câble support des informations.

Avec ce genre de défaut, on a alors un phénomène analogue à celui de la foudre mais cette fois-ci on peut faire un calcul plus ou moins réaliste si on connaît à l'avance l'impédance Z longitudinale de l'enveloppe, l'admittance Y transversale de l'enveloppe par rapport au sol et la distance séparant la pylône et l'enveloppe afin de pouvoir calculer l'élévation de potentiel de sol au point quelconque n en l'absence du câble enterré.

L'intérêt de ce calcul est de mettre en évidence le comportement du câble à proximité d'une prise de terre en défaut car les expériences déjà réalisées ont révélé que dans ce cas le potentiel d'enveloppe ne suit plus la fonction U_d mais se trouve diminué dans des proportions qui font que l'enterrage du câble de terre horizontal est une technique de protection contre les élévations de potentiel de sol.

Les effets distants déjà évoqués peuvent engendrer des surtensions dangereuses sur les câbles enterrés surtout par couplage magnétique avec les lignes d'énergie T.H.T. L'analyse projetée sur les câbles souterrains avec enveloppe métallique isolé du sol par une gaine plastique suggère qu'en cas de foudre direct proche, il y a un risque de claquage entre le sol et les conducteurs intérieurs à travers une gaine plastique et de la même façon, il peut y avoir claquage entre le sol et les conducteurs également sur une surtension 50HZ en cas de proximité d'ouvrages d'énergie et les effets distants sont analogues à ceux décrits ci-dessus.

Néanmoins, techniquement, la pratique a montré qu'on ne peut pas oublier les dégâts qui peuvent apparaître lors des transitions aérosouterraines. Pendant la transition aérosouterraine, il y a des systèmes de protection à parafoudre installés généralement à ce point.

Si le courant de défaut est trop élevé, ou la prise de terre de mauvaise qualité, l'enveloppe métallique du câble souterrain peut être portée à un potentiel dépassant la limite de rigidité interne des conducteurs intérieurs et cela a pour effet de provoquer des claquages à une distance élevée du point de transition. Finalement, l'étude des effets de couplage a été portée sur les câbles souterrains desservant les sites radioélectriques et les résultats de recherche suggèrent qu'en cas de coup de foudre sur l'antenne radio, l'élévation de potentiel de la prise de terre du site peut être très élevée (plusieurs V à quelques dizaines de kV)

Techniquement si le raccordement est fait avec des câbles sans enveloppe métallique ou des câbles métalliques non reliés à la prise de terre du site, il se produit un claquage entre les conducteurs intérieurs et l'enveloppe. Même en cas de raccordement de l'enveloppe à la terre du site, il faut que la prise de terre du site ait une valeur suffisamment faible pour diminuer l'élévation de potentiel du site et la valeur dans l'enveloppe du câble. La fig. 5.3 montre l'élévation du potentiel du sol en cas du coup de foudre direct sur l'antenne.

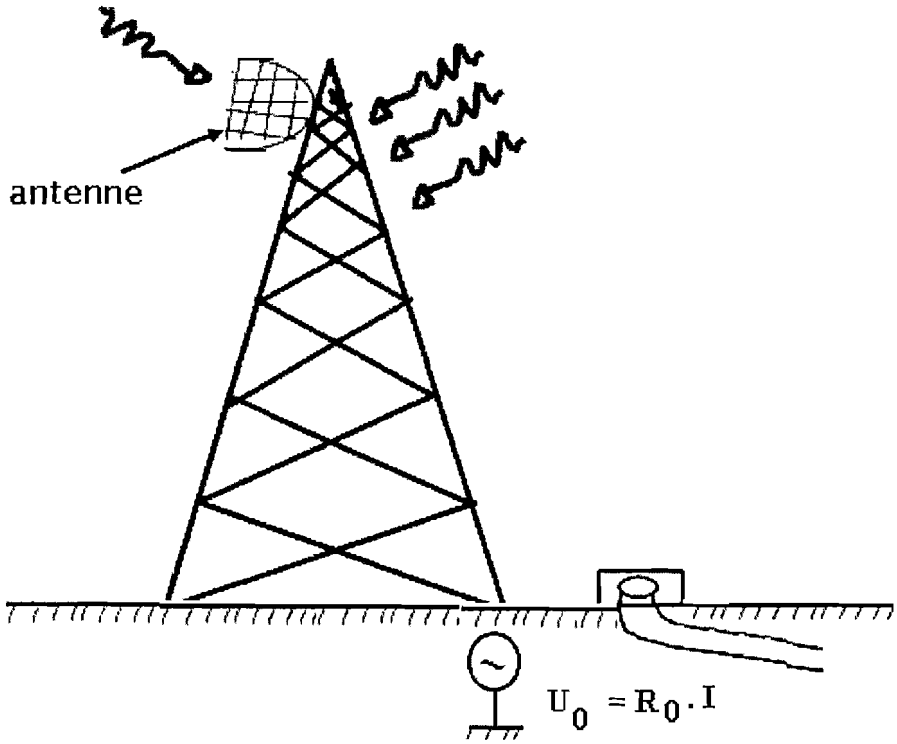


Figure 5.3 : Elévation du potentiel du sol en cas de foudre directe sur l'antenne et support d'antenne

Cependant, les études ne sont pas seulement restées sur les câbles souterrains mais, d'autres études trop poussées ont été projetées aussi sur le bâtiment, les sites de télécommunication et les sites radioélectriques. En effet, lors d'un coup de foudre direct sur les structures métalliques du bâtiment, le courant de la foudre se propage dans les structures et transfert un potentiel à l'intérieur du bâtiment équivalent à :

$$U = Z_T.I \qquad (5.2)$$

Avec Z_T : impédance de transfert qui est généralement de l'ordre de $10^{-4}\Omega$ /m.
I : valeur de l'intensité de courant de la foudre dans les structures.

Ainsi, les effets distants comme couplage par conduction dans le sol en cas de proximité avec un pylône de ligne électrique, les problèmes d'équipotentialité et les problèmes d'alimentation BT sont réellement à signaler. Réellement, ces effets distants engendrent des problèmes suivants :
- Induction foudre sur la ligne BT et conduction jusqu'au site alimenté d'une tension de mode commun et différentielle ;
- Problèmes liés au transformateur MT/BT en cas d'amorçage sur les éclateurs.

Dans ce cas, la surtension 50HZ dépasse la limite de rigidité MT/BT et crée l'apparition d'une surtension de quelques kilovolts sur les conducteurs BT d'où soit on assiste à un amorçage au niveau de l'alimentions ou soit couplage entre terre des masses et terre du neutre, ce qui produit les mêmes effets que ceux cités ci-dessus.

5.3. Analyse des solutions de protection contre les surtensions

5.3.1. Etude de la protection des lignes

Pour protéger les câbles aériens contre la foudre, il faut mettre à la terre le porteur tous les 300m au moins quand cela est possible mais toujours en respectant une terre de l'ordre de 50Ω mais aussi sans oublier la mise en place de para- surtensions en ligne, aux point de distribution.

Néanmoins, la technique de protection des câbles aériens contre les surtensions 50HZ exige la mise en place de para- surtensions aux extrémités du câble soumis à l'induction ou pour éviter un couplage entre la mise à la terre du porteur et une terre d'énergie sans oublier que la pratique a révélé qu' il faut de plus en plus souvent favoriser le passage en souterrain.

Ainsi, dans cette même optique de se protéger contre la foudre, la technique exige que lors de la transition aérosouterraine il faut toujours :
- Mettre en place des para-surtensions au point de transition sur tous les conducteurs, mêmes ceux inutilisés ;
- La prise de terre d'écoulement des para-surtensions doit être comprise entre 20 et 50Ω.

Toutefois, si la valeur ohmique de cette prise de terre n'est pas suffisamment basse, on met des para-surtensions supplémentaires à 300m du point de transition pour éviter que les claquages entre conducteurs et enveloppe ne se produisent pas dans la partie souterraine. La protection contre les surtensions 50HZ lors de la transition aérosouterraine est la pratique d'une technique d'éloignement impératif des mises à la terre des para-surtensions de toute prise de terre d'énergie (pylône métallique, transformateur MT/BT, neutre BT)

En ce qui concerne les distances limites à respecter entre les prises de terre d'énergie et les prises de terre des installations de télécommunication, il est nécessaire de faire un calcul d'évaluation de potentiel de sol en fonction des données du réseau électrique.

En principe, les câbles armés en feuillards sont assez fiables pour protéger les câbles souterrains avec enveloppe métallique en contact avec le sol contre la foudre dans des zones avec des résistivités moyennes. Mais dans des zones à haute résistivité, la technique exige qu'il faille ajouter des protections supplémentaires à savoir la mise en place d'un fil écran en acier galvanisé de 6 à 8m. Les recommandations du CCITT sont préconisées pour un pays avec un niveau kéraunique moyen mais en général ces dernières sont les suivantes :

Importance du câble	Valeur de résistivité	Protection recommandée
Câble de moindre importance	$\rho \leq 1000\Omega m$ $\rho > 1000\Omega m$	Pas de fil écran Fil écran sur les secteurs à risque foudre
Câble reliant les installations stratégiques	$\rho < 100\Omega m$ $\rho = 100$ à $1000\Omega m$ $\rho = 1000$ à $3000\Omega m$ $\rho > 3000\Omega m$	Pas de fil écran 1 fil écran 2 fils écran canalisation souterraine métallique

L'autre protection supplémentaire contre la foudre dans les zones à haute résistivité est l'utilisation d'un câble à grand facteur de qualité. Dans la technique de protection contre la foudre, le facteur de qualité est défini comme le rapport entre la rigidité diélectrique interne et l'impédance de transfert. Autrement dit, c'est le pouvoir d'écoulement en courant de l'enveloppe sans qu'il ait claquage entre conducteurs intérieurs et l'enveloppe. Mathématiquement, le facteur de qualité est défini par :

$$g = \frac{V_{max}}{Z_T} \quad (5.3)$$

Avec : V_{max} : rigidité diélectrique interne en kV

Z_T : impédance de transfert mesurée en Ω /km

La rigidité conducteur- enveloppe est souvent de l'ordre de 3kV et une impédance de transfert de l'ordre de 1Ω /km.

Toutes fois, si on parvient à améliorer la rigidité interne par isolation plastique jusqu'à 10kV et si l'enveloppe possède une impédance de transfert de 0,1Ω /km le facteur de qualité g sera de 100kAkm. Réellement, la pratique des techniques de protection contre la foudre a révélé que dans les régions à fortes résistivités, il s'avère donc nécessaire de tenir compte de la durée du courant de foudre qui peut atteindre 450 microsecondes (temps à mi-valeurs) mais aussi respecter la mise à la terre des écrans aux extrémités et l'isolation par tube plastique du câble vis-à-vis des terres d'énergie susceptibles d'écouler le courant de la foudre.

Les procédés utilisés pour la protection des câbles avec enveloppe métallique isolé du sol par une gaine plastique restent analogues à ceux décrits ci-dessus que ce soit pour la foudre et les surtensions 50HZ. Mais ce qu'il faut tout simplement ajouter c'est la technique d'utilisation du fil écran à proximité des arbres comme le montre la figure 4.4 avec une distance de 30Cm entre câble et fil écran qui reste toujours obligatoire.

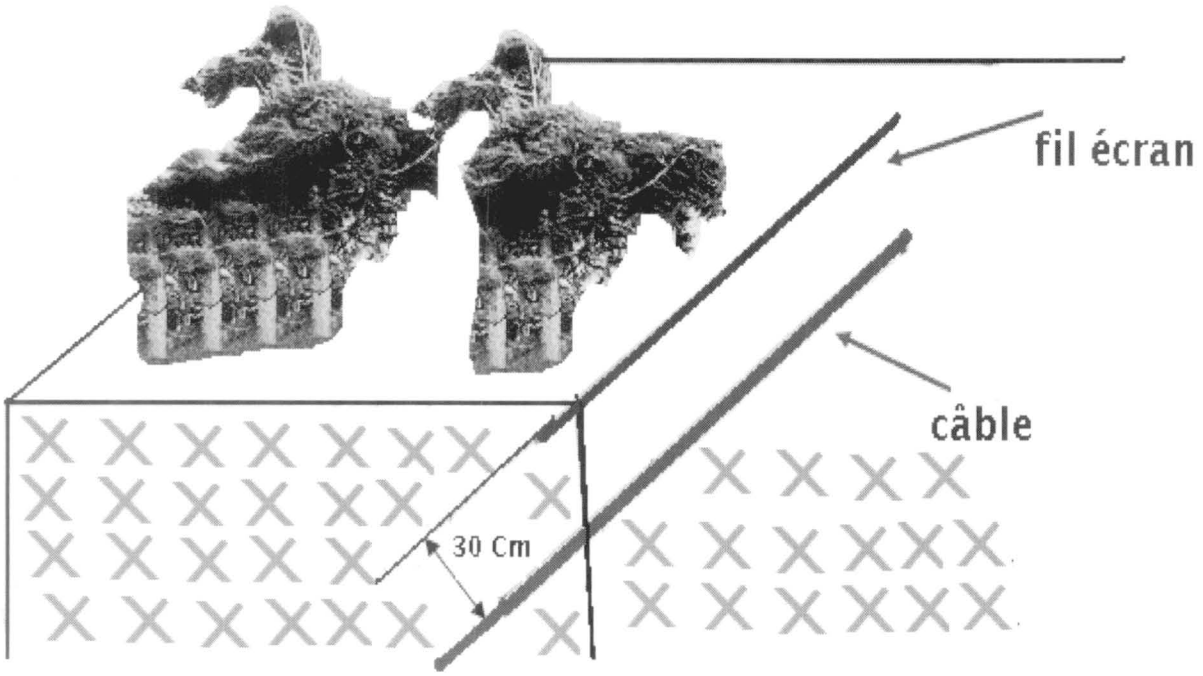


Figure 5.4 : Technique d'utilisation du fil écran à proximité des arbres

5.3.2. Etude de la protection des bâtiments

La protection des bâtiments abritant les équipements de télécommunications contre la foudre doit être étudiée avec plus de rigueur eu égard à notre sujet de projet de fin d'étude.

Pour protéger les bâtiments installés sur des hauteurs ou dans des zones dégagées contre la foudre, ces derniers doivent être munis d'un paratonnerre avec une prise de terre inférieure à 10Ω. Le paratonnerre et sa descente à la terre sont placés toujours le plus loin possible des structures supportant les équipements de télécommunications. Le principe de protection externe du bâtiment est sommairement décrit sur la figure 5.5 ci-dessous.

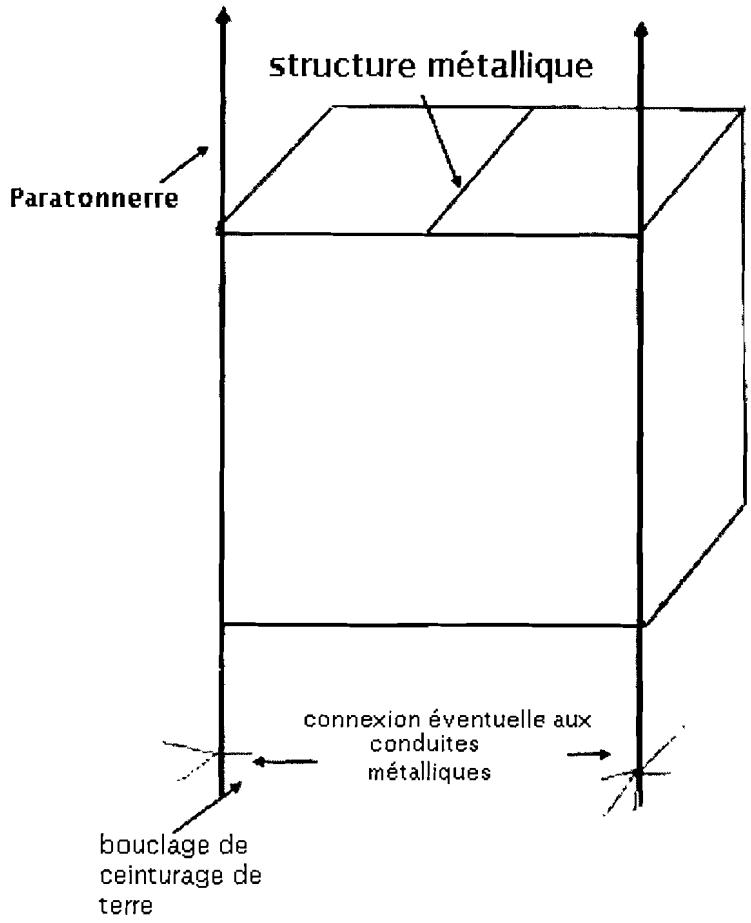


Figure 5.5 : Principe de protection externe au bâtiment

Néanmoins, pour réaliser une protection interne du bâtiment, il s'agit de chercher l'équipotentialité du bâtiment et le principe est l'interconnexion des structures métalliques du réseau de terre, du système de protection pour éviter toute différence de potentiel. Mais si le bâtiment est à plusieurs étages, on réalise une équipotentialité (réseau maillé-étoilé) à chaque étage.

De surcroît, les équipements électroniques doivent être équipés de protections spéciales car tous les accès lignes au répartiteur doivent être tous munis de para-surtensions, même sur les paires non utilisées. Dans la même optique de protéger des bâtiments abritant les équipements de télécommunication contre la foudre, plusieurs normes internationales font jusqu'à présent des recherches sur les dispositifs de protection contre la foudre.

Ainsi, la norme Commission Electrotechnique Internationale, la norme Française NFC17-100 et d'autres normes en vigueur traitant les dispositifs de protection contre la foudre permettent l'utilisation des composants naturels comme les infrastructures métalliques de l'installation si leurs natures et leurs dimensions sont conformes aux prescriptions de ces normes.
Les dispositifs de protection externes sont :
- Le paratonnerre à tige simple ;
- Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA) ;
- Les fils tendus ;
- La cage maillée.

L'évaluation du risque de foudroiement des différentes constructions d'un site est calculée selon les prescriptions de la norme NFC17-100 et celle du risque de foudroiement sur les structures est réalisée en trois étapes :
1° Calcul de la surface équivalente de captation de la foudre ;
2° Calcul de la fréquence attendue de coups de foudre directs sur la structure ;
3° Calcul de la fréquence acceptée de coups de foudre directs sur la structure.

5.3.2.1. Calcul de la surface équivalente de captation de la foudre sur un bâtiment

La surface équivalente de captation de la foudre d'une structure S_1 est calculée avec la formule extraite de la norme NFC17-100.

(5.4)

$$S_1 = L \cdot l + 6h_1(L + l) + 9 \cdot \pi \cdot h_1^2 \quad (5.4)$$

Avec : L : longueur de structure
l : largeur de structure
h_1 : hauteur de la structure.

La surface équivalente d'une structure est donc toujours plus grande que sa superficie au sol comme le montre la figure 5.6.

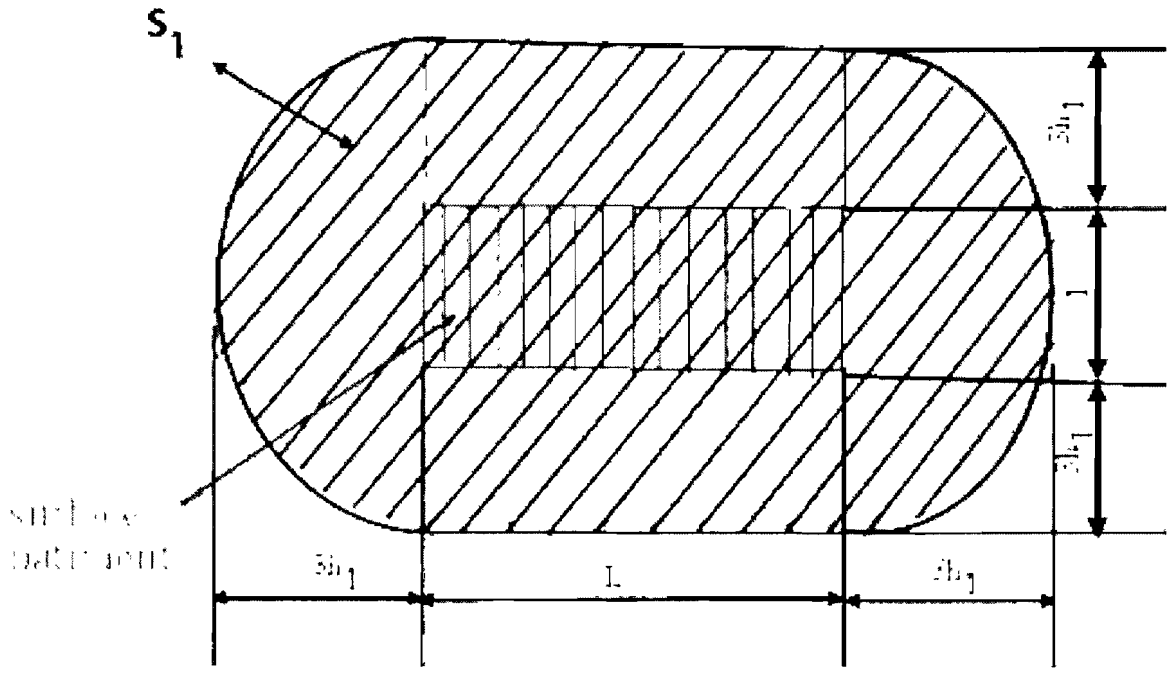


Figure 5.6 : surface de captation d'une structure

Généralement, il arrive souvent que deux structures soient suffisamment proches pour que leurs surfaces équivalentes se superposent. Dans ce cas, il faut réduire les valeurs des surfaces calculées. Par ailleurs, la foudre ne tombe pas au même instant sur deux structures voisines. Si la structure comporte une cheminée suffisamment haute, la formule de surface de captation change et devient S_2 qui sera calculée en fonction de la hauteur de cette cheminée grâce à la formule suivante :

$$S_2 = 9 \cdot \pi \cdot h_2^2 \quad (5.5).$$

Avec : h_2 : la hauteur de la cheminée.

La surface de captation équivalente A_e de la structure correspond dans ce cas au maximum des surfaces S_1 et S_2 c'est-à-dire :

$$A_e = Max(S_1; S_2)$$

5.3.2.2. Calcul de la fréquence attendue de coups de foudre directs sur une structure

Le calcul de la surface attendue de coups de foudre directs sur une structure s'effectue à partir des données suivantes :

- La surface de captation de la structure : de manière claire, plus cette dernière est grande, plus la fréquence attendue de coups de foudre est importante ;
- La densité de foudre local ;
- L'influence de l'environnement proche autour de la structure considérée. L'influence de l'environnement proche est prise en compte grâce au coefficient C_1 défini dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.1 : Coefficient environnemental C_1

C_1	Environnement
0,25	Structure située dans un espace où il y a des structures ou des arbres de même hauteur ou plus élevés.
0,5	Structures entourées de plus petites structures.
1	Structure isolée : pas d'autres structures à au moins une distance de $3h_1$.
2	Structure au sommet d'une colline ou promontoire.

En définitive, la fréquence attendue de coups de foudre directs sur une structure est donnée par la formule suivante :

$$N_d = 2 \cdot N_g \cdot C_1 \cdot A_e \cdot 10^{-6} \qquad (5.6)$$

Avec : N_g : densité de foudroiement local mesurée en impact/an/km^2
A_e : surface équivalente de captation en m^2 ;
C_1 : coefficient d'environnement.

5.3.2.3. Calcul de la fréquence acceptée de coups de foudre directs sur une structure

Le calcul de la fréquence acceptée de coups de foudre directs sur une structure se fait à l'aide de la formule extraite dans la norme NFC17-100. Les paramètres C_2, C_3, C_4, et C_5 visent à évaluer de manière forfaitaire la gravité des dommages causés par des coups de foudre directs. Les tableaux ci-dessous montrent les valeurs de ces paramètres.

Tableau 5.2 : Coefficient structurel C_2

Nature de la structure	Toiture en métal	Toiture commune	Toiture inflammable
Structure en métal	0,5	1	2
Structure courant	1	1	2,5
Structure inflammable	2	2	3

Tableau 5.3 : Coefficient qui tient compte du contenu de la structure C_3

Le contenu de la structure	Valeur
Sans valeur inflammable	0,5
Forte valeur ou particulièrement inflammable	2
Valeur exceptionnelle, irremplaçable ou très inflammable, explosive	3
Valeur courante ou normalement inflammable	1

Tableau 5.4 : Coefficient qui tient compte de l'occupation de la structure C_4

Occupation de la structure	valeur
Inoccupée	0,5
Normalement occupé	1
Evacuation difficile ou risque de panique	3

Tableau 5.5 : Coefficient qui tient compte des conséquences de foudroiement C_5

Conséquences d'un foudroiement	valeur
Pas de nécessité de continuité de service et aucune conséquence sur l'environnement	1
Nécessité de continuité de service et aucune conséquence sur l'environnement	5
Conséquence sur l'environnement	10

V.3.3. Notion de protection contre les effets directs de la foudre

Du fait des limites de la norme NFC17-100 pour les installations à risques, il est nécessaire de faire appel à d'autres normes en vigueur en particulier la prénorme EN6102-1 «Protection des structures contre la foudre».

En effet, comme l'indique la norme NFC17-100 pour les installations à risques, celle-ci s'applique aux installations de paratonnerres destinées à protéger les bâtiments contre les coups de foudre directs. La norme NFC17-100 ne traite pas de la protection des installations contre les surtensions d'origine atmosphérique et transmises par le réseau de distribution car les conditions de protection correspondantes sont définies dans les normes concernant les règles d'installations notamment guide UTE15443.

Selon la norme Française NFC17-100, on distingue deux principaux types de systèmes de protection contre les coups de foudre directs à savoir les paratonnerres à tige (ionisant à dispositif d'amorçage ou tiges simples) et les paratonnerres à cage maillée.

5.3.3.1. Aspect sur les paratonnerres à tige et leurs modes de fonctionnement

Lors d'un coup de foudre, il existe au niveau du sol un champ permanent croissant en fonction de l'approche du traceur par bonds. A partir d'un certain seuil, généralement de 50 à 100kV/m, l'effet corona se développant naturellement au sommet de certaines aspérités, va permettre le démarrage des charges ascendantes se dirigeant vers le nuage. La charge ascendante se présentant près du traceur par bonds venant du nuage déterminera la position du canal ionisé permettant l'écoulement du courant foudre, c'est-à-dire, le point d'impact de l'éclair.

Normalement, il semble claire que la décharge ascendante démarrera rapidement vers le nuage, elle rejoindra le traceur descendant et déterminera le point d'impact. Le but du paratonnerre à tige va donc être la facilitation des conditions de formation de la charge ascendante qui dépendent de la géométrie de la tige (pointe), la valeur du champ et une bonne prise de terre.

Avec ce principe de fonctionnement, une installation de paratonnerre à tige est composée par :

- Une pointe paratonnerre proprement dite (dispositif de capture), montée sur un mât rallonge fixé au point le plus haut du bâtiment à protéger ;
- Un ou deux conducteurs de descente reliant la pointe au sol ;
- Un ou deux prises de terre, chargées d'écouler et de disperser les courants de la foudre.

Dans cette famille des paratonnerres à tige, on retrouve les paratonnerres ionisants **PREVECTRON** à dispositif d'amorçage électrique autonome et les paratonnerres à tige simple. Les premiers sont des paratonnerres réputés, très performants et sont utilisés partout où la protection doit être maximum. Les paratonnerres à tige peuvent être soit à un seul effet de pointe, ou tige JUPITER à 4 effets de pointe destinés à assurer la protection des zones réduites.

5.3.3.1.1. paratonnerres ionisants PREVECTRON

Le **PREVECTRON** est un paratonnerre à dispositif d'amorçage électrique indépendant de toute source d'énergie extérieure mais aussi c'est un générateur d'ions à l'approche de l'orage. L'objectif du paratonnerre **PREVECTRON** est de créer un phénomène d'ionisation autour de la pointe avec une mise en œuvre facile. Le schéma repris ci-après montre le type de paratonnerre **PREVECTRON** le plus utilisé en pratique lorsque le dispositif à protéger se trouve dans la zone la plus exposée aux coups de foudre.

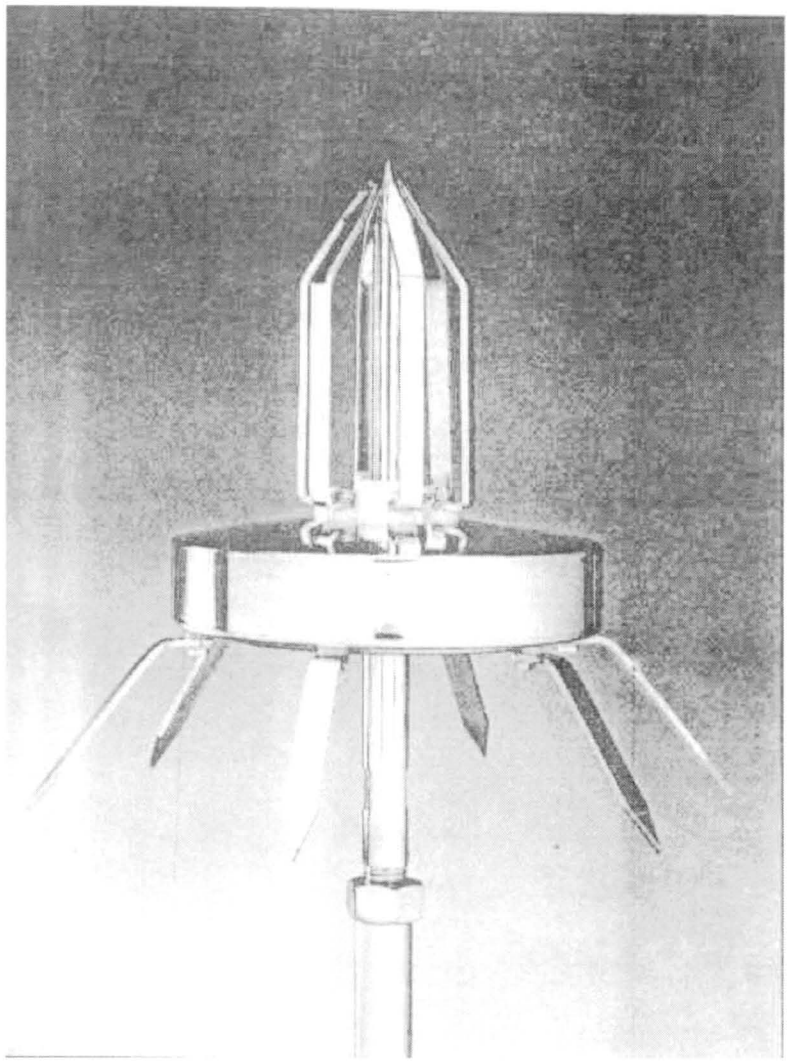


Figure 5.7 : Le paratonnerre ionisant PREVECTRON type S_6

Le paratonnerre ionisant PREVECTRON respecte le principe de fonctionnement de tout paratonnerre à tige mais ce dernier puise son énergie dans le champ électrique atmosphérique qui augmente considérablement par temps d'orage. L'énergie ainsi récupérée est d'abord accumulée puis libérée en masse à un moment prédéterminé, pour assurer une ionisation par étincelage au niveau de la pointe. Cette ionisation artificielle, associée à l'effet de pointe déjà existant, favorise le pouvoir attractif du paratonnerre, donc, augmente son rayon de protection.

La description du paratonnerre ionisant PREVECTRON reste aussi la même chose que tout autre paratonnerre à tige car ce dernier est constitué par :

- Une pointe captrice en cuivre massif électrolytique ou inoxydable relié en permanence à la terre pour y conduire le courant foudre ; cette pointe fait déjà office de paratonnerre à tige ;
- Un dispositif électrique d'ionisation contenu dans son carénage étanche en acier inoxydable sur lequel sont fixées les électrodes inférieures de récupération de l'énergie ambiante et des électrodes supérieures génératrices d'étincelles.

Quant aux caractéristiques de ce genre de paratonnerre, l'ionisation au niveau de la pointe permet :

- L'amorçage de l'effet corona grâce à une émission d'électrons en phase avec la montée du champ électrique, le PREVECTRON fait apparaître plutôt le phénomène de l'effet corona, ce qui augmente et contribue déjà largement à une grande efficacité de l'ensemble du dispositif ;
- L'anticipation du traceur obtenu grâce à la formation précoce de l'effet corona par émission d'électrons générés, ce qui permet à la pointe du PREVECTRON d'anticiper la formation d'un traceur ascendant par rapport à toute aspérité environnante ;
- La maîtrise du déclenchement d'ions : la génération d'ions, en effluves (décharges électriques), dans un laps de temps et avec une précision remarquable suscite au bon moment un chemin préférentiel de la foudre.

Cependant, les avantages du paratonnerre ionisant PREVECTRON sont :
- Le fonctionnement totalement autonome ;
- Le système simple, donc prix compétitif ;
- La continuité permanente de la pointe à la terre ;
- L'ionisation permanente de la pointe par temps d'orage ;
- Une fiabilité maximum, sans entretien et testé à plus de 3000000 de volts.

La norme NFC17-102 de juillet 1995 traitant les installations extérieures de protection contre la foudre en abrégé I.E.P.F donne une formule de rayon de protection R_P d'un paratonnerre PREVECTRON et cette dernière dépend de plusieurs paramètres à savoir, l'avance à l'amorçage en microsecondes, la hauteur réelle du paratonnerre PREVECTRON et le diamètre. Cette formule permet de déterminer la distance parcourue par le traceur ascendant.

$$\Delta l = V \cdot \Delta t \qquad (5.8)$$

Δl : la distance parcourue par le traceur ascendant en mètres
V : la vitesse du traceur ascendant en m/sec
Δt : l'avance à l'amorçage en microsecondes.

- Le niveau de protection I, II, III requis pour le projet est déterminé selon le guide d'évaluation du risque de foudroiement selon la norme NFC17-102 dans l'annexe B ;
- La hauteur réelle du paratonnerre PREVECTRON au dessus de la surface à protéger en mètres.

Ainsi donc, le rayon de protection d'un paratonnerre PEVECTRON devient :

$$R_P = \sqrt{h(2D-h) + \Delta l(D+\Delta l)}[1]$$

Avec : D : diamètre du paratonnerre PREVECTRON® qui varie entre 20 à 65mm en fonction du niveau de protection requis.

N.B : pour h >5m la formule (5.9) reste valable mais pour h < 5m, il faut se référer aux tableaux ci-dessous.

Tableau 5.6 : Niveau de protection N°1

h (m)	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20
S_6.60	31	47	63	79	79	79	79	79	80	80
S_4.50	27	41	55	68	69	69	69	76	70	70
S_3.40	23	35	46	58	58	59	59	75	60	60
T_{S3}.40	23	35	46	58	58	59	59	59	60	60
T_{S2}.25	17	25	34	43	43	43	44	44	45	45

Tableau 5.7 : Niveau de protection N°2

H(m)	2	3	4	5	6	8	10	15	20	45
S6.60	39	58	78	97	97	98	99	101	102	105
S4.50	34	52	69	86	87	87	88	90	92	95
S3.40	30	45	60	75	76	77	77	80	81	85
T_{S3}.40	30	45	60	75	76	77	77	80	81	85
T_{S2}.25	23	34	40	57	58	59	61	63	65	70

Tableau 5.8 : Niveau de protection N°3

H(m)	2	3	4	5	6	8	10	10	20	45	60
S6.60	43	64	85	107	1O7	108	109	109	113	119	120
S4.50	38	57	76	95	96	97	98	98	102	109	110
S3.40	33	50	67	84	84	85	87	87	92	99	100
T_{S3}.40	33	50	67	84	84	85	87	87	92	99	100
T_{S2}.25	26	39	52	65	66	67	69	69	84	84	85

T_S = type de paratonnerre dans la famille des paratonnerres PREVECTRON

[1]= www.ineris.fr

5.3.3.1.2 Paratonnerres à tige simple

Les paratonnerres à tige simple regroupent des modèles à savoir :
- Modèle simple à un effet de pointe ;
- Modèle **JUPITER** à 4effets de pointe.

Les paratonnerres à tige simple et à un effet de pointe Indelec sont constitués d'une pointe captrice effilée en cuivre chromé d'une longueur de 2,3m éventuellement rallongée par des éléments en acier galvanisé, pouvant atteindre une longueur de 8m sans haubanage.

Néanmoins, il ya des paratonnerres TD inox qui sont spécialement utilisés pour la protection des cheminées industrielles. La pointe en acier inoxydable d'une longueur de 1,2m est vissée sur un support coudé, lui-même fixée à la cheminé par soudure ou cerclage avec entraxe 100m et un trou de diamètre 11mm. Les pointes de paratonnerres modèles **JUPITER** à 4effets de pointe sont prévues pour assurer une protection efficace des antennes collectives, ou indépendamment sur les mâts rallongés de différentes longueurs. Le schéma ci-après montre le modèle JUPITER à 4effets de pointe.

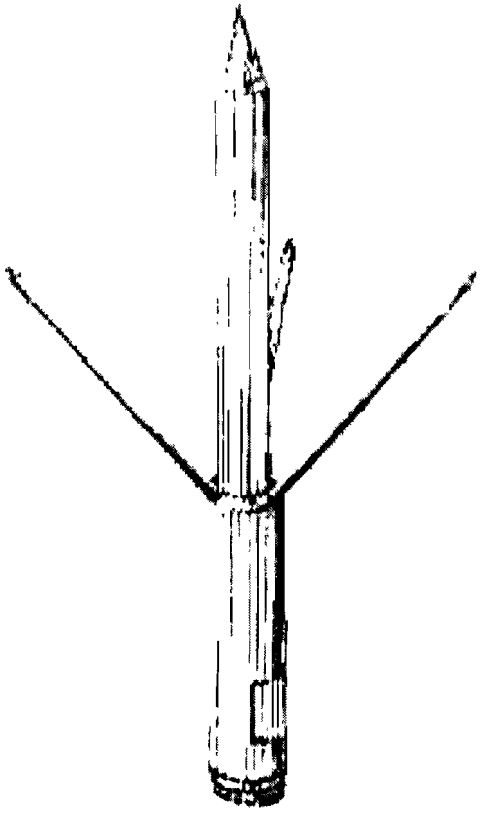


Figure 5. 8 : Le paratonnerre type JUPITER à 4 effets de pointe

5.3.3.2 Paratonnerres à cage maillée

Les paratonnerres à cage maillée sont constitués par de petites pointes (0,30 à 0,50) et de conducteurs horizontaux et verticaux, reliés à plusieurs prises de terres .Ces installations avec des paratonnerres à cage maillée ne protègent que les bâtiments qu'elles entourent, à l'exception de toute autre zone. Des systèmes de protection par **fils tendus** sont parfois envisagés pour des sites de télécommunication à configuration particulière.

5.3.4 Protection des sites radioélectriques

La protection des sites radioélectriques contre la foudre doit être réalisée en mettant en place toujours un paratonnerre sur le pylône d'antenne avec une mise à la terre si possible inférieur à 10Ohms. Pour plus de sécurité, la pratique peut imposer une valeur proche à 1Ohm. Si la résistivité du terrain est élevée, le support d'antenne repose sur un sol contenant du minerai ou si les sites de télécommunication se trouvent dans des régions exposées aux coups de foudres directs. La figure ci-après montre la mise à la terre du pylône et l'interconnexion pylône /shelter.

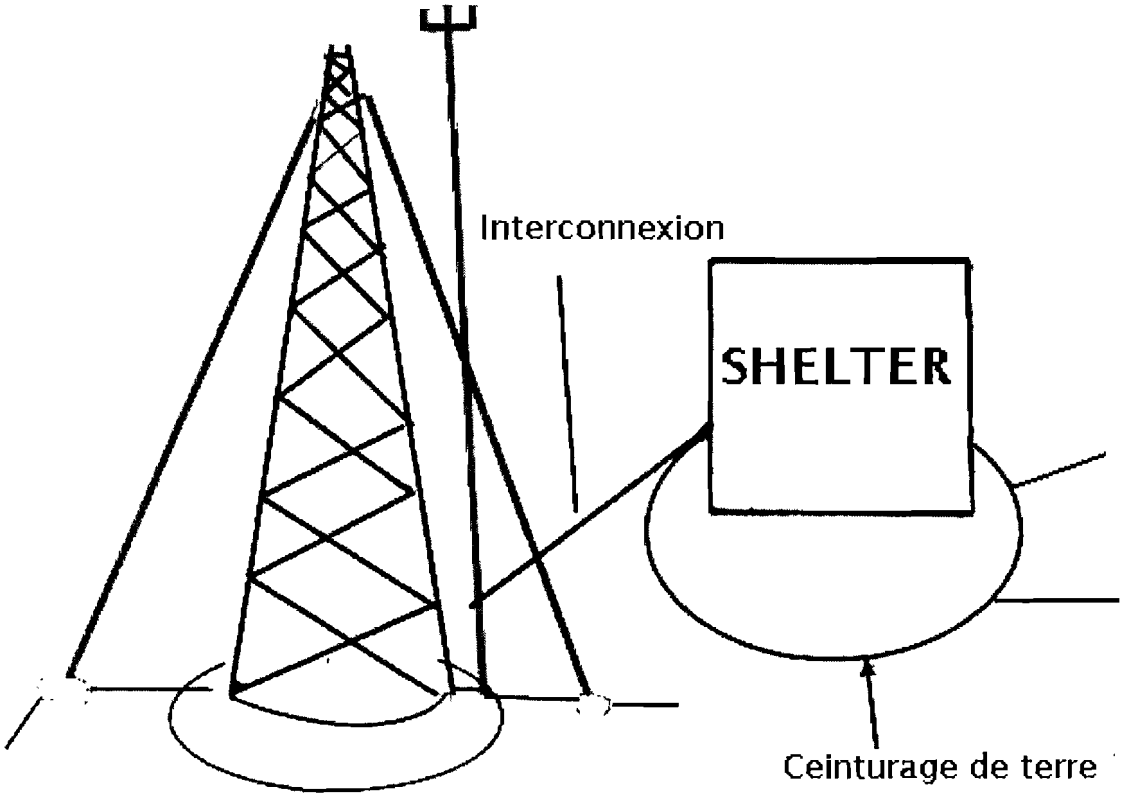


Figure 5.9 : mise à la terre du pylône et l'interconnexion pylône/shelter

Cette interconnexion doit se faire dans le sol par un câble méplat ou en acier galvanisé et par passage horizontal des câbles entrant dans le bâtiment (shelter). Généralement si les câbles sont souterrains, cette interconnexion entre pylône et bâtiment se fait à l'aide d'une conduite métallique.

Comme précédemment, il s'agit là aussi d'une protection externe contre la foudre. Il faut nécessairement ajouter au titre de la protection, un soin très attentif aux connexions du réseau de terre à une réalisation de prise de terre correcte c'est-à-dire une prise de terre avec électrode de terre inférieure à 20m, essayer d'éviter toute courbure et envisager des produits additionnels pour améliorer la valeur de la prise de terre .

En rapport avec la protection interne contre la foudre, il est conseillé de réaliser une équipotentialité dans le bâtiment (shelter) mais bien sûr éviter des connexions trop longues en effectuant une liaison à une prise terre. Cette dernière sera faite toujours par les contacts métal contre métal.

Pour ce qui est de la protection interne contre les surtensions 50HZ, si on suppose que les câbles desservant le site sont protégés, le problème à ce moment serait seulement celui de l'adduction du courant électrique BT et à ce moment la technique de protection exige la mise en place des parafoudres sur les points stratégiques. La technique de découplage de l'alimentation par un transformateur de haute rigidité est souvent employée mais aussi celle de détection d'orage au cas où le découplage seul ne suffit pas.

CHAPITRE VI. AMELIORATION DE LA PROTECTION DU NŒUD HERTZIEN DE MUGONGO

6.1. Introduction.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les protections actuelles du site hertzien de **MUGONGO** contre la foudre et contre l'alimentation en énergie électrique afin de donner notre contribution dans la recherche de tous les moyens techniques possibles pour améliorer la protection de ce site.

En effet, ce centre de télécommunication est un cas intéressant, d'une part, parce qu'il a déjà subi des dégâts dus à la foudre alors qu'il était alimenté en énergie électrique par un groupe électrogène de secours, et d'autre part parce qu'il est actuellement raccordé sur le réseau de transport d'électricité de la **REGIDESO.** Ainsi, compte tenu de l'importance de ce centre de télécommunication, l'aspect protection devient vraiment primordial.

Le problème de protection contre la foudre du nœud hertzien de **MUGONGO** réside dans la valeur de la résistivité du terrain de ce site car ce dernier repose sur un sol rocheux granitique (quartzitique) proéminente et une très bonne conductivité en surface (profondeur de quelques cm). Dans ces conditions, il n'est pas aussi facile de réaliser des prises de terre de bonne valeur et très efficaces contre la foudre. La valeur de la résistivité du nœud hertzien de MUGONGO dépasse 10000Ωm sans oublier aussi qu'il faut mentionner qu'en réalité les valeurs mesurées sont certainement minorées du fait de l'humidité.

Cependant, lors de la construction de ce centre, c'est-à-dire la situation initiale du nœud hertzien de MUGONGO, ce dernier était alimenté en énergie électrique par un groupe électrogène en permanence. Ainsi, si on exclue les raccordements filanés métalliques, le seul risque des dégâts est celui dû à un coup de foudre direct sur le centre hertzien. Dans ce cas, tout défaut d'équipotentialité dans le bâtiment pouvait devenir dangereux pour les équipements électroniques de télécommunication. En plus, la structure de la prise de terre actuelle n'est pas favorable dans la mesure où elle est réalisée en surface avec du méplat galvanisé de trop grande longueur.

Toutefois, l'impédance de choc d'une telle structure n'est pas donc favorable à l'écoulement du courant de la foudre et à l'équipotentialité du site de télécommunication. L'enquête que nous avons mené sur le centre hertzien de MUGONGO dans les dates du 28, du 29, du 30 et du 31 décembre 2006 nous a révélé en réalité la situation actuelle de ce centre de télécommunication en rapport avec la protection de ce site contre la foudre et contre les installations d'énergie électrique.

Le risque causé par le défaut d'équipotentialité subsiste toujours sur ce centre. Par ailleurs, le transformateur MT/BT qui alimentait ce centre et qui était placé juste à 120m du centre a été bousié à cause des coups de foudre directs. Par après, l'ONATEL s'est coalisé avec TELECEL pour acheter un nouveau transformateur afin que la REGIDESO puisse encore une fois raccorder ces deux centres hertziens sur le réseau BT.

Le transformateur actuel a été installé à 280m du centre hertzien de MUGONGO-ONATEL et à 100m du centre hertzien de MUGONGO-TELECEL et tout cela a été fait dans le but de contourner les arbres de grandes hauteurs qui sont implantés à l'endroit où était installé l'ancien transformateur brûlé.

En considérant donc le raccordement BT sur le centre hertzien de MUGONGO, nous pouvons faire des analyses suivantes :

En cas de surtension sur la prise de terre du site ce qui est inévitable en considérant la hauteur des supports des antennes qui est de 59,5m pour l'antenne de réception et de 58m pour l'antenne d'émission, il y a risque de claquage du centre vers la BT et dans cette hypothèse c'est l'alimentation BT qui risque d'être endommagée.

En cas d'amorçage des éclateurs MT au niveau du poste MT/BT il y a deux risques possibles :

Premièrement, la surtension foudre risque de dépasser très largement la rigidité du disjoncteur sectionneur au niveau du poste MT/BT ce qui s'est déjà produit sur le nœud hertzien de MUGONGO. Par conséquent, la foudre devait se propager vers le local hertzien. Par illusion, on peut penser que les parafoudres BT (actuellement ce sont les parafoudres DS40-230V) protègent l'alimentation, mais il peut se produire une tension différentielle du fait de la dissymétrie du circuit BT qui aura des répercutions sur l'installation d'énergie du centre hertzien.

Deuxièmement, le courant de suite 50HZ peut créer une élévation de potentiel de la terre des masses MT telle qu'il y ait passage de la surtension sur les conducteurs BT par rupture diélectrique du disjoncteur sectionneur et là encore le réseau BT risque de souffrir au niveau de l'alimentation en énergie du centre hertzien.

Néanmoins, un autre risque à ne pas oublier est l'effet distant de la foudre sur le câble aérien torsadé (longueur de 280m depuis le transformateur actuelle jusqu'au local hertzien), dû à l'induction électromagnétique. La protection par parafoudre BT ne garantit pas la suppression des surtensions différentielles pour les installations d'énergie.

Dans ce présent chapitre, nous allons inventorier les solutions possibles en rapport avec la protection des effets indirects de la foudre et donner notre contribution dans l'amélioration de la protection du nœud hertzien de MUGONGO en rapport avec l'équipotentialité du nœud hertzien de MUGONGO, le découplage, le renforcement de la protection de l'alimentation BT à l'entrée du bâtiment hertzien et l'étude de l'amélioration de la prise de terre du site.

6.2. Méthodes de protection des installations par parafoudres

6.2 .1. Protection du réseau électrique BT par parafoudre de la gamme rouge

Le parafoudre est un dispositif qu'on installe dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions transitoires et la limitation de la durée de l'amplitude des courants de suite c'est-à-dire les courants débités par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge, dû à l'amorçage.

En général les parafoudres sont destinés à protéger les équipements électriques contre les surtensions transitoires d'origine atmosphériques (foudre) ou industrielles (manœuvre sur le réseau, commutation.....). Ces surtensions peuvent apparaître sur tous les types de câbles électriques d'alimentation BT, d'instrumentation, de contrôle, de commande ou encore de réseau informatique. Elles peuvent être générées par un coup de foudre direct sur la ligne concernée ou par induction électromagnétique très intense rayonné par l'éclair.

La protection du réseau électrique BT par parafoudre de la gamme rouge fait l'objet d'une recommandation de la norme Française NFC15-100, notamment lorsqu'elles sont alimentées par la ligne aérienne. Une protection de front à l'origine de l'installation sera réalisé par l'intermédiaire d'un parafoudre haute énergie type VGA par exemple et les protections complémentaires appropriés aux matériels plus sensibles seront assurées de manière coordonnée, grâce aux parafoudres à plus faibles tension résiduelle (type VA, DC ou SF).

Les parafoudres haute énergie de type VGA sont conçus pour protéger les installations monophasées ou triphasées au niveau de leur alimentation basse tension contre les surtensions provoquées sur le réseau par des coups de foudre directs ou indirects, ou encore par les manœuvres de couplages.

La protection par parafoudre type VGA-haute énergie est réalisée par intermédiaire d'un éclateur à diélectrique solide, monté en parallèle avec une varistance à oxyde de zinc. Les surcharges en courant de l'ordre de 10kA traversent la varistance, et les surintensités plus importantes jusqu'à 100kA sont écoulées à la terre par amorçage de l'éclateur sans causer de dommage à l'appareil. La tension résiduelle appliquée au système aval est de l'ordre de 2,5kV à courant de décharge de 5kA. Le fort pouvoir d'écoulement du parafoudre VGA permet d'en faire l'élément de front d'une protection étagée de l'installation réalisée en association avec les parafoudres DG ou DGT.

Selon les recommandations de la norme Française NFC15-100 et du guide d'installation UTE C15-531 ou UTE C15-443, le parafoudre de type VGA est destiné à la protection des systèmes électriques contre les surtensions transitoires.

6.2.1.1. Description et guide d'installation du parafoudre VGA-haute énergie



Figure 6.1 : Schéma du parafoudre type VGA-haute énergie

Selon les recommandations de la norme française NFC15-100 et du guide d'installation UTE C15-531 en rapport la continuité de service et la signalisation de défaut, ces normes exigent que la continuité de service du parafoudre VGA est assurée par l'intermédiaire et par le biais d'un fusible thermique intégré placé en série sur la varistance et qui l'isole du circuit en cas de défaillance tandis que le défaut est indiqué en face avant de l'appareil par voyant lumineux et peut être signalée à distance par l'intermédiaire d'un contact sec à ouverture. La ligne de signalisation doit être protégée par une protection modulaire du type à ses deux extrémités pour arrêter des éventuelles surtensions qui lui seraient induites. Un bouton de test permet généralement de simuler ce défaut pour vérifier le bon fonctionnement du voyant lumineux et du contact de report à distance.

En parlant de l'installation du parafoudre type VGA, la norme Française NFC15-100 exige que dans la majorité des cas, l'emplacement du parafoudre VGA doit être juste en aval du disjoncteur principal de l'installation et installé dans un coffret IP54 en raison du souffle généré par les éclateurs lors de leurs fonctionnement. Mais, dans la plupart des cas, il est toutes fois possible de le monter directement dans l'armoire électrique sur rail OMEGA de 35mm en s'assurant qu'un autre appareil ne soit situé à moins de 150mm en dessous.

En rapport avec le câblage du parafoudre VGA-haute énergie, la norme Française NFC15-100 exige que si l'alimentation électrique du bâtiment à protéger n'est pas équipée d'un disjoncteur inférieur à 100A, il y a nécessité de rajouter des fusibles $100A_{gl}$ en amont du parafoudre. La liaison à la terre doit être aussi courte que possible. Les câbles de raccordement entre le parafoudre et la ligne à protéger doivent avoir une section identique à celle-ci, avec un minimum de $10mm^2$ et un maximum de $50mm^2$. Si des fusibles de $100A_{gl}$ ont dû être rajoutés, la norme Française NFC15-100 exige l'utilisation d'un câble de $35mm^2$. Le tableau ci-après montre les caractéristiques techniques du parafoudre VGA-haute énergie selon la norme C.E.I 99.1.

Tableau 6.1 : Caractéristiques techniques du parafoudre VGA

Tension maximum de régime permanent U_C	280V/50HZ ou 275V/400HZ.
Courant maximum admissible (onde 8/80) Valeur de crête en charge Energie spécifique	100kA. 50As. $2,5.10^6.A^2s$
Courant de choc maximum	65kA
Tension résiduelle à 5kA Tension résiduelle à courant de la foudre	< 2,5kV < 4kV
Calibre maximum du disjoncteur de protection amont sinon ajouter des fusibles	100A
Courant de court-circuit admissible	25kA/50HZ
Plage de température de service	-40 °C à 80°C
Section maximum du fil de signalisation de défaut	$2,5mm^2$

6.2.1.2. Protections des installations électriques par parafoudres type DP haute énergie

Les parafoudres modulaires hautes énergie de type DP sont conçus pour protéger les installations électriques au niveau de leur alimentation basse tension par les coups de foudre directs ou indirects ou encore les manœuvres de couplage (parasites industriels). Il est nécessaire d'installer un module par phase à protéger et éventuellement un pour le neutre selon son schéma de distribution.

De la même manière, la protection est réalisée par un éclateur à fort pouvoir d'écoulement en courant. Les surcharges sont écoulées à la terre sans destruction de l'appareil jusqu'à des courant de 100kA. La tension résiduelle appliquée au système aval est de l'ordre de 3,5kV pour un courant généré par un coup de foudre direct sur la ligne. Le fort pouvoir d'écoulement du parafoudre DP en fait un élément de front idéal dans le concept de protection cascade des équipements électriques réalisé en association avec les parafoudres de type DG ou DGT.

L'installation du parafoudre type DP-haute énergie respecte aussi le guide d'installation UTE C15-531 ou UTE C15-443 de la même manière que c'est mentionné pour les parafoudres type VGA-haute énergie. En réalité, ce qu'il faut ajouter ce que pour le câblage, une fois si l'alimentation électrique du bâtiment à protéger n'est pas équipée d'un disjoncteur inférieur à 200A pour les parafoudres DP280 ou 63A pour les parafoudres DP500, il y a nécessité de rajouter des fusibles de ces calibres en amont du parafoudre. Le tableau ci-après montre les caractéristiques techniques du parafoudre type DP haute énergie.

Tableau.6.2 : Caractéristiques techniques des parafoudres type DP-haute énergie

Type	DP280	DP500
Tension maximum de régime permanent U_C	225V/50HZ à 60HZ	440V/50HZ à 60HZ
Courant d'essai sous un pôle I_{max}	75kA	75kA
Courant d'essai sous deux pôles ou plus I_{max}	100kA	100kA
Tension résiduelle U_P	< 3,5kV	< 3,5kV
Résistance d'isolement R_{iso}	$< 10^3 M\Omega$	$< 10^3 M\Omega$
Temps de réponse	< 100ns	< 100ns
Calibres maxima du disjoncteur de protection amont sinon rajouter des fusibles.	$200A_{gl}$	$63A_{gl}$
Courant de court-circuit admissible	25kA/50HZ	25kA/50HZ
Plage de température de service	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C
Section du câble utilisable	Min $10mm^2$ Max $50mm^2$	Min $10mm^2$ Max $50mm^2$



Figure 6.2. Schéma du parafoudre type DP-haute énergie

6.2.1.3. Protection des installations électriques contre les surtensions par parafoudres type VA, DG et DGT

Les parafoudres de type VA assurent la protection des systèmes électriques contre les surtensions pouvant apparaître sur leur circuit d'alimentation par temps d'orage (effets de la foudre), ou lors des opérations de couplage sur le réseau (parasites industriels). Selon le schéma de distribution, il y a lieu de prévoir un élément par phase à protéger et éventuellement un supplémentaire pour le neutre.

En ce moment, la protection est assurée par une varistance au carbure de silicium montée en série avec un éclateur qui écoule à la terre les surcharges en courant de l'ordre de 10kA, tout en assurant sur le système aval une tension résiduelle inférieure à 1,5kV pour un courant de décharge de 5kA. Une protection étagée de l'installation peut être réalisée en utilisant les parafoudres VA conjointement avec un parafoudre haute énergie de type VGA en amont, et si c'est nécessaire on peut aussi utiliser des dérivateurs de type S ou CS en aval, pour obtenir le niveau de protection souhaité.

Toutes fois, il est souhaitable d'installer les parafoudres VA aussi près que possible de l'équipement à protéger par exemple dans le tableau de distribution électrique le plus proche. Pour le câblage, si la longueur du câble reliant le parafoudre au réseau électrique est supérieure à 3m, il y a lieu de placer les fusibles de $50A_{gl}$ entre les deux. La liaison à la terre doit être réalisé avec du câble très court. Les câbles de raccordement entre le parafoudre et la ligne à protéger doivent avoir une section identique à celle-ci avec un maximum de $25mm^2$.

La continuité de service du parafoudre VA est assurée par le biais d'un fusible thermique intégré en série avec la varistance, et qui l'isole du circuit en cas de défaillance. Ce défaut est indiqué par un témoin visuel placé en face avant de l'appareil. Le tableau 6.3 ci-après montre les caractéristiques techniques des parafoudres type VA.

Tableau 6.3 : Caractéristiques techniques des parafoudres type VA.

Type	VA280	VA500
Tension maximum de régime permanent U_C	280V/50HZ	560V/50HZ
Courant nominal de décharge	5kA	2,5kA
Courant maximum de décharge	10kA	10kA
Courant maximum de choc	65kA	65kA
Tension résiduelle à courant nominal	< 1 ,5KV	< 2,5KV
Tension résiduelle à courant d'amorçage	environ 1,9kV	environ 2,2kV
Temps de réponse	environ 150ns	environ 150ns
Courant de court-circuit admissible	25kA/50HZ	25kA/50HZ
Plage de température	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C
Section maximale du câble	$25mm^2$	$25mm^2$

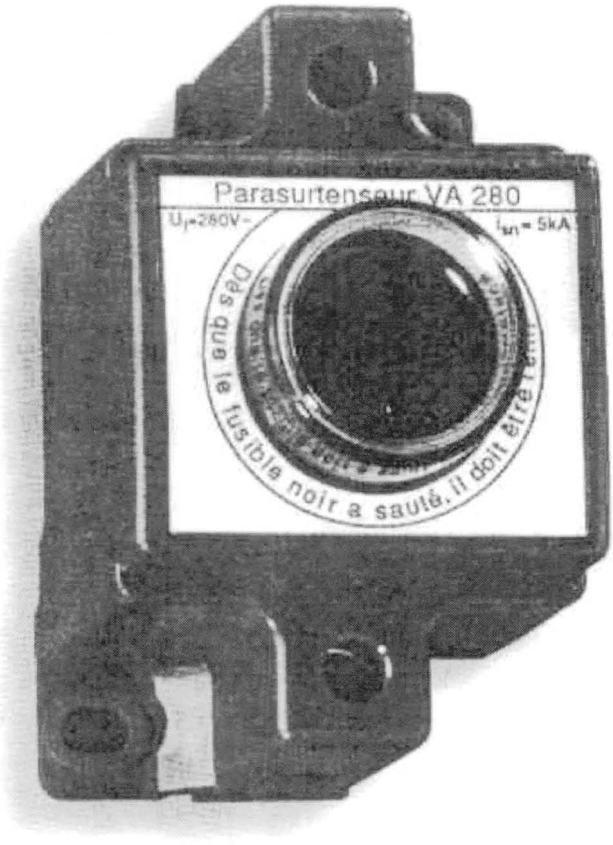


Figure 6.3.Schéma du parafoudre type VA

Ainsi, l'étude portée sur les parafoudres de type DG et DGT montre que ces derniers sont conçus eux aussi pour assurer la protection des installations électriques contre les surtensions pouvant apparaître sur leur circuit d'alimentation par temps d'orage. De la même manière, la protection est assurée par une varistance à oxyde de zinc, capable d'écouler à la terre un courant de l'ordre de 40kA sans subir des dommages. Une protection cascade de l'installation peut être réalisée en utilisant les parafoudres DG et DGT conjointement avec un parafoudre haute énergie type VGA ou DP en amont.

La technologie de protéger les installations électriques contre la foudre permet le remplacement de la varistance sans intervention sur le câblage du *parafoudre type* DGT grâce à une cartouche déblocable. Le guide d'installation UTE C15-531 recommande qu'il faille installer le parafoudre DG ou DGT aussi près que possible de l'équipement à protéger par exemple dans le tableau divisionnaire qui l'alimente. En rapport avec le câblage, la norme Française NFC15-100 suggère que si l'alimentation électrique du bâtiment à protéger n'est pas équipée d'un disjoncteur inférieur à $125A_{gl}$ pour les parafoudres DG75, DG150, DG280, DG385 ou $100A_{gl}$ pour les parafoudres DG500, DGT280 et DGT500 il y a lieu de rajouter des fusibles de ces calibres en amont des parafoudres.

La liaison à la terre doit être courte que possible. Les câbles de raccordement entre les parafoudres et la ligne à protéger restent identiques que ceux utilisés pour les parafoudres type VA. Le tableau 6.4 regroupe les caractéristiques techniques des parafoudres de type DG et DGT.

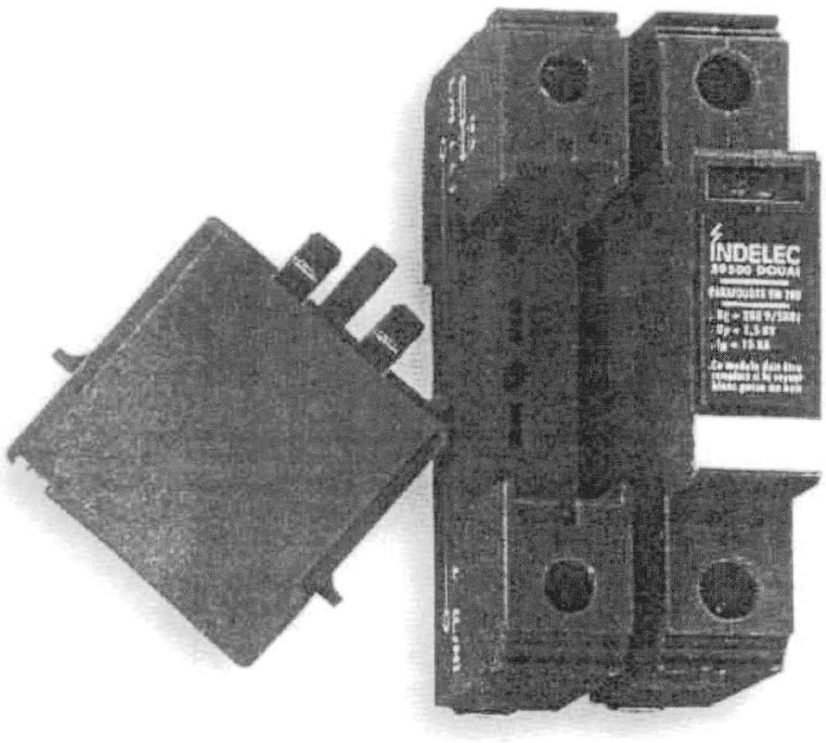


Figure 6.4 : Schéma du parafoudre DG et DGT

Tableau 6.4 : Caractéristiques des parafoudres DG ET DGT

Type	DG75	DG150	DG280	DG385	DG500	DGT280	DGT500
Conformités aux normes	NFC 61-740	NFC 61-740	NFC 61-740	NFC 61-740	NFC 61-740	NFC 61-740	NFC 61-740
Tension maximum de régime permanent U_C	75V/50 HZ 100V_	150V/50 HZ 200V_	280V/50 HZ 350V_	385V/50 HZ 550V_	440V/50 HZ 600V_	280V/50 HZ 300V_	440V/50 HZ -
Courant Nominal de décharge	10kA	15kA	15kA	15kA	15kA	15kA	10kA
Courant Maximal de décharge	40kA	40kA	40kA	40kA	40kA	40kA	40kA
Courant maximum de choc	65kA	65kA	65kA	65kA	65kA	65kA	65kA
Niveau de protection U_P	450V	750V	1,5kV	2kV	3kV	1,5kV	2,5kV
Tension Résiduelle à 5KA	< 350V	< 550V	< 1kV	< 1,5kV	< 2,5kV	< 1kV	-
Courant de Court-circuit admissible	25kA/50 HZ	25kA/50 HZ	25kA/50 HZ	25kA/50 HZ	25kA/50 HZ	25kA/50 HZ	25kA/50 HZ
Temps de réponse	< 25ns	< 25ns	< 25ns	< 25ns	< 25ns	< 25ns	< 25ns
Plage de température	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C	-40°C à 80°C
Section de câble	$35mm^2$	$35mm^2$	$35mm^2$	$35mm^2$	$35mm^2$	$35mm^2$	$35mm^2$
Caractéristiques du module	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20

6.2.1.4. Choix d'un parafoudre dans la protection cascade du réseau électrique BT

Le guide pratique UTE C-443 permet de choisir un parafoudre selon les paramètres suivants :

►**Tension maximale de régime permanent U_C:** C'est la valeur spécifique admissible de la tension à fréquence industrielle qui peut être appliquée de façon continue entre les bornes du parafoudre sans affecter son fonctionnement. La valeur de U_C est fonction du régime du neutre du réseau. Pour les protections entre conducteurs actifs et terre il convient de choisir :

- Pour les réseaux IT, $U_C \geq 1{,}732U_O$
- Pour les réseaux TT et TN, $U_C > 1{,}5U_O$, avec U_O : tension simple du réseau en volts.

On peut toujours signaler que le réseau basse tension alimentant les équipements de télécommunication doit obligatoirement avoir le régime du neutre type TT. Pour les protections entre phases et neutre, il convient de choisir $U_C \geq 1{,}1U_O$ que ce soit le type de réseau.

►**Courant de court-circuit admissible I_{CC} :** I_{CC} est la valeur maximale de l'intensité de court-circuit externe admissible, définie par le constructeur qui peut traverser le parafoudre lors d'un défaut sur la charge entre les bornes d'entrées et de sorties. Le parafoudre et son dispositif de protection contre les courts-circuits doivent être choisis de telle façon que I_{CC} admissible soit supérieur au courant de défaut 50HZ au droit du parafoudre et généralement, une valeur plus courant de I_{CC} est de 3kA.

►**Le niveau de protection U_P:** U_P est la tension à la borne du parafoudre lors du passage du courant maximal. Le niveau de protection U_P est un paramètre qui caractérise les performances de protection du parafoudre et qui est choisi parmi les valeurs de protection dont les plus courantes pour un réseau 220V/400V sont : 2,5kV ; 2kV ; 1,5kV ; 1,2kV et 1kV.

Les équipements électroniques et électriques commercialisés sur le marché Européen depuis le premier Janvier 1996 doivent être conformes à la directive CEM 89/336. Ainsi, la norme générique d'Immunité pour les environnements industriels NFEN 61000-6-2 établi en août 1999 indique l'utilisation de la norme d'essai de la qualification CEI 61000-4-5 sur l'Immunité aux ondes de chocs. Cette norme d'essai permet de vérifier la tenue aux ondes de choc des parafoudres et de vérifier que les équipements fonctionnent correctement lorsque les ondes résiduelles d'un coup de foudre sont appliquées sur les câbles.

Pour un environnement industriel, le niveau de sécurité est de 4kV en mode commun c'est-à-dire tension électrique entre phase et terre et de 2kV en mode différentiel. En premier approche, en choisissant U_P inférieur à 2,5kV, les équipements marqués CE ne doivent être pas perturbés.

Cependant, sur les sites industriels, une partie des équipements ont été qualifiés pour un environnement résidentiel ou commercial et c'est le cas des micro-ordinateurs sauf les PC durcis ou les équipements de télécommunication et de radiocommunication comme les télécommandes et autres. Pour un environnement résidentiel ou commercial, le niveau de sécurité est de 2kV en mode commun et 1kV en mode différentiel.

Lorsque le fabricant d'un matériel n'indique pas à l'utilisateur final les résultats de ses essais de qualification, la valeur de U_P est généralement déterminée selon le type de matériel. Le critère de choix proposé par certains fabricants de matériels est le suivant :

- Pour le matériel électrotechnique, la valeur de U_P est de 2,5kV ;
- Pour le matériel électronique peut sensible, la valeur de U_P est de 1,8kV ;
- Pour le matériel électronique sensible, la valeur de U_P est de 1kV ;
- Pour le matériel électronique très sensible, la valeur de U_P est de 0,5kV.

NB : Les matériels électrotechniques sont les moteurs, les machines électriques de forte puissance et moyenne puissance, les organes de commandes et les organes de coupure. Les matériels électriques comportant de l'électronique peu sensible sont les équipements bureautiques, les machines-outils, les commandes numériques et les automates programmables industrielles (API).

Les matériels électroniques sensibles sont des mini et micro-ordinateurs, les centrales d'alarme, les modems, les équipements de radiocommunication et de télécommandes radio, etc. Les matériels électroniques très sensibles sont des équipements médicaux, certains bascules et balances électroniques professionnelles.

►**Courant maximal de décharge Imax :** Imax est la valeur maximale du courant de forme d'onde 8/20microsecondes que peut subir un parafoudre. Cette valeur est donnée par le constructeur du parafoudre. La guide UTE C15 -443 propose une méthode empirique valable en mode commun et un mode différentiel, pour le choix de Imax. En fonction de l'estimation du risque F, la valeur de Imax est la suivante :

Tableau 6.5 : Choix du courant de décharge en fonction de l'estimation du risque F

Estimation du risque F	Imax
$F \leq 2$	$\geq$ 10KA
$2 < F \leq 4$	$\geq$ 10KA
$F > 4$	$\geq$ 40KA

$$F = Ng\,(1+2L_{BT}+ T_{HTA} +\delta) \qquad (6.1)$$

Avec : Ng : densité de foudroiement local (probablement de foudroiement local)

L_{BT} : Longueur (en Km) de la ligne basse tension aérienne alimentant l'installation.

T_{HTA} est égale à 0 si le réseau alimentant le poste HT /BT est souterrain, sinon il est égale à 1, δ tient compte de la situation de la ligne aérienne et de l'installation. Il prend la valeur maximale résultante des situations présentées dans le tableau ci-après :

Tableau 6 .6 : Les valeurs de δ

Situation de la ligne aérienne ou du bâtiment	**Valeur de δ**
Complètement entourée de structures	0
Quelques structures à proximité	0,5
Terrain plan et découvert	0,75
Sur une crête	1
Présence d'un plan d'eau	1
Site montagneux	1

En réalité, la pratique a pu démontrer que même en respectant tous ces paramètres dans le choix d'un parafoudre ou d'un parasurtenseur, ce dernier meurt tôt ou tard. Certains meurent par cause des courts-circuits et les protections amont sont sollicitées. Les résistances de court-circuit sont plus ou moins élevées. Ces courts-circuits nécessitent une déconnexion du parafoudre ou du réseau. La déconnexion du parafoudre supprime la protection et la déconnexion du réseau interrompt la distribution de l'énergie électrique.

La déconnexion du parafoudre s'effectue par fusible ou disjoncteur en parallèle dans la ligne de ce parafoudre (fig. 6.5). Leur courbe de réponse doit être compatible avec la capacité en court-circuit du parafoudre. La déconnexion du réseau peut s'effectuer aussi par fusible mais celle par disjoncteur est plus meilleure pour deux raisons :

- Premièrement c'est le premier défaut à la terre qui déconnecte ;
- Deuxièmement le disjoncteur différentiel laisse passer sans s'ouvrir les forts courants de foudre (500A) tant que la durée ne dépasse pas quelques millisecondes

La norme NFC 61-740 exige la déconnexion .Le déconnecteur est soit en série avec le parafoudre, soit incorporé au parafoudre ou soit associé au parafoudre dans la ligne d'alimentation.

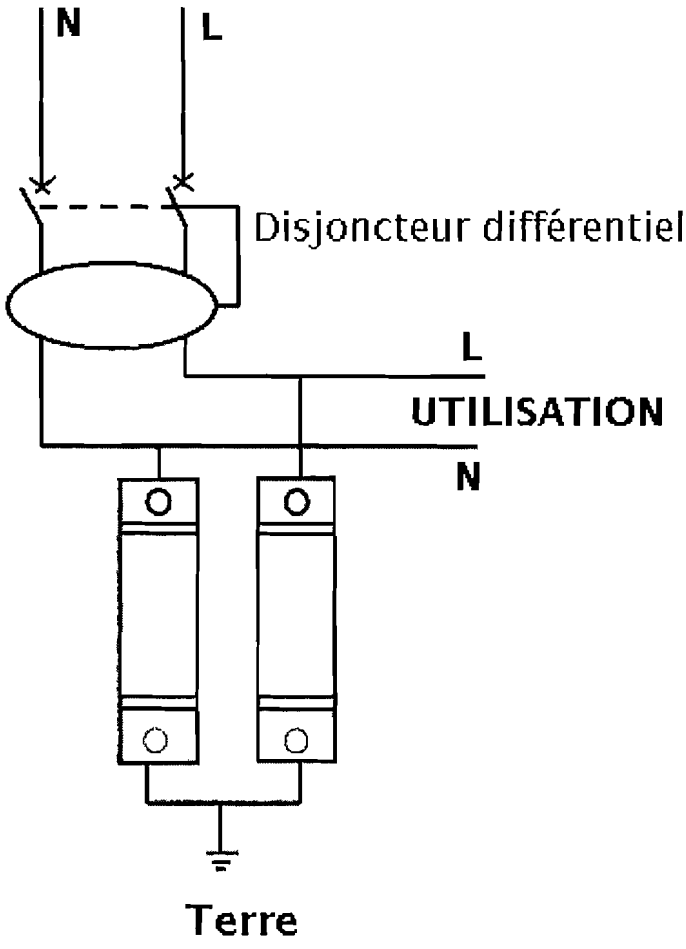


Figure 6 .5 : La déconnexion du parafoudre par un disjoncteur pour le schéma TT

L'étude des qualités d'un parafoudre doit se rappeler une fois que les connaissances en matière de foudre sont extrêmement récentes. On ne saurait donc s'étonner de rencontrer sur le marché, des dispositifs de protections totalement aberrants par rapport à la ligne qui se dégage des études récentes (ex les prises de courant parafoudre)

6.2.2. Amélioration de la protection du nœud hertzien de MUGONGO

6.2.2.1. Description et étude de la protection du nœud hertzien de MUGONGO en énergie

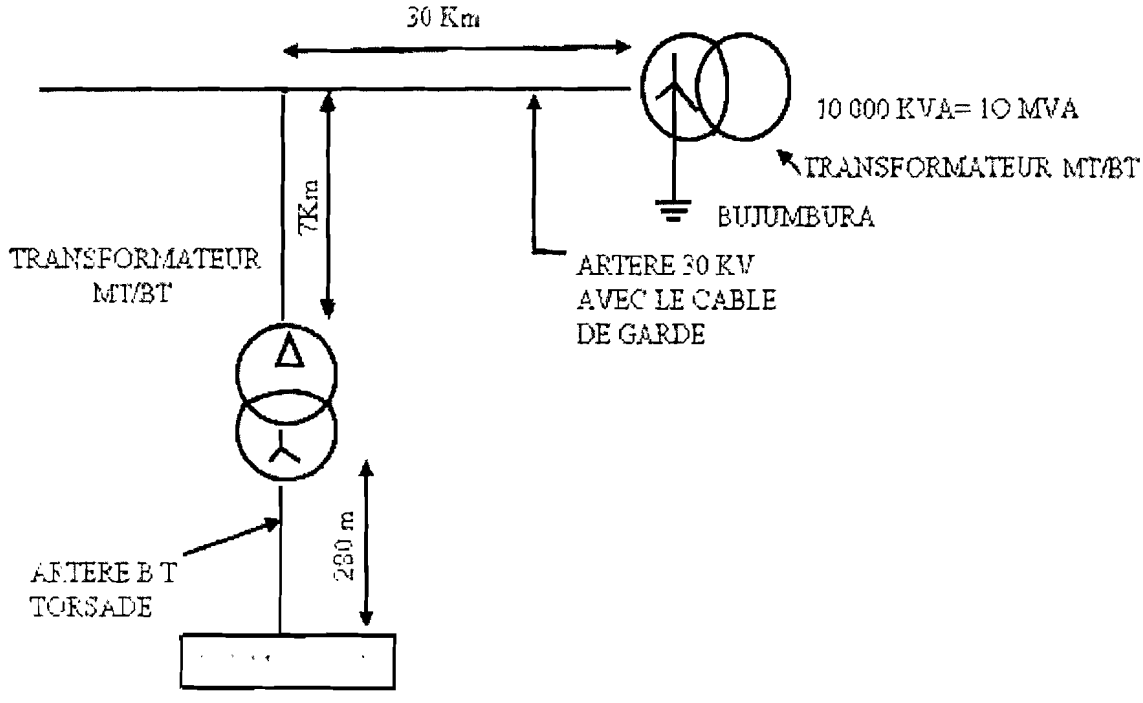


Figure 6 .6 : Alimentation MT/BT du nœud hertzien de MUGONGO

En fait, comme nous l'avons signalé lors de l'introduction de ce présent chapitre, plusieurs transformateurs qui étaient placés à 120m du site hertzien ont été bousiés par la foudre d'après les informations recueillies auprès des techniciens de l'**ONATEL** trouvés sur le site.

Actuellement le transformateur alimentant le nœud hertzien de MUGONGO est protégé par des éclateurs et un disjoncteur sectionneur et rien ne garantissent jusqu' à présent que d'autres coups de foudre directs ne puissent pas encore détruire le transformateur.

A l'égard de cette problématique, c'est dans cette optique que nous avons jugé bon de donner notre contribution dans la protection du transformateur alimentant le site hertzien de **MUGONGO** contre la foudre. La protection du transformateur MT/BT contre les surtensions doit être réalisée de manière à éviter les avaries du transformateur et d'empêcher l'apparition d'un défaut entre la MT et la BT c'est-à-dire le passage du courant de défaut à la terre du réseau MT sur le réseau BT où il aggrave dangereusement les dégâts occasionnés par les surtensions dues à la foudre .Le réseau MT n'étant réuni à la terre que par la résistance ou l'impédance de mise à la terre du neutre au poste source, l'élévation du potentiel par rapport à la terre du neutre BT est la même sur toute l'étendu du réseau.

Cependant, tout défaut à la terre simple ou double se produisant en un ou plusieurs points quelconques d'un réseau a pour conséquence d'élever le potentiel par rapport à la terre des enroulements MT de tous les transformateur MT/BT du réseau. Il n'y a aucune contrainte appliquée entre les enroulements BT et la masse, sauf au cas où le disjoncteur BT est ouvert, se qui sépare les enroulements BT de la mise à la terre du neutre et permet une certaine élévation de tension de ces enroulements suite à la capacité séparant les enroulements MT et BT.

La séparation ou l'interconnexion des masses (cuve du transformateur, terre des éclateurs) et du neutre BT sont deux solutions qui présentent chacune les avantages et les inconvénients qui sont les suivants :

- L'interconnexion supprime toute contrainte électrique entre les enroulements BT et la cuve du transformateur. Mais, en cas de défaut sur le réseau MT, elle conduit à transmettre sur le neutre BT l'intégralité de la montée en potentiel des masses MT, ce qui augmente le risque des dégâts sur les installations intérieures du bâtiment du nœud hertzien.
- La séparation permet théoriquement de découpler totalement les masses MT du neutre BT et donc d'éviter de transmettre les montées en potentiel de la MT vers le local hertzien. Les enroulements BT du transformateur sont cependant soumis à des contraintes diélectriques qui, dans certaines conditions, peuvent être très élevées au point de dépasser la tenue du matériel électronique de télécommunication.

De surcroît, un découplage parfait n'est obtenu que dans la mesure où la(les) mise (s) à la terre du neutre BT est (sont) complètement découplée (s) de la terre des masses MT ce qui nécessite un éloignement important. Pour ce qui nous concerne, comme notre réseau alimente les équipements de télécommunication, nous avons décidé de choisir la deuxième solution afin de réaliser un découplage parfait et remplacer les éclateurs se trouvant sur le transformateur alimentant le nœud hertzien de **MUGONGO** par des parafoudres.

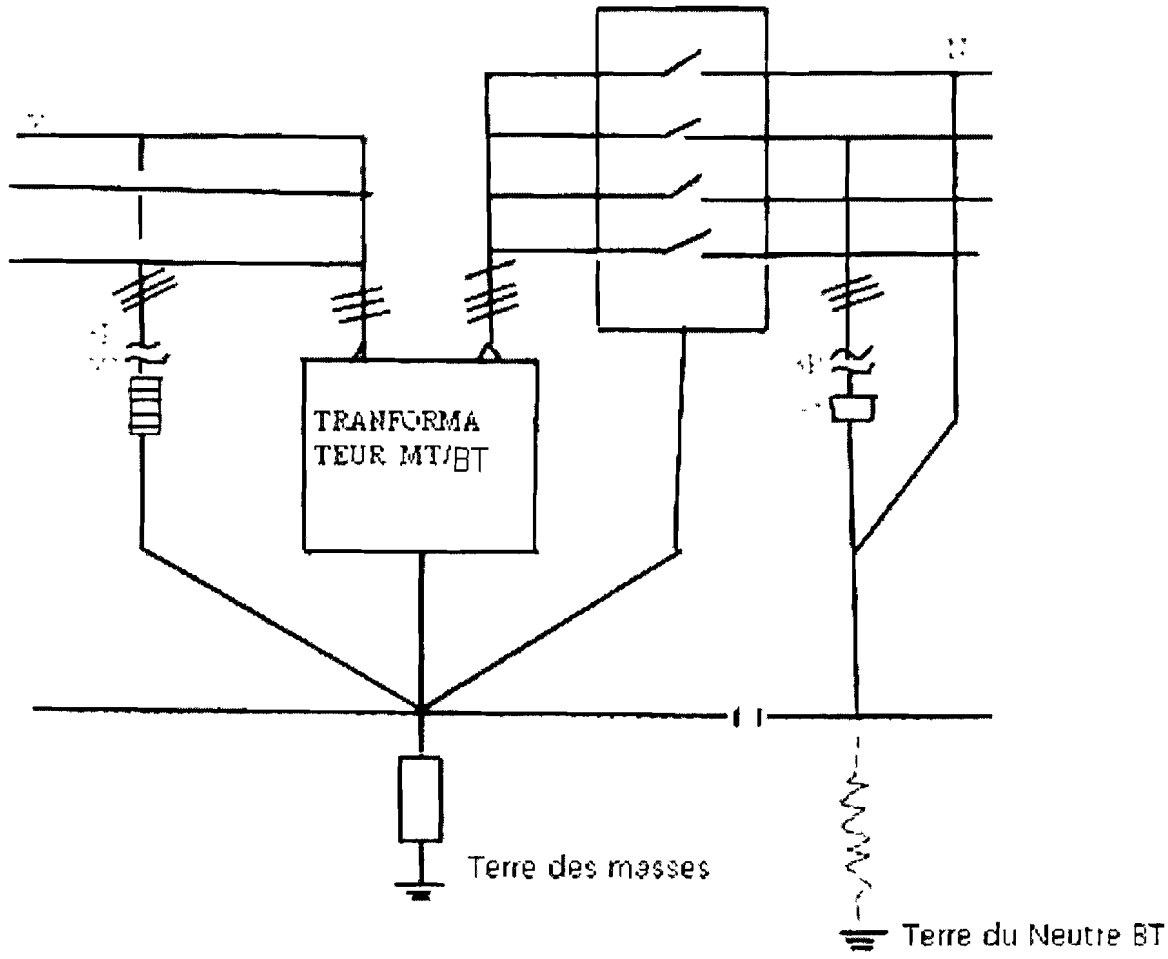


Figure 6.7 : Protection complète d'un poste MT/BT au moyen des parafoudres

La prise de terre que nous avons proposée doit comporter une ceinture de terre d'environ 1m de rayon enfouie à une faible profondeur (30 à 40cm) de manière à supprimer la possibilité d'apparition des surtensions.

Comme on peut le voir sur la figure 6.8, sur cette ceinture de terre doivent partir six conducteurs rayonnants enfouis en tranchée à 60 ou 80Cm de profondeur combinés avec des piquets de terre enfoncés obliquement. Comme le sol est de forte résistivité (10000Ωm), nous avons également proposé une solution de mettre en place une seconde ceinture de terre concentrique et, on allongera les conducteurs rayonnants et augmentera leur nombre afin de réduire la résistance de terre et l'impédance de choc. Pour améliorer encore la situation, on peut envisager un traitement du sol qui réduira fortement la résistivité et nous avons proposé d'utiliser des herbes vertes mélangées avec du sel et du charbon tout au tour des piquets de terre enfoncés obliquement.

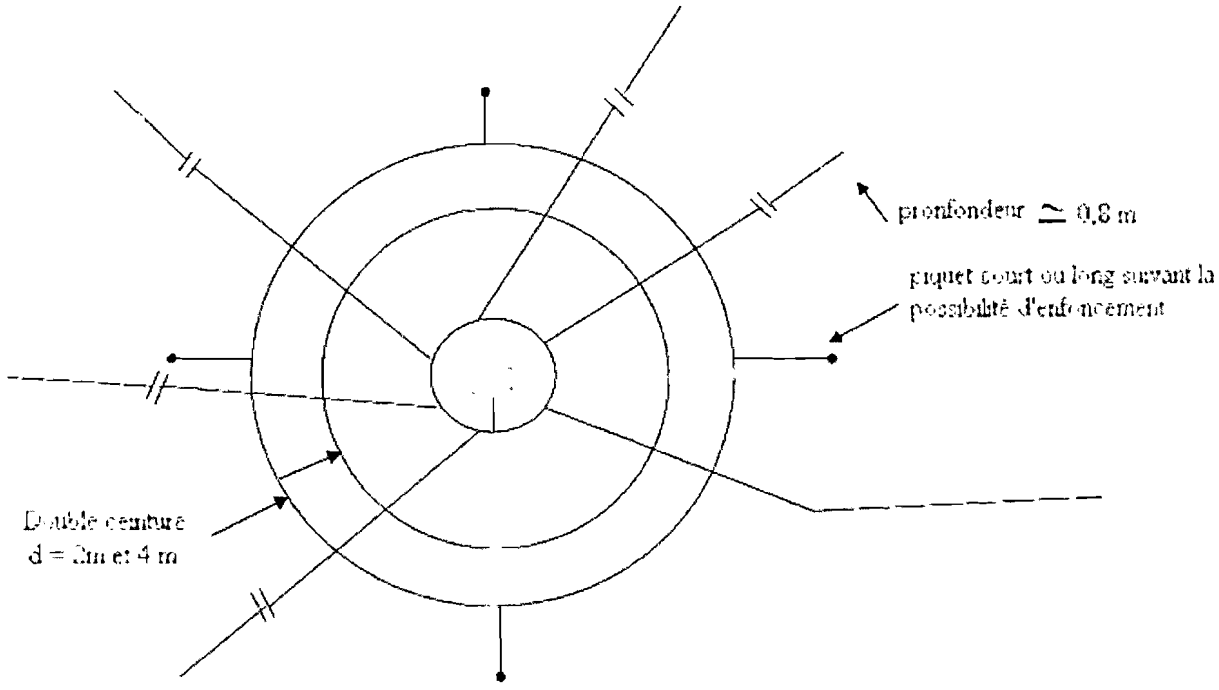


Figure 6.8 : Disposition schématique du réseau de terre d'un poste MT/BT en zone foudroyée et sur terrain de forte résistivité

Par ailleurs, dans la solution que nous avons proposée concernant le remplacement des éclateurs par des parafoudres pour la protection du poste MT/BT alimentant le site hertzien de MUGONGO, chacun peut se poser une question sur l'avantage des parafoudres par rapport aux éclateurs.

En fait, la protection des postes MT/BT contre les surtensions de la foudre est plus efficace lorsqu'elle est réalisée par des parafoudres car lorsque la foudre atteint une ligne MT à proximité d'un poste de transformation MT/BT protégé par des éclateurs, le courant de décharge de ces derniers s'écoule par la prise de terre. Le potentiel de la prise de terre et des masses qui sont reliées s'élève par rapport aux circuits BT.

Lorsqu'un amorçage se produit entre les masses et les circuits BT, les éclateurs laissent donc passer les surtensions sur les circuits BT et comme ils ne coupent pas leur courant de suite, celui-ci passe également par le chemin ouvert par la surtension. Il y a donc formation d'un défaut MT/BT avec passage sur le réseau BT du courant de défaut à la terre du réseau MT avec toutes les conséquences que cela peut comporter (incendie, destruction de matériels etc.).

Les parafoudres ont l'avantage de limiter le courant de décharge, donc les montées de potentiel sur les prises de terre .Les parafoudres sont capables également de couper leur courant de suite en moins d'une alternance limitant ainsi les risques vers le local hertzien. Une protection efficace des équipements de télécommunication contre les surtensions transmises par la ligne d'énergie électrique doit être une protection cascade. Les dispositifs de protection contre les surtensions installées actuellement dans le bâtiment technique du nœud hertzien de **MUGONGO** sont deux parafoudres type DS 40-230V.

Par ailleurs, en considérant l'impédance longitudinale de la ligne, l'impédance du transformateur, la valeur de la prise de terre des masses M.T et dans l'hypothèse que le courant de suite peut créer une élévation de potentiel sur la terre des masses M.T telle qu'il y ait passage de la surtension sur les conducteurs B.T par rupture du diélectrique du disjoncteur sectionneur, on peut faire l'évaluation de la surtension 50HZ en se basant sur le schéma de principe suivant :

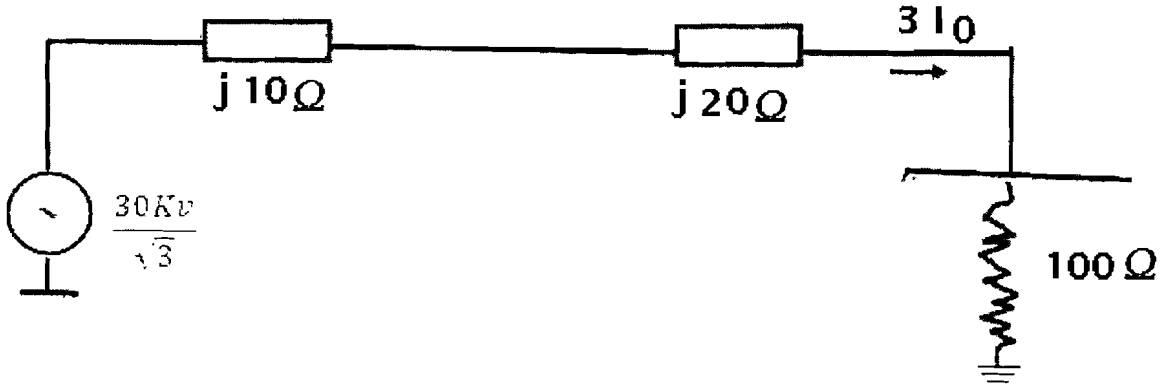


Figure 6.9 : Evaluation de la surtension sur l'artère 30kV alimentant le nœud hertzien de MUGONGO

Le courant de défaut I_d est égal à : $I_d = 3 \cdot I_0 = \frac{30000 \cdot V}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\Omega \cdot \sqrt{100^2 + 30^2}} = 165{,}90A$

Si on essai d'évaluer la tension sur la terre des masses on a :

$$U = 165{,}90A \times 100\Omega = 16590V$$

Finalement, avec de telles valeurs de courant de suite et de tension sur la terre des masses M.T, on voit que le réseau B.T risque de souffrir au niveau du poste et particulièrement au niveau de l'alimentation du centre car les deux parafoudres actuels DS 40-230V n'ont pas le pouvoir de coupure suffisant capable d'interrompre le courant de défaut de 165,90A.

Cependant, au cours de l'enquête que nous avons effectué dans le bâtiment technique du nœud hertzien de **MUGONGO**, nous avons vu que l'un des parafoudres DS 40-230V a été détérioré et rien ne garantit jusqu'à présent que l'autre parafoudre restant pourrait protéger efficacement les équipements électroniques de télécommunication contre les surtensions d'origine atmosphérique ou les surtensions 50HZ.

Ainsi donc, c'est dans cette optique que nous avons proposé une protection cascade réalisée à l'aide des différents parafoudres selon la norme Française NFC 61-740 en rapport avec les recommandations de coordination des parafoudres en matière de protéger les équipements sensibles contre les surtensions 50HZ.

Normalement, l'énergie électrique utilisée par l'**ONATEL** est subdivisée en trois catégories suivant leur destination et c'est ainsi qu'on a :

- L'énergie primaire destinée à faire fonctionner les équipements classiques ;
- L'énergie secondaire utilisée par les équipements de télécommunications en divers départements comme la commutation et la transmission ;
- L'énergie tertiaire, non exploitée maintenant car c'était l'énergie prévue pour alimenter les équipements Télex qui ne sont plus à jour.

Parmi ces trois catégories, la secondaire est la plus exploitée car la plupart des équipements dont est doté l'**ONATEL** utilisent un courant dont la tension varie entre 48V et 220V. En ce qui est de la production de cette énergie secondaire, diverses installations servant au transport ou la protection se trouvent avant l'atelier d'énergie, partie où est générée l'énergie secondaire.

Toutefois, quelques équipements spéciaux comme les redresseurs et les onduleurs méritent une attention particulière du fait qu'ils ont un rôle important dans le circuit. Alors, voilà la raison qui oblige à exécuter toujours en pratiques une protection cascade par le différents types de parafoudres afin qu'ils établissent une communication entre l'installation à protéger et la terre, diminuant ainsi l'amplitude des surtensions. La figure 6.10 montre le schéma multifilaire synoptique d'installation des parafoudres sur une ligne triphasé avec le conducteur neutre.

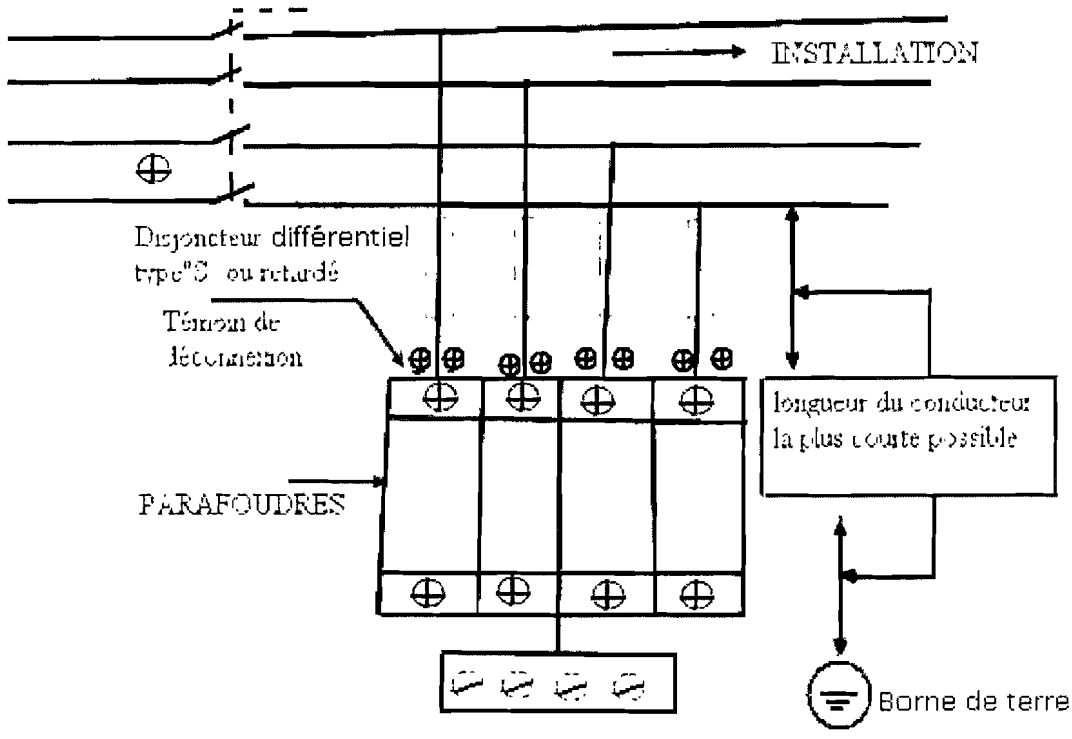


Figure 6.10 : Schéma synoptique d'installation des parafoudres

Pour ce qui nous concerne en rapport avec le renforcement de la protection de l'alimentation B .T à l'entrée du bâtiment technique du nœud hertzien de MUGONGO, nous avons proposé une protection cascade par parafoudres dont la protection de tête sera réalisée par, soit les parafoudres VGA haute énergie soit, par les parafoudres DP haute énergie de 70 à 100kA.

La protection secondaire est réalisé par deux types de parafoudres en série à savoir les parafoudres DGT 40kA et les parafoudres DG 385 de 15kA tandis que la protection terminale (amont des équipements) sera faite par les parafoudres VA 500 de 10A. La figure 6.11 montre cette protection cascade proposée pour protéger le nœud hertzien de MUGONGO contre les surtensions 50HZ.

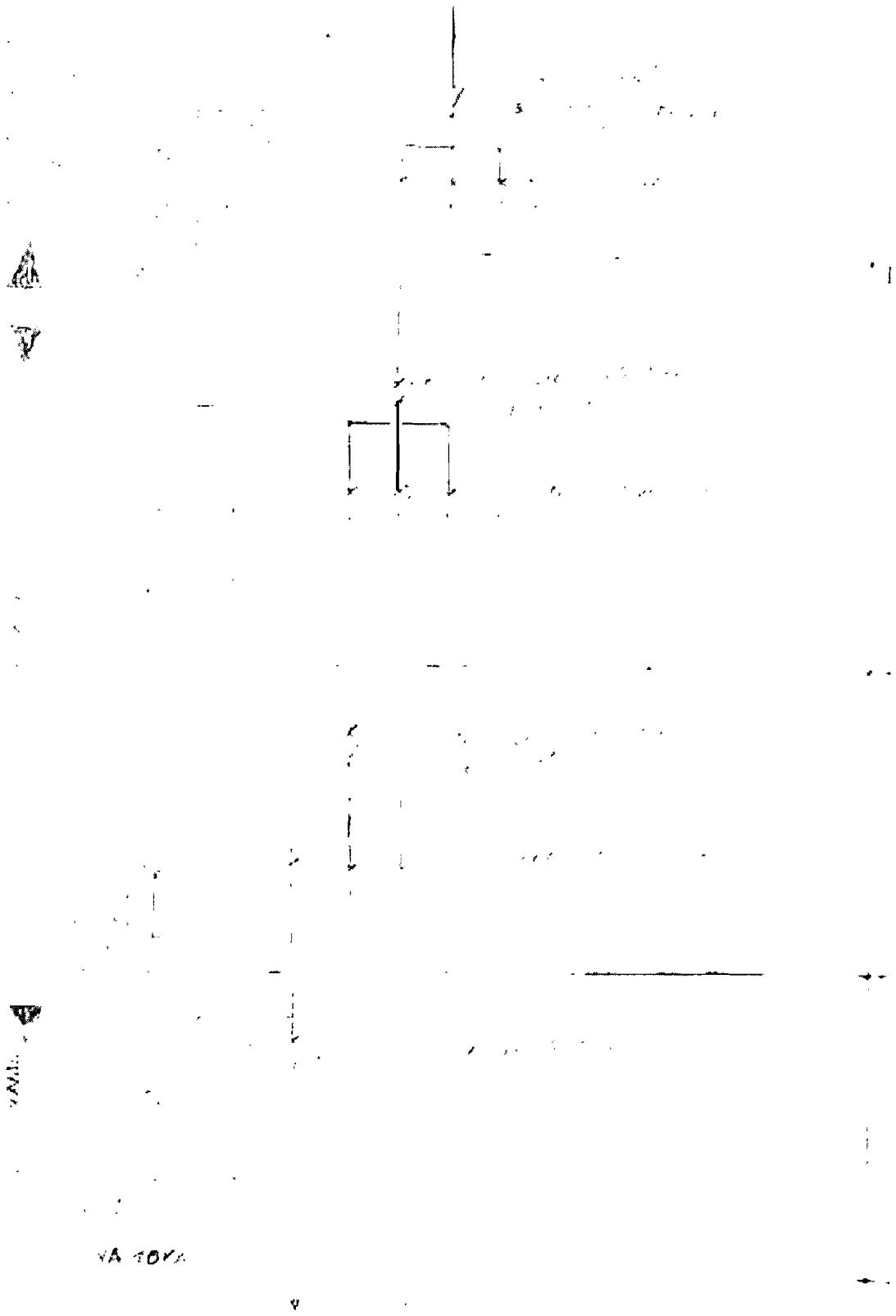


Figure 6.11 : Protection cascade proposée pour le nœud hertzien de MUGONGO.

6.2 .2.2. Protection du bâtiment technique et des antennes du nœud hertzien de MUGONGO

6.2.2.2.1. Proposition de la protection du local hertzien de MUGONGO

Le bâtiment technique abritant les équipements de télécommunication et l'atelier d'énergie électrique du nœud hertzien de **MUGONGO** ont une superficie de $84m^2$ et une hauteur d'élévation de 3,2m. Ce bâtiment technique se trouve à 8m de l'antenne de réception et à 3,8m de l'antenne d'émission.

En considérant la hauteur des pylônes supportant les antennes de réception et d'émission respectivement de 59,5m et de 58m, rien ne garantit jusqu'à présent que si la foudre touche ces deux pylônes supportant ces antennes pourquoi elle ne peut pas tomber directement sur le bâtiment technique. Par ailleurs, ce dernier se trouve sur l'aspérité de 2512m d'altitude et actuellement, il n'est pas protégé contre les coups de foudre alors que cette valeur de 2512m d'altitude montre que ce local hertzien se trouve dans une zone très exposé aux coups de foudre.

Avec ces hypothèses, la conclusion est que le local hertzien de **MUGONGO** est un bâtiment technique d'abord très isolé, en plus situé dans une zone très foudroyée et la norme Française NFC 17-102 nous propose de protéger ce genre de bâtiment technique avec du paratonnerre **PREVECTRON** type **TOP SET**. La figure VI.12 montre la disposition du paratonnerre sur le bâtiment ainsi que sa descente jusqu'à la terre.

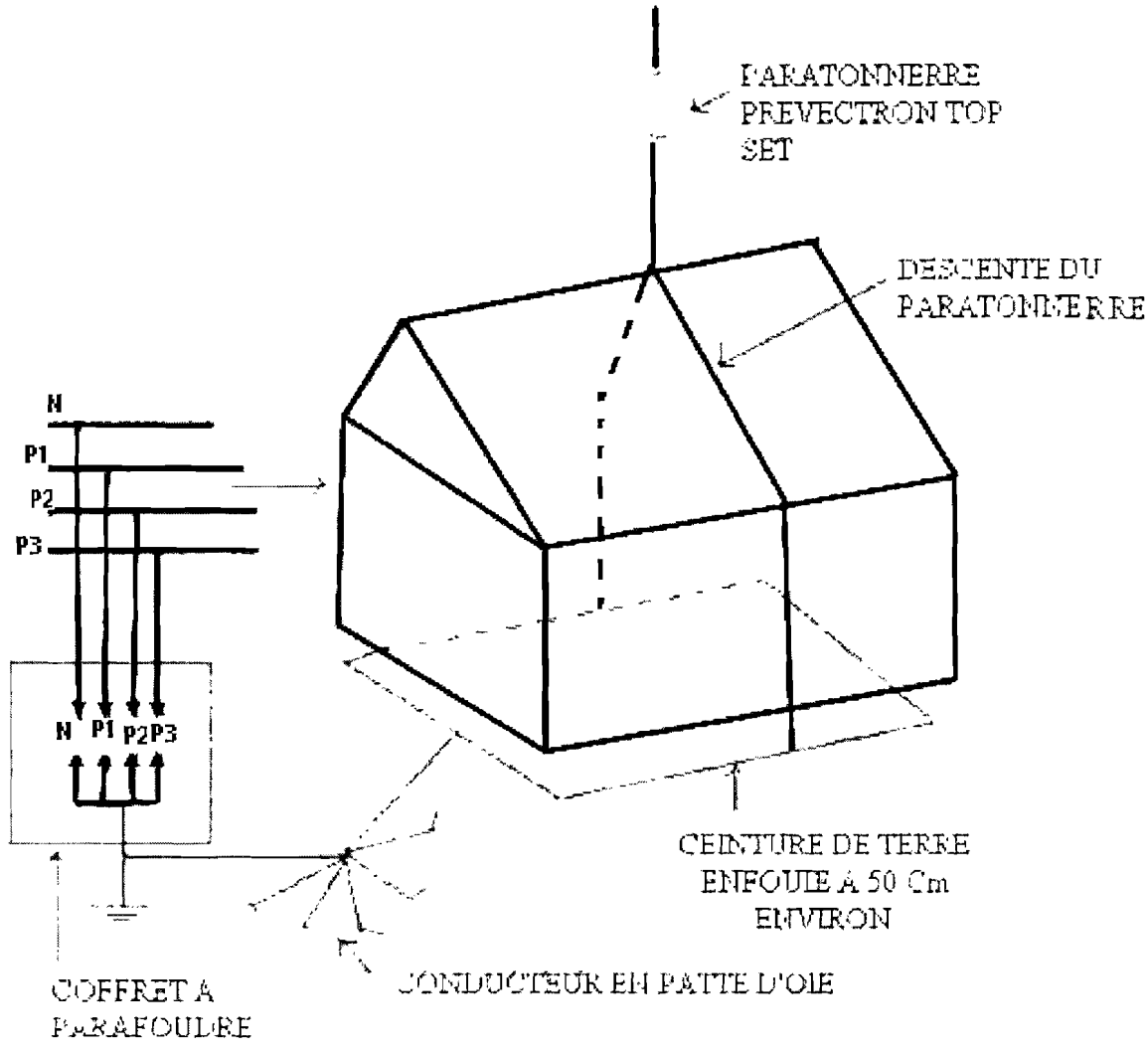


Figure 6.12 : Protection du bâtiment technique du nœud hertzien de MUGONGO.

6.2.2.2.2. Proposition de la protection des antennes du nœud hertzien de MUGONGO

Comme on peut le voir sur la figure 6.13 et figure 6.14, la protection des antennes de télécommunication du nœud hertzien de **MUGONGO** que nous avons proposé est l'utilisation des paratonnerres **PROVECTRON** type S_6 qui assure la protection maximum. Suivant la recommandation de la norme NFC 17-102 en rapport avec les dispositifs à prendre avec la nature et la section des conducteurs de descente, nous avons opté d'utiliser le cuivre étamé 30 mm x 2mm et les prises de terre seront réalisées en patte d'oie améliorée par les piquets de terre et les grilles.

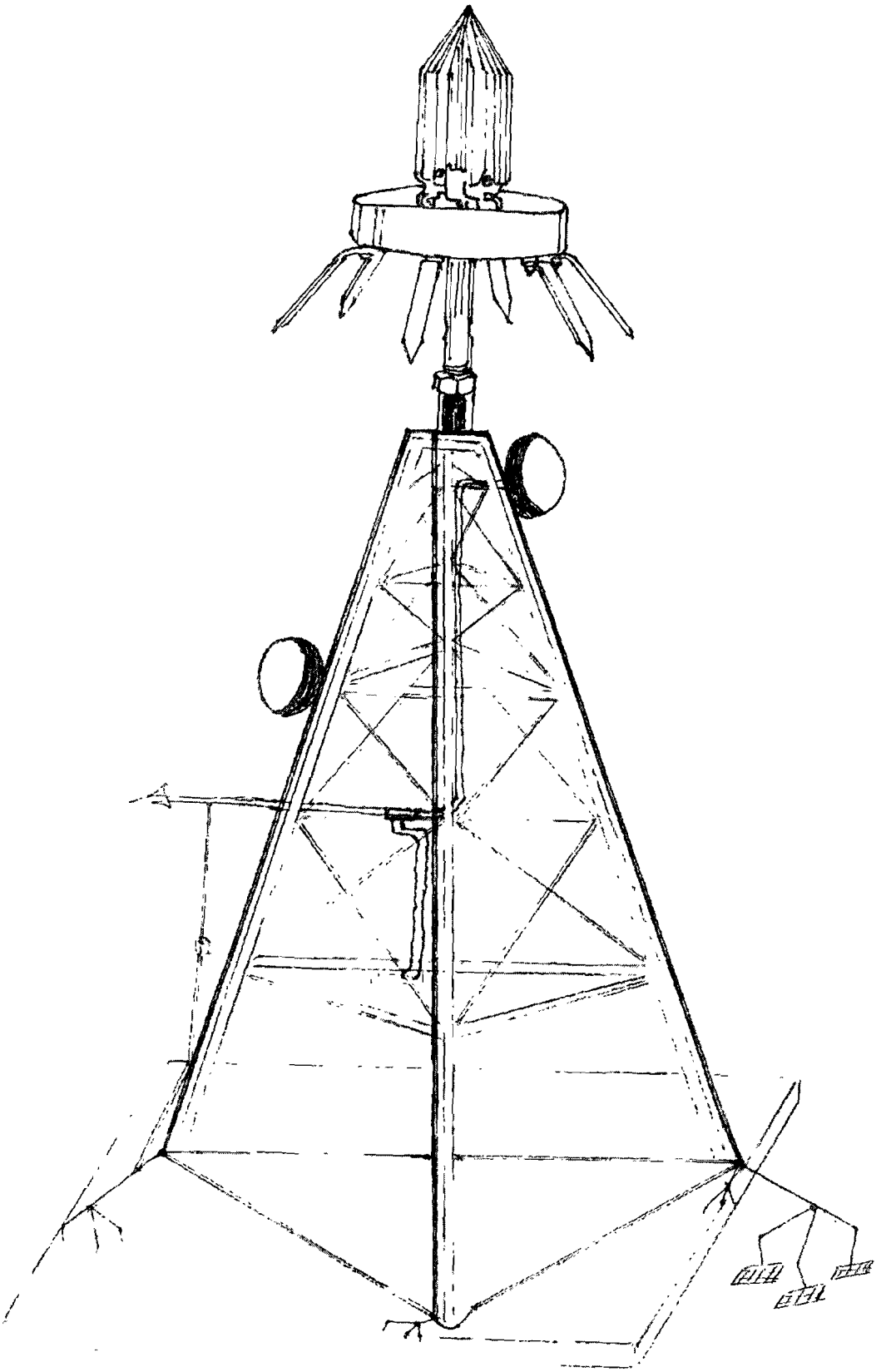


Figure 6.13 : Protection des antennes de réception du nœud hertzien de MUGONGO.

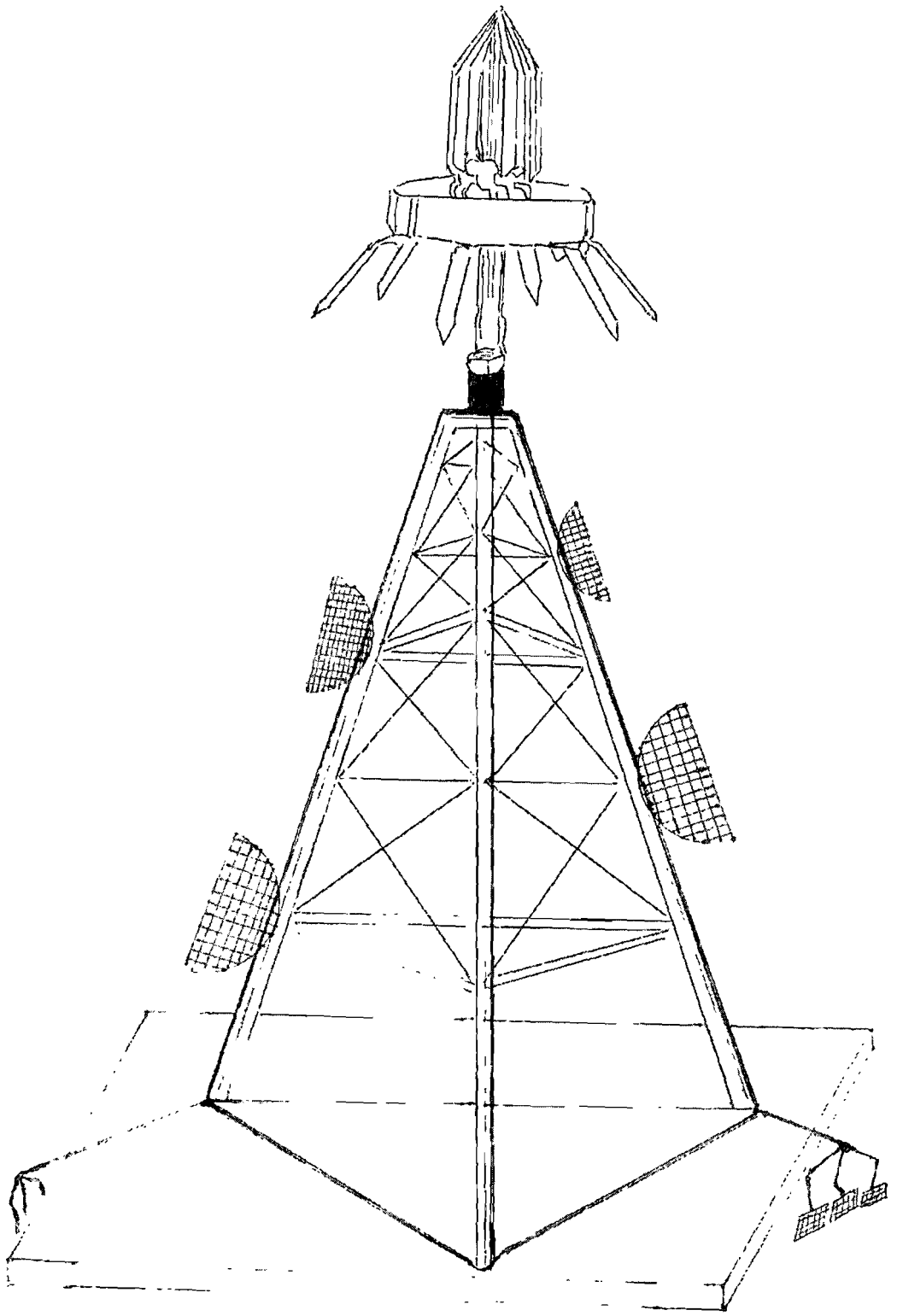


Figure 6.14 : Protection des antennes d'émission du nœud hertzien de MUGONGO.

6.2.2.2.3. Recherche de l'équipotentialité sur le site du nœud hertzien de MUGONGO

Lors de l'introduction de ce chapitre VI, on a suggéré qu'une prise de terre favorable pour écouler correctement les courants de défauts 50HZ ainsi que les courants de la foudre doit avoir une valeur ohmique plus petite. Pour les valeurs des prises de terres des sites de télécommunication, une valeur inférieure à 1Ω ou à la limite égale à 3Ω est recherchée pour réaliser une bonne équipotentialité du site.

Même s'il est difficile de réaliser une prise de terre d'impédance faible sur le site hertzien de **MUGONGO** dont la résistivité du sol est tellement élevée car on peut même mesurer une valeur supérieure à 10000Ωm pendant certaines périodes de l'année. Pour ce qui nous concerne, nous avons proposé quelques solutions :

Premièrement, l'**ONATEL** doit envisager de dynamiter la roche et amener une autre terre d'apport comme c'était le cas pour l'entreprise **TELECEL** car tous les calculs faits en rapport avec les surtensions sur les prises de terres ont démontré qu'il est presque impossible de réaliser une prise de terre générale d'une valeur inférieure à 1Ω sur un sol ayant une résistivité de 10000Ωm.

Deuxièmement, interconnecter par brasage toutes les prises de terre du site dans un regard de visite creusé à une profondeur de 50Cm et cette interconnexion doit se réaliser avec des tresses possédant une grande rigidité. Enfin, lors de l'interconnexion, il faudra chaque fois utiliser des prises de terre enfoncées obliquement et entourer autours des piquets de terre du charbon mélangé avec du sel, du potassium ainsi que des herbes vertes dans le but de chercher toujours une équipotentialité favorable pour une site de télécommunication qui est pour notre cas le nœud hertzien de **MUGONGO.**

Conclusion générale

Notre projet d'étude intitulé « Etude de la protection des installations de télécommunication contre la foudre et contre les installations d'énergie électrique : cas du nœud hertzien de MUGONGO», touche plusieurs aspects.

Nous avons focalisé notre analyse sur les techniques de protéger les installations contre les surtensions d'origine atmosphériques et celles de 50HZ qui sont transmises par le réseau de distribution selon les normes internationales en rapport avec les règles d'installations.

Cependant, face au trafic et l'immensité du territoire desservi via le centre hertzien de MUGONGO et que toute réparation d'un équipement de télécommunication exige l'expédition de celui-ci chez ALCATEL, nous proposons à l'ONATEL ce qui suit :

1. faire l'entretien préventif de tous les équipements électromécaniques ;
2. envisager le dynamitage de la roche granitique du site de la même manière que TELECEL dans le but de chercher l'équipotentialité du centre de télécommunication MUGONGO selon les normes en vigueur ;
3. empêcher la position militaire du site de jeter les restes de la cuisine sur les fils conducteurs de mise à la terre.

Au terme de notre travail, nous ne prétendons pas avoir épuisé les contours et détours du sujet, nous suggérons aux futurs chercheurs intéressés de faire la conception d'une autre liaison automatique bien sécurisée du groupe électrogène de secours aux équipements de télécommunication car l'ancienne liaison automatique a été endommagée par les coups de foudre directs sur le centre alors que la plupart du temps le centre fonctionne avec le groupe électrogène suite aux perturbations répétitives du réseau d'énergie de la REGIDESO par la foudre.

BIBLIOGRAPHIE

I. OUVRAGES GENERAUX

1° J FAVAUD, Fonctionnement et protection des réseaux de distribution, Centre de perfectionnement de Nanterre, Paris,1967

2° Guide d'ingénieur, Electricité de France, 2ème Tirage revu juin 1986

3° M.AGUET M.IANOZ Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, 2ème édition Paris 1986

4° Gérard SOLIGNAC, Guide d'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines, Paris, juin 1985

5° HENRI NEY, Technologie d'électricité, Nathan technique, mai 1996

II. MEMOIRES ET COURS

1° Charles HAKIZIMANA, Perturbation du réseau triphasé basse tension par des charges alimentées, Université du BURUNDI, Avril 2005

2° Onésime HARUBUNTU, Etude des interruptions de service dans le réseau de distribution Moyenne et Basse Tension de Bujumbura, Université du BURUNDI, Février 1990

3° Iddy BUHANGA, Cours d'installations électriques, Université du BURUNDI, ITSIII, 2003-2004

III. SOURCES ELECTRONIQUES

www.ecus-ondulique.com

www.castorama.fr

www.franklin-france.com

www.mesures.com

www.citel.fr

www.promotelec.com

www.ineris.fr

www.technfoudre.com

www.protibat.fr

www.paratonnerre.pda.com

www.bricolage-accostillage.com