

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche*  
*Scientifique*

*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

*Faculté du Génie électrique et informatique*

*Département d'électrotechnique*



# **Mémoire de fin d'étude**

En vue de l'obtention du diplôme d'un Master  
professionnel Spécialité : électrotechnique industriel.

**Thème**

**ETUDE D'UNE MISE A LA TERRE  
D'UNE INSTALATION  
ELECTRIQUE**

**Proposé par**

*M<sup>r</sup> : M.A. HANDALA*

**dirigé par :**

*M<sup>r</sup> : E. BELHITECHE*

**Réalisé par :**

*M<sup>r</sup> : B. AITMOHAMMED*

*M<sup>r</sup> : Dj. MANSOURI*

**Promotion : 2011 - 2012**

## Remerciements

*Nous remercions le bon DIEU de nous avoir donné le courage et la force de mener à terme notre travail.*

*Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr. **M.A HANDALA**, Maître de conférences à l'UMMTO, et Mr. **E.BELHITECHE**, Doctorant à l'UMMTO pour leurs aides précieuses.*

*Un grand merci à Mr. **MOUDOUD** et **HEMACHE** pour leurs disponibilités.*

*Ainsi nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur en acceptant de juger notre travail.*

*Enfin un grand merci à tous les enseignants du département d'électrotechnique de l'UMMTO qui ont participé à notre formation durant tout notre cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Ma mère : OIRDIA*

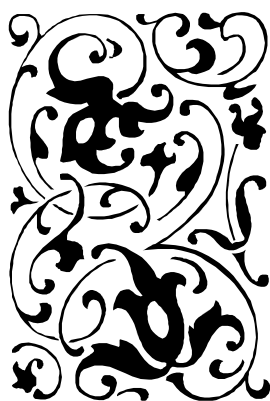
*Mon père : MOKRANE*

*Mes frères : Sofiane et Jugurta*

*Mes sœur : Dihia, thileliet à toute  
ma famille*

*Tous mes amis en particulier Mustapha*

*Toute la promotion ETH LMD  
professionnel 2012*



*djamel*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Ma mère : Khloudja*

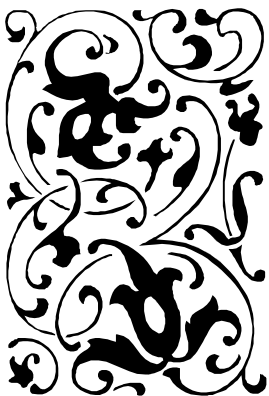
*Mon père : Ali*

*Mes frères : Mohand, Samir et  
hidouche*

*Mes sœurs : Fatíha, Nora, ouíza  
et Fahíma, et à toute ma famille*

*Tous mes amis*

*Toute la promotion ETH LMD  
professionnel 2012*



*Belkacem*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralistes sur la mise à la terre</b>	
I-1-Introduction .....	3
1.2. Définition et but d'un réseau de terre .....	3
1.3. Les conditions générales imposées .....	3
I.4. Résistance et résistivité de la terre .....	4
I.5. Différentes prise de terre .....	5
I.5.1. Conducteurs enfouis horizontalement .....	5
I.5.2. Piquets verticaux .....	6
I.5.3. Plaque verticale .....	7
I.6. Schémas de liaison à la terre en moyenne tension (MT) .....	8
I.7. Schémas de liaison à la terre en basse tension (BT) .....	8
I.7.1. Domaines d'utilisation des régimes de neutre .....	9
I.7.2. Normes de mise à la terre .....	9
I.7.2.1. Normes relatives à la sécurité des personnes .....	9
I.7.3. Le schema TT .....	10
a) Calcul la tension et le courant de défaut .....	11
b) Avantages et inconvénients du schéma TT .....	11
I.7.4. Le schema IT .....	12
a) Avantages et inconvénients du schéma IT .....	13

I.7.5. Le schema TN .....	13
a) Schema TN-S .....	14
b) schema TN-C .....	14
c) Calcul la tension et le courant de défaut .....	15
d)Avantages et inconvénients du schéma TN .....	15
I.8. Normes relatives à la sécurité des équipements .....	16
I.8.1. Mise à la terre dans les postes MT/BT et surtensions temporaires .....	16
I.8.2.Mise à la terre dans les postes MT/BT.....	17
I.9.Conclusion .....	18

## **Chapitre II : Modélisation et calcul des résistances de terre**

II.1. Introduction .....	19
II.2.Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre .....	19
II.3. Résistance d'une électrode hémisphérique .....	19
II.4. Tension de pas .....	19
II.5. Modèles de calcul .....	20
II.5.1. modèle de Rudenberg .....	20
II.5.2. Modèle de Dwight-Sunde .....	21
II.5.3.Modèle de LIEW-DARVENIZA .....	21
II.5.4.Interprétation .....	21
II.6. Electrodes en ligne droite .....	22
II.7.Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral .....	22
II.8..Electrodes sur les côtés d'un carré.....	22
II.9.Electrodes dans un carré solide.....	23
II. 10.Electrode sur la circonférence d'un cercle .....	24

II.11. Câble enterré horizontalement .....	25
II.12. Plusieurs (n) câbles rayonnant de longueur l, enfouis à la même profondeur h .....	25
II.13. Réseau maillé ou grille .....	25
II.14. Modèles des électrodes de mise à la terre .....	26
II.14. 1. Le modèle du circuit RLC.....	26
II.15. Résistivité des sols .....	27
II.15.1. Introduction .....	27
II.15.2. Méthodes de mesure de la résistivité .....	27
II.15.2.1 Méthode des quatre électrodes .....	28
II.15.2.1. Principe de mesure .....	28
II.15.2.2. Méthode de WENNER.....	30
II.16. Comportement d'une prise de terre en fonction du courant .....	31
II.16.1. Champ électrique dans le sol .....	31
II.16.2. Phénomènes de claquage dans le sol.....	31
II.16.3. Caractérisation du comportement des prises de terre .....	31
II.17. Conclusion : .....	32

### **Chapitre III : Mesures et application**

III.1 Introduction.....	33
III.2 La mesure de résistance d'une prise de terre existante .....	33
III.2.1 Les mesures de terre sur des installations possédant une prise de terre unique .....	33
III.2.2 Les différentes méthodes .....	34
III.2.2.1 Mesure de terre 3 pôles dits méthode des 62 % .....	35
III.2.2.2 La méthode de mesure en triangle .....	36
III.2.2.3 La mesure de terre méthode 4 pôles .....	37

III.2.2.4	Avantage des mesures de terre avec la méthode de 3 pôles ou quatre pôles .....	38
III.2.2.5	Mesure de terre 4 pôles sélective par pince ampère métrique .....	39
III.2.2.6	Mesure de boucle de terre à 2 pinces de terre (sans piquet de terre).....	40
III.3	Cas pratique .....	41
III.3. 1	Introduction .....	41
III.3.2	Présentation et fonctionnement du matériel .....	41
III.3.2.1	Éléments constitutifs .....	42
III.3.2.2	Principe de fonctionnement .....	42
III.3.2.3	Caractéristique de l'appareil .....	43
III.3.2.4	Accessoires optionnel .....	43
III.3.3	Mesure de la prise de terre du laboratoire de haute tension .....	43
III.3.3.1	Equipements de laboratoire de Haute tension .....	43
III.3.3.2	Description de la méthode utilisée .....	45
III.3.3.3	Application .....	45
III.3.3.4	Les résultats obtenus .....	47
III.3.3.5	Interprétation des résultats .....	48
III.4	Amélioration la résistance d'une prise de terre.....	48
III.4.1	Augmentation de la longueur de l'électrode .....	48
III.4.2	Augmentation de nombre d'électrode .....	49
III.4.3	Augmentation de la distance entre les électrodes.....	50
III.4.4	Augmentation de diamètre d'électrode .....	50
III.4.5	Géométrie de l'électrode.....	51
III.4.6	Traitement des sols pour réduire la résistivité.....	52

III.4.6.1 Influence de la profondeur d'enterrement du piquet .....	53
III.5.Le remède propose pour améliorer la prise de terre.....	54
III.5.1.Les procédure à suivre.....	54
III.6.Conclusion .....	55
Conclusion générale.....	56

L'énergie électrique occupe une place fondamentale dans la vie quotidienne, et assure un rôle primordiale pour le bien être de l'humanité.

L'extraordinaire explosion de l'utilisation de l'électricité dans la vie quotidienne, tant privée que professionnelle et le formidable développement des réseaux de distribution qui a suivi ont nécessité l'écriture de règles de l'art sur la construction des installations, afin d'assurer la sécurité des personnes, des animaux domestiques ou d'élevage et des biens contre les dangers et dommages pouvant résulter de l'utilisation de cette dernière.

Depuis plusieurs décennies, des recherches se sont intensifiées dans le domaine des mises à la terre des installations électriques. Ces recherches visaient, dans leur grande majorité, les comportements de ces mises à la terre à fréquence industrielle et en régime établi, en plus, la résistivité du sol considérée était généralement proche de  $100 \Omega.m$  (valeur souvent rencontrée dans les régions tempérées), ce qui n'est pas le cas en région tropicale dans certains types de terrain.

En très hautes fréquences, les comportements des mises à la terre sont fort différents de ceux à fréquence industrielle. Plusieurs études (théoriques et expérimentales) ont été effectuées à ce sujet mais des zones d'ombre persistent encore à ce jour. Les hypothèses simplificatrices viennent encore s'ajouter à ces zones d'ombre et compliquent davantage la précision dans l'analyse.

Dans ce travail, on a étudié une mise à la terre d'une installation, en se basant sur le plan de travail suivant :

Le premier chapitre rappelle quelques notions de base élémentaires et importantes à la compréhension de l'analyse des mises à la terre des installations électriques.

Pour le deuxième chapitre on présente les modèles de calcul de la résistance et les différentes méthodes de calcul de la résistivité de terre.

Le troisième chapitre est consacré pour mesurer la résistance de mise à la terre du laboratoire de haute tension en respectant toutes les normes qui permettent la fiabilité des essais et assurent la sécurité des manipulateur.

Des nombreuses solutions existent pour améliorer la résistance de prise de terre, on propose une solution qu'il faudra choisir parmi celles qui minimisent le coût des installations, tout en respectant les normes.

## **I.1. Introduction**

Beaucoup de références détaillent depuis plusieurs dizaines d'années les mises à la terre des installations électriques. Le problème de mise à la terre est plus complexe qu'on ne le pense à cause de plusieurs facteurs qui interviennent dans le développement analytique des paramètres en jeu.

Dans le présent chapitre, nous allons rappeler les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre des installations électriques.

## **I.2. Définition et but d'un réseau de terre**

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. D'une manière générale, il a pour but :

- d'écouler dans le sol les courants de défaut à la terre et de la foudre.
- d'assurer et maintenir à tout moment la sécurité des biens et des personnes
- de maintenir un potentiel de référence.

A fréquence industrielle, l'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol qui l'entoure. Cette répartition est en fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité (dans une moindre mesure, sa permittivité aussi), des caractéristiques géométriques du réseau de terre et de la source. La conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol. [1]

## **I.3. Les conditions générales imposées**

- Le potentiel de la masse doit être sensiblement le même que celui de la terre. Il faut donc veiller à ce que les résistances du conducteur de protection et de la prise de terre soient les plus faibles possibles.
- Le conducteur de protection doit avoir une bonne résistance mécanique, physique et chimique.
- La prise de terre doit résister à la corrosion du sol.

#### 1.4. Résistance et résistivité de la terre

Le sol (la terre) est constitué de matériaux à faible conductivité. Celle-ci est due aux sels et aux impuretés entre les isolants (oxyde de silice et oxyde d'aluminium).

A cause de la faible conductivité de la terre, tout courant qui passe à travers elle crée une grande chute de tension, ce qui revient à affirmer que le potentiel de la terre n'est pas uniforme.

La résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs : la nature des sols, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température, ... [1]

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les résistivités des différents types de sol

Nature du sol	Résistivité en $\Omega.m$
Terrain marécageux	De quelques unités à 30
Limon	20 à 30
Humus	10 à 20
Tourbe humide	5 à 10
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000
Granits et grès très altérés	100 à 600

**Tableau I.1.** : Résistivités moyennes des différents types de sol. [2]

La résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci peut être considérée comme homogène.

Un autre facteur dont il faudra tenir compte est la caractéristique de l'électrode de mise à la terre : la matière, la forme, la profondeur dans le sol, le nombre, la structure, ...

### **I.5. Différentes prise de terre**

L'efficacité des mises à la terre dépend des conditions du terrain et la valeur de la résistance de prise de terre.

La prise de terre peut être constituée :

- Soit par des conducteurs nus ;
- Soit par des piquets verticaux ;
- Soit par des plaques verticales ;
- Soit par un ceinturage à fond de fouille, enfouis dans le sol, de dimensions suffisantes et de nature choisie pour résister à l'action destructive de ce milieu.

Il est interdit d'utiliser comme prise de terre :

- Les canalisations de gaz ;
- Les canalisations de chauffage central ;
- Les conduits d'évacuation d'eau, de fumée ou d'ordures ménagères.

#### **I.5.1. Conducteurs enfouis horizontalement**

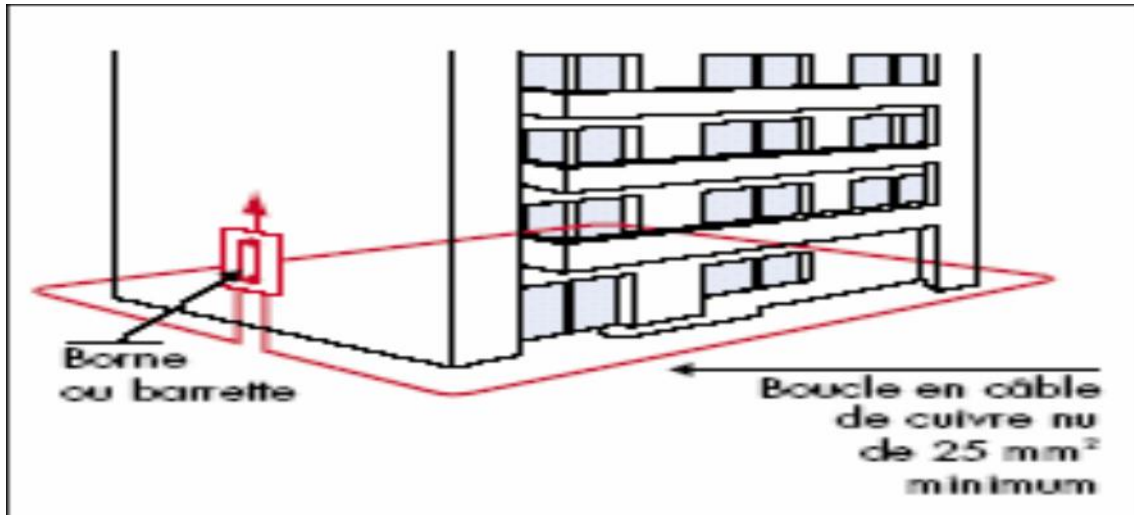
Cette disposition est à conseiller pour toute construction nouvelle. Elle consiste à placer sous le béton de propreté, ou contre les murs extérieurs à au moins un mètre de profondeur, avec généralement un câble en cuivre nu de 25 mm<sup>2</sup> de section (ou 95 mm<sup>2</sup> en acier galvanisé).

Pour calculer sa résistance on fait appelle à la formule suivante :

$$R=2 \rho/L \quad (I.1)$$

L : longueur de la boucle (m) ;

$\rho$  : résistivité du sol ( $\Omega.m$ ).



**Fig.I.1.** Une boucle à fond de fouille.

### I.5.2. Piquets verticaux

L'enfoncement des piquets doit être réalisé dans un endroit abrité de la sécheresse et du gel, à une profondeur d'au moins deux mètres.

Les piquets verticaux peuvent être constitués de :

- ❖ tubes en acier galvanisé d'au moins 25mm de diamètre extérieur ;
- ❖ profiler en acier doux galvanisé d'au moins 60mm de côté ;
- ❖ barres en cuivre ou en acier, recouverte de cuivre de moins 15mm de diamètre.

Il est possible de diminuer la valeur de la résistance de la prise de terre posant plusieurs piquets verticaux, reliés en parallèle et éloignés d'au moins leur longueur en cas de deux piquets et d'avantage s'il y en a plus.

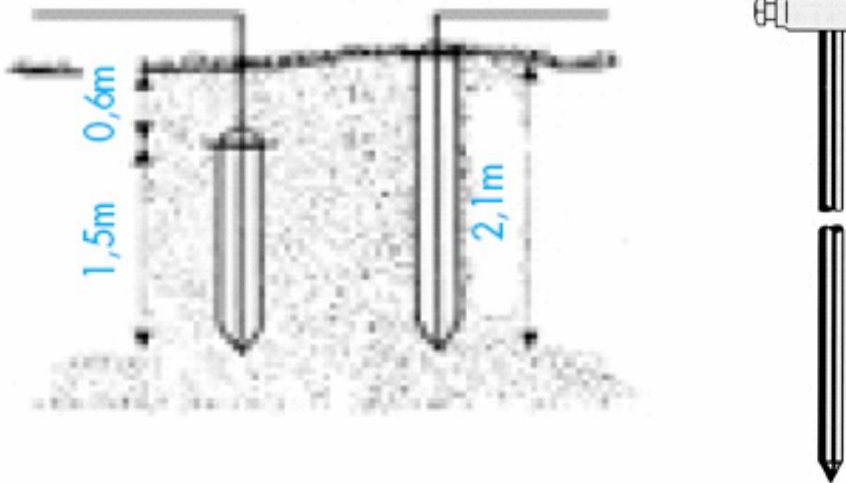
Pour la détermination sa résistance on fait appel à la formule suivante :

$$R = (1/n) \rho / L \quad (I.2)$$

L : longueur du piquet ; (m)

n : nombre de piquets

$\rho$  : résistivité du sol ;( $\Omega$ .m).



**Fig.I.2.** piquets verticaux

### I.5.3. Plaque verticale

Ces plaques sont soit carrés, soit rectangulaires ( $l > 0.5$  m). Elles doivent être enterrées de telle façon que leur centre soit au moins 1 m de la surface. Les plaques peuvent être :

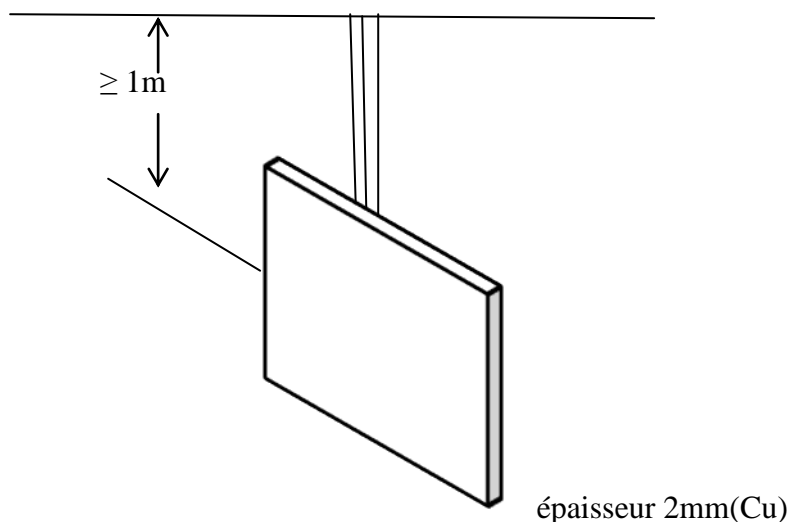
- en cuivre de 2 mm d'épaisseur
- en acier galvanisé de 3 mm d'épaisseur

La résistance obtenue est :

$$R=0.8 \rho/L \quad (I.3)$$

L : périmètre de la plaque ; (m).

$\rho$  : résistivité du sol. ( $\Omega.m$ ). [5]



**Fig.I.3.** Plaque verticale

### I.6. Schémas de liaison à la terre en moyenne tension (MT)

Les éléments à mettre à la terre dans un poste MT/BT sont les masses (MT et BT) du poste et le neutre du transformateur MT/BT.

La norme NFC 13-200 [AFNOR, 1989] définit les régimes de neutre pour l'ensemble des ouvrages MT. Le traitement du neutre et des masses est représenté par trois lettres :

- La première (I ou T) définit le traitement du neutre ;
- La deuxième (T ou N) définit le mode de raccordement des masses ;
- La troisième (N, R, S) définit les interconnexions éventuelles entre les réseaux de terre

N : les masses du poste et les points neutres sont reliés à la même prise de terre,

R : les masses du poste et les masses de l'installation sont reliées à une même prise de terre

S : les masses du poste sont reliées à une terre séparée). [2]

### I.7. Schémas de liaison à la terre en basse tension (BT)

Il est assez important de rappeler ici les différents schémas de liaison à la terre (régimes de neutre) car les valeurs des résistances de mises à la terre dépendent fortement de ceux-ci, tant du point de vue du fonctionnement des réseaux électriques (sécurité du matériel) que de la sécurité des personnes.

Il existe 3 schémas de liaison à la terre. Chacun est défini par 2 lettres principales :

Première lettre : I ou T : Le neutre du transformateur est-il Isolé ou à la Terre.

Deuxième lettre : T ou N : Les masses sont-elles à la Terre ou au Neutre. [3]

### **I.7.1. Domaines d'utilisation des régimes de neutre**

Les trois schémas de liaison à la terre (SLT) mondialement utilisés et normalisés par la CEI 60364 ont pour objectif commun la recherche de la meilleure sûreté. Sur le plan de la protection des personnes, les trois régimes sont équivalents si l'on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation. Étant donné les caractéristiques spécifiques à chaque régime, il ne peut donc être question de faire un choix à priori. Ce choix doit résulter d'une concertation entre l'utilisateur et le concepteur de réseau : (Bureaux d'études, installateur...) sur :

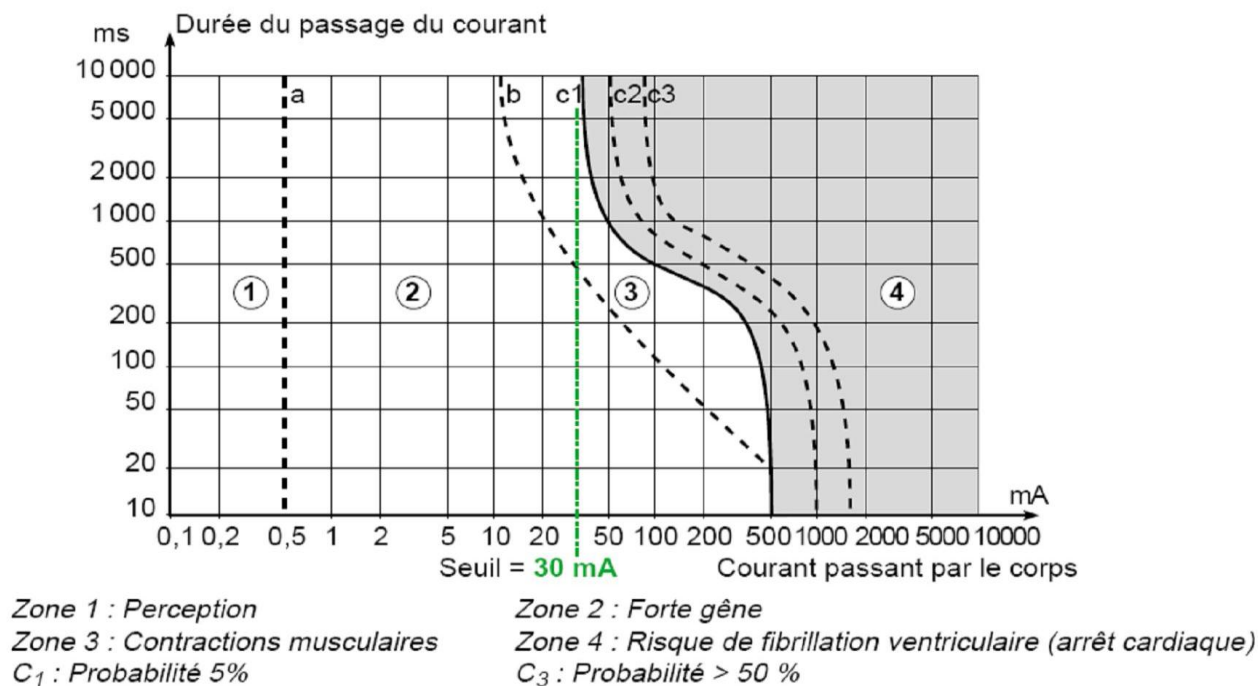
- ❖ les caractéristiques de l'installation,
- ❖ les conditions et les impératifs d'exploitation.

### **I.7.2. Normes de mise à la terre**

Les résistances des mises à la terre doivent avoir des valeurs maximales bien déterminées pour pouvoir remplir correctement leur mission de protéger les personnes et les matériels dans un système électroénergétique. Dans ce paragraphe, nous rappelons brièvement les normes de mise à la terre tant du point de vue de la sécurité des personnes que de celle des équipements. La situation est analysée par schéma de liaison à la terre.

#### **I.7.2.1. Normes relatives à la sécurité des personnes**

La norme 60479-1 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) illustre les effets du courant électrique sur le corps humain et les animaux. La même norme définit une tension de sécurité (tension de contact maximale admissible pendant au moins 5 s), elle est appelée tension limite conventionnelle UL, valant 50 V pour les locaux secs et humides et 25 V pour les locaux mouillés).



**Fig.I.4.** zones temps/courant des effets du courant alternatif (15 Hz à 100 Hz) sur les personnes. [3]

### I.7.3. Le schema TT

T : Neutre relié à la terre.

T : Masses reliées à la terre.

Le regime de distribution TT est le regime employer par EDF pour toute distribution d'énergie publique basse tension. Le principe de la liaison consiste à relier le neutre à la terre en tete de l'instalation BT ainsi que toutes les masses directement à la terre locale.ainsi dés qu'un d'isolement apparait,il se caractérise par un court circuit phase-terre qui doit etre interrompu, on dit que alors il y a « Coupure au premier défaut ». Le schema du regime TT est représenté par la figure suivante :

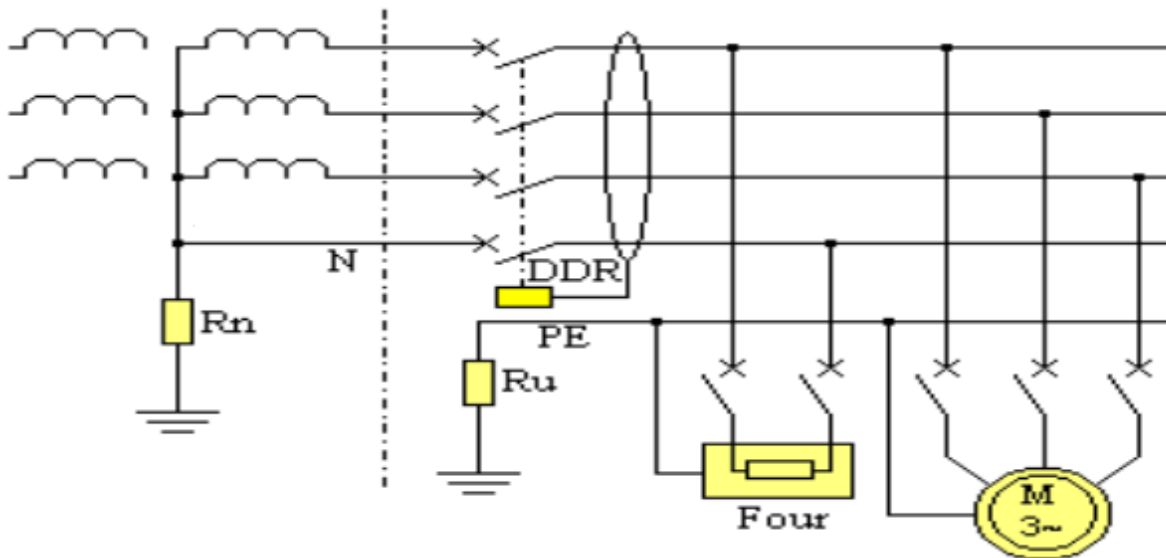


Fig.I.5. schema TT

Un dispositif différentiel à courant résiduel (DDR) est placée en tête de l'installation. La coupure a lieu lors d'un défaut d'isolement dont le courant de fuite dépasse la sensibilité du DDR (en général 30 mA). [5]

#### a) Calcul de la tension et du courant de défaut

$$I_{\Delta n} = U_{\text{ph-N}} / \Sigma R \quad (\text{I.4})$$

En régime TT, la tension de calcul est toujours 230 V entre phase et neutre.

La somme des résistances  $\Sigma R$  correspond à la somme de  $R_n + R_u + R_d$

Calcul de la tension de contact indirect qui existe entre la carcasse et le sol (la terre) :

$$U_d = I_{\Delta n} * (R_u + R_d) \quad (\text{I.5})$$

#### b) Avantages et inconvénients du schéma TT

##### ➤ Avantages

- Coupure au premier défaut
- Peu de calculs pour la mise en oeuvre.
- Ne nécessite aucune personne qualifiée.
- Idéal pour les mauvaises valeurs de prises de terre.
- Extension d'installation simple à réaliser.
- Choix du DDR en fonction de la tension d'alimentation, sensibilité adaptée au local et la prise de terre, l'intensité nominale et du pouvoir de coupure.

➤ **Inconvénients**

- Pas de continuité de service lors d'un défaut d'isolement.
- Dispositif différentiel parfois coûteux (surtout les Hautes Sensibilités).
- Limité aux installations ayant peu de courant de fuites (phase-terre).

**I.7.4. Le schema IT**

I : Neutre isolé de la terre (ou impédant).

T : Masses reliées à la terre.

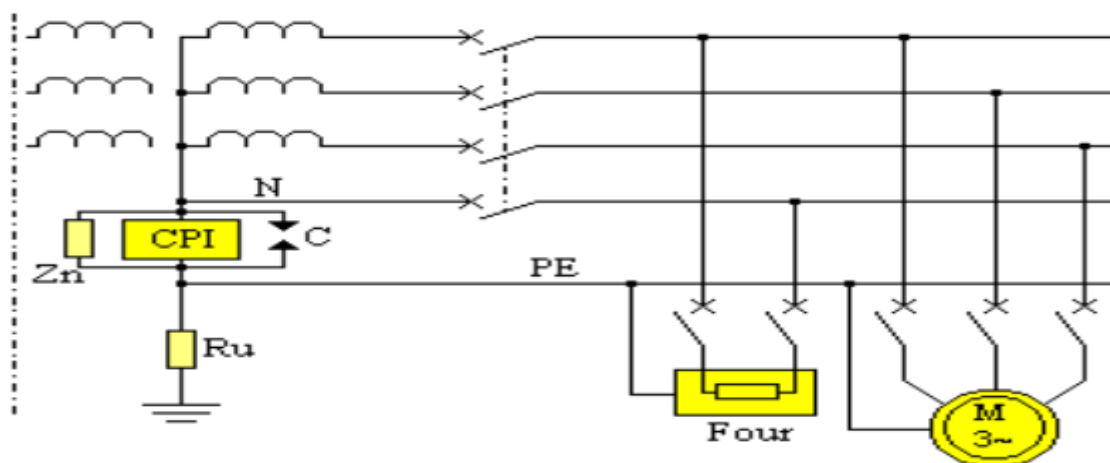
C'est un régime très utilisé dans l'industrie car il assure la meilleure continuité de service. Le neutre du transformateur est isolé de la terre à travers une grande impédance  $Z_n$  (de 500 à 2500 Ohms).

- Les masses sont reliées à la terre à travers une prise de terre de résistance  $R_u$ .

Un Contrôleur Permanent d'Isolement (CPI) mesure le courant de fuite résiduel et signale tout défaut d'isolement trop important (alarme sonore et visuelle).

Un limiteur de surtension (ou éclateur) est toujours installé pour écouler à la terre les surtensions atmosphériques.

Dans le cas de câbles longs, une protection différentielle doit être posée pour assurer la protection des personnes, car la résistance des câbles limiterait l'existence du courant de court-circuit. Le schema du regime IT est representé par la figure suivante :



**Fig.I.6. schema IT**

Lors de deux défauts d'isolement simultanés, la liaison équipotentielle (terre) entre les carcasses provoque un court-circuit qui entraîne le déclenchement des protections contre les surintensités (disjoncteurs, fusibles) pour assurer la sécurité des personnes.

#### **a) Avantages et inconvénients du schéma IT**

##### ➤ **Avantages**

- pas de coupure au premier défaut
- Schéma IT utilisé dans les installations de très courte dimensions, et les transformateurs d'isolement dans les ateliers, les salles de bains (prises rasoirs), etc.

##### ➤ **Inconvénients**

- nécessité d'avoir un spécialiste en dépannage pour supprimer ce défaut très rapidement, avant l'apparition d'un deuxième défaut qui va déclencher les protections.
- ce schéma oblige la mise en place d'un Contrôleur Permanent d'Isolement (CPI) signalant par alarmes sonores et visuelles tout défaut dans l'installation.

#### **I.7.5. Le schéma TN**

T : Neutre relié à la terre.

N : Masses reliées au neutre.

Ce schéma n'est pas autorisé en installations domestiques, il est réservé aux entreprises propriétaires de leur transformateur. Les masses sont reliées au conducteur PE ou PEN et mis à la terre en différents endroits de l'installation.

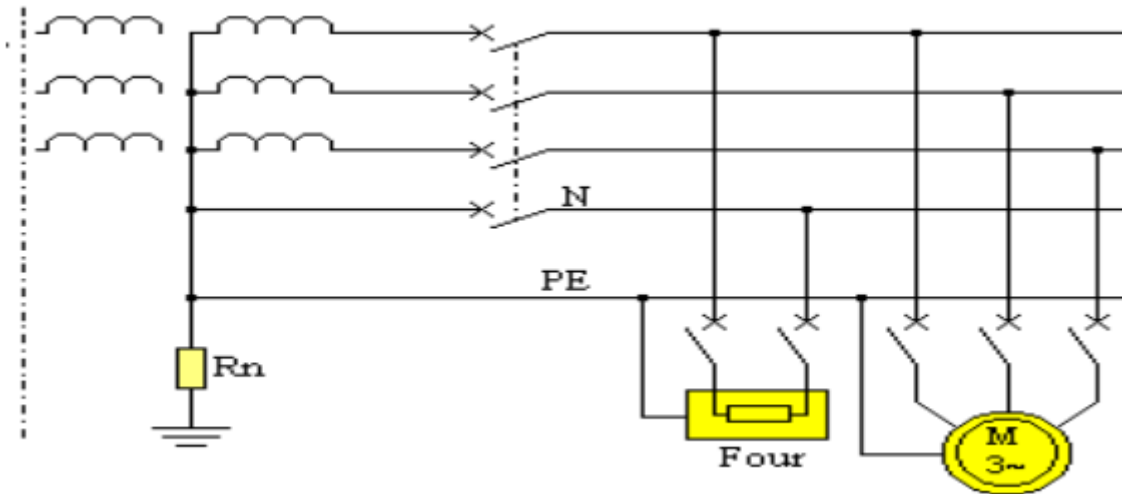
Lors d'un défaut d'isolement, la coupure se fait par surintensité ou court-circuit donc par la protection magnétothermique (disjoncteur ou fusibles). Mais alors, la présence de forts courants de défauts entraîne une augmentation des risques d'incendie.

Deux types de schéma TN sont pris en considération suivant la disposition du conducteur neutre et du conducteur de protection :

**a) Schema TN-S**

( S = Neutre et PE Séparés).

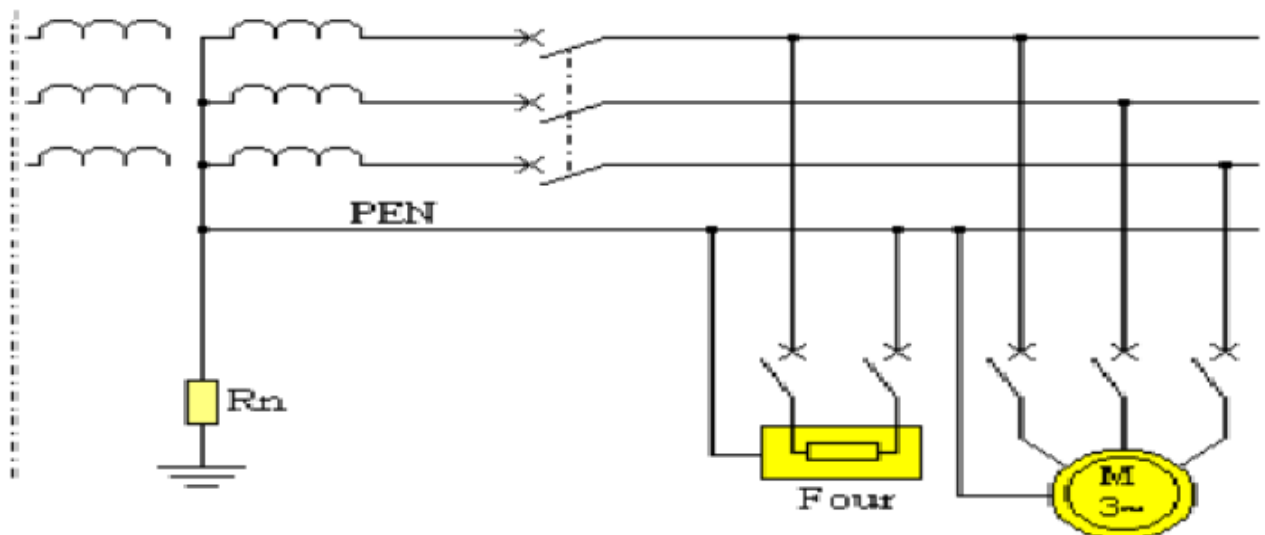
Conducteur de protection distinct du conducteur neutre.



**Fig.I.7.schema TN-S**

**b) schema TN-C : (C = Neutre et PE Confondus ou Communs).**

Conducteur de protection et conducteur neutre combinés en un seul conducteur dans l'ensemble du schéma.



**Fig.I.8.schema TN-C**

### c) Calcul de la tension et du courant de défaut

En présence d'un défaut d'isolement, le courant de défaut  $I_d$  n'est limité que par l'impédance des câbles de la boucle de défaut.

$$I_d = \frac{U_0}{R_{ph} + R_d + R_{pe}} \quad (I.6)$$

Pour un départ et dès que :  $R_d \simeq 0$

$$I_d = \frac{0,8 \cdot U_0}{R_{ph} + R_{pe}} \quad (I.7)$$

En effet, lors d'un court-circuit, il est admis que les impédances en amont du départ considéré provoquent une chute de tension de l'ordre de 20 la tension simple  $U_0$ , qui est la tension nominale entre phase et terre, d'où le coefficient de  $0,8 \cdot I_d$  induit donc une tension de défaut, par rapport à la terre :

$$U_d = R_{pe} \cdot I_d \quad (I.8)$$

Donc :

$$U_d = \frac{0,8 \cdot U_0 \cdot R_{pe}}{R_{ph} + R_{pe}} \quad (I.9)$$

Pour les réseaux 230/400 V, cette tension de l'ordre de  $U_0/2$  (si  $R_{pe} = R_{ph}$ ) est dangereuse car supérieure à la tension limite de sécurité, même en milieu sec ( $U_L = 50$  V). Il est alors nécessaire d'assurer une mise hors tension automatique et immédiate de l'installation ou de la partie de l'installation. Le défaut d'isolement étant similaire à un court-circuit phase-neutre, la coupure est réalisée par le Dispositif de Protection contre les Courts-Circuits - DPCC- avec un temps maximal de coupure spécifié fonction de  $U_L$ .

### d) Avantages et inconvénients du schéma TN

#### ➤ Avantages

- Coupure au premier défaut
- Employé avec succès dans les installations électriques dont les récepteurs ont naturellement des défauts d'isolement très élevés comme les radars, les

installations de calcul et d'acquisition de données qui utilisent des filtres capacitifs de forte puissance entre chaque phase et la masse.

- Également dans certaines installations très particulières (aéronefs) lorsque l'un des conducteurs est composé de la masse du récepteur, ou lorsque plusieurs réseaux mixtes (tensions ou fréquences différentes, continu et alternatif) cohabitent.

➤ **Inconvénients**

- Les installations doivent être calculées et essayées avec le plus grand soin en ce qui concerne la protection de surintensité de courant (relais électromagnétiques) avant toute mise en service normal .
- Toute modification relative à l'alimentation d'un récepteur donnera lieu à une étude comparable à celle effectuée lors de la mise en service initiale.
- Ces installations alimentent des récepteurs sans protection différentielle; en cas de défaut d'isolement, c'est la protection magnétique qui déclenchera la coupure de l'alimentation électrique.
- Afin de parer à une défaillance des connexions du conducteur de terre depuis l'origine de l'installation jusqu'au récepteurs terminaux lorsque le réseau est étendu, les schémas TN nécessitent la mise à la terre du conducteur de protection en plusieurs points tout au long de ce réseau. [3]

## **I.8. Normes relatives à la sécurité des équipements**

### **I.8.1. Mise à la terre dans les postes MT/BT et surtensions temporaires**

La norme CEI 60364-4-442,[CEI 1993] indique que le schéma de liaison à la terre dans un poste MT/BT doit être tel que l'installation BT ne soit pas soumise à une tension par rapport à la terre de :

- $U_0 + 250 \text{ V}$  : pendant plus de 5 s,
- $U_0 + 1200 \text{ V}$  : pendant moins de 5 s, ( $U_0 \sqrt{3}$  en IT),

$U_0$  étant la tension simple BT. Ceci signifie que les divers équipements raccordés au réseau BT doivent pouvoir supporter cette contrainte. La même norme indique que si la résistance des masses du poste  $R_p > 1 \Omega$ , la tension  $R_p \cdot I_{hMT}$  ( $I_{hMT}$  étant le courant de défaut homopolaire côté MT) doit être éliminée par exemple :

- en moins de 500 ms pour 100 V,
- en moins de 100 ms pour 500 V.

Si ce n'est pas le cas, les prises de terre des masses du poste et du neutre du transformateur MT/BT doivent être distinctes, ceci quel que soit le schéma de liaison à la terre BT. Cette règle, pas toujours respectée dans certains pays, conduit souvent à la séparation des deux prises de terre (ceci pour les réseaux MT ayant un fort courant de défaut homopolaire).

Cette contrainte signifie que dans le cas où la terre Rp des masses du poste de transformation est confondue à la terre du neutre du transformateur MT/BT, celle-ci doit avoir une résistance inférieure à 1 Ω.

La norme CEI 60364-4-442 [CEI, 1993] donne des détails sur la protection des matériels en fonction des schémas de liaison à la terre.

### **I.8.2. Mise à la terre dans les postes MT/BT et surtensions d'origine atmosphérique et de manœuvre**

Généralement, les surtensions de manoeuvre sont plus faibles que les surtensions d'origine atmosphérique et c'est pourquoi les prescriptions relatives à la protection contre les surtensions d'origine atmosphérique sont suffisantes pour la protection contre les surtensions de manoeuvre .

Lorsqu'une surtension de foudre provenant du réseau de distribution s'écoule à la terre dans un poste MT/BT à travers un dispositif de protection (parafoudre ou éclateur MT), il s'ensuit une élévation du potentiel des masses BT du poste et/ou des masses de l'installation qui dépend du schéma de liaison à la terre. Le niveau des surtensions transmises en BT dépend de la valeur écrêtée  $U_{rsd}$  et des valeurs des prises de terre. Pour assurer la protection de l'appareillage BT contre ces surtensions, il faut installer des parafoudres BT et limiter la résistance de la prise de terre du poste de façon à ne pas dépasser la tension de tenue au choc de foudre du matériel.

La valeur de l'impédance au choc de la terre des masses du poste MT/BT pour limiter les surtensions atmosphériques transmises en BT doit être telle que :

$$Z_P \leq \frac{Z_C}{\frac{2U_{rsd}}{U_{tc}}} \quad (I.10)$$

où  $Z_c$  est l'impédance caractéristique de la ligne aboutissant au poste MT/BT,  $U_{rsd}$  est la valeur de la tension écrêtée par le dispositif de protection de la ligne MT (parafoudre ou éclateur MT) et  $U_{tc}$  est la tension de tenue du matériel à l'onde de choc. [6]

### **I.9.Conclusion**

Les différents types de liaison à la terre du neutre se distinguent par leur mode de raccordement du point neutre, leur technique d'exploitation et le coût d'investissement.

Le choix de la mise à la terre du neutre des réseaux dépend des conditions du terrain et la valeur de la résistance de prise de terre.

## II.1.Introduction

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les paramètres d'un réseau de terre. Dans ce chapitre nous allons présenter les modèles de calcul de la résistance de terre et les différentes méthodes de mesure de la résistivité de terre.

## II.2.Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre

Avant d'étudier le comportement d'un réseau de terre écoulant un courant, il faut examiner la nature de la propagation des courants dans le sol, c'est-à-dire la répartition des potentiels autour du réseau de terre.

Le cas le plus simple est celui d'une électrode hémisphérique de rayon  $r$ , enterrée dans un sol supposé homogène, de résistivité  $\rho$ . Le potentiel, à une distance  $x$  du centre de l'hémisphère parcouru par un courant  $I$  est donné par la relation : [8]

$$U(x) = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{II.1})$$

## II.3. Résistance d'une électrode hémisphérique

La résistance de l'électrode hémisphérique est calculée à partir de la relation :

$R = \frac{U}{I}$  , on aura donc :

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Si } x \rightarrow \infty, \quad R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (\text{II.3})$$

Cette relation est la plus simple expression qui représente la résistance d'une mise à la terre réalisée avec une électrode hémisphérique. L'hypothèse  $x \rightarrow \infty$  donne un résultat autant précis que  $x$  est très grand. [9]

## II.4. Tension de pas

Comme représenté à la figure II.1, la tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient de potentiel maximum.

Dans un sol supposé homogène, la tension de pas est directement proportionnelle à la résistivité du sol. En général, elle dépend de la distribution de potentiel dans le sol.

A une distance  $d$  de l'impact d'un courant de foudre au sol, en considérant un sol homogène de résistivité  $\rho$  et une répartition purement résistive de potentiel, elle est donnée par la relation. [10]

$$U_p = \rho \frac{I}{2\pi(d+1)} \quad (\text{II.4})$$

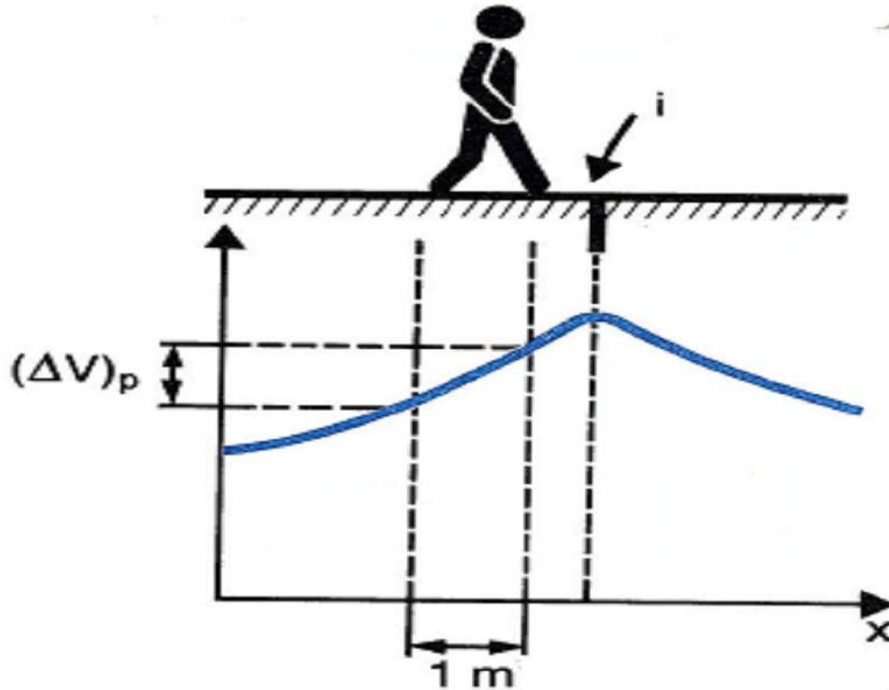


Fig.II.1. Tension de pas

Dans ce cas, pour un courant de foudre de valeur de crête 50 kA par exemple, la tension de pas à une distance de 30 m du lieu d'impact est de :

- $U_p = 855.67 \text{ V}$  pour  $\rho = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  (Europe par exemple).
- $U_p = 25.67 \text{ kV}$  pour  $\rho = 3000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  (région tropicale par exemple), si  $d = 30 \text{ m}$ .

## II.5. Modèles de calcul

Trois modèles ont été développés dans la littérature pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical, de forme cylindrique. [1]

### II.5.1. modèle de Rudenberg

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \text{Ln} \frac{4l}{d} \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec

$\rho$  : la résistivité du sol ( $\Omega \cdot \text{m}$ ).

$l$  : la longueur de l'électrode et  $d$  le diamètre de l'électrode (m).

### II.5.2 Modèle de Dwight-Sunde

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \text{Ln} \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

### II.5.3 Modèle de LIEW-DARVENIZA

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \text{Ln} \frac{r+l}{r} \right) \quad (\text{II.7})$$

$r$  : étant le rayon de l'électrode.

Il est assez important de connaître le rayon équivalent de l'hémisphère qui aurait la même résistance qu'un piquet de terre. C'est le rayon équivalent. Il est donné par la relation.

$$R_{\text{eq}} = \frac{\rho}{2\pi R_{\text{piquet}}} \quad (\text{II.8})$$

$R_{\text{piquet}}$  est la résistance du piquet.

Ces relations, bien que différentes, donnent des résultats très proches. La figure ci-dessous donne les valeurs des résistances pour les différentes valeurs de la longueur de l'électrode cylindrique de rayon 0.0125 m, pour un sol homogène de résistivité 100 Ω.m. [7]

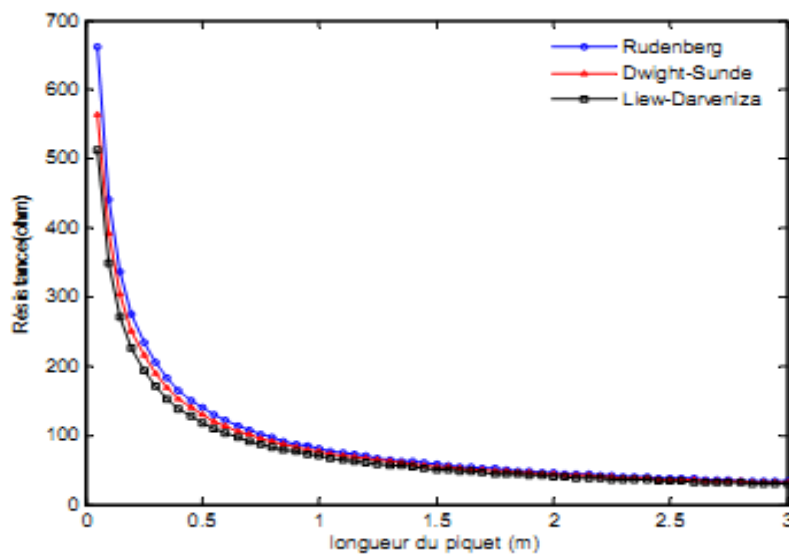


Fig.II.2. Resistance d'une électrode cylindrique.

### II.5.4 Interprétation

Cette figure montre que les résultats de calcul de la résistance de l'électrode cylindrique en utilisant ces différentes formules sont d'autant plus proches que la longueur de l'électrode est relativement grande (au-delà de 1.5 m).

### II.6. Electrodes en ligne droite

La résistance équivalente de deux électrodes en ligne droite est donnée par la formule suivante : [7]

$$R_{eq} = R \left( \frac{1 + \alpha}{2} \right) \quad (II.9)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{r_{eq}}{d} \quad (II.10)$$

d : étant la distance entre les électrodes.

La résistance équivalente de trois électrodes en ligne droite est donnée par la formule suivante :

$$R_{eq} = R \left( \frac{2 + \alpha - 4\alpha^2}{6 - 7\alpha} \right) \quad (II.11)$$

En général, pour N électrodes en ligne droite, pour  $d > l$ , la résistance équivalente est donnée par la relation approchée suivante :

$$R = \frac{1}{N} \left[ \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{2} \dots \dots \frac{1}{N} \right) \right] \quad (II.12)$$

### II.7. Electrodes aux sommets d'un triangle équilatéral

Si trois électrodes sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral de côté d, la résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

$$R_{eq} = R \left( \frac{1+2\alpha}{3} \right) \quad (II.13)$$

### II.8 Electrodes sur les côtés d'un carré

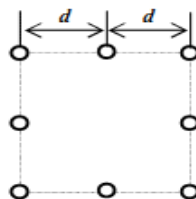


Fig.II.3. Electrode sur les côtés d'un carré.

Soit  $N$  le nombre d'électrodes, la résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

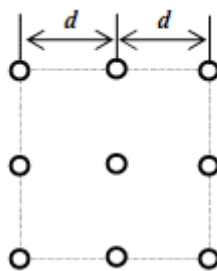
$$R_N = R \left( \frac{1+K\alpha}{N} \right) \quad (\text{II.14})$$

Les coefficients  $k$  sont donnés par le tableau ci-dessous :

Nombre d'électrodes par côté	Nombre total d'électrodes	k
2	4	2.7071
4	8	4.2583
5	12	5.3939
6	16	6.0072
7	20	6.4633
8	24	6.8363
9	28	7.1479

**Tableau. II.1.** Coefficients  $k$  pour des électrodes sur les côtés d'un carré. [11]

### II.9. Electrodes dans un carré solide



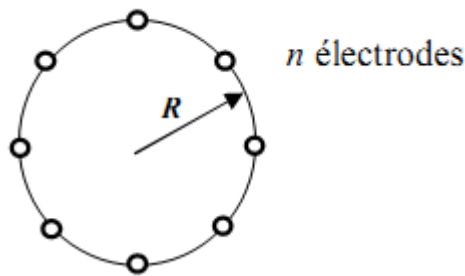
**Fig.II.4.** Electrode dans un carré solide.

La résistance est donnée par la relation (II.14) ci-dessus. Cependant, les coefficients  $k$  sont donnés par le tableau ci-après.

Nombre d'électrodes par côté	Nombre total d'électrodes	k
2	4	2.7071
3	9	5.8917
4	16	8.5545
5	25	11.4371
6	36	14.0650
7	49	16.8933
8	64	19.5003

**Tableau II.2.** Coefficients k pour des électrodes dans un carré solide. [11]

### II.10 Electrodes sur la circonférence d'un cercle



**Fig.II.5.** Electrodes sur une circonférence.

La résistance équivalente est donnée par la relation suivante :

$$R_N = R \left( \frac{1 + 0.5\alpha + \alpha \sum_{s=1}^{s=(\frac{n}{2}-1)} \cos\left(\frac{S\pi}{n}\right)}{n} \right), \quad (\text{II.15})$$

Avec :  $\alpha = \frac{r}{R}$

Dans ce cas, la distance entre deux électrodes est donnée par la relation suivante :

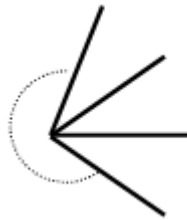
$$d = 2R \sin \frac{2\pi}{n} \quad (\text{II.16})$$

### II.11. Câble enterré horizontalement

La résistance d'un câble de longueur  $L$  et de rayon  $r$ , enterré horizontalement à une profondeur  $h$  est donnée par [Electricité de France, Direction des études et recherches, 1984]

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left( \ln \frac{2L}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (\text{II.17})$$

### II.12. Plusieurs (n) câbles rayonnant de longueur $L$ , enfouis à la même profondeur $h$



**Fig.II.6.** Plusieurs câbles rayonnants.

La résistance équivalente est donnée par la formule suivante :

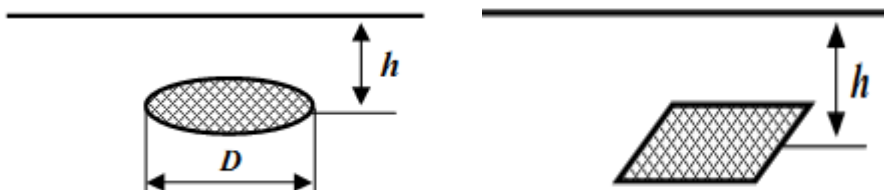
$$R = \frac{\rho}{n\pi L} \left( \ln \frac{2L}{\sqrt{2rh}} - 1 + N(n) \right) \quad (\text{II.18})$$

Avec les  $N(n)$  donnés par le tableau suivant :

n	2	3	4	6	8	12	100
N	0.7	1.53	2.45	4.42	6.5	11	116

**Tableau II.3.** Coefficients  $N(n)$  pour  $n$  électrodes rayonnant. [2]

### II.13. Réseau maillé ou grille



**Fig.II.7.** Réseau maillé.

La résistance est donnée par les formules suivantes :

$$h \ll D, R = \frac{\rho}{4D} \left( 1 - \frac{4h}{D} \right) \quad (\text{II.19})$$

$$h \gg D, R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi h} \quad (\text{II.20})$$

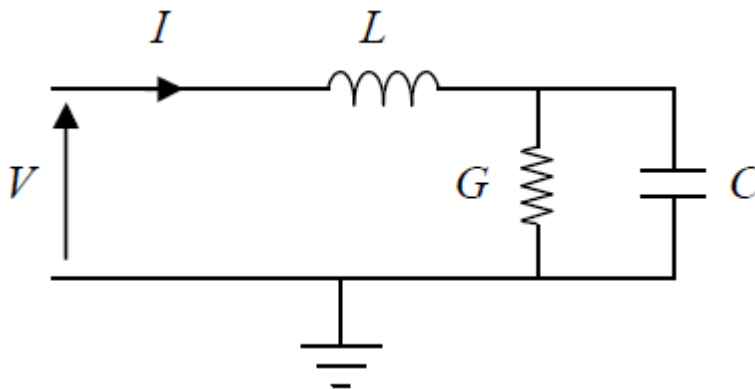
### II.14 Modèles des électrodes de mise à la terre

Plusieurs modèles se sont développés au cours des années pour la représentation des électrodes de mise à la terre. Les plus importants sont :

- le modèle du circuit RLC,
- le modèle de ligne de transmission (TL),
- le modèle électromagnétique (EMF).

#### II.14.1 Le modèle du circuit RLC

Dans ce modèle, en négligeant sa résistance propre, l'électrode est représentée comme un circuit RLC, comme indiqué à la figure suivante.



**Fig.II.8.**Modèle du circuit RLC.

Ce modèle est utilisé avec l'hypothèse d'approximation quasi-statique, ce qui signifie que l'effet du retard dans la propagation des ondes est négligé, cette hypothèse n'est valable que pour des longueurs de l'électrode de l'ordre de : [1]

$$l = \frac{\lambda}{10} \quad (\text{II.21})$$

$\lambda$  est la longueur d'onde dans le sol. Elle dépend des paramètres électriques du sol et est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\epsilon\mu_0}} \left\{ \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\epsilon\omega} \right)^2} + 1 \right) \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.22})$$

$\omega$  est la pulsation de l'onde (liée à la fréquence par la relation  $\omega=2\pi f$ ),  $\epsilon$ ,  $\mu_0$  et  $\sigma$  respectivement la permittivité diélectrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du sol.

## II.15. Résistivité des sols

### II.15.1. Introduction

Il a été précisé dans le chapitre I que la conception d'un réseau de terre doit débuter par une étude de la résistivité du sol dans lequel il sera réalisé. Pour un réseau de terre, il est nécessaire de connaître le profil de la résistivité du sol suivant la profondeur, de manière à choisir la disposition des conducteurs de terre et à prévoir les caractéristiques électriques du réseau de terre.

### II.15.2. Méthodes de mesure de la résistivité

Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain. Mentionnons rapidement le prélèvement d'échantillons et la méthode des <deux électrodes > qui ne fournissent que des indications très locales, et par conséquent insuffisante, voir trompeuse, pour la conception des prises de terre.

On utilise parfois la mesure de la résistance de terre d'une électrode de forme connue (piquet, par exemple) pour déterminer la résistivité du terrain qui l'entoure. Cette méthode a l'avantage de fournir une mesure globale, mais elle ne s'applique bien que si la prise de terre à implanter est de dimension comparables à celles de l'électrode utilisée comme référence.

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité du sol est celle des « quatre électrodes » qui possède deux variantes, la méthode de « WENNER » et celle de « SCHLUMBERGER », qui se distinguent par la disposition des piquets de mesure.

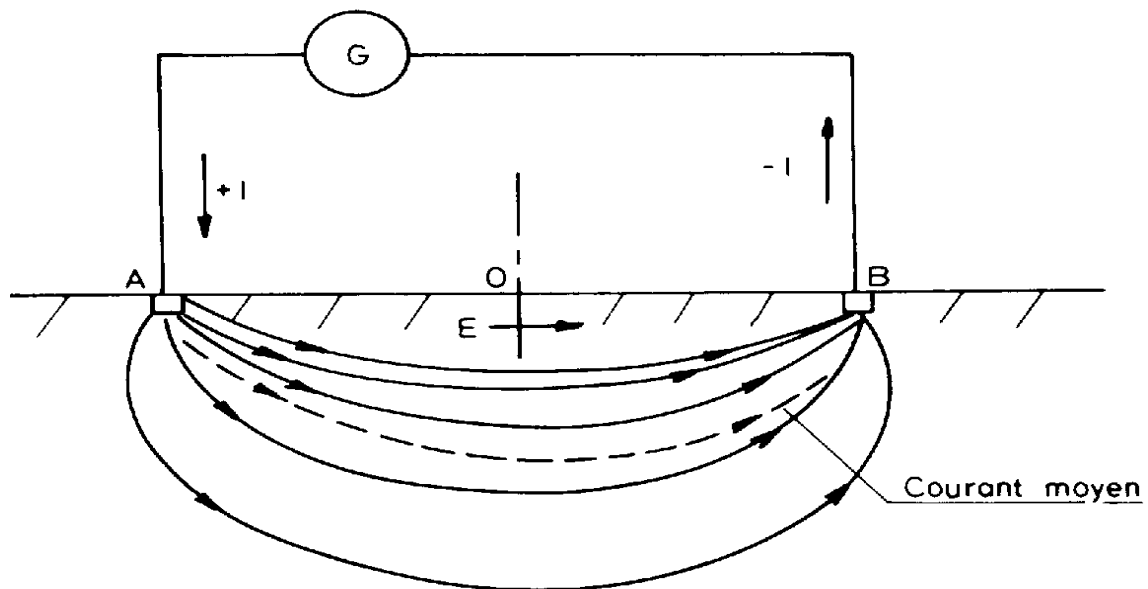
### II.15.2.1 Méthode des quatre électrodes

#### II.15.2.1.Principe de mesure

Pour connaître au juste d'un point O la résistivité du sol en fonction de la profondeur, on fait circuler à l'aide d'un générateur G un courant I entre deux prises de terre ponctuelles de très petites dimensions A et B (figure II.9).

En sol homogène de résistivité  $\rho$ , la valeur du champ électrique E au point O qui est du à la présence des charges électriques de signes contraires venant de A et de B, a pour valeur. [7]

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{I}{AO^2} + \frac{I}{OB^2} \right) \quad (\text{II.23})$$



**Fig.II.9.**Mesure de la résistivité à l'aplomb du point O

Si le point O est situé au milieu de AB, tel que  $AO=OB=x$ , on en déduit la formule suivante de la résistivité du sol sous le point O :

$$\rho = \pi x^2 \frac{E}{I} \quad (\text{II.24})$$

Le sol étant rarement homogène, la formule exprime la résistivité apparente des couches cumulées du sol sous le point O 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 en faisant le rapport entre la différence de potentiel  $\Delta V$ , qui existe entre deux sondes de terre C et D disposées symétriquement par rapport à O, et leur écartement  $\Delta L$ .

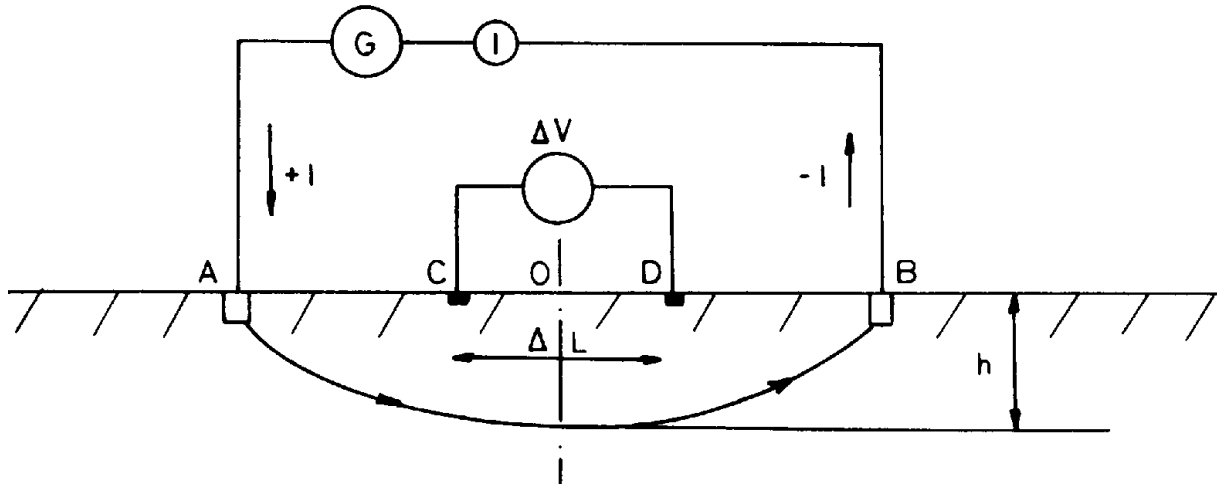


Fig. II.10 Principe de mesure de la résistivité apparente

Le champ électrique s'écrit comme suit

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta L} \quad (\text{II.25})$$

La différence de potentiel  $\Delta V$  peut être exprimée en fonction de la distance respective des point C et D par rapport aux courant +I et -I.

On obtient la relation suivante :

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} \right) - \left( \frac{1}{AD} - \frac{1}{DB} \right) \right] \quad (\text{II.26})$$

On en déduit la valeur de la résistivité apparente  $\rho$  des couches cumulées du sol sous le point O :

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{II.27})$$

C'est la formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols, quelle que soit la longueur des segments en négligeant l'enfoncement des piquets dans le sol.

Le terme  $V/I$  est la résistance R qui est mesurée avec telluromètre à quatre bornes dont le circuit volumétrique est relié aux prises C et D et le circuit ampère métrique aux prises A et B. [5]

Dans le cas où le sol est homogène, la résistivité apparente est identique à la résistivité réelle.

### II.15.2.2. Méthode de WENNER

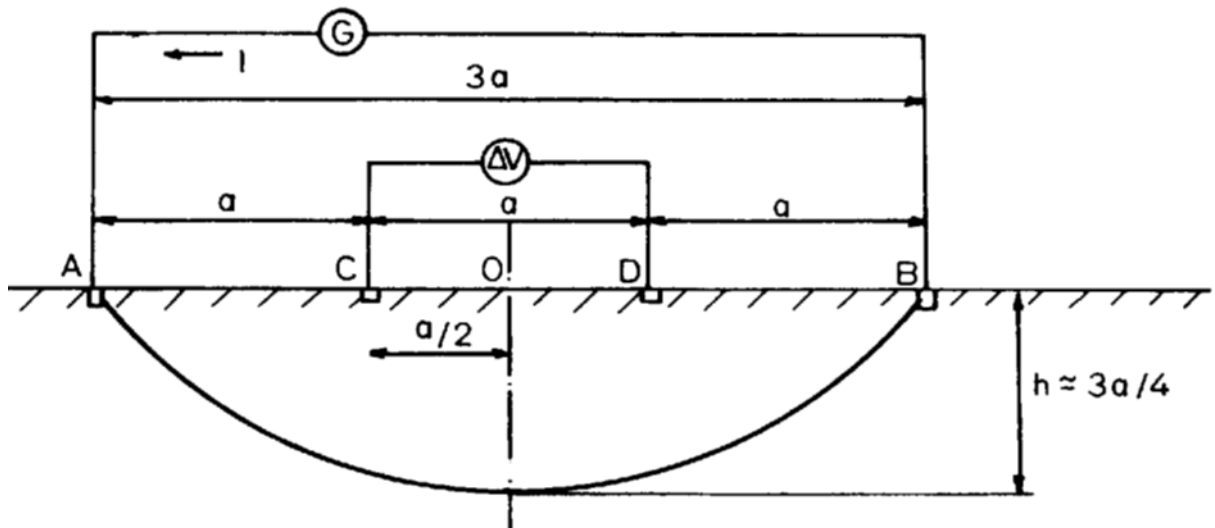


Fig. II.11.Méthode de WENNER

La méthode de mesure de la résistivité apparente des sols la plus utilisée est celle de WENNER dans laquelle les quatre électrodes sont disposées en ligne équidistantes.

L'appareil de mesure est un telluromètre classique. Les deux électrodes extrêmes sont celle d'injection du courant de mesure ; les deux centrales sont les électrodes de mesure du potentiel  $\Delta V$ .

Le point O de mesure de la résistivité se trouve au milieu d'un système, entre les électrodes de potentiel. La distance «a» entre deux électrodes adjacentes est appelée «base de mesure», la distance entre les électrodes extrêmes est la «ligne d'émission», (elle est égale à «3a» avec la méthode de WENNER).

La formule générale (II.15) donnant la valeur de la résistivité apparente cumulée des couches de terrain située sous le point de mesure se trouve simplifiée avec la méthode de WENNER, elle devient : [11]

$$\rho = 2. \pi. a. R \quad (\text{II.28})$$

$\rho$  : résistivité apparente cumulée en  $\Omega.m$ ,

a : base de mesure en mètres,

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

## II.16. Comportement d'une prise de terre en fonction du courant

### II.16.1. Champ électrique dans le sol

L'écoulement d'un courant par une prise de terre engendre dans le sol un champ électrique  $\vec{E}$  lié à la densité de courant  $J$  par la loi d'Ohm :

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{J} \quad (\text{II.29})$$

$\rho$  : étant la résistivité du sol

Puisque les lignes de courant par une prise de terre engendre dans le sol un champ électrique  $\vec{E}$  est d'autant plus élevé qu'on se place près de la prise de terre.

Or, on a constaté que le champ électrique dans le sol ne peut dépasser certains niveaux sans que se produisent dans le sol des claquages réduisant, de manière réversible, la résistivité apparente de la terre. [5]

### II.16.2. Phénomènes de claquage dans le sol

Les processus physiques qui sont à l'origine des claquages dans les matériaux sont divers. Il ne semble pas qu'on connaisse, à l'heure actuelle, le mécanisme des claquages se produisant dans les sols. La valeur du champ critique  $E_c$  au-delà duquel on observe une réduction de la résistivité apparente du sol – varie, selon les auteurs, la nature du terrain et son état (humidité, en particulier) de 500 à 400  $V/m$  environ. De plus, certaines études ont montré que ces phénomènes de claquage évoluent au cours du temps, ce qui complique encore leur caractérisation. [12]

### II.16.3. Caractérisation du comportement des prises de terre

On définit l'impédance transitoire ou la résistance impulsionnelle d'une prise de terre comme l'ensemble du graphe  $Z(t) = (U(t))/(I(t))$  correspondant à une onde de courant donnée ou parfois, plus sommairement, comme la valeur minimale de  $Z(t)$ , ou encore comme la valeur de  $Z(t)$  à l'instant du maximum de  $U(t)$ . Dans tous les cas, l'impédance transitoire dépend de la forme et de l'amplitude du courant injecté  $I(t)$ , inconvénient qu'on ne serait éviter des lors qu'on essaie de caractériser un phénomène non linéaire.

En principe, la caractérisation complète d'une prise de terre nécessite la connaissance de cette dernière en haute fréquence est, grâce à la relation d'impédance harmonique, beaucoup plus simple. [3]

### **II.17. Conclusion**

Nous avons cité les différentes méthodes de mesure de la résistivité des sols. Dont le choix de la prise de terre dépend au premier lieu de la résistivité des sols.

Ces diverses méthodes sont utilisées pour calculer la résistivité de sol, mais la plus utilisé est celle des quatre électrodes, dite méthode de «WENNER».

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les méthodes de mesure de la prise de terre, ainsi que les résultats obtenues en niveau du laboratoire haute tension.

A partir de ces résultats, on peut juger s'il y a intérêt de proposer des solutions pour cette prise de terre, comme il nous faudra choisir celles qui minimisent le coût des installations, tout en respectant les normes.

### III.2 La mesure de résistance d'une prise de terre existante

#### III.2.1 Les mesures de terre sur des installations possédant une prise de terre unique

Il est important de rappeler que la mesure de terre de référence est la mesure de terre avec 2 piquets. Cette mesure est référencée dans toutes les normes de contrôle d'une installation électrique et permet de réaliser une mesure précise et sûre de la résistance de terre.

Le principe de mesure consiste à faire circuler à l'aide d'un générateur approprié G, un courant alternatif (i) d'amplitude constante à travers la prise auxiliaire H dite « prise d'injection courant », le retour se réalisant par la prise de terre E.

On mesure la tension V entre les prises E et le point du sol où le potentiel est nul au moyen d'une autre prise auxiliaire S dite « prise de potentiel 0 V ». Le quotient entre la tension ainsi mesurée et le courant constant injecté (i), donne la résistance recherchée.

$$R_E = U_{ES} / I_{EH} \quad (III.1)$$

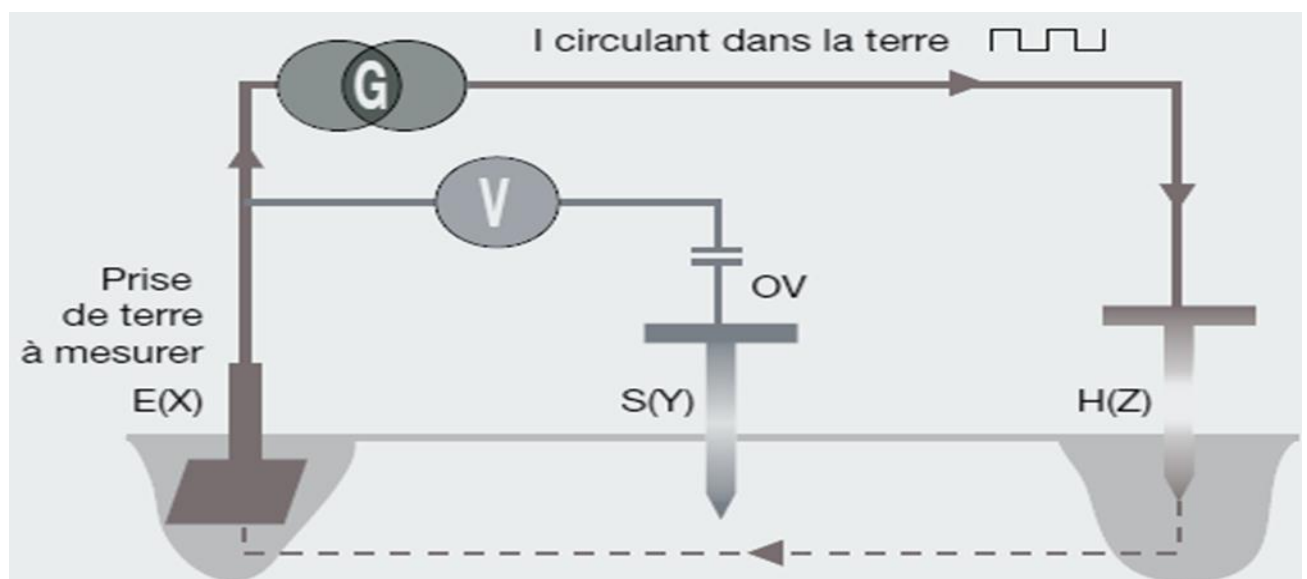
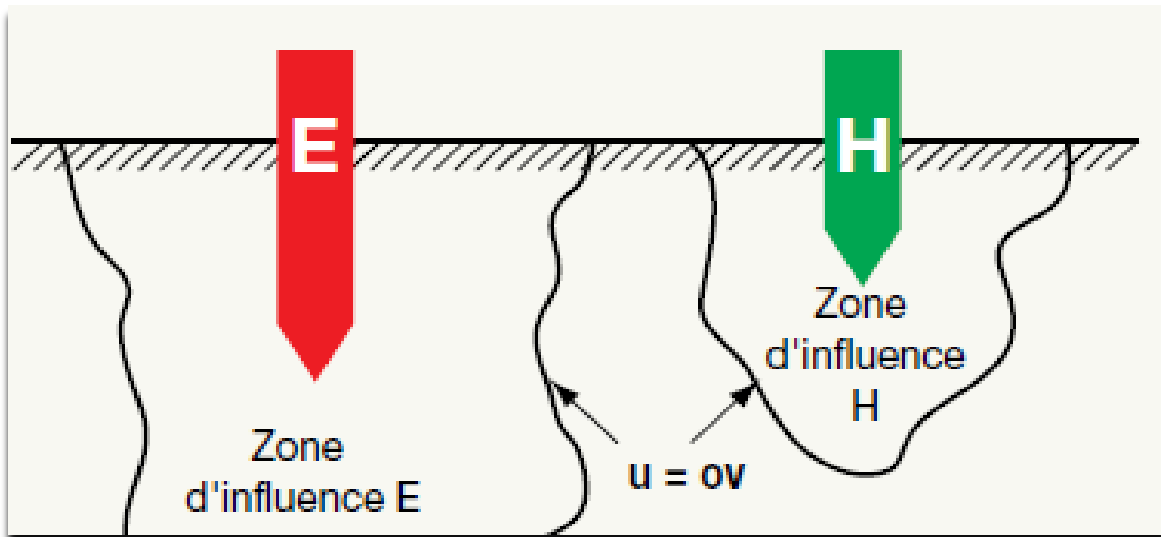


Fig.III.1 principe de mesure une prise de terre [5]

L'écoulement d'un courant de défaut se fait d'abord à travers les résistances de contact de la prise de terre. Plus on s'éloigne de la prise de terre, plus le nombre des résistances de contact en parallèle tend vers l'infini et constitue une résistance équivalente quasiment nulle.

À partir de cette limite, quel que soit le courant de défaut, le potentiel est nul. Il existe donc autour de chaque prise de terre, traversée par un courant, une zone d'influence dont on ignore la forme et l'étendue.

Lors des mesures, il faut s'appliquer à planter la prise auxiliaire S dite « prise de potentiel 0 V » à l'extérieur des zones d'influences des prises auxiliaires traversée par le courant (i).



**Fig.III.2** deux zones d'influence indépendante

Etant donné la différence de comportement de diffusion de courant électrique selon la résistivité du sol, il est difficile d'être certain d'avoir évité les zones d'influence. La meilleure solution pour valider la mesure est donc de refaire une mesure en déplaçant le piquet S et de s'assurer qu'elle est du même ordre de grandeur que la mesure précédente

### III.2.2 Les différentes méthodes

Les mesures de résistivité vues précédemment ne peuvent s'appliquer que dans le cas de construction d'une nouvelle prise de terre : elles permettent de prévoir par avance la valeur de résistance de terre et d'ajuster la construction selon la valeur de terre souhaitée.

Dans le cas de prises de terre existantes, la démarche consiste à vérifier que celles-ci répondent correctement aux normes de sécurité en termes de construction et de valeur de résistance.

Cependant, de nombreuses mesures peuvent être appliquées selon les caractéristiques de l'installation telles que la possibilité de mettre l'installation hors tension, de déconnecter la prise de terre, d'avoir une prise de terre unique à mesurer ou reliée à d'autres, la précision de la mesure souhaitée, le lieu de l'installation (milieu urbain ou non), etc.

Pour ce faire on fait appel à plusieurs méthodes de mesure, dont on distingue deux types :

- type de mesure avec déconnection obligatoire de la barrette de terre.
- type de mesure sans déconnecter la barrette de terre.

### **III.2.2.1 Mesure de terre 3 pôles dits méthode des 62 %**

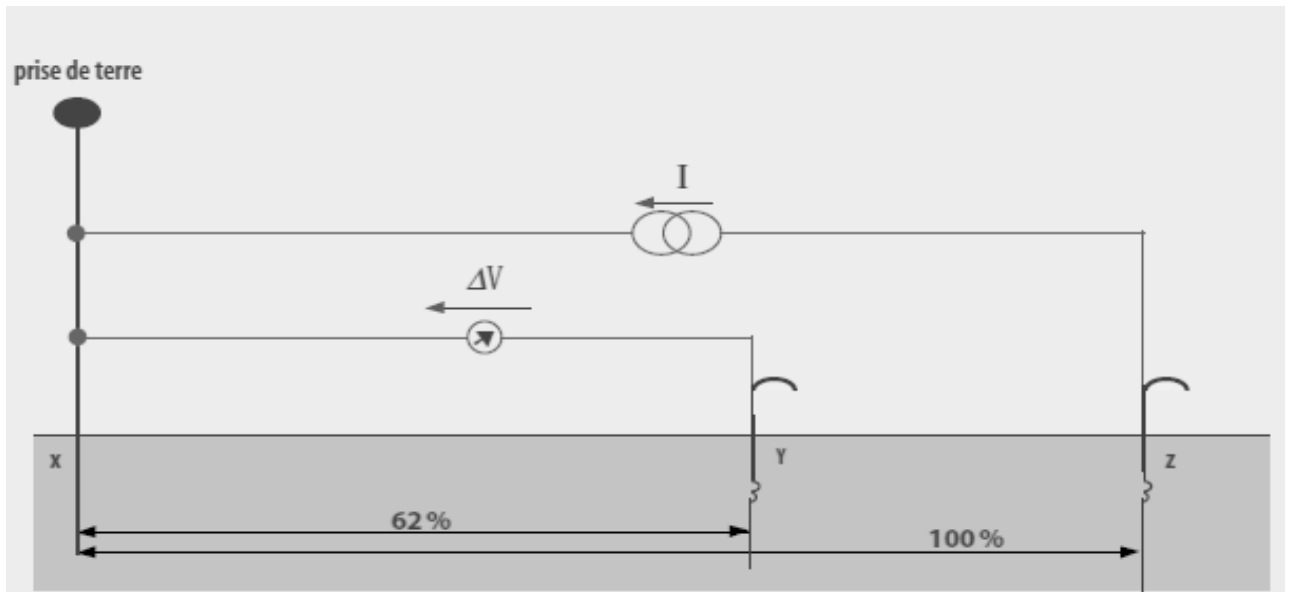
Cette méthode nécessite l'emploi de deux électrodes (ou « piquets ») auxiliaires pour permettre l'injection de courant et la référence de potentiel 0 V. La position des deux électrodes auxiliaires, par rapport à la prise de terre à mesurer (X), est déterminante.

Le piquet situé le plus loin de la prise de terre assure le bouclage du courant I généré par l'ohmmètre de terre : c'est la sonde auxiliaire ou terre auxiliaire (Z), le deuxième piquet est la sonde de tension (Y) qui permet de mesurer la différence de potentiel  $\Delta V$  par rapport à la prise de terre.

La sonde de tension doit être positionnée entre la prise de terre et la sonde auxiliaire selon la règle des 62%. [9]

Cette règle qui consiste à placer la sonde de tension à 62% de la distance (XZ) permet de s'assurer de se trouver en dehors des zones d'influence de chaque pôle et donc de rechercher une mesure assez précise.

Connaissant la différence de potentiel et le courant, on calcule la résistance de terre à l'aide de la loi d'Ohm.



**Fig.III.3** principe de la mesure (méthode des 62%)

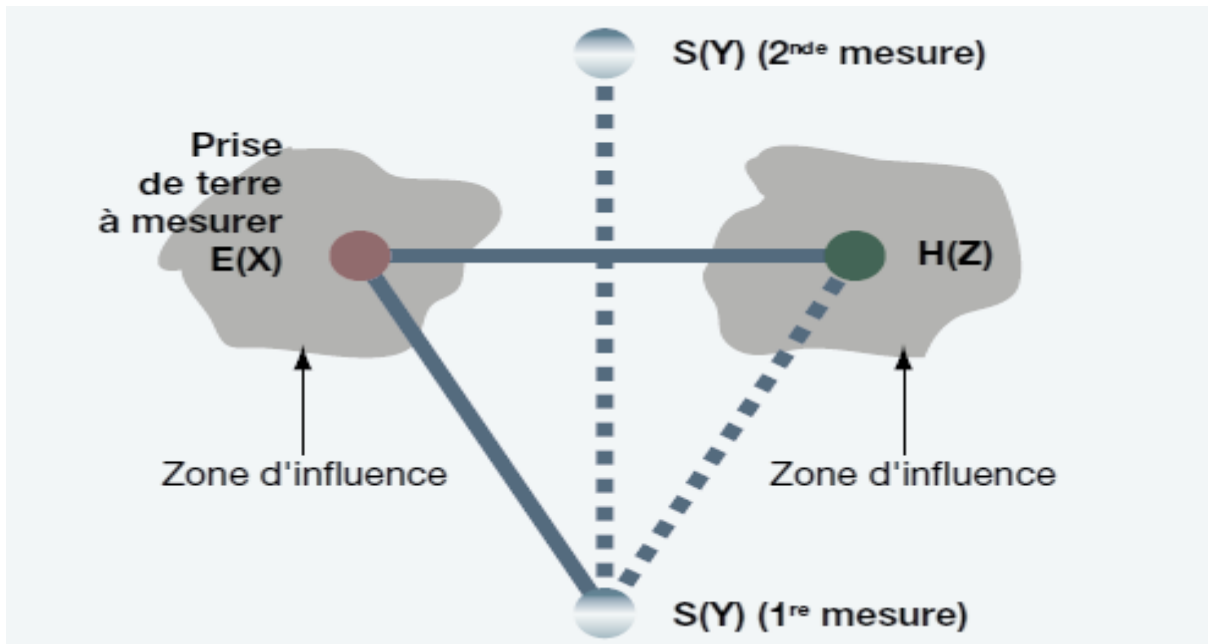
### III.2.2.2 La méthode de mesure en triangle

Cette méthode nécessite l'emploi de deux électrodes auxiliaires (ou « piquets »). Elle est utilisée lorsque la méthode de trois pôles ne peut être réalisée (impossibilité d'alignement ou obstacle interdisant un éloignement suffisant de H).

Elle consiste à :

- Planter les piquets S et H tels que la prise de terre E et les piquets S et H forment un triangle équilatéral,
- Effectuer une première mesure en plaçant S d'un côté, puis une seconde mesure en plaçant S de l'autre côté. Si les valeurs trouvées sont très différentes, le piquet S est dans une zone d'influence. Il faut alors, augmenter les distances et recommencer les mesures. Si les valeurs trouvées sont voisines, à quelques % près, la mesure peut être considérée comme correcte.

Toutefois, cette méthode fournit des résultats incertains. En effet, même lorsque les valeurs trouvées en sont voisines, les zones d'influence peuvent se chevaucher. Pour s'en assurer, recommencer les mesures en augmentant les distances



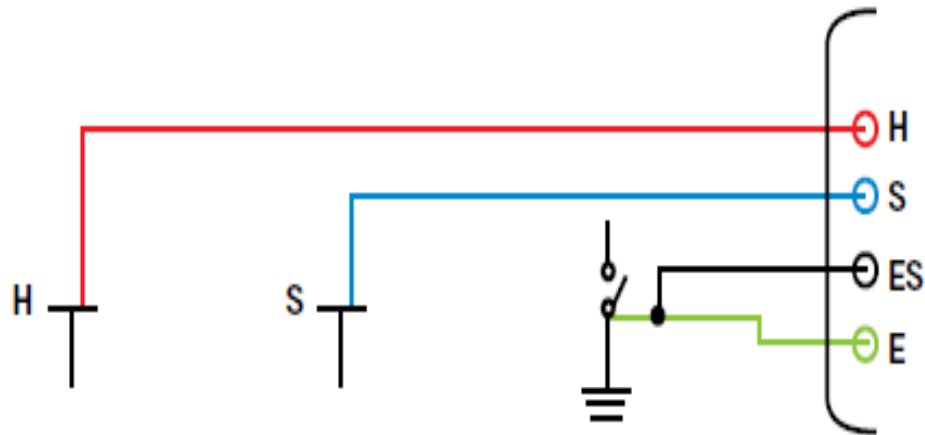
**Fig.III.4** principe de mesure en triangle

### III.2.2.3 La mesure de terre méthode 4 pôles

La mesure de terre 4 pôles (figure III.5) est basée sur le même principe que la mesure 3 pôles mais avec une connexion supplémentaire entre la terre à mesurer E et l'appareil de mesure.

Cette méthode permet ainsi d'obtenir une meilleure précision (10 fois meilleure que la mesure avec trois pôles) et de s'affranchir de la résistance des cordons de mesure.

Cette fonction est idéale pour les mesures de résistance de terre très faibles et par conséquent convient particulièrement aux transporteurs et distributeurs d'énergie qui ont besoin de mesurer des résistances de terre de quelques ohms.



**Fig.III.5** principe de mesure avec quatre pôles

#### III.2.2.4 Avantage des mesures de terre avec la méthode de 3 pôles ou quatre pôles

L'avantage des mesures de terre en 3 pôles ou 4 pôles est qu'elles s'effectuent sur une installation hors-tension et permettent ainsi d'obtenir une mesure de terre même si le pavillon ou le bâtiment n'a pas été encore raccordé au réseau de distribution d'énergie électrique ou ne l'est plus.

Pour réaliser ces deux types de mesure, il est conseillé d'ouvrir la barrette de terre pour isoler la prise de terre à mesurer et s'assurer ainsi que la résistance de terre mesurée est bien celle de la prise de terre. En effet, il peut exister une liaison de l'installation de mise à la terre à une prise de terre de fait due par exemple, aux conduites métalliques d'un réseau de distribution d'eau ou de gaz.

Une mesure de terre « barrette fermée » sera alors « faussée » par la présence de cette prise de terre de fait qui en étant supprimée peut entraîner une valeur de résistance de terre trop élevée (par exemple, remplacement d'une conduite métallique par une conduite isolante).

Par conséquent, à moins d'être certain de l'absence de prise de fait, il est nécessaire d'ouvrir la barrette de terre pour réaliser une mesure de terre.

Pour identifier la présence éventuelle de prises de terre de fait, il peut être utile de mesurer les prises de terre « barrette ouverte » et « barrette fermée » afin de savoir si la valeur «barrette fermée» est due à la prise de terre spécialement établie ou à des prises de terre de fait.

### III.2.2.5 Mesure de terre 4 pôles sélective par pince ampère métrique (sans déconnecter la résistance de terre)

Elle permet de mesurer la résistance des prises de terre individuelles sur des systèmes complexes comportant des systèmes maillés ou de réseaux de grilles tels que ceux qui sont utilisés pour les postes de distribution publique, pour les pylônes des lignes à haute tension comportant des câbles de garde et pour les installations industrielles à terres multiples.

Lors de l'utilisation d'une méthode de mesure classique 3 pôles ou 4 pôles sur un système de mise à la terre en parallèle, le courant de mesure injecté dans le système se divise entre les différentes terres. Il est alors impossible de connaître la quantité de courant dans une prise de terre donnée et donc sa résistance. La mesure faite dans ce cas est celle du courant total circulant dans la mise à la terre, donnant la résistance globale de terre équivalente à la mise en parallèle des résistances de chaque mise à la terre. Pour parvenir à éliminer l'influence des prises de terre parallèles, il existe une mesure de terre 4 pôles sélective, variante de la mesure 4 pôles. Elle s'appuie sur le même principe auquel on ajoute une pince ampère métrique permettant de mesurer exactement le courant circulant dans la terre à mesurer et ainsi de déterminer sa valeur exacte.

Grâce à l'utilisation des piquets auxiliaires, et plus particulièrement de la référence 0 V avec le piquet S, cette mesure permet d'obtenir une valeur précise de la résistance de terre.

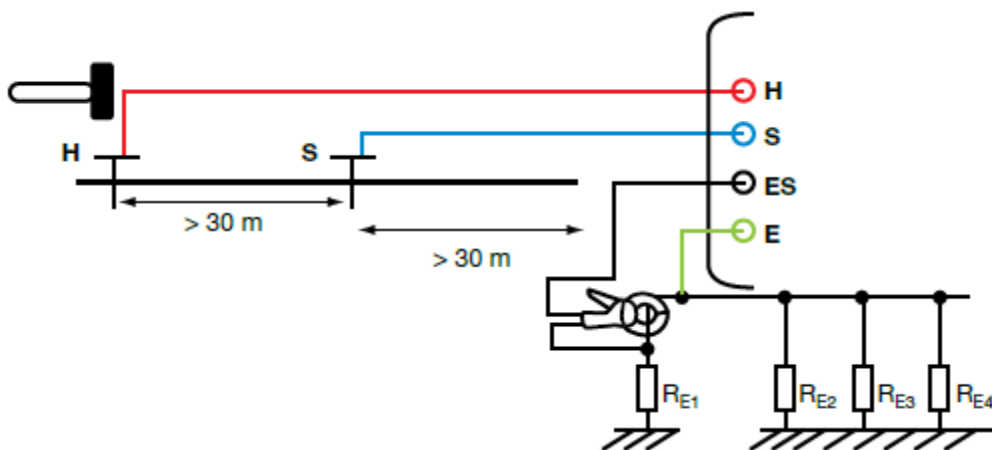


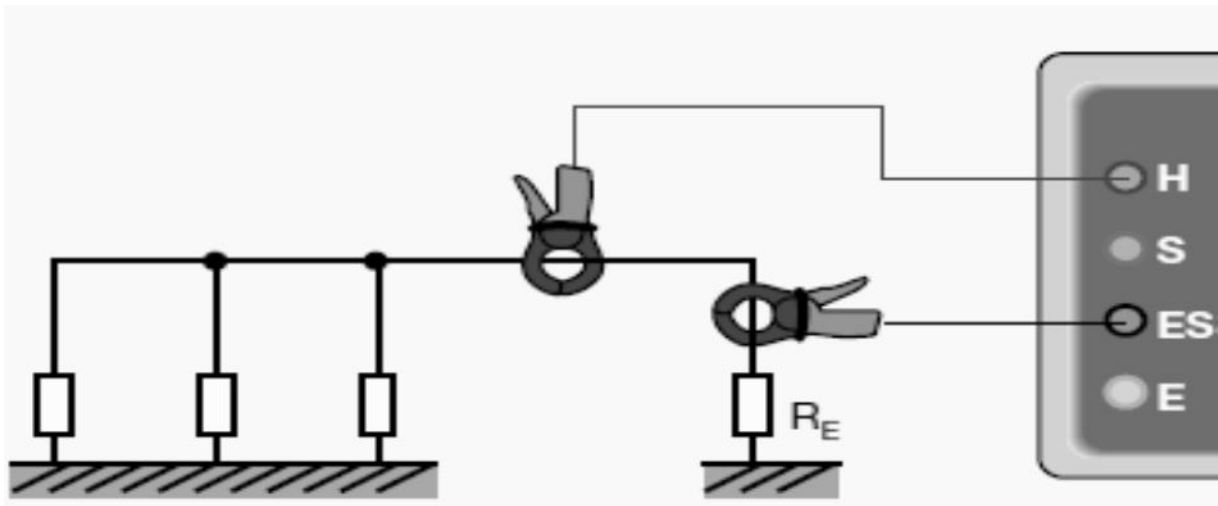
Fig.III.6 principe de mesure avec 4 pôles sélective

### III.2.2.6 Mesure de boucle de terre à 2 pinces de terre (sans piquet de terre)

Pour mesurer les différentes résistances de terre sur des installations de mise à la terre complexes on fait appel à l'aide de 2 pinces ampère-métriques. Avec ce système, il n'y a plus besoin de déconnecter les prises de terre parallèles.

La méthode est basée sur le fait que dans les installations disposant de prises de terre multiples, la résistance de terre effective globale est nettement inférieure à la résistance de terre individuelle qu'il faut mesurer.

La résistance qui résulte du montage parallèle des résistances  $R_1...R_n$  est très faible. Dans la pratique, l'erreur de mesure de  $R_E$  est donc négligeable.



**Fig.III.7** principe de mesure avec deux pinces ampère-métrique

La première pince ampère-métrique injecte une tension, tandis que la deuxième pince mesure le courant qui passe effectivement. Cela permet à l'UNILAP GEOX de mesurer la tension et le courant avec redressement synchrone et de calculer la résistance  $R_E$ . Les mesures par pinces ampère-métriques ne s'appliquent qu'aux prises de terres qui sont montées en parallèle sur des installations complexes. Lorsque le reste du système de mise à la terre n'est pas directement en parallèle de prise de terre mesurée, la mesure est impossible (pas de bouclage du courant) ou bien on obtient la résistance de l'ensemble du circuit de retour par la terre.

### III.3 Cas pratique

#### III.3.1 Introduction

Dans cette manipulation, nous allons décrire la méthode de mesure, et présenter les résultats des mesures effectuées au niveau du laboratoire de haute tension, de département d'électrotechnique de l'université mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU pour la résistance des mises à la terre. A partir de ces résultats, nous allons, pour des cas concrets, proposer des solutions pour les mises à la terre adéquates.

#### III.3.2 Présentation et fonctionnement du matériel

Dans notre cas de mesure on fait appel à un appareil de mesure qu'est un telluromètre de type « METRATERR 2 VDE0413 T5 » qu'est donnée par la figure suivante :



**Fig. III.8** Telluromètre type <<METRATERR 2 VDE0413 T5>>

### III.3.2.1 Éléments constitutifs

- La borne [E] : liaison vers la terre à mesuré.
- La borne [S] : liaison vers l'électrode auxiliaire de potentiel.
- La borne [H] : liaison vers l'électrode auxiliaire de courant.
- La borne [BATT TEST] sert à vérifier la fiabilité de la batterie.
- La borne [EIN ON] sert à allumer l'appareil et la mesure, pour les le reste des bornes ont comme fonction pour ajuster le curseur de l'appareil au milieu.

### III.3.2.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un telluromètre généralement se base sur la méthode dite « La chute de tension ».

La figure III.8 Schématise le principe de fonctionnement du telluromètre qui comprend :

- Un générateur G qui délivre un courant I est applique  $U_G$  entre la prise de terre X à mesurer et la sonde auxiliaire d'injection de courant C.
- Un dispositif permettant de mesurer le quotient  $V/I$ , donc d'afficher directement la valeur de la résistance de la prise de terre X (montage en pont dans lequel l'affichage de la valeur de la résistance de la prise de terre mesurée permet d'annuler le courant traversant un galvanomètre).

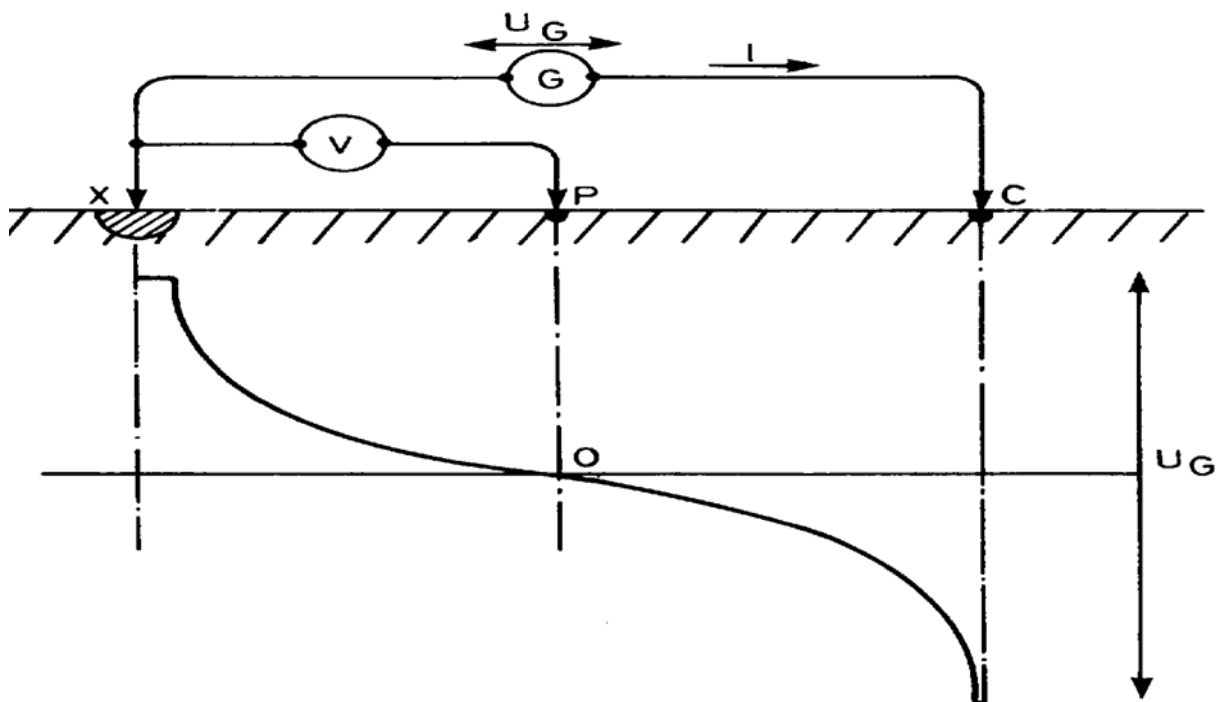


Fig. III.9 Principe de fonctionnement d'un telluromètre

**III.3.2.3 Caractéristique de l'appareil**

Mesure	Terre / Résistivité
Type	3P ou 4P
Gamme de mesure	0,1 $\Omega$ à 10 k $\Omega$
Précision	$\pm 2 \%$
Tension à vide	$\leq 24$ V
Fréquence	108 Hz
Alimentation	6 piles de 1,5 V
Dimensions	270 x 250 x 110 mm

**Fig.III.1** Tableau suivant nous donne les caractéristiques de l'appareil de mesure

**III.3.2.4 Accessoires optionnel**

Pour faire les mesures avec le telluromètre, il nous faut quelques accessoires optionnel comme :

- a) 2 piquets de terre d'environ 100 cm
- b) 1 enrouleur 20m de câble bleu PVC
- c) 1 enrouleur 30m de câble rouge PVC

**III.3.3 Mesure de la prise de terre du laboratoire de haute tension****III.3.3.1 Equipements de laboratoire de Haute tension**

La figure III.10 représente les différents équipements du laboratoire de haute tension, et leur branchement vers la prise de terre.

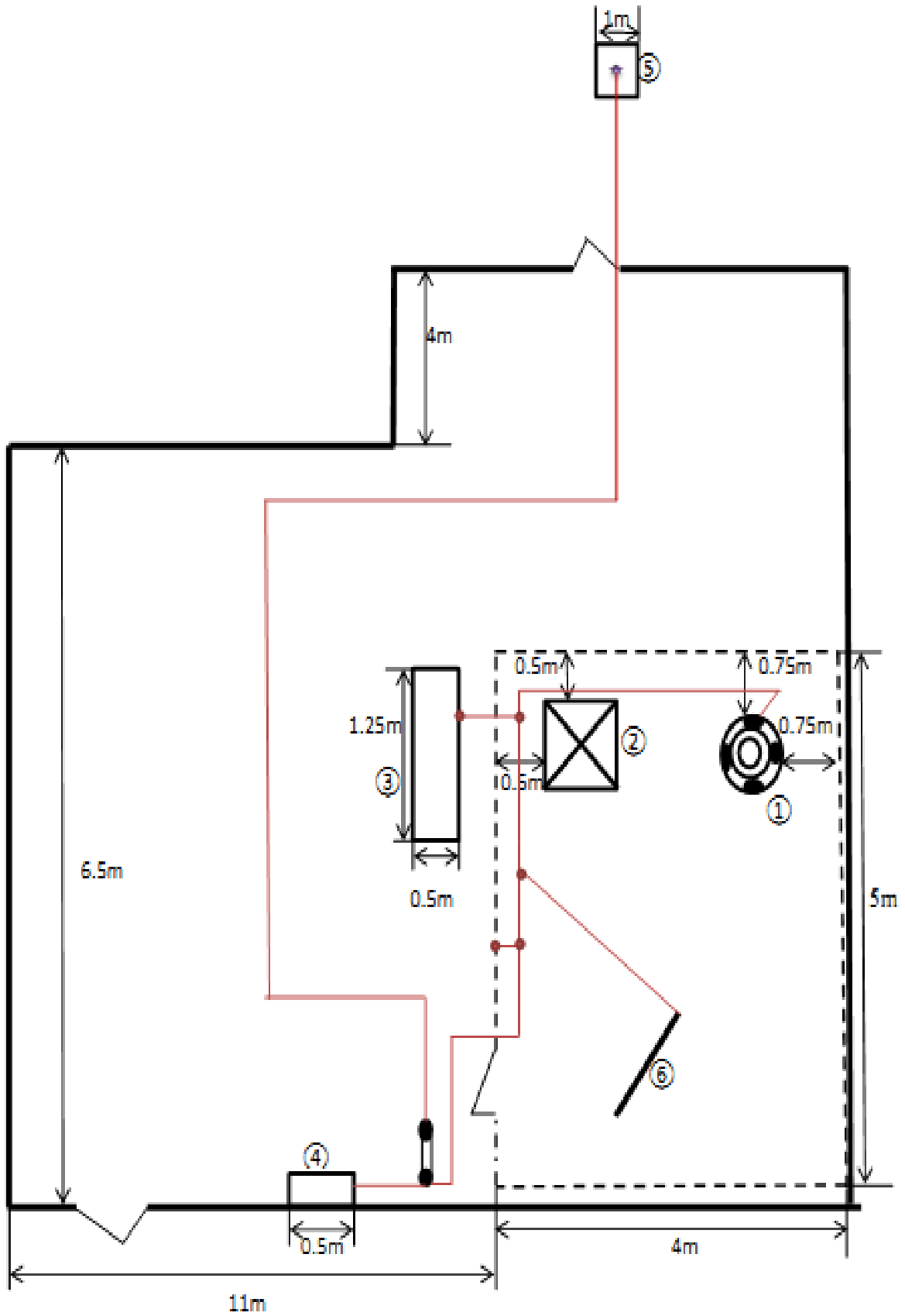


Fig.III.10 les équipements du laboratoire haut tension.

- ① Transformateur à haute tension sert à alimenter l'autotransformateur
- ② Table d'essai
- ③ Pupitre de commande ; le pupitre comprend tous les organes nécessaires à la station dans sa commande et son contrôle.

Barrette de terre : sert à déconnecter la prise de terre si on a besoin.

- ④ L'armoire électrique : sert à l'alimentation et à la protection.
- ⑤ Électrode ou Piquet de terre profondément enterré pour assurer ses fonctions.
- ⑥ Perche isolante : elle permette d'écouler les charges statiques qui s'accumulent sur les bornes hautes tension qui présentent des dangers sur les personnes venant les toucher, vers la terre à laquelle elle est reliée.

----- Cage de FARADY : elle permet d'assurer une bonne protection des individus contre les décharges électrique.

————— Conducteur de terre : assure une liaison entre la barrette de terre et les autres équipements du laboratoire avec la prise de terre ou le (piquet).

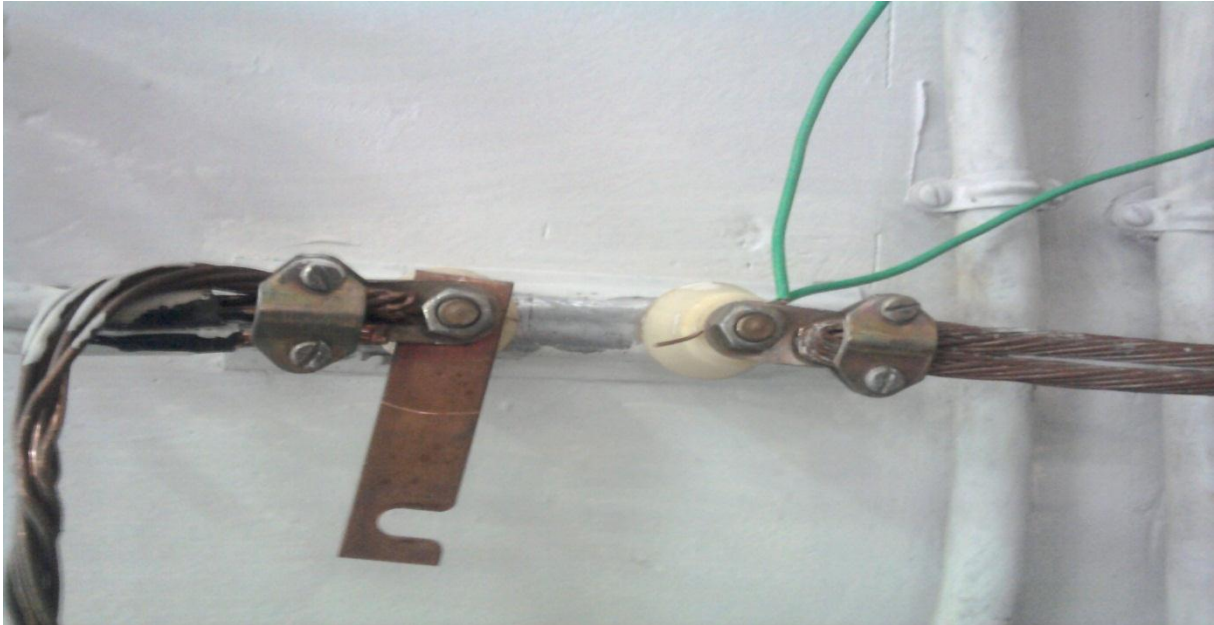
### **III.3.3.2 description de la méthode utilisée**

Pour mesurer la prise de terre du laboratoire de haute tension nous avons utilisé la méthode dite quatre pôles qu'on juge très favorable dans notre cas.

### **III.3.3.3 application**

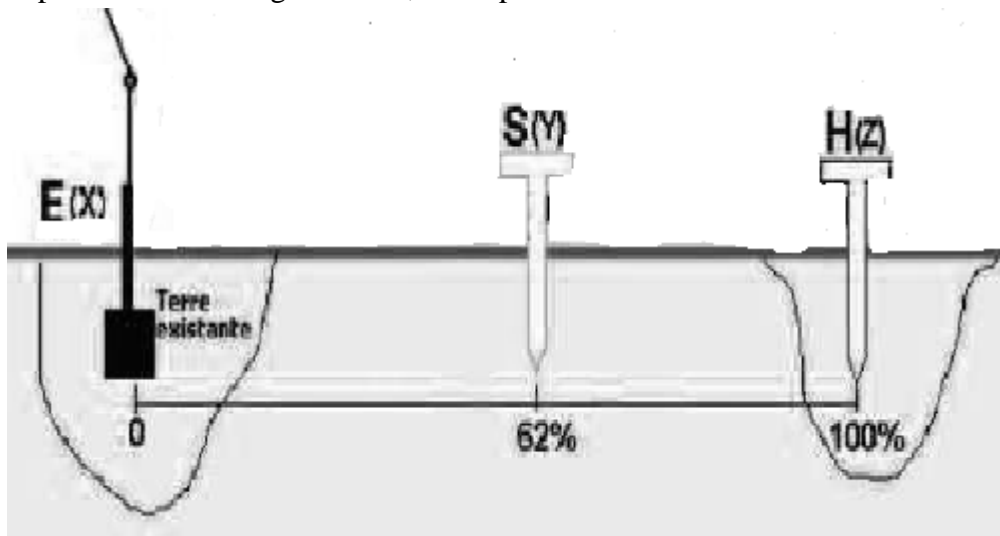
Pour qu'on puisse mesurer la prise de terre il faut qu'on suit les étapes suivante :

- Au premier lieu on déconnecte la barrette de terre de l'installation comme il est indiqué dans la figure (III.11)



**Fig.III.11** la barrette de terre déconnectée

- Après avoir déconnecté la barrette de terre on plante les deux piquets auxiliaire selon le plant ci-dessous figure III.12, en respectant les distances.



**Fig.III.12** plantages des piquets

- Après avoir planté les piquets on connecte les files, puis s on les branche à l'appareil de mesure.



**Fig.III.13** piquet planter et connecter au fil

- Le premier fil connecté au piquet le plus loin.
- Le deuxième fil sur le piquet auxiliaire et les deux autres sur le piquet de terre.
- Après avoir connecté l'appareil, on allume l'appareil et ont vérifié sa batterie au premier lieu avec la touche «BATT TEST» si la batterie est chargée, on commence les mesures, et pour se faire, on appuis sur la touche «on» et la maintenir enfoncer jusqu'à ce que le résultat se stabilise. Alors on note la valeur mesurée.

#### III.3.3.4 les résultats obtenus

Pour différentes distances entre électrodes et la prise de terre, nous avons effectué 5 essais, elles ont été effectuées durant la première semaine puis durant la troisième semaine. Les distances ont été choisies de sorte que la zone d'influence soit évitée.

	1 <sup>ere</sup> semaine	3 <sup>eme</sup> semaine
1 <sup>er</sup> essai (1 <sup>er</sup> position)	72Ω	74Ω
2 <sup>eme</sup> essai (2 <sup>eme</sup> position)	59Ω	63Ω
3 <sup>eme</sup> essai (3 <sup>eme</sup> position)	81Ω	83Ω
4 <sup>eme</sup> essai (4 <sup>eme</sup> position)	62Ω	66Ω
5 <sup>eme</sup> essai (5 <sup>eme</sup> position)	79Ω	83Ω
La moyenne	70.6Ω	73.8Ω

**Tableau.III.1** résultats des mesures.

### III.2.3.5 Interprétation des résultats

On remarque que les valeurs obtenues lors des mesures sont très proches, et ce là nous confirme la bonne position des piquets, dont les zones d'influence ne s'ingèrent pas dans les mesures.

La différence entre les valeurs trouvées, est due aux parasites comme les courants telluriques et vagabonds existant dans le sol, ainsi que la nature du sol qui est hétérogène c'est-à-dire que la résistivité du sol diffère d'un coin à l'autre.

Les valeurs trouvées dans la première semaine sont légèrement petite par rapport aux valeurs trouvées dans la troisième semaine et cela est dû à l'augmentation du facteur de la sécheresse.

On constate que la valeur moyenne de la résistance de la prise de terre est un peu élevée, ce qui nous impose une amélioration pour cette dernière.

### III.4 Amélioration la résistance d'une prise de terre

Des nombreuses solutions existent mais il nous faudra choisir celles qui minimisent le coût des installations, tout en respectant les normes. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons énumérer ces différents moyens et évaluer l'impact de l'amélioration des résistances des mises à la terre qu'ils permettent.

#### III.4.1 Augmentation de la longueur de l'électrode

Pour une résistivité  $\rho$ , la figure (II.2), illustre comment varie, pour différentes relations analytiques, la résistance d'un piquet de terre de forme cylindrique de rayon  $r$  en fonction de sa longueur.

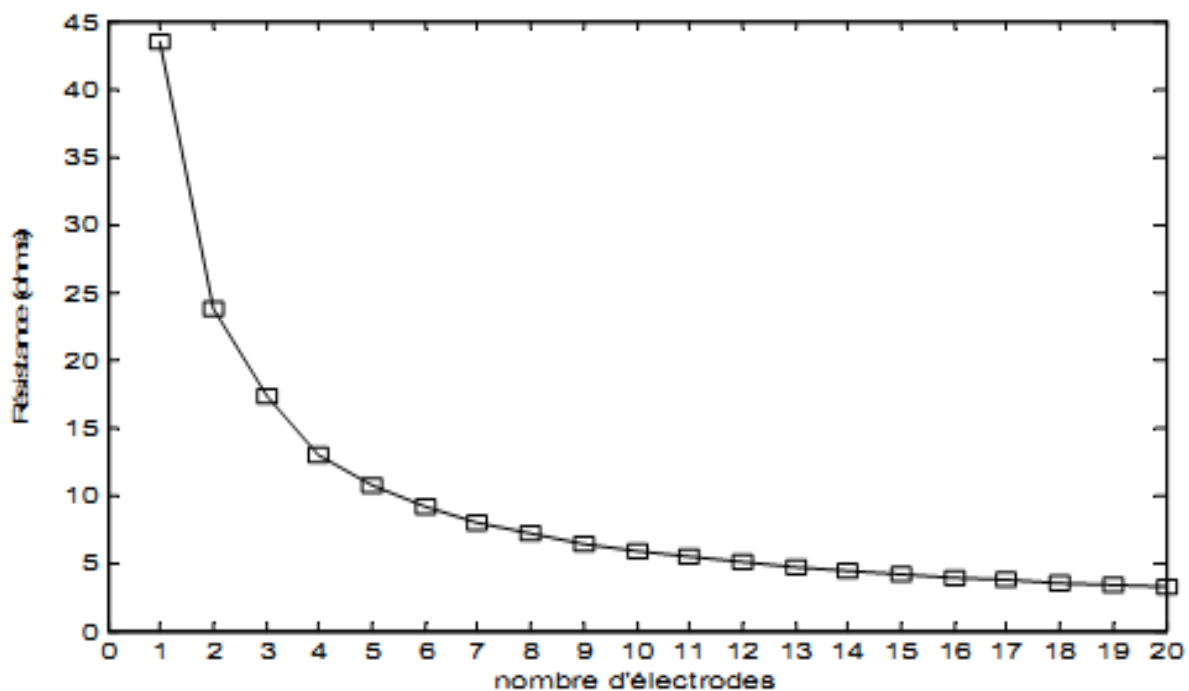
Cette figure montre que le doublement de la longueur de l'électrode réduit la résistance de 45 % seulement dans un sol homogène. Il est à noter que cette affirmation n'existe que rarement en pratique. En plus, l'augmentation de la longueur induit l'augmentation de l'inductance du piquet, donc de son impédance, ce qui est mauvais pour les courants hautes fréquences.

### III.4.2 Augmentation du nombre d'électrodes

On peut réduire la résistance d'une mise à la terre en augmentant le nombre d'électrodes.

La littérature indique que l'augmentation du nombre d'électrodes diminue la résistance mais pas d'un facteur inverse.

La figure suivante donne la résistance en fonction du nombre d'électrodes cylindriques pour une configuration en ligne droite et pour une distance entre électrodes égale au double de la longueur des électrodes.

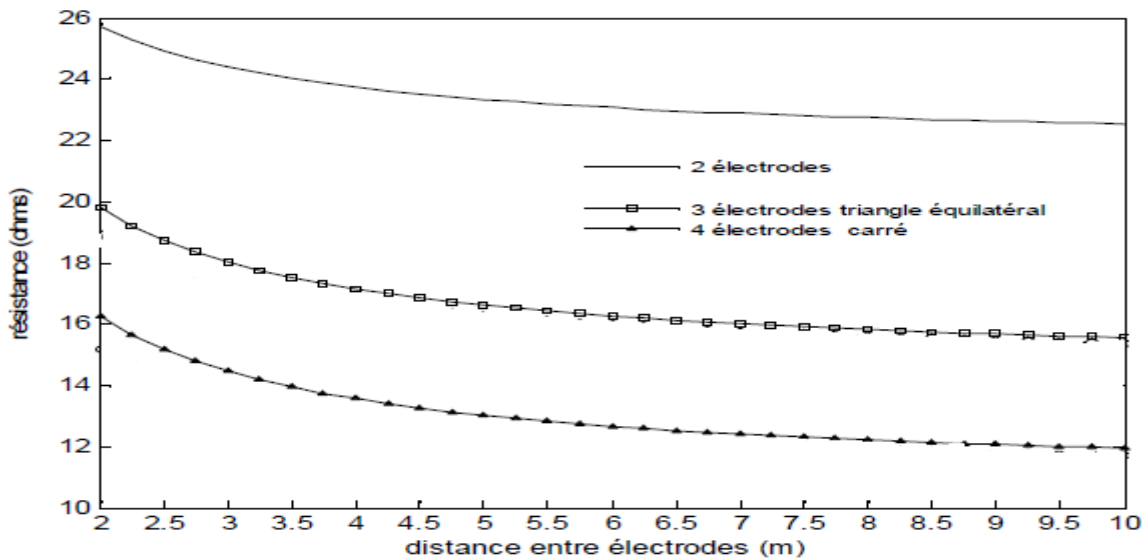


**Fig.III.14** Résistance en fonction du nombre d'électrodes cylindriques. [1]

Cette figure montre bien l'impact de l'augmentation du nombre d'électrodes. Par exemple, en passant d'une à 20 électrodes, la résistance est divisée par 10, comme souligné précédemment. La meilleure réduction de la résistance a lieu quand on passe d'une à deux électrodes. Au fur et à mesure que l'on augmente le nombre d'électrodes, la réduction de la résistance devient plus faible. Ce moyen est le plus utilisé pour obtenir une résistance de mise à la terre réduite. Il demande, néanmoins, de l'espace et augmente le coût de la mise à la terre.

### III.4.3 Augmentation de la distance entre électrodes

La figure ci-dessous montre la résistance respectivement de deux électrodes, trois électrodes aux sommets d'un triangle équilatéral et quatre électrodes aux sommets d'un carré ( $r = 0.0125$  m,  $l = 2$  m) en fonction de la distance entre elles, pour un sol homogène ( $\rho = 100$   $\Omega.m$ ).



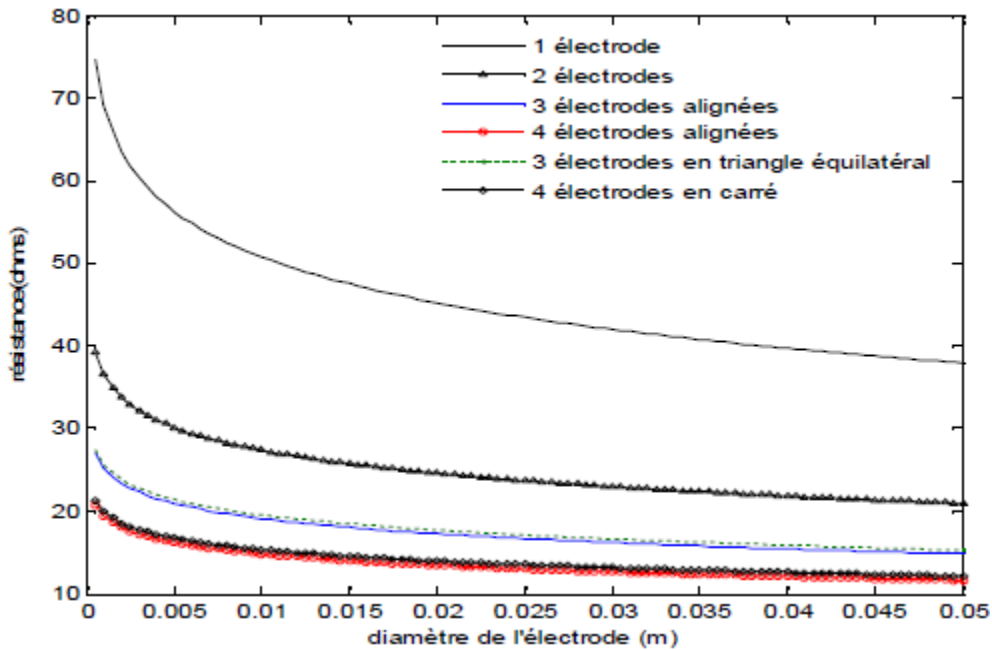
**Fig.III.15** Résistance en fonction de la distance entre les électrodes cylindriques. [1]

Nous remarquons bien que pour des distances entre électrodes juste supérieures à la longueur de celle-ci, la réduction de la résistance des piquets est assez sensible et diminue avec l'augmentation de la distance (par exemple, pour 3 électrodes au sommet d'un triangle équilatéral, la résistance subite une diminution de 13 % quand la distance passe de 2 m à 3 m, alors que quand elle passe de 2 m à 10 m, la réduction n'est que de 21 %). Ceci montre une fois de plus que pour des raisons de coût et d'espace, il y a une limite quant à la distance entre les électrodes.

La littérature renseigne que la distance de 6 m entre les électrodes est économiquement une limite du coût de la mise à la terre.

### III.4.4 Augmentation du diamètre de l'électrode

On appliquant la relation de Dwight-SUNDE, la figure (III.15), nous donne la mise à la terre en fonction du diamètre de l'électrode pour plusieurs configurations



**Fig.III.16.** Résistance en fonction du diamètre de l'électrode cylindrique verticale. [1]

La figure ci-dessus montre que pour une électrode cylindrique, en multipliant le diamètre par 10, la résistance est réduite de 43 % pour une électrode, de 30 % pour deux électrodes, 29 % pour trois, 28 % pour 4 électrodes en ligne et 27 % pour 4 électrodes aux sommets d'un carré). Ceci montre qu'il n'y a pas beaucoup d'intérêt à augmenter dans des larges proportions le diamètre de l'électrode à cause des problèmes de coût. Nous rappelons ici que pour une électrode cylindrique pleine, multiplier le diamètre par 10 revient à multiplier le volume (le prix également) par 100, pour la même longueur, alors que la résistance, quant à elle, n'est réduite que de 30 % en moyenne.

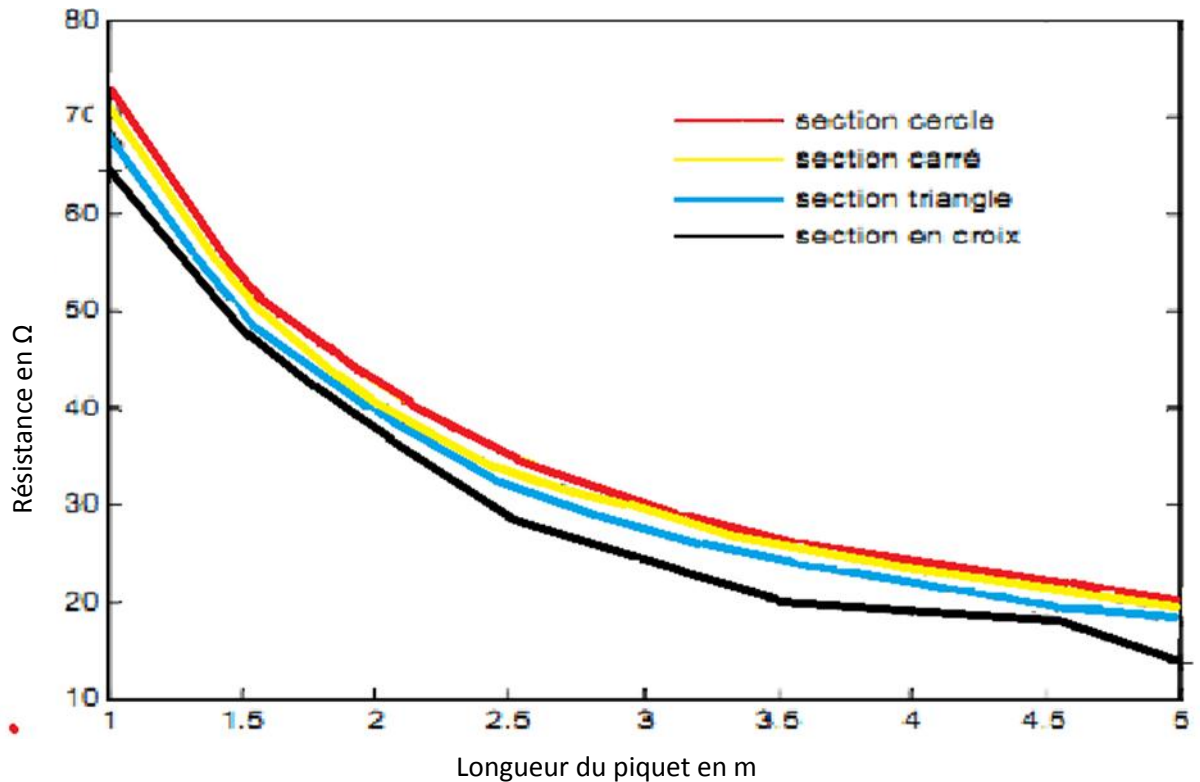
### III.4.5 Géométrie de l'électrode

Dans notre travail on a précisé que la valeur de la résistance de la prise de terre dépend essentiellement de la résistivité du sol, et la forme géométrique de l'électrode.

Pour une électrode cylindrique, nous avons montré que l'augmentation du diamètre de celui-ci n'avait pas une incidence majeure sur la diminution de la résistance de mise à la terre.

Dès lors, nous savons que c'est plutôt la surface extérieure de l'électrode en contact avec le sol qui joue beaucoup dans la valeur de la résistance de celle-ci. C'est pour ça qu'on va intéresser aux formes d'électrodes qui maximisent la surface du piquet afin d'améliorer notre prise de terre.

La figure ci-dessous montre comment se réduit la résistance si l'on considère une électrode non cylindrique, de même volume et de même longueur.

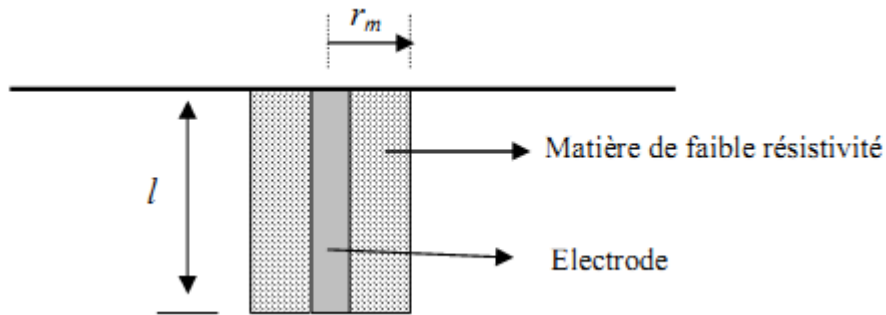


**Fig.III.17** Résistance en fonction de la forme géométrique du piquet. [1]

En comparaison avec une électrode de section circulaire, la forme de la section influence peu la résistance de l'électrode, pour les sections carrée et triangulaire. Cependant, la section en forme de croix réduit plus sensiblement la résistance du piquet.

### III.4.6 Traitement des sols pour réduire la résistivité

Il y a moyen de réduire la résistivité en traitant le sol avec des produits tels que le charbon de bois, la bentonite ou le sel (mais celui-ci est à éviter à cause des risques de corrosion du métal constituant l'électrode). La norme CEI 62305-3 recommande les matériaux à utiliser comme électrode de mise à la terre et les risques de corrosion en présence d'autres matériaux dans le sol, pour les mises à la terre de protection contre la foudre.



**Fig.III.16** Cas de piquet de terre enterré.

Cette matière devra ne pas causer une corrosion aux piquets métalliques (qui sont souvent en cuivre ou en acier inoxydable). Plusieurs produits de faible résistivité sont utilisés (la bentonite par exemple). La matière qui conviendrait et coûte moins cher, est le charbon de bois. Cette pratique est déjà expérimentée et la relation analytique ci-dessous, pour évaluer la résistance d'une telle électrode verticale. [6]

$$R_m = \frac{1}{2\pi l} \left\{ \rho_m \left[ L_n \left( \frac{r_m}{r} \right) \right] + \rho \left[ L_n \left( \frac{4l}{r_m} \right) \right] - 1 \right\} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$l$  : la longueur du piquet.

$\rho$ : la résistivité de sol.

$\rho_m$ : la résistivité de la matière autour de l'électrode.

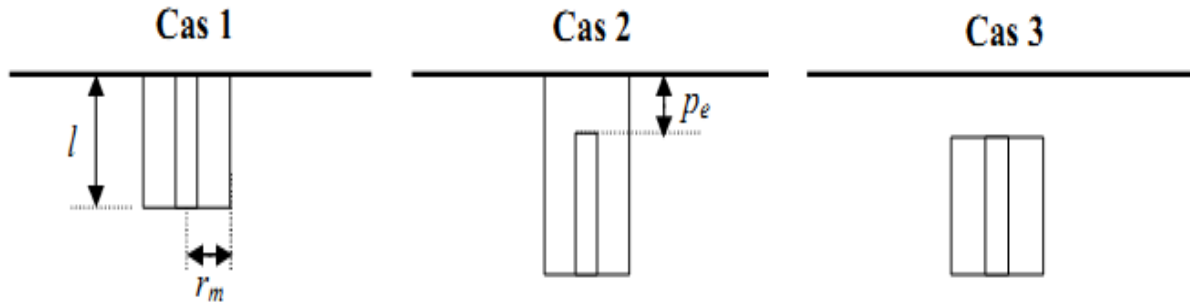
$r$  : le rayon de l'électrode.

$r_m$ : le rayon de la matière autour de l'électrode.

La résistivité du sol dépend de plusieurs facteurs (la nature des sols, la profondeur des courants dans le sol, le taux d'impuretés, la salinité, le taux d'humidité, la température,...).

#### III.4.6.1 Influence de la profondeur d'enterrement du piquet

En pratique, le piquet est enterré à une profondeur  $P_e$  de la surface du sol. Les figures suivantes présentent trois cas d'un piquet de terre entouré d'une couche de matière de faible résistivité.



**Fig.III.17** Cas de piquet de terre enterré.

Avec  $l = 2 \text{ m}$ ,  $r = 0.0125 \text{ m}$ ,  $p_e = 1 \text{ m}$ ,  $\rho_{\text{sol}} = 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ,  $\rho_m = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ,  $r_m = 0.5 \text{ m}$ ,

$I = 1 \text{ A}$ , nous obtenons les valeurs de résistance de  $425.71 \text{ } \Omega$  pour un piquet sans charbon de bois,  $145.94 \text{ } \Omega$  pour le cas 1,  $116.75 \text{ } \Omega$  pour le cas 2 et  $124.04 \text{ } \Omega$  pour le cas 3. [1]

Nous remarquerons bien que la résistance diminue de 20 % pour le cas 2 et de 15 % pour le cas 3. [1], Ce qui nous confirme le rôle de la profondeur des piquets dans le sol.

### III.5 Le remède proposé pour améliorer la prise de terre du laboratoire haut tension

Comme c'est une installation existante déjà on a intérêt de proposer le remède suivant : installation un autre piquet de terre en parallèle avec le piquet de terre existant déjà, afin de diminué la résistance de la prise de terre, en sorte qu'elle soit inférieure à  $50 \text{ } \Omega$ , en restant dans des conditions économique acceptable.

#### III.5.1 Les procédures à suivre

Après avoir proposé le remède pour la prise de terre, et pour une application sur le terrain on est conditionné de suivre les étapes suivantes :

Au premier lieu on fait une étude du comportement électrique du sol en fonction de l'humidité, afin de tenir compte des variations saisonnières de la résistivité du sol et, en deuxième lieu la configuration du réseau de terre, comme le diamètre du piquet ne doit pas dépassé  $16 \text{ mm}$ , pour une raison de cout.

Après avoir la nature du sol et choisi le piquet qui nous correspondant, on fait enterrer le piquet à une distance deux fois supérieur la longueur du piquet existant déjà, et on le branche avec un conducteur de terre avec la prise existante.

Maintenant si le branchement est fait, on ferme la barrette de mesure, et on mesure notre nouvelle prise de terre, pour vérifier si nous avons obtenu la prise de terre souhaitée.

### **Conclusion**

Après avoir parlé sur les différentes méthodes de mesure de la prise de terre, on a met en application la méthode dite quatre pole pour mesurer la prise du laboratoire de haute tension, et a partie de ces mesure on a jugé l'intérêt de proposer une amélioration qui consiste à augmenter le nombre d'électrodes afin de diminuer sa résistance.

Le concept de mise à la terre implique plusieurs champs de recherche. Le fonctionnement des installations électriques dépend étroitement de la manière dont certains dispositifs sont mis à la terre et des valeurs des paramètres des mises à la terre (résistance, inductance, capacité,...). Le paramètre le plus important dans l'analyse des mises à la terre en fréquence industrielle est la résistance qui doit être la plus faible possible, pour assurer la sécurité des personnes et du matériel. La valeur de la résistance de mise à la terre dépend de la nature du sol (résistivité) et de la forme (géométrie) des électrodes de terre.

Plusieurs études ont été menées dans ce domaine depuis plusieurs dizaines d'années. Ces recherches ont mis en évidence des méthodes de calcul, pour réduire la complexité, se basent sur des hypothèses simplificatrices.

L'étude réalisée dans ce mémoire nous informe sur la nécessité de protéger les personnes et le matériel contre les dangers.

Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité de sol mais la plus utilisée est celle des « quatre électrodes » : méthode de WENNER.

Dans ce travail, pour évaluer les résistances des mises à la terre en fréquence industrielle, dans une installation de haute tension, on a proposé la méthode la moins onéreuse, ajoutant un autre piquet en parallèle avec le piquet existant déjà. Cette solution nous permet la réduction de la résistance, peuvent dépasser 40 %.

## Bibliographie

---

- [1] Jean-Pierre NZURU NSEKERE «Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales» Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, Février 2009
- [2] BONNAFOUS «Electrotechnique et normalisation : Installations électriques et électrodomestiques» Édition : technique & vulgarisation, 1985
- [3] Henry Ney .Noel Morel «Installations électriques» Edition : NATAHAN TECHNIQUE, 2001
- [4] Mr. K. HADJ-SAID et Mr. A. HALLADJ «Étude et réalisation d'un laboratoire à haute tension» mémoire d'ingénieur de l'université de TIZI OUZOU. juin 1991
- [5] électricité de France (EDF)/ centre de normalisation H115 <<principe de conception et de réalisation des mises à la terre>> janvier 1984
- [6] [Commission Electrotechnique Internationale (CEI), 1999] CEI 60364-4-442 : Installations électriques des bâtiments. Quatrième partie: Protection pour assurer la sécurité, ed.1993, amendement 1999.
- [7] [Commission Electrotechnique Internationale (CEI), 2002] CEI 60364-5-54 : Installations électriques des bâtiments, choix et mise en œuvre des matériels électriques – Mises à la terre, conducteurs de protection et d'équipotentialité, 2ème édition 2002-06.
- [8] [Commission Electrotechnique Internationale (CEI), 2005] CEI 60479-1 : Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1 : Aspects généraux, Ed.4, 2005.
- [9] [Electricité de France, Direction des études et recherches, 1984] Principes de conception et de réalisation des mises à la terre, EDF NI 115, 1984.
- [10] [AFNOR, 1989] NFC 13-200 : Installations électriques à haute tension. Règles, Décembre 1989.
- [11] CHRISTIAN PEUTO, ERIK FLICE et ALAIN KOHLER «Guide de la mesure électrique (bâtiment et industrie)» DUNOD série EEA, paris 2007
- [12] PHLIPE DUNAUD «Protection des installations électrique contre la foudre» DUNOD, 2003