

UNIVERSITE D'ANTSIRANANA

ENSET

DEPARTEMENT GE

Mémoire (PETGE 5)

Nombre d'étudiant : 01

LOGICIEL D'ANALYSE DE SYSTEME DE MISE A LA TERRE

Méthodes modernes de calcul pour la conception et l'analyse de mise à la terre de système de puissance.

Travail demandé :

- Recherche bibliographique
- Etude théorique
- Choix du langage de programmation
- Conception du logiciel
- Manuel d'utilisation du logiciel
- Application

Responsable :

VIAL Marie Ariane

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, j'aimerais au préalable exprimer quelques mots de remerciements au bon Dieu de m'avoir donné la vie, la santé, la bonté et pour m'avoir donné le courage de réaliser ce travail de mémoire de fin d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Madame VIAL Marie Ariane, Chef de Département Génie Electrique, qui a proposé ce sujet et a donné des conseils durant l'élaboration dudit travail.

Mes remerciements vont également à :

- Monsieur RANDRIAMAROMILA Richard pour sa grande disponibilité et ses précieuses directives ;
- Monsieur RAKOTONDRA SOA Honoré, Directeur de l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique (E.N.S.E.T.) ;
- Monsieur Le Président et à tous les membres de jury qui vont porter le jugement sur ce mémoire ;
- Tout le personnel de l'Université d'Antsiranana, notamment les Enseignants de l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique qui ont bien voulu me prodiguer leurs connaissances le long de notre formation ;
- Tous les étudiants de nous avoir manifesté une atmosphère chaleureuse durant notre cursus universitaire.

Je n'oublierai pas non plus tous les efforts de mes parents ainsi que tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu moralement et matériellement tout au long de mes études.

Enfin, j'adresse mes remerciements à ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Merci!

MILYMANANA Mily Heritiana

Publié par EDF en janvier 1980.

L'étude de la nature et de la structure géologique d'un terrain, et l'étude de la variation de sa résistivité en fonction du climat, sont les deux bases nécessaires à la détermination de la configuration géométrique et du dimensionnement d'une prise ou d'un réseau équipotentiel de terre bien adapté aux conditions de service auxquelles il sera soumis.

La résistance d'un réseau de terre est proportionnelle à la résistivité du sol dans lequel le réseau est enterré. Or la résistivité des terrains naturels présente les particularités suivantes :

- Elle est extrêmement variable d'un endroit à un autre selon la nature du sol et le taux d'humidité. Les valeurs extrêmes que l'on rencontre en pratique peuvent s'échelonner dans un rapport de 1 à 1000 et plus (quelques dizaines d' $\Omega \cdot m$ pour les terrains gras, à quelques dizaines de milliers d' $\Omega \cdot m$ pour les granits très sains et très secs).
- Le sol, à un endroit donné est souvent extrêmement hétérogène tant horizontalement que verticalement.
- La résistivité des couches superficielles du terrain présente de très importantes variations saisonnières sous l'effet du gel et de la sécheresse qui l'augmentent ou de l'humidité qui la diminue. Cette action se fait sentir jusqu'à environ 1 ou 2 m de profondeur. Il est prudent de compter sur des variations de résistivité et, par conséquent de résistance, de l'ordre d'au moins 1 à 3 et parfois plus, pour des réseaux de terre de dimensions moyennes enfouis à une profondeur de l'ordre de 1 m.
- Les résistivités du sol en surface ou encore en profondeur, sont rarement bien connues avant l'établissement des ouvrages et c'est souvent la réalisation des prises de terre elles-mêmes qui donne les premières indications sur la qualité des terrains.

Extrait de :
NFC 15-100 § 542.2.1

Les prises de terre doivent être, dans toute la mesure du possible, enfouies au-dessous du niveau permanent d'humidité, sauf lorsque l'on rencontre un fond rocheux. Les tuyaux ou piquets doivent être prolongés jusqu'à une profondeur assurant un contact approprié avec la terre, par exemple au moins 2 m. Il doit être tenu compte, si nécessaire, de l'augmentation possible de la résistance de la prise de terre due à la corrosion des électrodes.

RÈGLES COMPLÉMENTAIRES D'INSTALLATION

1. Même dans le cas où l'on obtient une résistance de prise de terre très bonne à une profondeur de 1,50 m ou 2 m, il convient de prolonger la prise de terre à une profondeur de 3 à 4 m minimum pour être à l'abri du gel ou des variations saisonnières d'humidité.
2. Dans le cas d'une prise de terre devant écouler vers la Terre en un temps donné des courants de forte intensité, il importe d'avoir une électrode de section calculée. En conséquence, en second lieu, il faut assurer un contact intime entre le terrain et l'électrode pour éviter la formation d'arcs qui entraîneraient la dessiccation et même la cristallisation du terrain et la destruction de l'électrode. On voit ici la nécessité de descendre l'électrode dans des couches constamment humides. L'humidité empêche que le phénomène de dessiccation du terrain soit irréversible. La pratique d'arroser abondamment les prises de terre a pour conséquence de diminuer le contact des 2 éléments et en second lieu d'entraîner les électrolytes facteurs essentiels de la faible résistivité d'un terrain. Cette pratique est donc à proscrire.

3. Il faut implanter les prises de terre loin des murs enterrés ou des fondations profondes. La diffusion du courant ne se faisant que dans une demi-sphère, l'efficacité de la prise de terre est diminuée.
4. Il ne faut pas implanter les prises de terre trop près d'une rivière; le courant d'eau souterrain ayant entraîné les électrolytes du terrain, la résistivité de celui-ci est forte.
Il convient de prendre une grande précaution : Supprimer ou diminuer en partie la tension de pas (différence de potentiel apparaissant sur le sol à proximité de la prise de terre entre 2 points distants de la grandeur d'un pas humain soit 0,75 m). Cette tension doit être de 10 à 15 volts/mètre. Cette règle impose donc d'isoler les électrodes de terre à partir du sol sur une profondeur suffisante et d'isoler aussi les liaisons qui y aboutissent. Un isolement sur un mètre de profondeur matérialisé par un tube en chlorure de polyvinyle est en général suffisant.

Mots-clé: installation électrique, circuit de terre, sécurité électrique, variabilité du sol, analyse de risque.

Table des figures

Figure 1.1 : Section angulaire du globe terrestre	13
Figure 1.2 : Répartition du potentiel autour d'une électrode hémisphérique.....	17
Figure 1.3 : Répartition du potentiel autour d'un piquet de terre.....	17
Figure 1.4 : Répartition des potentiels entre deux prises de terre ponctuelles A et B	18
Figure 1.5 : Représentation du couplage entre deux réseaux de terre	19
Figure 1.6 : Résistivité du sol.....	19
Figure 1.7 : Mesure de la résistivité à l'aplomb du point O	21
Figure 1.8 : Principe de mesure de la résistivité apparente.....	21
Figure 1.9 : Méthode de Wenner	22
Figure 1.10 : Courbe de variation de la résistance du corps humain	25
Figure 1.11 : Tension de pas.....	27
Figure 1.12 : Tension de Touche	28
Figure 1.13 : Schéma de liaison à la terre TT.....	31
Figure 1.14 : Schéma de liaison à la terre TN	32
Figure 1.15. Premier défaut d'isolement dans le schéma de liaison à la terre IT	33
Figure 2.1 : Electrode cylindrique verticale.....	35
Figure 2.2 : Piquets placés en parallèle.....	37
Figure 2.3. Plusieurs câbles rayonnants	38
Figure 2.4 : Réseau maillé.....	39
Figure 2.5 : Boucle enterrée.....	41
Figure 2.6 : Calcul de rayon équivalent d'électrode de forme carrée.....	41
Figure 2.7 : Calcul du rayon équivalent d'électrode de forme rectangulaire	42
Figure 2.8 : Electrode de terre dans des fondations sans béton armé	44
Figure 2.9 : Electrode de terre dans des fondations en béton armé.....	45
Figure 2.10 : Méthode de trois points.....	46
Figure 2.11 : Méthode de chute de potentiel.....	46
Figure 2.12 : Courbe des conditions de mesure.....	48
Figure 2.13 : Principe de fonctionnement du telluromètre.....	49
Figure 3.1 : Modèle du circuit RLC	52
Figure 3.2 : Modèle de la ligne de transmission.....	56
Figure 3.3 : Modélisation d'un piquet de terre écouant un courant transitoire	58
Figure 3.4 : Courant, tension et impédance transitoires d'une électrode	58
Figure 3.6 : Coup de foudre sur un conducteur de phase d'une ligne aérienne.....	62
Figure 3.7 : Coup de foudre au sommet d'un pylône d'une ligne aérienne.....	63
Figure 3.8 : Zone de protection du câble de garde d'une ligne aérienne	64
Figure 4.1: Schéma de mise à la terre d'une poste.....	66
Figure 4.2 : Schéma de principe.....	67
Figure 4.3: Schéma de l'interconnexion au moyen de parafoudres	71
Figure 4.4 : Parafoudre.....	72
Figure 4.5 : Eclateur avec anti- oiseau	73

Figure 4.6 : Exemple de protection d'un branchement de client BT	75
Figure 5.1 : Diagramme de cas d'utilisation du logiciel.....	76
Figure 5.2 : Diagramme de séquence.....	77
Figure 5.4 : Interface d'accueil du logiciel.....	80
Figure 5.5 : Calcul de résistance de prise de terre	80
Figure 5.6 : Calcul de résistance de prise de terre de masse et du neutre.....	81
Figure 5.7 : Couplage de la résistance de terre	82
Figure 6.1 : Schéma de principe d'un ohmmètre à aiguille	86
Figure 6.2 : Schéma de principe d'un ohmmètre numérique	88
Figure 6.3 : montage amont	88
Figure 6.4 : montage aval.....	88
Figure 6.5 : Schéma de principe du pont de WHEATSTONE	90
Figure 6.6 : Schéma de principe du pont de THOMSON	91

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Valeurs typiques des chaleurs spécifiques	15
Tableau 1.2 : Conductivité thermique de divers types du sol	16
Tableau 1.3 : Résistivité des différents types de sol	20
Tableau 2.1 : Coefficients $N(n)$ pour n électrodes rayonnant.....	39
Tableau 3.1 : longueur d'ondes en fonction de fréquence	53
Tableau 4.1 : Avantage et inconvénient de la séparation ou l'interconnexion des masses MT et du neutre BT	71

Liste des symboles

E : Champ électrique dans le sol (V/m)
 J : Densité du courant (A/m^2)
 D : Distance entre le centre de l'électrode et un point quelconque du sol(m)
 ρ : Résistivité du terrain ($\Omega.m$)
 I : Courant écoulé (A)
 a : Base de mesure (m)
 R : Valeur lue sur l'ohmmètre de terre (Ω)
 R_p : Résistance de terre des pieds (Ω)
 V_{pas} : Tension de pas (V)
 R_c : Résistance du corps (Ω)
 I_c : Courant de choc (A)
 V_{cont} : la tension de contact ou de toucher
 I_a : Courant du dispositif de protection contre les surintensités (A)
 $I_{\Delta n}$: Seuil de courant assigné du DDR (mA)
 I_d : Courant de défaut (A)
 Z_c : Impédance caractéristique de la ligne au poste MT/BT (Ω)
 U_{rsd} : Valeur de la tension écrêtée par le dispositif de protection de la ligne MT (V)
 U_{tc} : Tension de tenue du matériel à l'onde de choc (V)
 rh : rayon de l'hémisphère
 l : Longueur de l'électrode (m)
 d : Diamètre de l'électrode (mm)
 R_m : Résistance mutuelle entre la grille et les piquets de terre (Ω)
 l_c : Longueur totale de tous les conducteurs de la grille (m)
 a : Rayon des conducteurs de la grille (mm)
 A : Aire occupée par les conducteurs (m^2)
 n : Nombre de piquets
 K : Coefficient de réflexion
 V : est le volume des fondations (m^3)
 λ : Longueur d'onde qui dépend des paramètres électriques du sol
 ω : Pulsation de l'onde
 ε : Permittivité diélectrique
 μ_0 : Perméabilité magnétique
 σ : Conductivité électrique du sol
 δ : la profondeur de pénétration
 r : Rayon de l'électrode (mm)
 T : Temps de montée de l'onde du courant de foudre (μs)
 U_N : Tension crête entre la phase et la ferrure du pylône de la ligne (kV)
 U_{cr} : Tension critique d'amorçage de la chaîne d'isolateur (kV)

$V1t$: tension due à l'onde de courant de la foudre rencontrant l'impédance équivalente ZI

ZS : impédance d'onde du pylône (Ω)

ZT : impédance d'onde du câble de garde (Ω)

τT : Temps de propagation de l'onde du sommet à la base du pylône (s)

c : Vitesse de la lumière dans le vide

ht : Hauteur du pylône (m)

ψ : Facteur d'amortissement des ondes réfléchies

INTRODUCTION

L'énergie électrique est un facteur primordial du développement. Plusieurs pays ont encore à ce jour un déficit en taux d'électrification et en plus, les réseaux électriques existants connaissent de nombreuses perturbations, dues notamment aux problèmes de mise à la terre.

La décharge par la foudre inévitable dans les régions à niveau kéraunique élevé, avec des niveaux énergétiques importants, couplés aux mauvaises caractéristiques du sol, conduit à des difficultés d'exploitation et à une mise en œuvre minutieuse des mises à la terre, faute de quoi les perturbations dans les installations électriques sont répétitives ; en plus, la sécurité du matériel et des personnes n'est plus garantie

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. En très hautes fréquences, les comportements des mises à la terre sont fort différents de ceux à fréquence industrielle.

Des outils d'analyse numérique pour l'évaluation des mises à la terre sont donc nécessaires.

Toutes les formules de base pour calculer la résistance d'une prise de terre sont définies à partir de l'hypothèse fautive que le sol est homogène et infini. En outre, la résistivité du sol varie en fonction de son humidité et par conséquent en fonction des saisons.

En pratique, toutes les informations exactes concernant la résistance de la prise de terre seront données par la mesure réelle.

Il y a deux types de systèmes de mise à la terre :

- les systèmes simples sont constitués de prises de terre individuelles enfoncées dans le sol. Les terres individuelles représentent le type de mise à la terre le plus utilisé.
- les systèmes complexes se composent de prises de terre multiples reliées entre elles, de systèmes maillés ou de réseaux de grilles, de plaques de métal et de boucles enterrées. En général, ces systèmes sont utilisés pour les installations de production et pour les établissements importants.

Dans ce travail, nous ferons usage de calculs analytiques pour évaluer les performances des mises à la terre en intégrant plusieurs configurations possibles, dans le souci de se rapprocher des réalités physiques.

Le premier chapitre rappelle quelques notions de base élémentaire et importante à la compréhension de l'analyse des mises à la terre des installations électriques. Le deuxième chapitre nous montre le calcul et les différentes méthodes de mesure de la résistance d'un réseau de terre. Le troisième chapitre traite des mises à la terre et des lignes électriques qui sont sujettes à des perturbations d'origine atmosphérique et provoquent des déclenchements préjudiciables à la continuité de service. Le quatrième chapitre exprime des prises de terre des réseaux aériens de distribution suivi de la présentation et le manuel d'utilisation du logiciel en cinquième chapitre. Avant d'achever ce travail, le sixième chapitre propose des implications pédagogiques qui contiennent les points essentiels aux enseignants et élèves du lycée technique.

Chapitre 1 : NOTIONS DE BASE SUR LA MISE A LA TERRE

1. Généralité

La mise à la terre a été introduite par Benjamin Franklin célèbre inventeur des parafoudres.

Souvent, l'expression prise de terre est employée pour une installation ou une structure de faible étendue et le terme réseau de terre aux installations importantes telles que postes et centrales. Le réseau de terre est constitué d'un ensemble d'un conducteur enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux.

Dans ces dernier cas, il convient de distinguer le circuit de mise à la terre qui comprend l'ensemble des conducteurs non enterrés ou isolés du sol et raccordés au réseau de terre, généralement reliés à la masse mécanique ou à la masse électrotechnique des appareils.

2. Fonctions des réseaux de terre

Le rôle du réseau de terre d'une installation électrique est de permettre l'écoulement à l'intérieur du sol de courant de choc dû à des coups de foudre ou bien de courant de défaut à 50 Hz. La conception des prises et réseaux de terre doit assurer le maintien de :

- la sécurité des personnes,
- la protection des installations de puissance,
- la protection des équipements sensibles,
- un potentiel de référence.

2.1. Sécurité des personnes et des animaux

Lors de l'écoulement dans le sol de courant élevé, la sécurité doit être assurée à l'intérieur de l'installation électrique et de ses abords immédiats par une limitation de la tension de pas et de la tension de contact à des valeurs non dangereuses pour le corps humain ou les animaux. Cette limitation est obtenue grâce à la connaissance et au contrôle de la répartition du potentiel à la surface du sol. Dans une installation, les normes exigent que toutes les liaisons de terre soient interconnectées et ne formant ainsi qu'un seul réseau.

2.2. Protection des installations de puissance

Le réseau de terre des installations électriques, la prise de terre des supports de lignes, limitent la création et la propagation des sustentions provoquées par les défauts à 50 Hz, les manœuvres d'appareillages dans les postes et centrales, la foudre.

Cette limitation est d'autant plus efficace que ces réseaux et prises de terre facilitent l'écoulement du courant dans le sol, c'est-à-dire qu'ils présentent une impédance de terre faible, aussi bien pour les phénomènes lents que pour les phénomènes rapides tels que ceux engouffrés par la foudre.

2.3. Protection des équipements fonctionnant à bas niveaux

A cotés des installations de puissance, on trouve souvent des équipements fonctionnant à des niveaux comparativement beaucoup plus bas : équipements de relais dans les postes par exemple. Ces équipements sont également exposés aux effets des surtensions subies par les installations de puissance, avec lesquelles ils peuvent être liés par couplage résistif, inductif, capacitif ou plus généralement électromagnétique. Ces couplages sont rarement caractérisés par une grandeur simple, telle la résistance du réseau de terre, mais plutôt par un ensemble complexe des paramètres qui dépendent notamment de la disposition des conducteurs de terre, de celle des équipements sensibles et des règles de mise à la terre, etc....

2.4. Potentiel de référence

Différents équipements placés dans une même installation doivent, lorsqu'ils sont reliés électriquement, rester fixés à un potentiel identique même pendant la durée des perturbations.

Dans les réseaux à neutre directement à la terre, le réseau de terre des postes contribue à fixer le potentiel des phases saines pendant un défaut, mais les courants de défauts peuvent alors atteindre des valeurs importantes.

Ceux-ci montrent à nouveau l'importance de la résistance de terre et de la qualité de l'équipotentialité des réseaux de terre.

3. Etude géologique du sol

L'impédance d'un réseau de terre, la répartition du potentiel dans le sol dépendent des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité.

C'est pourquoi la conception du réseau de terre d'une installation électrique doit débiter par une étude de la nature du sol sur lequel il sera réalisé.

3.1. Structure du globe terrestre

Le globe terrestre est constitué d'un noyau liquide en ébullition entouré de quatre couches concentriques solides. Ce noyau est situé au centre du globe, entouré de la première couche qui est composée de particules refroidies du noyau, la deuxième couche appelée le manteau, la troisième couche est la couche extérieure du manteau et la quatrième couche appelée l'écorce terrestre.

Le noyau possède un rayon moyen de 1300 km, il est constitué de métaux lourds en liquide et sa résistivité se situe entre 10^{-4} et $10^{-3} \Omega \cdot m$. La couche extérieure du noyau s'étend de 1300 à 3500 km du centre de la terre, elle est constituée de différents métaux à l'état solide et sa résistivité est d'environ $10^{-3} \Omega \cdot m$. Le manteau s'étend de 3500 à 5950 km du centre de la terre. Il est formé de diverses roches et sa résistivité varie de 10^3 à $10^4 \Omega \cdot m$. La partie extérieure du manteau est d'épaisseur d'environ 380 km. Elle est composée des roches de résistivité de l'ordre de $10^6 \Omega \cdot m$. L'écorce terrestre est d'épaisseur variant de 5 à 40 km. Elle est constituée de diverses roches dont la résistivité varie sur un large éventail de 10^{-1} jusqu'à $10^8 \Omega \cdot m$.

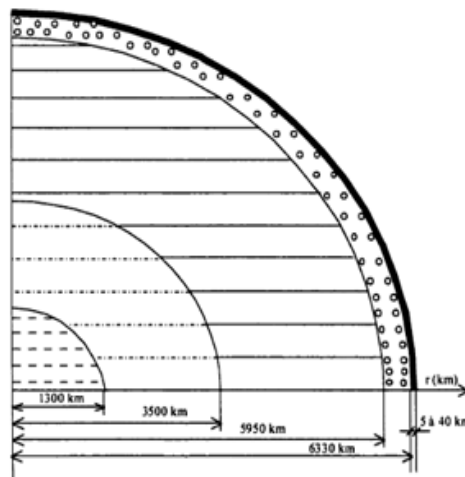


Figure 1.1 : Section angulaire du globe terrestre

3.2. Conductivité électrique du sol

La terre électrique est un concept qui représente le sol (la masse terrestre, d'où le nom de terre) tout en le considérant comme conducteur et par convention au potentiel 0 volt.

En pratique, aucun conducteur n'étant parfait le potentiel d'un conducteur de mise à la terre ne sera pas nécessairement nul par exemple pendant le temps ponctuel d'un choc de foudre en un point précis, le potentiel du sol n'est plus homogène et localement il n'est pas au potentiel moyen du globe.

Le sol est aussi constitué de matériaux à faible conductivité qui 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. Il s'agit donc d'une convention. Toutefois, sauf problème d'installation ce potentiel devrait être suffisamment faible pour ne pas être dangereux.

Le courant de conduction dans le sol est un déplacement des charges électriques sous l'effet d'un champ électrique appliqué qui dépend de la structure physique et chimique du globe terrestre. La combinaison des sels, des acides et des bases avec l'eau comme dans les océans et dans les couches de sol humide forment des solutions conductrices. On distingue deux types de conduction dans le sol :

- la conduction électrolytique,
- la conduction électronique.

3.2.1. La conduction électrolytique

Sous l'effet du champ électrique et du courant, les électrolytes sont soumis à l'électrolyse, c'est-à-dire, ils sont décomposés en anions ou charges négatives qui se dirigent vers l'anode et en cations ou les charges positives qui se dirigent vers la cathode.

Les ions qui atteignent les électrodes se départissent de leur charge, ils se déposent sur ces électrodes ou réagissent chimiquement avec elles. Le déplacement des ions engendre le passage du courant électrique, leur vitesse de déplacement est proportionnelle à l'intensité du champ électrique. Le nombre des ions varie avec la température, par exemple pour une augmentation de 1°C, le nombre d'ions libérés augmente et la résistivité de l'électrolyte diminue d'environ 2%. Ainsi, le courant électrique augmente avec l'augmentation du champ électrique ou de la température.

3.2.2. La conduction électronique

Elle est assurée par la présence des électrons libres qui sont caractérisés par une grande mobilité et se trouvent sur l'orbite externe de l'atome. Ce type de conduction est rencontré dans les milieux du globe où il y a une concentration des minerais et dépend de l'intensité du champ électrique. En général, les électrons libres sont rares dans les couches extérieures du globe mais quand même une faible conduction est toujours possible à cause de la grande superficie du milieu.

3.3. Propriétés thermiques du sol

Le courant électrique qui circule dans le sol produit un transfert d'énergie par effet Joule sous forme de chaleur ce qui entraîne une augmentation de la température du milieu. D'où la puissance dissipée (W/m^3) dans le sol par unité de volume :

$$P = E.J = \rho.J^2 = \frac{E}{\rho} \quad (1.1)$$

Où E : Champ électrique dans le sol (V/m)

J : Densité du courant (A/m^2)

ρ : Résistivité du sol ($\Omega.m$)

Les caractéristiques spécifiques d'un type de sol qui influencent particulièrement le calcul des mises à la terre sont les suivants la chaleur spécifique et la conductivité thermique.

3.3.1. Chaleur spécifique

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de $1^\circ C$ un volume de $1 m^3$ de sol. Cette caractéristique influence d'une façon déterminante la température des prises de terre et du sol environnant lors du passage d'un courant de court-circuit. Cette valeur dépend du type du sol et de son contenu d'eau. Le tableau suivant présente quelques valeurs :

Tableau 1.1 : Valeurs typiques des chaleurs spécifiques

Type du sol	Chaleur spécifique γ ($106 J/m^3 . C^\circ$)		
	Sol sec	Sol saturé d'eau à 50%	Sol saturé d'eau à 100%
Sablonneux	1.26	2.13	3.00
Argileux	1.00	2.22	3.43
Humus	0.63	2.13	3.77

3.3.2. Conductivité thermique

C'est la quantité d'énergie thermique transportée pendant une seconde sur une distance d'un mètre pour une différence de température égale à 1° C. Elle dépend du type de sol et augmente avec l'humidité relative dans le sol.

Tableau 1.2 : Conductivité thermique de divers types du sol.

Type du sol	Conductivité thermique (W/m . °C)	
	Sol sec	Sol saturé d'eau à 100%
Gravier avec sable et limon	0.55	2.55
Sable avec limon, et argile	0.43	1.90
Argile avec sable	0.42	1.95
Marne avec sable	0.37	0.88
Marne avec sable très fin	0.33	2.30
Sable	0.27	1.65
Terre noire	0.18	1.13
Terre volcanique	0.13	0.62
Air	0.025	
Eau	0.606	
Glace	2.22	
Roches	2.9	

3.4. Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre

Avant d'étudier le comportement d'un réseau de terre écouant 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. Deux cas sont à considérer :

- le retour de courant à l'infini : cas pour le réseau de terre d'un paratonnerre ou d'un parafoudre écouant un courant de choc ;
- le retour du courant par un autre réseau de terre : cas pour un réseau de terre écouant un courant de défaut se renfermant par un réseau de terre plus ou moins éloigné, ou cas de la mesure de la valeur de la résistance du réseau de terre.

3.4.1. Répartition des potentiels avec retour du courant à l'infini

Dans le cas d'un réseau de terre de forme hémisphérique de rayon r_h établi à la surface d'un sol homogène, les filets de courant s'écoulent radialement dans toutes les directions en passant par le centre de ce réseau.

Les surfaces équipotentielles sont des hémisphères centrés sur le réseau de terre et dont les intersections avec la surface du sol sont des cercles.

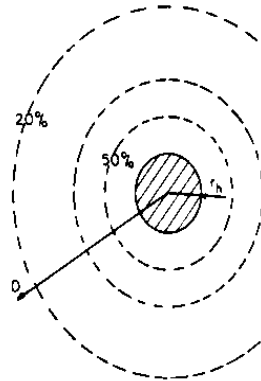


Figure 1.2 : Répartition du potentiel autour d'une électrode hémisphérique

Par rapport à un point de référence infiniment éloigné, le potentiel d'un point du sol est inversement proportionnel à sa distance au centre du réseau de terre. En un point du sol éloigné d'une distance D du centre de l'hémisphère, le potentiel $U(D)$ est indépendant du rayon de l'hémisphère. La couche représentant les variations du potentiel en fonction de la distance d'éloignement est donc une hyperbole comme le montre la figure ci-dessus. Le potentiel $U(D)$ du s'écrit :

$$U(D) = \frac{\rho I}{2\pi D} = 0,16 \frac{\rho I}{D} \quad (1.2)$$

Où

- D : Distance entre le centre de l'électrode et un point quelconque du sol(m)
- ρ : Résistivité du terrain ($\Omega.m$)
- I : Courant écoulé (A)

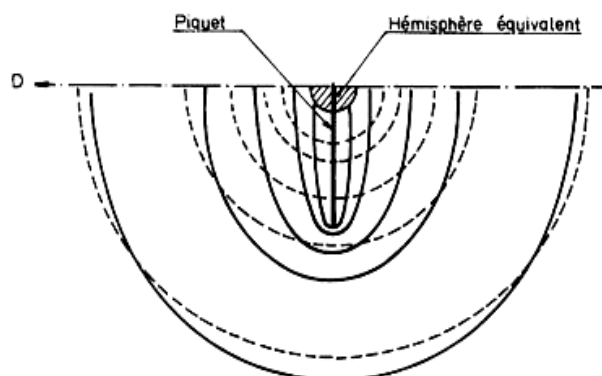


Figure 1.3 : Répartition du potentiel autour d'un piquet de terre

3.4.2. Retour du courant par un autre réseau de terre

Lorsqu'un courant circule dans le sol entre deux prises de terre ponctuelles A et B, la répartition du potentiel dans le sol et sur les prises de terre résulte de la superposition des effets du courant I écoulé par A et $-I$ écoulé par B.

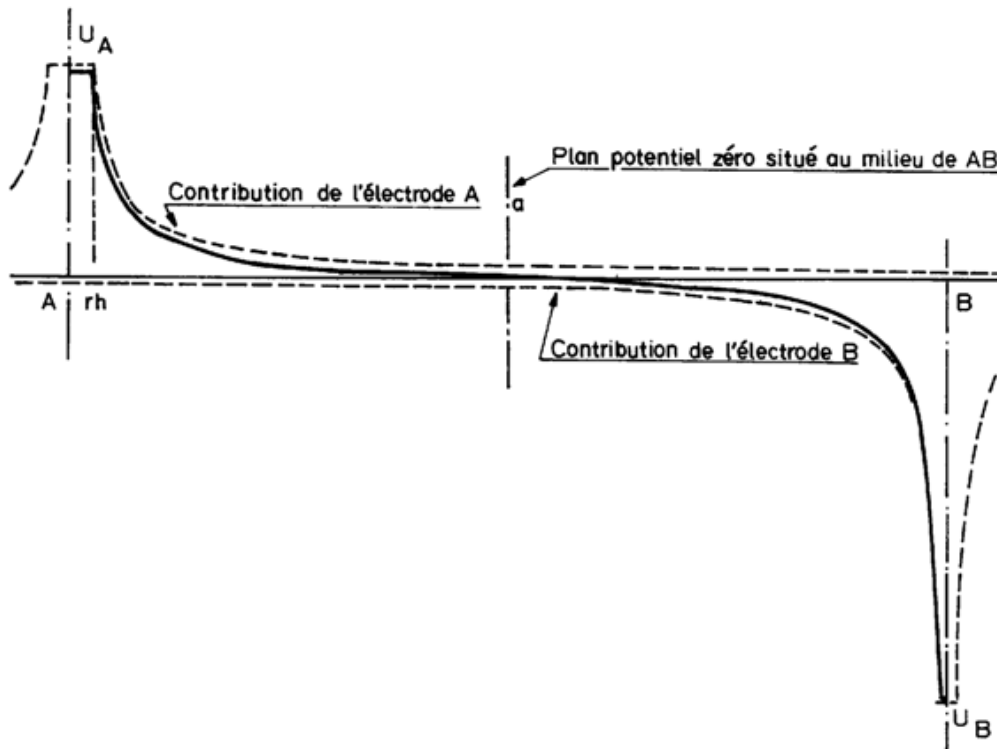


Figure 1.4 : Répartition des potentiels entre deux prises de terre ponctuelles A et B

3.5. Interactions entre réseaux de terre

Soient deux réseaux de terre voisins A et B, de résistances de terre respectives R_A et R_B , le potentiel de A s'élève lorsque B écoule seul un courant I_B dans le sol est $R_{AB}I_B$, de même pour $R_{AB}I_A$, il y a l'élévation du potentiel de B lorsque A écoule I_A dans le sol. Lorsque les deux réseaux de terre écoulent en même temps des courants I_A et I_B dans le sol, le potentiel d'un point du sol est la somme des contributions des courants I_A et I_B pris isolément. Les élévations de potentiel des électrodes A et B s'écrivent :

$$\begin{aligned} V_A &= R_A I_A + R_{AB} I_B \\ V_B &= R_B I_B + R_{AB} I_A \end{aligned} \quad (1.9)$$

D'où le schéma équivalent :

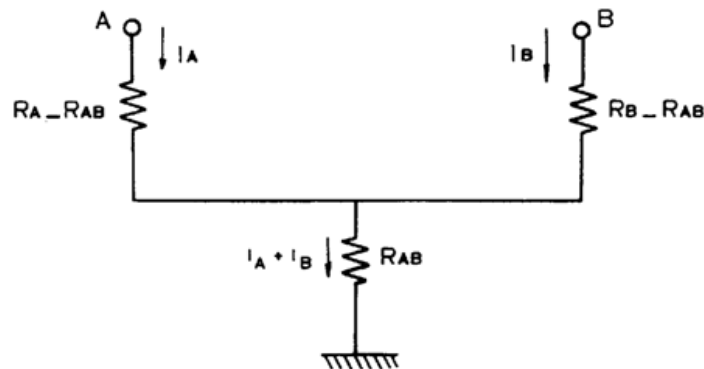


Figure 1.5 : Représentation du couplage entre deux réseaux de terre

Deux réseaux de terre voisins ne sont pas indépendants car l'élévation du potentiel de l'un dépend du courant écoulé dans le sol par l'autre.

3.6. Résistivité du sol

La résistivité du sol est une quantité variable. Elle dépend de plusieurs facteurs qui influencent la formation d'électrolyte. Les facteurs principaux sont la perméabilité, le pourcentage d'eau contenu dans le sol, le pourcentage de sels solubles, le pourcentage d'acide et de bases, le type du sol, la dimension des grains et la température.

Pour cette raison, la détermination de cette valeur devient une tâche compliquée et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle se mesure à l'aide d'un telluromètre et s'exprime en Ohm mètre ($\Omega.m$).

Elle correspond à la résistance théorique en Ohm d'un cylindre de terre de $1m^2$ de section et de 1m de longueur.

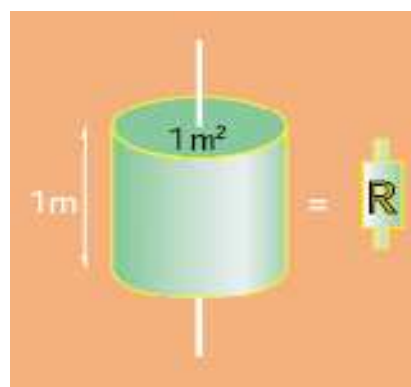


Figure 1.6 : Résistivité du sol

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les résistivités de sol à 20°C de température et à 20% d'humidité. Leur écart par rapport aux valeurs rencontrées sur le terrain peut être important en fonction de la qualité du sol et de son environnement.

Tableau 1.3 : Résistivité des différents types de sol

Type du sol	Résistivité ρ en $\Omega.m$	
	Plage de valeurs	Valeur moyenne
Argile, sol tourbeux, sol organique, sol végétal, humus, sol marécageux	2 à 200	40
Argile sablonneuse, argile poussiéreuse, sol blanc, marne sablonneuse	30 à 260	100
Béton	50 à 300	150
Sable argileux et poussiéreux, sol blanc composé d'argile sablonneuse	50 à 600	200
Sable, gravier, sol blanc composé de sable et de gravier	50 à 3000	400
Sable et gravier sec au dessous de 3 m de profondeur	50 à 50000	1000
Sol pierreux	100 à 8000	2000
Sol rocheux	1000 à 20000	10000

La résistance d'une mise à la terre est proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci est considérée comme homogène, c'est-à-dire le sol en une seule couche de résistivité ρ . Mais il faut tenir compte de la caractéristique de l'électrode de mise à la terre c'est-à-dire de la matière, du forme, de la profondeur dans le sol, du nombre et de la structure, ...

3.6.1. Mesure des résistivités des sols

La conception d'un réseau de terre doit débiter par une étude de la résistivité du sol dans lequel il sera réalisé. Parfois, on utilise la mesure de la résistance de terre d'une électrode de forme connue pour déterminer la résistivité du sol qui l'entoure. Cette méthode a l'avantage de fournir une mesure globale, mais ne s'applique bien que si la prise de terre à implanter est de dimensions comparables à celle de l'électrode utilisée comme référence.

3.6.2. Méthode de mesure de la résistivité

3.6.2.1. Méthode des quatre électrodes

C'est la méthode la plus utilisée pour mesurer la résistivité d'un terrain. On fait circuler à l'aide d'un générateur G un courant I entre deux prise de terre ponctuelles de très petites dimensions A et B.

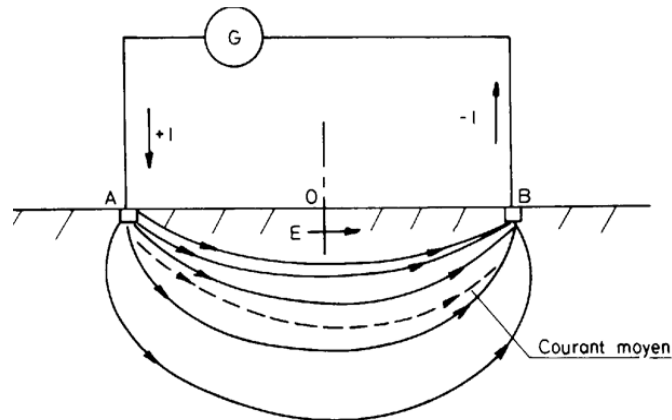


Figure 1.7 : Mesure de la résistivité à l'aplomb du point O

En sol homogène, la valeur du champ électrique E au point O a pour valeur :

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{(+I)}{OA^2} - \frac{(-I)}{OB^2} \right] \quad (1.3)$$

Si le point O est situé au milieu de AB, la formule de la résistivité du sol sous ce point est égal à :

$$\rho = \pi x^2 \frac{E}{I} \quad (1.4)$$

En pratique, le champ électrique E au point O est déterminé en faisant le rapport entre la différence de potentiel ΔV qui existe entre deux sondes de terre C et D disposées symétriquement par rapport à O et leur écartement ΔL .

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta L} \quad (1.5)$$

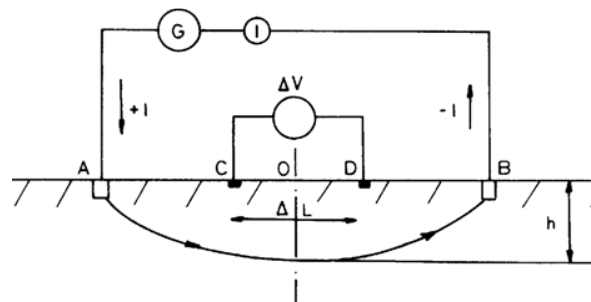


Figure 1.8 : Principe de mesure de la résistivité apparente

La différence de potentiel ΔV peut être exprimée en fonction de la distance respective des points C et D par rapport aux courants $-I$ et $+I$.

$$\Delta V = V_C - V_D$$

$$\Delta V = \frac{\rho a I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} \right) - \left(\frac{1}{AD} - \frac{1}{DB} \right) \right] \quad (1.6)$$

On déduit la valeur de la résistivité apparente ρ des couches cumulées du sol sous le point O.

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \frac{\Delta V}{I} \quad (1.7)$$

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 un telluromètre à quatre bornes. Dans le cas où le sol est homogène, la résistivité apparente est identique à la résistivité réelle.

3.6.2.2. Méthode de Wenner

C'est la méthode de mesure de la résistivité apparente des sols la plus utilisée dans laquelle les quatre électrodes sont disposées en ligne et équidistantes. Les deux électrodes extrêmes sont celles d'injection du courant de mesure I et les deux centrales sont les électrodes de mesure du potentiel ΔV . La distance a entre deux électrodes adjacentes est appelée base de mesure.

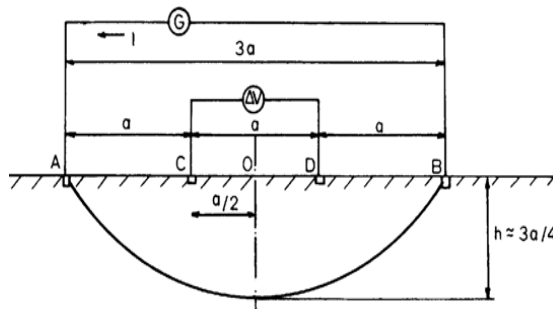


Figure 1.9 : Méthode de Wenner

La formule générale devient :

$$\rho = 2\pi a R \quad (1.8)$$

Où ρ : Résistivité apparente cumulée ($\Omega.m$)

a : Base de mesure (m)

R : Valeur lue sur l'ohmmètre de terre (Ω)

3.7. Profondeur d'investigation

A l'aplomb des deux électrodes centrales, la densité de courant dans le sol décroît régulièrement lorsque la profondeur augmente. Le courant pénètre d'autant plus profondément dans le sol que les électrodes d'injection du courant sont éloignées. En sol homogène, la profondeur d'investigation h est compris entre a et $0,75 a$, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la distance a séparant deux piquet adjacents

4. Dangers du courant électrique

Le courant électrique présente un danger à cause de son caractère invisible. En effet, aucun sens humain ne peut détecter le passage du courant dans un conducteur excepté le bruit ou l'échauffement dû à un fort courant. Il est donc nécessaire dans une optique de sécurité d'utiliser des dispositifs de protection des personnes pour se prémunir de ces risques.

Le risque d'électrocution est lié non à la valeur de l'élévation du potentiel de terre mais au courant traversant le corps ainsi que de l'impédance rencontrée par ce courant lors de son cheminement au travers du corps humain.

Les paramètres à considérer sont l'amplitude et la durée d'application du courant, le trajet suivi par le courant (les points d'application de la tension) et la valeur des impédances rencontrées. Cette relation n'est pas linéaire, car cette impédance dépend du trajet au travers du corps, de la fréquence du courant et de la tension de contact appliquée, ainsi que de l'état d'humidité de la peau.

4.1. Effets du courant passant par le corps humain

4.1.1. Effets du courant alternatif entre 15 et 100 Hz :

- Seuil de perception : valeur minimale du courant qui provoque une sensation pour une personne à travers laquelle le courant passe. De l'ordre de 0,5 mA.
- Seuil de non lâché : valeur maximale du courant pour laquelle une personne tenant des électrodes peut les lâcher. Généralement considéré à 10 mA.
- Seuil de fibrillation ventriculaire du cœur humain : ce seuil dépend de la durée de passage du courant. Il est considéré égal à 400 mA pour une durée d'exposition inférieure à 0,1 s.

4.1.2. Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz

Plus la fréquence du courant augmente, plus les risques de fibrillation ventriculaire diminuent ; par contre, les risques de brûlure augmentent. Mais, plus la fréquence du courant augmente (entre 200 et 400 Hz), plus l'impédance du corps humain diminue. Il est généralement considéré que les conditions de protection contre les contacts indirects sont identiques à 400 Hz et à 50/60 Hz.

4.1.3. Effets du courant continu

Le courant continu apparaît comme moins dangereux que le courant alternatif ; en effet, il est moins difficile de lâcher des parties tenues à la main qu'en présence de courant alternatif. En courant continu, le seuil de fibrillation ventriculaire est beaucoup plus élevé.

4.1.4. Effets des courants de formes d'onde spéciales

Le développement des commandes électroniques risque de créer, en cas de défaut d'isolement, des courants dont la forme est composée de courant alternatif auquel se superpose une composante continue. Les effets de ces courants sur le corps humain sont intermédiaires entre ceux du courant alternatif et ceux du courant continu.

4.1.5. Effets des courants d'impulsion unique de courte durée

Ils sont issus des décharges de condensateurs et peuvent présenter certains dangers pour les personnes en cas de défaut d'isolement. Le facteur principal qui peut provoquer une fibrillation ventriculaire est la valeur de la quantité d'électricité ou d'énergie pour des durées de choc inférieures à 10 ms. Le seuil de douleur dépend de la charge de l'impulsion et de sa valeur de crête.

4.2. Risques de brûlures

Un autre risque important lié à l'électricité est les brûlures. Celles-ci sont très fréquentes lors des accidents domestiques et surtout industriels. Il existe deux types de brûlures :

- la brûlure par arc, qui est une brûlure thermique due à l'intense rayonnement calorifique de l'arc électrique ;

- la brûlure électrothermique, seule vraie brûlure électrique, qui est due au passage du courant à travers l'organisme.

4.3. Résistance du trajet électrique

De nombreuses expérimentations ont permis de donner un ordre de grandeur pour les valeurs des résistances qui nous intéressent :

- ✓ la résistance du corps
- ✓ la résistance présentée par les chaussures
- ✓ la résistance de terre des pieds

4.3.1. Résistance du corps humain

Elle comprend deux termes dont la résistance interne qui est relativement constante et la résistance de la peau qui est variable. Cette dernière dépend de l'état du revêtement de la peau, de l'état d'hydratation, de l'attention du sujet et de la tension appliquée. Si la tension s'élève, le pouvoir protecteur de la peau diminue.

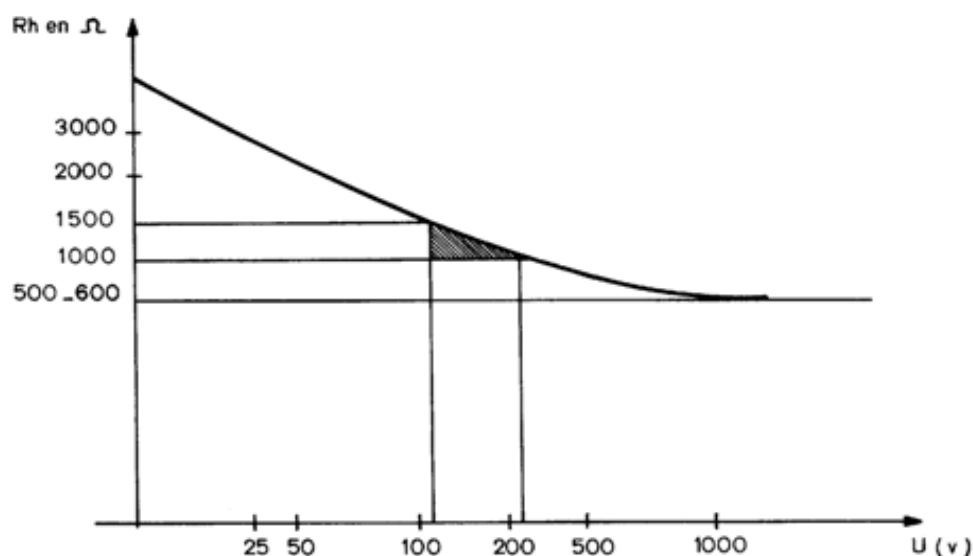


Figure 1.10 : Courbe de variation de la résistance du corps humain

Pour une tension donnée, la résistance du corps est d'autant plus faible que la surface de contact est plus grande et la pression de contact est plus forte.

On admet qu'une résistance de 1000 Ω constitue une assez bonne approximation pour la résistance moyenne du corps.

4.3.2. Résistance présentée par les chaussures

La résistance d'une chaussure est extrêmement variable et dépend des matériaux utilisés dans sa fabrication et de son usure. Elle est plus basse lorsqu'une chaussure est détrempée que lorsqu'elle est sèche. La tension de claquage diélectrique des semelles peut descendre à des valeurs aussi basses que quelques kilovolts.

4.3.3. Résistance de terre des pieds

Un pied posé sur le sol est assimilable à une plaque circulaire d'un rayon voisin de 10 cm. En générale, la résistance de contact des pieds avec le sol est représentée par deux petites prises de terre qui sont assimilées à une électrode hémisphérique de rayon r . Elle est représentée par l'équation suivante:

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

Où R_p : Résistance de terre des pieds (Ω)

ρ : Résistivité du sol ($\Omega.m$)

4.4. Tension de pas et de contact

Les tensions admissibles sont définies par la sensibilité du corps humain aux courants électriques, en particulier les seuils relatifs à la fibrillation cardiaque ventriculaire. Le risque est conditionné par l'amplitude, la durée des courants de terre, la résistance d'isolement des chaussures par rapport au sol, le degré d'humidité relative des mains, le poids de la personne, etc. L'évaluation du risque se résume à la prise en compte ces deux catégories de tensions.

4.4.1. Tension de pas

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

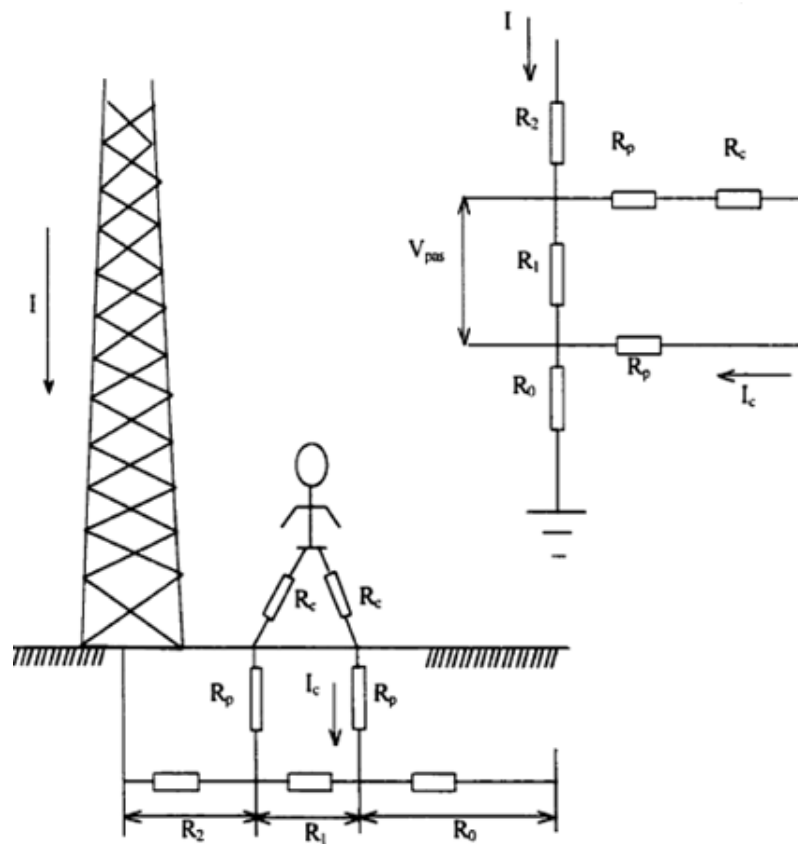


Figure 1.11 : Tension de pas

Le circuit inclue la résistance de l'électrode de mise à la terre ($R_1 + R_2 + R_0$), la résistance de pas R_p , et la résistance du corps R_c .

La tension tolérable entre deux points du sol qui peuvent être touchés simultanément par les deux pieds d'un être humain se détermine comme suit :

$$V_{pas} = (R_c + 2R_p) I_c \quad (1.11)$$

Où

- V_{pas} : Tension de pas (V)
- R_c : Résistance du corps (Ω)
- R_p : Résistance de terre des pieds (Ω)
- I_c : Courant de choc (A)

4.4.2. Tension de contact

La figure ci-dessous illustre le phénomène de la tension de contact qui est représenté par la différence de potentiel entre un point à la surface du sol où une personne peut être debout et un autre point de contact avec l'objet chargé.

La distance conventionnelle est de 1 m entre l'objet touché et le point central entre les pieds. Les pieds sont distancés de 0.5 m entre eux et placés sur un axe perpendiculaire à une droite reliant le point central à l'objet touché. La valeur de cette tension est déterminée par l'équation suivante :

$$V_{cont} = \left(R_c + \frac{R_p}{2} \right) I_c \quad (1.12)$$

Avec : V_{cont} la tension de contact ou de toucher

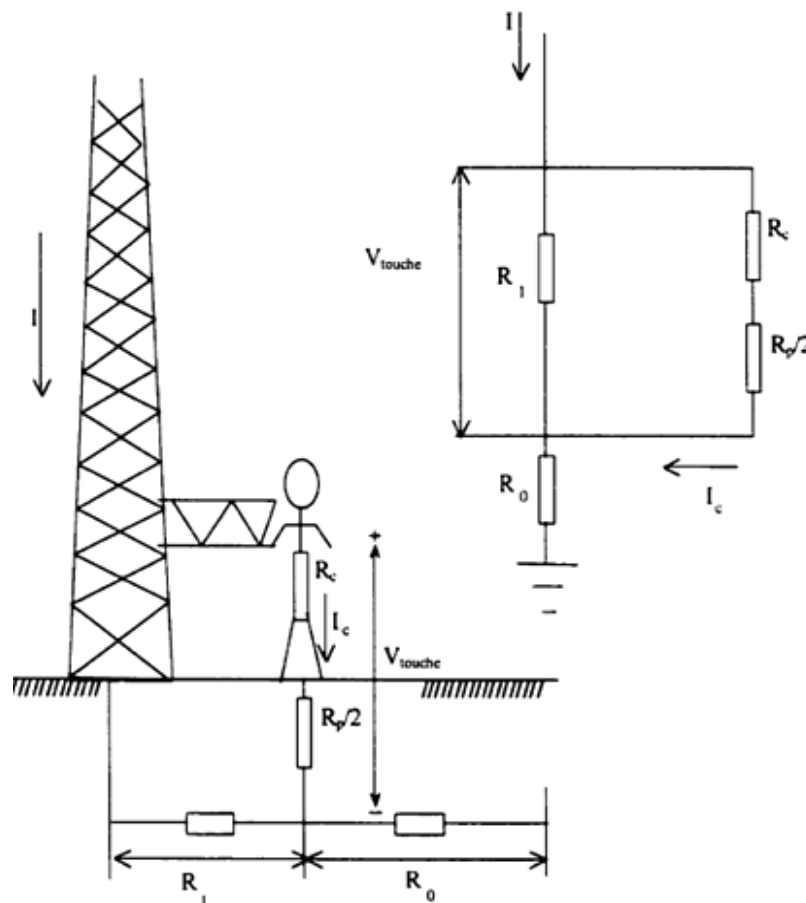


Figure 1.12 : Tension de Touche

4.5. Mesure de protection

4.5.1. Protection contre les contacts directs

Les parties actives peuvent être les conducteurs actifs, les enroulements d'un moteur ou transformateur ou les pistes de circuits imprimés, etc.... Le courant peut circuler soit d'un conducteur actif à un autre en passant par le corps humain, soit d'un conducteur actif vers la terre puis la source, en passant par le corps humain.

Quel que soit le régime de neutre dans le cas d'un contact direct, le courant qui retourne à la source est celui qui traverse le corps humain. Le moyen à mettre en œuvre pour protéger les personnes contre les contacts directs est d'isoler les parties actives par les boîtiers isolants, des disjoncteurs et d'isolant extérieur d'un câble....

4.5.2. Protection contre les contacts indirects

Selon la norme française NF C 15-100, elle s'avère nécessaire. C'est la protection par coupure automatique, elle n'est réelle que si les deux conditions suivantes sont réalisées :

- première condition : toutes les masses et éléments conducteurs accessibles doivent être interconnectés et reliés à la terre. Deux masses simultanément accessibles doivent être reliées à une même prise de terre ;
- deuxième condition : la coupure doit s'effectuer par mise hors tension automatique de la partie de l'installation où se produit un défaut d'isolement, de manière à ne pas soumettre une personne à une tension de contact U_c pendant une durée telle qu'elle soit dangereuse. Plus cette tension est élevée, plus la mise hors tension de cette partie d'installation en défaut doit être rapide.

5. Différentes configurations de mises à la terre

Les valeurs des résistances de mises à la terre dépendent fortement des différents schémas de liaison à la terre, tant du point de vue du fonctionnement des réseaux électriques sécurité du matériel que de la sécurité des personnes.

5.1. Fonction d'un système de liaison à la terre

La fonction d'un système de liaison à la terre est de fournir :

- une liaison équipotentielle de protection,

- une liaison équipotentielle fonctionnelle dans les réseaux de distribution électriques,
- une protection contre la foudre.

5.1.1. Liaison équipotentielle de protection

La liaison équipotentielle de protection impose l'interconnexion ou la liaison de toutes les pièces métalliques qu'une personne ou un animal peut toucher. Dans des conditions normales, sans défaut, il n'y a pas de différence de potentiel entre ces pièces, mais, lors d'un défaut, un potentiel dangereux peut apparaître du fait de la circulation du courant de défaut. La fonction d'un système de mise à la terre étant la protection des personnes contre un choc électrique, la condition fondamentale est que le potentiel de l'électrode de terre sous un éventuel courant de court-circuit n'excède pas la tension de contact admissible,

Dans les installations industrielles, ainsi que dans les sous-stations de distribution, les systèmes équipotentiels des réseaux de haute et basse tension sont communs du fait de la surface limitée disponible au sol. Notamment en schéma de liaison de type isolé (IT), la mise à la terre de la haute tension devrait être commune avec la basse tension, indépendamment du type de connexion du point neutre (isolé ou impédant).

5.1.2. Liaison équipotentielle fonctionnelle

La liaison équipotentielle fonctionnelle fait référence à la nécessité de connecter certains points du système électrique au système de liaison à la terre afin d'assurer un fonctionnement normal. Un exemple classique est la liaison du point neutre d'un transformateur

5.1.3. Protection contre la foudre

La descente de terre d'une protection contre la foudre conduit les courants de foudre dans la terre. Les courants de foudre peuvent atteindre d'importantes valeurs crêtes et créer de très forts potentiels d'électrode de terre.

En fonction du courant de foudre et des propriétés du système de liaisons équipotentiels, le potentiel peut atteindre des valeurs très élevées, jusqu'à plusieurs centaines de kV. Puisque ces valeurs sont plus importantes que les tensions de fonctionnement du réseau, la foudre cause souvent des claquages ou induit des surtensions dans l'installation.

Ainsi, une protection complète des installations contre la foudre nécessite l'installation d'un système de parafoudres et d'éclateurs.

5.2. Schémas de liaison à la terre

Il existe trois types de schémas de liaison à la terre, communément appelés régimes de neutre. Ces schémas représentent la manière dont le neutre du transformateur d'alimentation et les masses des récepteurs sont reliés ou pas à la terre ou au neutre.

Il est représenté par trois lettres dont:

- la première (I ou T) définit le traitement du neutre,
- la deuxième (T ou N) définit le mode de raccordement des masses,

Pour les récepteurs, la troisième lettre indique la situation du conducteur neutre N et du conducteur de protection PE (C : N et PE forment un conducteur commun PEN ; S : N et PE séparés).

Et au niveau d'une poste, elle est définie par les interconnexions éventuelles entre les réseaux de terre (N, R, S).

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.

5.2.1. Le schéma TT

Soit un défaut d'isolement entre une phase BT et la terre.

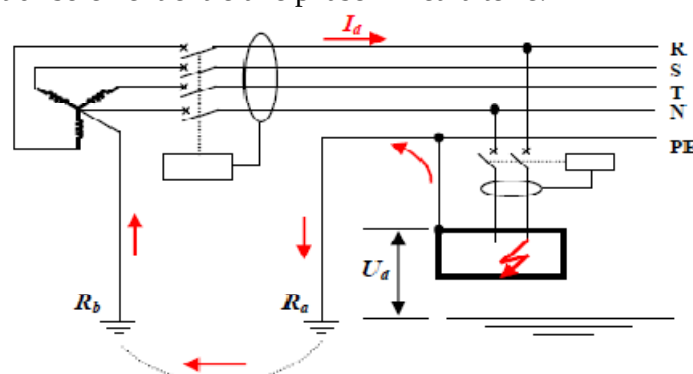


Figure 1.13 : Schéma de liaison à la terre TT

Dans ce type de distribution, le point neutre est relié à la terre et les masses de l'installation sont reliées à des prises de terre distinctes de celle du neutre. En cas de défaut, le courant I_d est limité principalement par la résistance des prises de terre.

En rapport avec la norme CEI 60364 – 4 [Commission Electrotechnique Internationale], les dispositifs de protection tel que les disjoncteurs, fusibles, dispositifs différentiels à courant résiduel (DDR) doivent être coordonnés avec ce système de mise à la terre dans le but de déconnecter la charge si la tension de toucher U_d atteint les valeurs limites de sécurité pour le corps humain.

Dans ce cas, il faut que :

$$R_t \leq \frac{U_L}{I_a} \quad \text{ou} \quad R_t \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}} \quad (1.13)$$

Où R_t : Somme des résistances de la mise à la terre des masses de la charge R_a , et celle du conducteur de protection de la charge (Ω)

I_a : Courant du dispositif de protection contre les surintensités (A)

$I_{\Delta n}$: Seuil de courant assigné du DDR (mA)

5.2.2. Le schéma TN

Dans le cas d'un défaut d'isolement, la situation se présente de la manière suivante.

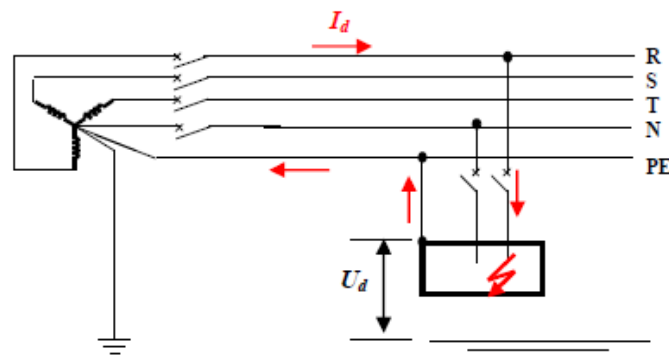


Figure 1.14 : Schéma de liaison à la terre TN

Les masses de l'installation sont reliées directement au conducteur neutre qui est donc à la fois conducteur de protection et conducteur de neutre. Les masses sont portées à un potentiel dangereux, car la tension simple se répartit entre les résistances des conducteurs de phase et celui qui sert à la protection. Lors du court-circuit, la tension simple descend à 0,8 fois la tension simple. Le courant de défaut I_d n'est limité que par l'impédance des câbles de la boucle de défaut, étant donné que les masses des charges ne sont pas mises à la terre.

5.2.3. Le schéma IT

Pour le premier défaut d'isolement, la situation se présente de la manière suivante.

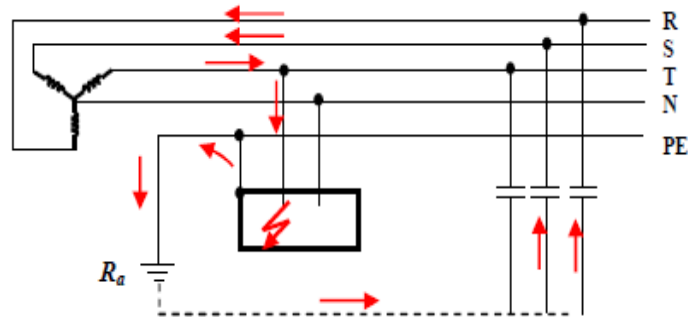


Figure 1.15. Premier défaut d'isolement dans le schéma de liaison à la terre IT

La déconnexion automatique du circuit n'est pas nécessaire seulement si la condition suivante est remplie :

$$R_t I_d \leq U_L \quad (1.14)$$

Où R_t : Somme de la résistance R_a et celle du conducteur de protection de la masse de la charge (Ω),
 I_d : Courant de défaut (A).

Le courant I_d étant généralement faible à cause des capacités parasites du réseau d'où la tension développée dans la prise de terre des masses ne présente pas de danger.

Dans le cas d'un second défaut, le courant ne passe pas par la mise à la terre.

5.3. Mise à la terre dans les postes MT/BT et surtensions temporaires

La norme CEI 60364-4-442 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),

Où U_0 étant la tension simple BT.

La même norme indique que si la résistance des masses du poste $R_p > 1 \Omega$, la tension $R_p \times I_{hMT}$ doit être éliminée.

Où I_{hMT} étant le courant de défaut homopolaire côté MT.

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.

5.4. Mise à la terre dans les postes MT/BT, surtensions d'origine atmosphérique et de manœuvre.

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

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 la valeur de la tension écriêtée U_{rsd} par le dispositif de protection de la ligne MT (parafoudre ou éclateur MT 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 Z_p au choc de la terre des masses du poste MT/BT pour limiter les surtensions atmosphériques transmises en BT est :

$$Z_p \leq \frac{Z_c}{\left(\frac{2U_{rsd}}{U_{tc}} \right)} \quad (1.15)$$

Où Z_c : Impédance caractéristique de la ligne au poste MT/BT (Ω),

U_{rsd} : Valeur de la tension écriêtée par le dispositif de protection de la ligne MT (V)

U_{tc} : Tension de tenue du matériel à l'onde de choc (V).

Chapitre 2 : CALCUL ET MESURE DE LA RESISTANCE DE MISE A LA TERRE

La résistance d'une prise de terre est égale au rapport de son élévation de potentiel, mesurée par rapport à une référence infiniment éloignée, au courant qu'on injecte.

Le problème de la détermination de la résistance d'un réseau de terre et de la répartition du potentiel dans le sol est extrêmement complexe sauf dans le cas d'une électrode hémisphérique enfouie dans un sol homogène.

1. Calcul de la résistance des prises de terre

En pratique, pour tenir compte de l'hétérogénéité du sol, on fait souvent l'hypothèse de deux couches de résistivités différentes. Les différentes configurations dépendent de la forme de la prise de terre.

1.1. Sol homogène

1.1.1. Hémisphère

C'est la forme la plus générale d'une prise de terre. Comme on a dit auparavant dans un sol homogène de résistivité ρ , la résistance d'une prise de terre hémisphérique est donnée par la relation :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r_h} \quad (2.1)$$

Avec r_h : rayon de l'hémisphère

1.1.2. Piquet de terre de forme cylindrique et vertical

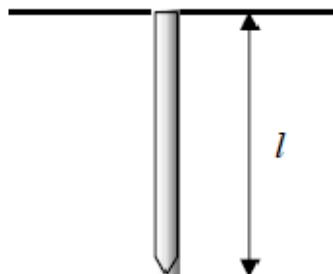


Figure 2.1 : Electrode cylindrique verticale

Trois relations ont été développées pour la détermination de la résistance d'un piquet de terre vertical, de forme cylindrique.

a) La relation de Rudenberg

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} \right) \quad (2.2)$$

Où ρ : Résistivité du sol ($\Omega.m$)
 l : Longueur de l'électrode (m)
 d : Diamètre de l'électrode (mm)

b) La relation de Dwight-Sunde

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} \right) - 1 \quad (2.3)$$

c) La relation de Liew-Darveniza

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{r+l}{r} \right) \quad (2.4)$$

Avec r 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. Il est donné par la relation suivante :

$$r_{eq} = \frac{\rho}{2\pi R_{piquet}} \quad (2.5)$$

Avec R_{piquet} la résistance du piquet

Une seule électrode verticale ne suffit généralement pas pour obtenir une faible résistance, il est important d'utiliser plusieurs électrodes en parallèle. Dans le cas de n électrodes verticales placées parallèlement les unes des autres et équidistantes de a , la résistance effective de la prise de terre est :

$$\frac{1}{R} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right] k \quad (2.6)$$

Où $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ sont les résistances de terre calculées pour chaque piquet, en admettant que chaque piquet n'est pas affecté par la présence des autres,
 k : Coefficient de remplissage ou de service, avec $k \geq 1$

La valeur de k est supérieure à 1 du fait de l'influence mutuelle des champs électriques produits par des piquets adjacents. En effet, la symétrie du débit de courant de chaque électrode est déformée et la densité de courant dans le sol est changée.

Dans une configuration simple (figure ci-dessus), les valeurs suivantes de k peuvent être admises pour :

$$a \geq 2l, k \approx 1,25$$

$$a \geq 4l, k \approx 1$$

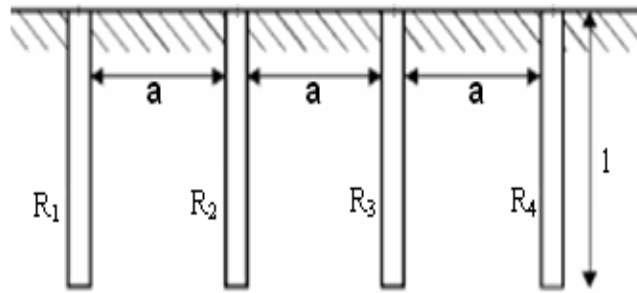


Figure 2.2 : Piquets placés en parallèle

Le nombre de piquet sera déterminé par :

$$n = \frac{\rho}{r_{eq} \cdot l} \quad (2.7)$$

1.1.3. Electrodes en ligne droite

La résistance équivalente de deux électrodes en ligne droite :

$$R_2 = R \left(\frac{1+\alpha}{2} \right) \quad (2.8)$$

Avec $\alpha = \frac{r_{eq}}{d}$; où d étant la distance entre les électrodes.

Pour n électrodes en ligne droite avec $d > l$, la résistance équivalente est donnée par la relation approchée suivante :

$$R \approx \frac{1}{n} \left[\frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{\pi d} \left(\frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad (2.9)$$

1.1.4. Câble enterré horizontalement

La résistance d'un câble de longueur l et de rayon r , enterré horizontalement à une profondeur h est donnée par la relation :

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

La relation analytique qui tient compte de la comparaison entre la longueur du conducteur enterré et la profondeur d'enfouissement (avec $l' = l/2$ et $S = 2h$) :

$$R = \frac{\rho}{4\pi l'} \left(\ln \frac{4l'}{r} - 1 + \ln \frac{2l' + \sqrt{(S^2 + 4l'^2)}}{S} + \frac{S}{2l'} - \frac{\sqrt{(S^2 + 4l'^2)}}{2l'} \right) \quad (2.11)$$

Pour des valeurs du rapport S/l' élevées, la relation devient

$$R = \frac{\rho}{4\pi l'} \left(\ln \frac{4l'}{r} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{l'^2}{3S^2} + \frac{2l'^4}{5S^4} \right) \quad (2.12)$$

Pour des valeurs du rapport S/l' faibles,

$$R = \frac{\rho}{4\pi l'} \left(\ln \frac{4l'}{r} + \ln \frac{4l'}{S} - 2 + \frac{S}{2l'} - \frac{S^2}{16l'^2} + \frac{S^4}{512l'^4} \right) \quad (2.13)$$

Si l'on dispose de deux câbles horizontaux en parallèle, écartés d'une distance e ($e \ll l$), la résistance devient :

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rhee'}} - 1 \right) \quad (2.14)$$

Avec

$$e' = \sqrt{e^2 - 4h^2}$$

1.1.5. Plusieurs câbles



Figure 2.3. Plusieurs câbles rayonnants

Pour les câbles de rayon r de longueur l , enfouis à la même profondeur h , la résistance équivalente est donnée par la relation :

$$R = \frac{\rho}{n\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 + N(n) \right) \quad (2.15)$$

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

Tableau 2.1 : Coefficients $N(n)$ pour n électrodes rayonnant

n	2	3	4	5	6	12	100
N	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11	116

1.1.6. Réseau maillé ou grille

Les électrodes maillées sont principalement utilisées pour des prises de terre dans le cas de surface au sol importante, comme par exemple les sous-stations électriques. Les grilles de ce type d'électrode sont généralement préfabriquées et correspondent aux dimensions de l'installation ; elles assurent ainsi une distribution favorable et approximativement uniforme du gradient de potentiel surfacique.

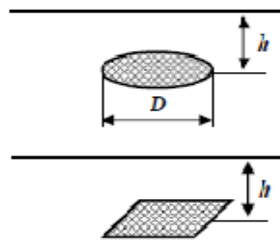


Figure 2.4 : Réseau maillé

La résistance de terre d'une grille peut être calculée en utilisant l'équation simplifiée suivante :

$$h \ll D, \quad R = \frac{\rho}{4D} \left(1 - \frac{4h}{D} \right) \quad (2.16)$$

$$h \gg D, \quad R = \frac{\rho}{8D} + \frac{\rho}{8\pi h}$$

$$R \approx \frac{2\rho}{P}$$

Avec P le périmètre de la grille.

Pour évaluer la résistance d'une grille de terre combinée avec des piquets de terre, on utilise l'équation suivante :

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (2.17)$$

Où R_1 : Résistance de conducteurs de la grille (Ω)
 R_2 : Résistance des piquets de terre (Ω)
 R_m : Résistance mutuelle entre la grille et les piquets de terre (Ω)

➤ **Résistance de conducteurs de la grille R_1 :**

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi l_c} \left[\ln \left(\frac{2l_c}{a'} \right) + \frac{k_1 l_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (2.18)$$

Avec :

ρ : Résistivité du sol ($\Omega.m$)
 l_c : Longueur totale de tous les conducteurs de la grille (m)
 a' : $\sqrt{a' 2h}$ Si la grille est enterrée à une profondeur h (m)
 a : Rayon des conducteurs de la grille (mm)
 A : Aire occupée par les conducteurs (m^2)
 k_1 et k_2 : Coefficient données dans la figure ci-dessous

➤ **Résistance des piquets de terre R_2 :**

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n l} \left[\ln \left(\frac{4l}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (2.19)$$

Où l : Longueur des piquets (m)
 b : Rayon des piquets (mm)
 n : Nombre de piquets

➤ **Résistance mutuelle entre la grille et les piquets de terre R_m**

$$R_m = \frac{\rho}{\pi l_c} \left[\ln \left(\frac{2l_c}{l} \right) + \frac{k_1 l_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (2.20)$$

1.1.7. Boucle enterrée

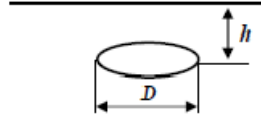


Figure 2.5 : Boucle enterrée

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D^2}{hr} \quad (2.21)$$

1.1.8. Détermination du rayon

Pour des surfaces carrées, ou approximativement carrées, le rayon équivalent r_h est celui qui correspond à une aire circulaire de même surface que le carré, qui peut être déterminé par la relation suivante :

$$r_h = \left(\frac{S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

Avec

$$S = be + d(c - e)$$

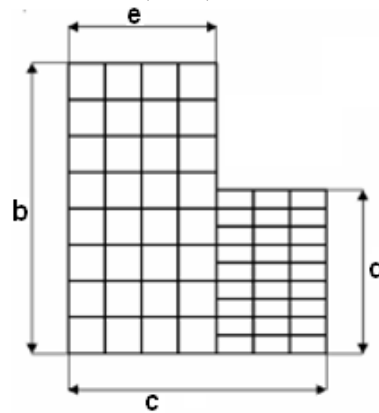


Figure 2.6 : Calcul de rayon équivalent d'électrode de forme carrée

Pour des surfaces rectangulaires, le rayon équivalent est égal à la somme des côtés externes divisée par π .

$$r_h = \left(\frac{b + c}{\pi} \right) \quad (2.23)$$

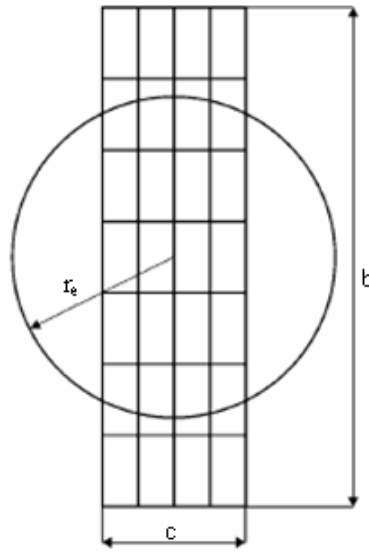


Figure 2.7 : Calcul du rayon équivalent d'électrode de forme rectangulaire

1.2. Sol non homogène

1.2.1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches

Soit une électrode cylindrique verticale de longueur l et de rayon r dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 , sa résistance s'exprime selon les deux cas ci-après :

a) Electrode se situe dans la couche supérieure de résistivité ρ_1

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\left(\frac{4l}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln \left(\frac{\frac{nh}{l} + 1}{\frac{nh}{l} - 1} \right) \right] \quad (2.24)$$

Où l : longueur de l'électrode (m)

h : Profondeur de la couche de résistivité ρ_1 (m)

K : Coefficient de réflexion ; $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$

b) Electrode traversant les deux couches

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{(1+K)}{(1-K) + 2K \frac{h}{l}} \left[\ln \frac{2l}{r} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left(\frac{2nh+1}{[(2n-2)h+1]} \right) \right] \quad (2.25)$$

1.2.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches

La résistance d'électrode cylindrique horizontale de longueur l et de rayon r , enterrée à une profondeur p ($p < h$) dans un sol en deux couches de résistivité ρ_1 et ρ_2 est donnée par la relation :

$$R = R_1 + R_a \quad (2.26)$$

Où R_1 : La résistance de l'électrode horizontale dans un sol homogène de résistivité ρ_1 (Ω)

R_a : La résistance additionnelle due au changement de la résistivité du sol (Ω).

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[4 \ln \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2nh}{l}\right)^2 + 1}}{2n \frac{h}{l}} + 8n \frac{h}{l} - 4 \sqrt{\left(\frac{2nh}{l}\right)^2 + 1} \right] \quad (2.27)$$

1.3. Electrodes de terre de fondation

Les électrodes de terre de fondations sont des conducteurs métalliques enrobés dans le béton des fondations du bâtiment. Le béton coulé directement dans le sol possède une humidité naturelle et peut être considéré comme une matière conductrice, avec une conductivité similaire à celle du sol. Du fait de la grande surface de ce type d'électrode, une faible résistance peut être atteinte. De plus, le béton protège les parties métalliques contre la corrosion et les éléments en acier enrobés dans le béton ne nécessitent pas une protection supplémentaire anti-corrosion. Elles sont actuellement recommandées comme solution pratique pour les prises de terre de bâtiment.

En pratique, il y a deux types de conception d'électrodes de terre de fondation :

- dans des fondations en béton non armé,
- dans des fondations en béton armé.

Dans ces deux cas, l'électrode de terre est constituée de :

- méplat acier de section rectangulaire pas inférieure à $30 \text{ mm} \times 3,5 \text{ mm}$, ou
- barre d'acier de section cylindrique d'un diamètre d'au moins 10 mm .

a) Fondations en béton non armé

Dans des fondations en béton non armé, l'électrode suit généralement le profil des fondations du bâtiment, c'est-à-dire qu'elle est placée en dessous des murs porteurs.

Dans les bâtiments ayant de vaste fondation, l'électrode est généralement réalisée en forme de boucle, elle recouvre la partie extérieure des fondations et est totalement interconnectée.

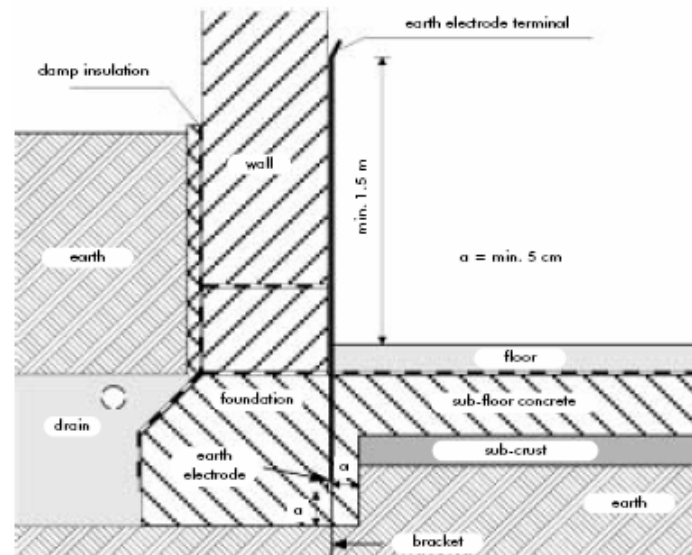


Figure 2.8 : Electrode de terre dans des fondations sans béton armé

b) Fondations en béton armé

Dans des fondations en béton armé, l'électrode de terre est placée en-dessous de la plus profonde armature, assurant ainsi une protection adéquate de l'électrode contre la corrosion. L'électrode peut être fixée à l'armature métallique du béton par des brins de câble à des intervalles jamais supérieures à 2 m de plus que la longueur de l'électrode. Il n'est pas nécessaire d'assurer une connexion électrique sûre à chaque point puisque la connexion électrique principale se fait via le béton. Si les fondations sont réalisées en panneaux séparés les uns des autres par des joints de dilatation, les électrodes de terre de chaque panneau seront connectées galvaniquement les unes aux autres. Ces connexions doivent être flexibles et doivent être repérées afin d'être accessible en cas de besoin de mesures ou de maintenance.

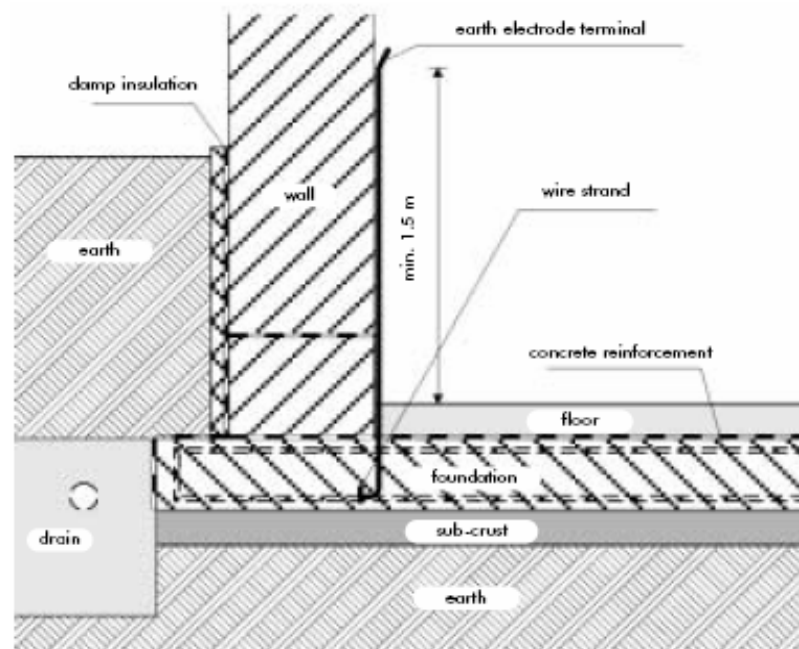


Figure 2.9 : Electrode de terre dans des fondations en béton armé

c) Résistance d'une prise de terre de fondation

La résistance d'une prise de terre de fondation peut être calculée en utilisant la formule simplifiée suivante :

$$R = 0,2 \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} \quad (2.28)$$

Où : V est le volume des fondations (m^3).

2. Méthodes de mesure de la résistance des prises de terre

Dans la pratique, il est nécessaire d'utiliser des électrodes auxiliaires d'une part pour injecter du courant dans la prise de terre étudiée et d'autre part pour mesurer l'élévation de potentiel de cette dernière.

2.1. Méthode de trois points

Dans cette méthode, on utilise trois électrodes dont deux électrodes auxiliaires A et B et une électrode de mesure X. La prise de terre X et les piquets A et B forment un triangle équilatéral.

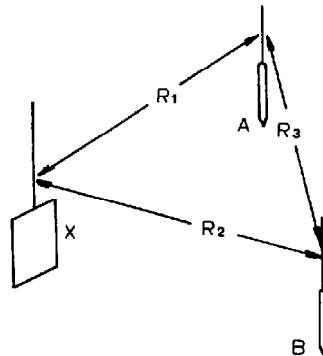


Figure 2.10 : Méthode de trois points

On a : $R_1 = R_X + R_A$

$$R_2 = R_X + R_B$$

$$R_3 = R_A + R_B$$

D'où

$$R_X = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad (2.29)$$

2.2. Méthode de la chute de potentiel

2.2.1. Principe de la mesure

Le problème de la détermination de la résistance de mise à la terre est extrêmement complexe. A part les méthodes de calculs analytiques et numériques, il est nécessaire dans la pratique d'utiliser des électrodes auxiliaires d'une part pour injecter du courant dans la prise de terre à étudier et d'autre part pour mesurer l'élévation de potentiel de cette dernière. C'est la méthode de chute de potentiel.

Un courant I est injecté entre les électrodes X et C, et on mesure la différence de potentiel V entre X et P.

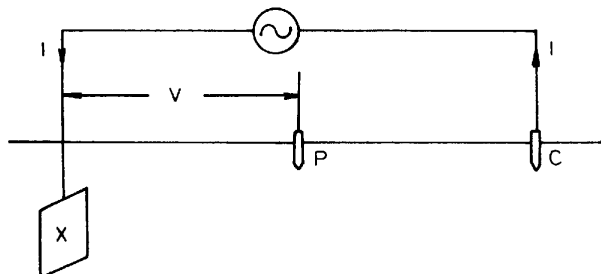


Figure 2.11 : Méthode de chute de potentiel

2.2.2. Conditions de mesure

Pour éviter l'influence des courants telluriques et vagabonds existant naturellement dans le sol, la mesure s'effectue avec un courant alternatif dont la fréquence diffère de celle du réseau et de ses harmoniques. La valeur V/I fournit une mesure correcte de la résistance de terre de l'électrode X, si l'un des deux conditions suivant est satisfait :

- ❖ les deux électrodes X et C doivent être éloignées pour que leur interaction ait un effet négligeable et P se trouve en un point où l'élévation de potentiel est négligeable. Ces conditions sont remplies si la distance entre X et C est au moins 20 fois plus grand que le rayon r_h de la prise de terre hémisphérique équivalente à X et si P est éloignée de X et C d'au moins 10 fois ce rayon. Lorsque ces conditions sont satisfaites, le résultat de mesure est pratiquement indépendant de la position des électrodes, ce qui peut être vérifié en déplaçant celles-ci ;
- ❖ les deux électrodes X, P et C sont alignées et P est placé entre X et C, à une distance de X égale à 62% de la distance séparant X et C. Lorsque le sol est fortement hétérogène, la position idéale de P peut différer sensiblement de la position correspondant à un sol homogène. En pratique l'interaction entre X et C n'est pas trop forte, on peut donc déplacer l'électrode P sur la ligne joignant X et C. Deux cas peuvent alors se présenter :
 - ✓ l'électrode C est en C_1 : il y a interaction des électrodes et la résistance mesurée croît rapidement lorsqu'on déplace P de X vers C.
 - ✓ l'électrode C est placée en C_2 : la résistance mesurée évolue comme la courbe XABD, avec une partie constante AB pratiquement horizontale. Le résultat de mesure dépend peu de la position de P, on peut s'assurer en déplaçant P autour de la position correspondant à la règle de 62%.

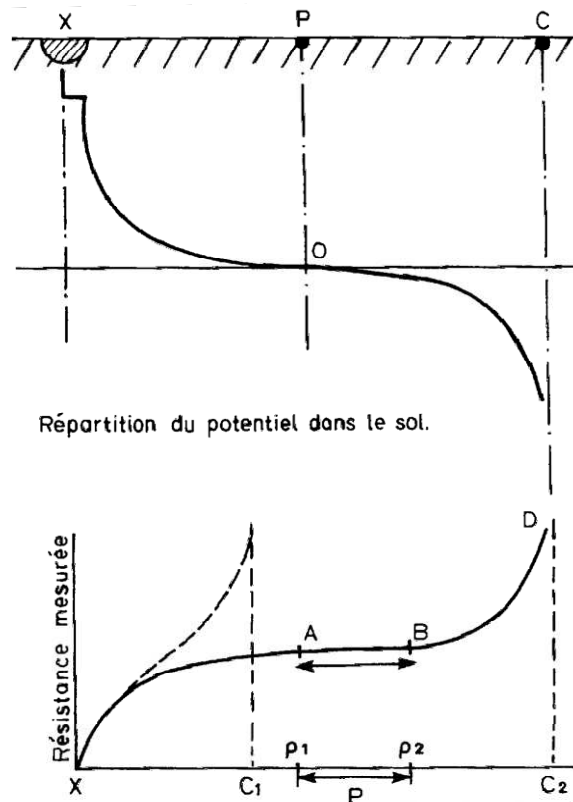
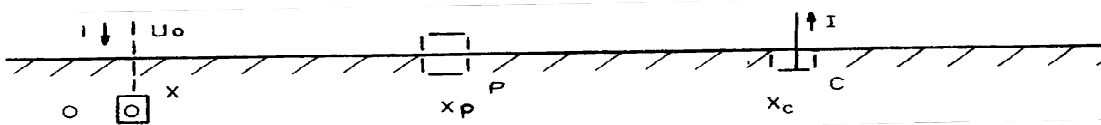


Figure 2.12 : Courbe des conditions de mesure

2.2.3. Méthode de mesure en ligne dite « des 62% »

Les trois prises de terre X, P et C sont alignées. On suppose que les électrodes X et C sont des hémisphères idéaux et que le sol est homogène.



Le potentiel dans le sol au point d'abscisse x_p a pour expression :

$$U(x_p) = \frac{\rho I}{2\pi x} - \frac{\rho I}{2\pi(x_c - x_p)} \quad (2.30)$$

Si la résistance R de terre de X, l'élévation de potentiel de X est

$$U_0 = RI - \frac{\rho I}{2\pi x_c} \quad (2.31)$$

La tension mesurée :

$$V = U_0 - U(x_p) = RI - \rho \left(\frac{I}{2\pi x_p} - \frac{I}{2\pi(x_c - x_p)} + \frac{I}{2\pi x_c} \right)$$

$$V = RI - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_c} - \frac{1}{(x_c - x_p)} \right) \quad (2.32)$$

La condition $V = RI$ est satisfaite pour $x_p \approx 0,62 x_c$

3. Mesure de la résistance d'une prise de terre ponctuelle

Le principe de fonctionnement du telluromètre comprend :

- un générateur G qui délivre un courant I et applique un potentiel 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 .

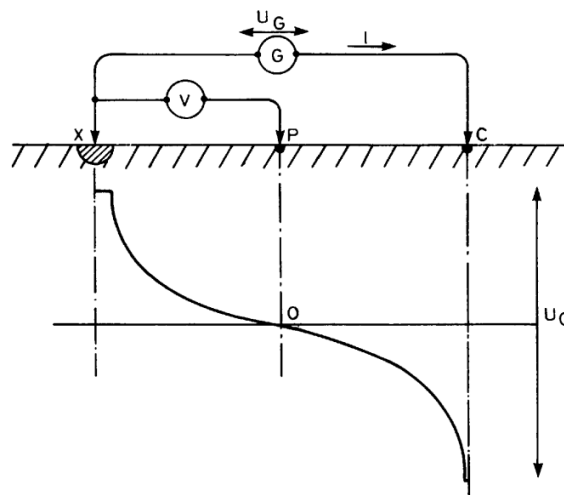


Figure 2.13 : Principe de fonctionnement du telluromètre

4. Choix d'une prise de terre

Pour choisir le type de prise de terre à réaliser, il convient de connaître :

- la résistance maximale à obtenir,
- la résistivité du sol,
- la surface libre dont on dispose.

La résistance est imposée par la protection à assurer. La résistivité du sol est une caractéristique du site, elle se détermine par mesure géophysique. La réalisation d'un sondage électrique permettra notamment de rechercher une couche conductrice en profondeur.

La surface libre dont on dispose est celle à l'intérieur de laquelle aucune perturbation n'est à craindre du fait de la présence de canalisations, de tranchées ou d'autres terres auxquelles on ne veut pas se connecter. Le choix s'effectue ensuite entre trois systèmes.

- linéaire horizontal : c'est un conducteur enterré au fond d'une tranchée de profondeur fonction de la nature du sol, mais toujours supérieure à 0,80 m (garde à la sécheresse),
- linéaire vertical : c'est un piquet enfoncé dans le sol ou un forage équipé, présentant une longueur grande par rapport à son diamètre,
- volumique vertical : c'est un forage de diamètre.

5. Coefficient de couplage

La détermination du coefficient de couplage sert à estimer l'influence réciproque de deux résistances de terre n'ayant normalement aucune relation. Il s'agit de s'assurer qu'aucune remontée de potentiel, induite par un courant de défaut circulant dans une des prises de terre puisse apparaître aux bornes de la prise de terre voisine.

Les paramètres déterminants qui influencent la valeur du coefficient de couplage, de la résistance de couplage sont les suivants :

- la distance qui sépare les deux prises de terre,
- la résistivité du sol,
- la valeur de chacune des résistances.

La distance séparant les deux résistances de terre est déterminée en fonction de la résistivité du sol. Par exemple, selon EDF, il faut respecter une distance minimale de 8 *mètres* entre la première résistance de terre du neutre la plus proche et la résistance des masses, ceci dans le cas d'une résistivité du sol inférieure ou égale à 300 $\Omega \cdot m$. Si la résistivité est comprise entre 500 $\Omega \cdot m$ et 1000 $\Omega \cdot m$ la distance minimale doit être de 24 m entre les deux résistances de terre.

Pour le déterminer, EDF procède de la manière suivante :

- mesure de la terre du neutre RN par la méthode des 62 % après avoir déconnecté le neutre sauf s'il n'existe pas d'autre M.A.L.T,
- mesure de la terre de la masse du transformateur RM par la méthode des 62 %,
- mesure de la résistance RMN à l'aide d'un mesureur 4 fils.

5.1. Calcul de la résistance de couplage

La résistance de couplage est donc donnée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{RM + RN - RMN}{2} \quad (2.33)$$

5.2. Le coefficient de couplage C

Le coefficient de couplage est égal à la valeur de la résistance de couplage R_c trouvée sur la valeur de la résistance de terre de masse du transformateur RM .

$$C = \frac{R_c}{RM} \quad (2.34)$$

Ce coefficient de couplage C doit être $< 0,15$ soit $C < 15\%$ pour considérer que l'influence réciproque des deux résistances de terre RM et RN est négligeable.

Chapitre 3 : CARACTERISTIQUES IMPULSIONNELLES DES MISES A LA TERRE

En basses fréquences comme celles du réseau électrique industriel (50 Hz et 60 Hz), les inductances et capacité des mises à la terre sont négligées vis-à-vis de leur résistance. Tandis qu'à des fréquences élevées telles que les fréquences de l'onde d'un courant de foudre, il faut tenir compte de tous ces éléments (résistance, inductance et capacité).

Avec des courants impulsionnels, le champ électrique peut devenir intense et le phénomène d'ionisation peut apparaître dans le sol. Ce phénomène a pour conséquence de réduire, de manière réversible, l'impédance apparente de la prise de terre, surtout pour les sols de grande résistivité.

1. Modèles des électrodes de mise à la terre

Plusieurs modèles se sont développés 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).

1.1. Modèle du circuit RLC

Dans ce modèle, en négligeant sa résistance propre, l'électrode est représentée comme un circuit RLC.

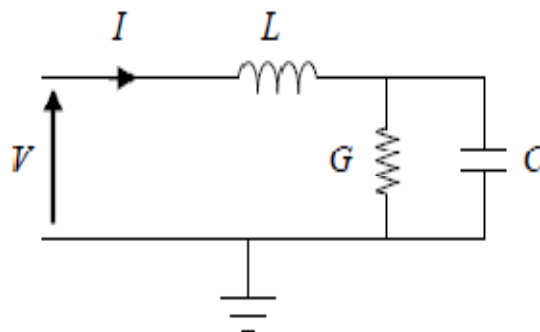


Figure 3.1 : Modèle du circuit RLC

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 :

$$l = \frac{\lambda}{10} \quad (3.1)$$

Où

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon}} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}}$$

λ : Longueur d'onde qui dépend des paramètres électriques du sol,

ω : Pulsation de l'onde,

ε : Permittivité diélectrique,

μ_0 : Perméabilité magnétique,

σ : Conductivité électrique du sol.

Les longueurs d'onde dans le sol pour les fréquences de 50 Hz, 100 kHz et 1 MHz sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.1 : longueur d'ondes en fonction de fréquence

Fréquence	Résistivité du sol ($\Omega \cdot m$)	Longueur d'onde (m)	
		$\varepsilon_r = 10$	$\varepsilon_r = 30$
50 Hz	100	4472	4472
	1000	14142	14142
100 kHz	100	100	99
	1000	308	291
1MHz	100	31	29
	1000	77	53

1.1.1. Prise en compte de l'effet de peau

La résistance interne d'une électrode cylindrique de rayon r , de longueur l , constituée d'un matériau de conductivité σ est donnée par la relation suivante :

- ❖ En courant continu et en basses fréquences.

$$R_{DC} = \frac{1}{\sigma\pi r^2} \quad (3.2)$$

- ❖ En hautes fréquences : $R_{HF} = R_{DC} \frac{r}{2\sigma} \quad (3.3)$

Où
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

Avec δ la profondeur de pénétration.

Dans le sol, les profondeurs de pénétration du courant sont assez importantes, même en hautes fréquences. Il permet de négliger l'effet de peau dans certaine électrode que dans le sol. En négligeant la résistance interne de l'électrode, l'impédance de mise à la terre est donnée par la relation suivante :

$$Z = j\omega l + \frac{1}{G + j\omega C} \quad (3.4)$$

Pour une électrode cylindrique et verticale, les relations suivantes définissent les paramètres RLC du circuit de la figure 3.1.

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (3.5)$$

$$C = 2\pi\epsilon l \left(\ln \frac{2l}{r} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2l}{r} \quad (3.7)$$

Où :

l : Longueur de l'électrode (m),

r : Rayon de l'électrode (mm).

Pour une électrode horizontale enterrée à une profondeur h ($\gg r$ et $l \gg h$) :

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho}{\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

$$C = 2\pi\epsilon l \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right)^{-1} \quad (3.9)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

1.1.2. Constante de temps capacitive

D'une manière générale, pour un sol homogène, la capacité et la résistance d'un piquet de terre sont liées par la constante de temps capacitive et donnée par la relation :

$$\tau_c = RC = \rho\epsilon \quad (3.11)$$

La constante de temps capacitive ne dépend que des propriétés du sol (sa résistivité et sa permittivité).

La notion de la constante de temps capacitive, qui dépend seulement des caractéristiques du sol amène à la condition d'une bonne terre de référence, pour laquelle le courant de déplacement doit être beaucoup plus faible que le courant de conduction. Ce qui revient à la condition suivante pour la fréquence la plus élevée possible :

$$\frac{1}{2\pi f \rho \epsilon} \gg 1 \quad (3.12)$$

Pour une fréquence f donnée, la résistivité et la permittivité du sol jouent un rôle essentiel.

1.1.3. Constante de temps inductive

La constante de temps inductive est proportionnelle au carré de la longueur du piquet et inversement proportionnelle à la résistivité du sol. Elle est donnée par la relation :

$$\tau_L = \frac{L}{R} = \mu_0 \frac{l^2}{\rho} \quad (3.13)$$

1.1.4. Fréquence de résonance d'un piquet

La fréquence de résonance est donnée par la relation suivante :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.14)$$

En utilisant la relation (3.5) et (3.6), on a :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi l \sqrt{\epsilon \mu}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\epsilon \mu}} \quad (3.15)$$

Prenons comme exemple un piquet de terre de 2 m de longueur, enterré dans un sol de permittivité relative égale à 10, la fréquence de résonance est de 23.9 MHz. Cette fréquence est rarement atteinte par les ondes de foudre. On peut donc supposer que pour des piquets de longueur modeste, la résonance due à un coup de foudre n'apparaîtra pas.

1.2. Modèle de ligne de transmission (TL)

L'électrode est considérée comme une ligne électrique ouverte à l'une des extrémités.

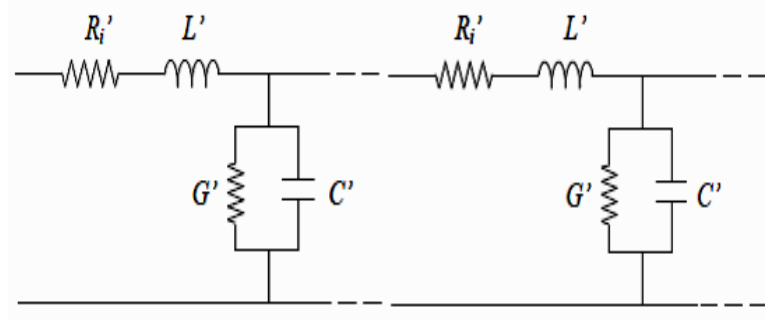


Figure 3.2 : Modèle de la ligne de transmission

Les relations permettant de trouver les caractéristiques de ce schéma équivalent (résistance, inductance, conductance et capacité linéiques) sont les suivantes :

$$R_i' = \frac{\rho}{S} \quad S \text{ étant la section de conducteur} \quad (3.16)$$

$$L' = \frac{L}{l} \quad (3.17)$$

$$G' = \frac{G}{l} \quad (3.18)$$

$$C' = \frac{C}{l} \quad (3.19)$$

Le comportement de l'électrode est alors étudié en appliquant la théorie de propagation.

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x,t) + L' \frac{\partial}{\partial x} I(x,t) + R_i' I(x,t) = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} I(x,t) + C' \frac{\partial}{\partial x} V(x,t) + G' V(x,t) = 0 \quad (3.21)$$

La constante de propagation est donnée par la relation :

$$\gamma = \sqrt{Z'Y'} = \sqrt{(R_i' + j\omega L')(G' + jC'\omega)} \quad (3.22)$$

Et l'impédance de propagation est :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{(R_i' + j\omega L')}{G' + jC'\omega}} \quad (3.23)$$

L'impédance de l'électrode à la terre est dans ce cas égale à l'impédance d'entrée, donnée par la relation :

$$Z_{in} = Z_0 \coth(\gamma l) \quad (3.24)$$

Comme on peut le constater à partir des modèles décrits ci-dessus, les paramètres caractéristiques de l'électrode de terre sont fonction de la fréquence de l'onde incidente, dans ce cas, il s'agit soit de l'onde de surtension de manœuvre soit celle de la foudre. Une analyse fréquentielle de l'impédance de terre est importante pour évaluer l'effet de l'augmentation de la fréquence. C'est l'impédance harmonique.

1.3. Modèle électromagnétique

Cette modélisation est basée sur la résolution des équations complètes de Maxwell.

Pour analyser les pertes dans le sol en provenance des antennes, pertes dues à la faible conductivité des sols, on utilise la méthode qui est basée sur la méthode des moments.

Cette méthode, qui exige le modèle homogène des sols, a été plus tard utilisée pour analyser les mises à la terre.

2. Impédances de mise à la terre

2.1. Impédance harmonique

L'impédance harmonique (analyse fréquentielle) de mise à la terre est une grandeur complexe et varie par rapport à la fréquence. Elle dépend uniquement des caractéristiques géométriques et électromagnétiques de la mise à la terre. L'impédance harmonique peut être trouvée de deux manières, selon que l'on modélise la mise à la terre comme un circuit électrique ou comme une ligne de transmission (à partir des formules 3.4 et 3.24).

Le comportement de la mise à la terre en hautes fréquences peut être soit résistive, soit inductive ou encore capacitive.

2.2. Impédance transitoire

L'impédance transitoire (analyse temporelle) est le rapport entre le potentiel au point d'injection du courant et l'onde de courant injectée, elle varie avec le temps. C'est au point d'injection que le potentiel est le plus élevé.

$$Z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (3.25)$$

Si $i(t)$ est constant, l'impédance transitoire se réduira à la résistance de la mise à la terre à basse fréquence, on a :

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.26)$$

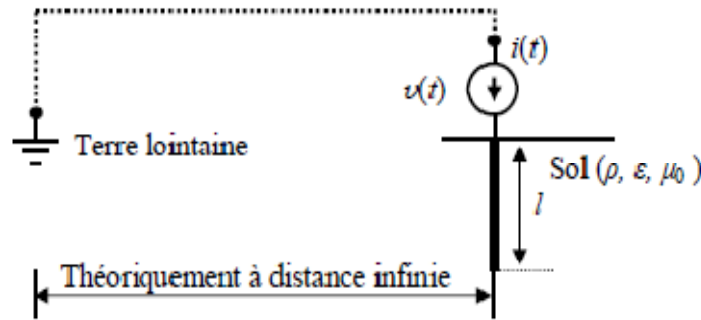


Figure 3.3 : Modélisation d'un piquet de terre écouant un courant transitoire

2.3. Impédance impulsionnelle

Soit une électrode verticale soumise à une onde de foudre donnée. Les courbes qui donnent la tension et l'impédance transitoires sont données à la figure suivante.

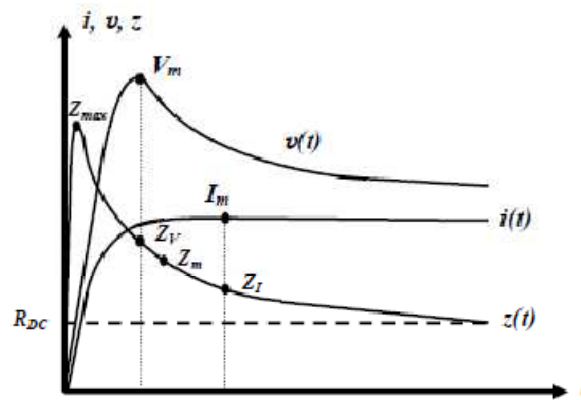


Figure 3.4 : Courant, tension et impédance transitoires d'une électrode

Pour caractériser le comportement transitoire de l'électrode, plusieurs paramètres sont définis. Ce sont le courant maximum I_m , la valeur de la tension au moment où le courant est maximum V_I , la tension maximum V_m et la valeur du courant au moment où la tension est maximum I_V .

L'impédance impulsionnelle Z_m est alors définie conventionnellement de quatre manières à l'aide de ces paramètres. C'est le rapport entre la tension et le courant maximum à des moments différents.

$$Z_{\max} = \max(Z(t)) \quad (3.27)$$

$$Z_{\max} = \frac{V_m}{I_m}$$

La valeur de l'impédance transitoire $z(t)$ au maximum du courant est (Z_I) et (Z_V) au maximum de la tension.

$$Z_I = \frac{V_I}{I_m} \quad (3.28)$$

$$Z_V = \frac{V_m}{I_V} \quad (3.29)$$

2.3.1. Coefficient impulsionnel

Le coefficient impulsionnel est le rapport entre l'impédance impulsionnelle et la résistance en basse fréquence.

$$IE = \frac{Z}{R} \quad (3.30)$$

La mise à la terre de faible coefficient impulsionnel (proche de l'unité) présente des bonnes performances transitoires. Mais il est toujours important, du fait de la valeur relative du coefficient impulsionnel, de tenir compte de la résistance basse fréquence de la mise à la terre.

L'impédance transitoire aussi bien l'impédance impulsionnelle dépend non seulement des caractéristiques géométriques de la mise à la terre et du milieu, mais aussi de la forme de l'onde du courant.

2.3.2. Longueur effective

La longueur effective d'une électrode de terre est sa longueur maximale pour laquelle le coefficient impulsionnel est égal à 1. Les relations analytiques suivantes sont données pour calculer le coefficient impulsionnel et la longueur effective.

$$l_{\text{eff}} = 1,4\sqrt{\rho T} \quad (3.31)$$

Où :

T : Temps de montée de l'onde du courant de foudre (μs).

Le coefficient impulsionnel

$$EI = \exp \left[0,333 \left(\frac{l}{l_{\text{eff}}} \right)^{2,3} \right] \quad (3.32)$$

Où

l : Longueur réelle de l'électrode (m).

3. Mise à la terre et lignes électriques

Les grandes quantités d'énergie à transmettre par des lignes électriques les forcent à fonctionner de plus en plus dans leurs limites et les coupures non programmées augmentent le risque d'instabilité. Les décharges par la foudre constituent la cause principale des coupures non programmées des lignes électriques. Il est possible de réduire le nombre de déclenchements des lignes électriques dus à la foudre par l'installation adéquate des câbles de garde et par les mises à la terre appropriées des pylônes.

3.1. Généralités sur la foudre

La terre et l'électrosphère, zone conductrice de l'atmosphère d'épaisseur de l'ordre de 50 à 100 km, constituent un condensateur sphérique naturel qui se charge par ionisation, d'où un champ électrique dirigé vers le sol de l'ordre de quelques centaines de volts mètre.

L'air étant faiblement conducteur, il existe donc un courant de conduction permanent associé, de l'ordre de 1500 A pour tout le globe terrestre.

L'équilibre électrique est assuré lors des décharges par pointes, par pluies et coups de foudre. La formation des nuages orageux, masses d'eau sous forme d'aérosols, s'accompagne des phénomènes électrostatiques de séparation des charges : les particules légères chargées positivement sont entraînées par les courants d'air ascendants, et les particules lourdes chargées négativement tombent sous l'action de leur poids. Il arrive également qu'à la base du nuage se trouvent des îlots de charges positives à l'endroit de pluies intenses. Globalement à l'échelle macroscopique, il y a création d'un dipôle. Lorsque le gradient limite de tenue au claquage est atteint, une décharge se produit au sein du nuage ou entre nuages ou entre nuage et sol. Dans ce dernier cas, on parle de foudre.

3.2. Niveau kéraunique (Nk)

C'est le nombre de jours par année où l'on entend l'orage en un lieu donné. La figure ci-dessous donne une indication sur le niveau kéraunique dans le monde.

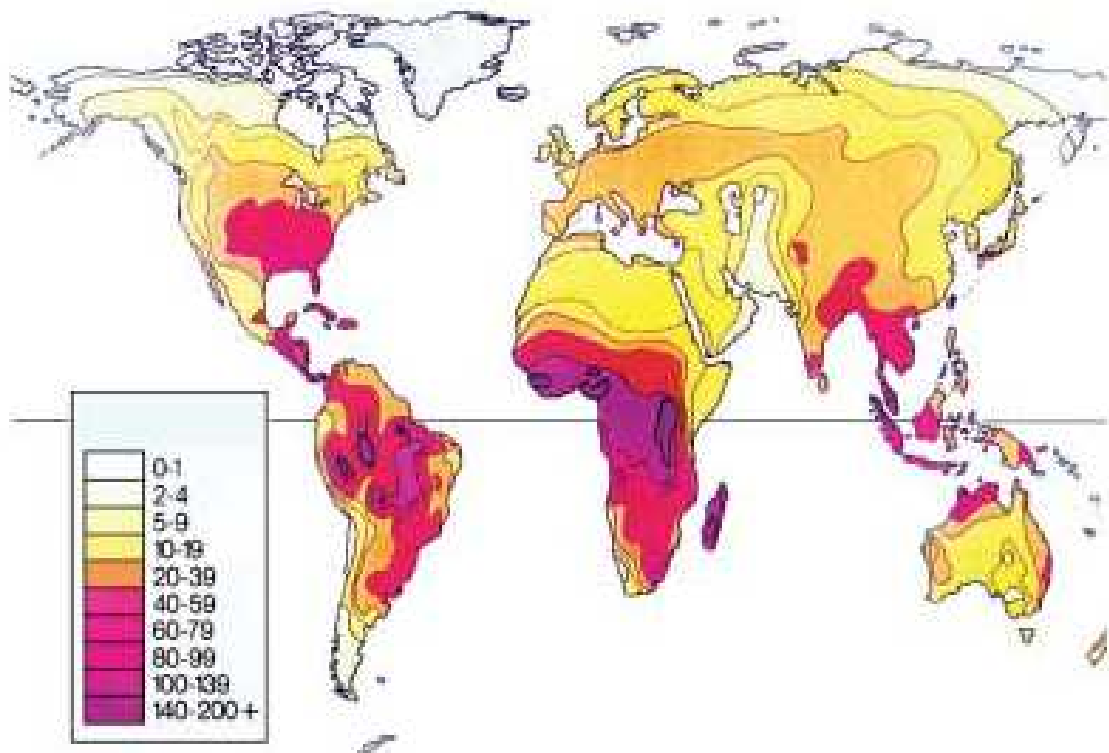


Figure 3.5 : Carte des niveaux kérauniques dans le monde

3.3. Densité de foudroiement (N)

C'est le nombre de coups de foudre par km^2 par an en un lieu donné. Plusieurs relations empiriques lient le niveau kéraunique à la densité de foudroiement. Ces relations empiriques affirment la proportionnalité entre le niveau kéraunique et la densité de foudroiement par un coefficient de proportionnalité variant entre 0,1 et 0,19. Une relation pratique lie, en valeur moyenne, le niveau kéraunique et la densité de foudroiement.

$$N \approx 0,143N_k \quad (3.33)$$

3.4. Nombre de coups de foudre sur une ligne (NI)

Le nombre de coups de foudre touchant une ligne électrique, par année et par kilomètre, de hauteur moyenne h en fonction du niveau kéraunique est donné par la formule empirique :

$$NI = N_k \frac{\sqrt{h}}{400} \quad (3.34)$$

3.5. Distance d'amorçage

Des mesures expérimentales ont permis de définir une distance d'amorçage d lors d'un coup de foudre, entre la tête du traceur et le sol. Cette distance est liée au courant de foudre par la relation :

$$d = 6,7 \times I^{0,8} \quad (3.35)$$

4. Coup de foudre sur une ligne aérienne

4.1. Coup de foudre sur un conducteur de phase

Lorsque le coup de foudre tombe sur le conducteur de phase d'une ligne, le courant $I(t)$ dans le conducteur se répartit de part et d'autre du point d'impact le long du conducteur. Il entraîne avec lui une onde de tension dont la valeur est :

$$U_c = \frac{1}{2} I Z_c \quad (3.36)$$

Avec : Z_c impédance d'onde de la ligne.

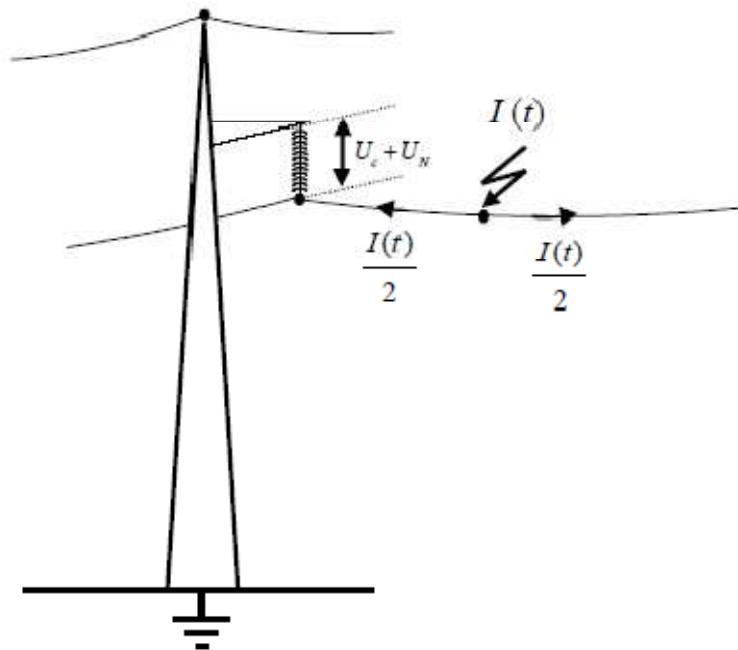


Figure 3.6 : Coup de foudre sur un conducteur de phase d'une ligne aérienne

L'onde de surtension est identique à celle du courant de foudre, néanmoins elle peut être modifiée par la propagation, l'effet couronne ou par les réflexions aux extrémités.

En un point donné de la ligne, par exemple au premier pylône rencontré par l'onde, la tension croît jusqu'à ce que se produise éventuellement l'amorçage de la chaîne d'isolateurs, si la condition suivante est vérifiée :

$$U_c + U_N \geq U_{cr} \quad (3.37)$$

Où :

U_N : Tension crête entre la phase et la ferrure du pylône de la ligne (kV),

U_{cr} : Tension critique d'amorçage de la chaîne d'isolateur (kV).

Compte tenu des distances entre conducteurs de phase et ferrures des pylônes, il existe donc, pour chaque échelon de tension, un courant critique I_c au-dessous duquel il n'y a pas d'amorçage sur coup direct sur un conducteur de phase de la ligne.

Pour éviter ces amorçages par défaut monophasé sur une ligne électrique, on place au-dessus des conducteurs de phase, des câbles de garde, directement liés au pylône, pour drainer les coups de foudre vers eux et écouler les courants de foudre vers la terre.

4.2. Coup de foudre sur le câble de garde

La foudre peut tomber à n'importe quel lieu sur la portée du câble de garde.

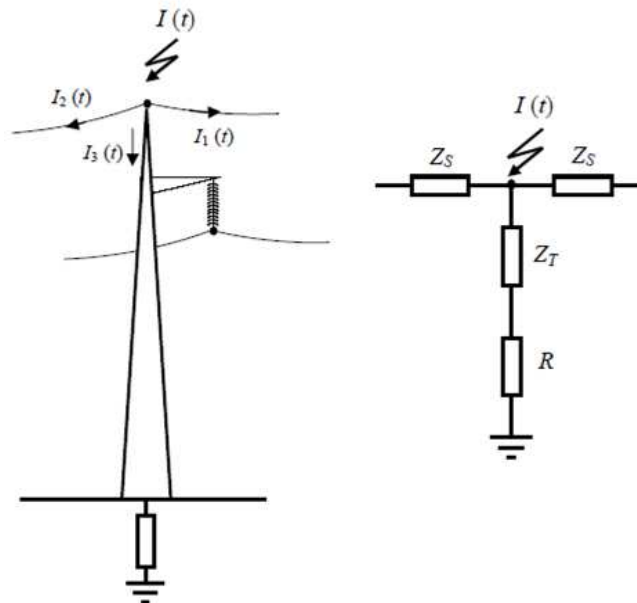


Figure 3.7 : Coup de foudre au sommet d'un pylône d'une ligne aérienne.

Comme représenté à la figure ci-dessus, lorsque la foudre tombe sur le sommet d'un pylône d'une ligne électrique équipée d'un câble de garde, l'onde de courant se divise en trois parties principales.

Les deux ondes se propagent de part et d'autre du câble de garde et une autre partie se propage à travers le pylône qui est mise à la terre à travers une impédance. Le câble de garde doit être soigneusement placé par rapport aux conducteurs de phase. La figure ci-dessous montre les zones protégée et non protégée d'un câble de garde.

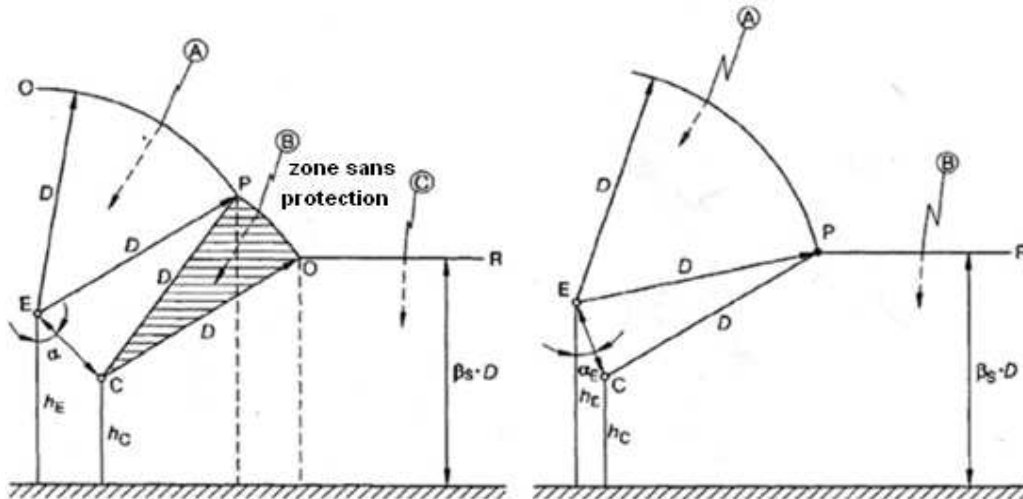


Figure 3.8 : Zone de protection du câble de garde d'une ligne aérienne

La protection par câbles de garde est efficace si :

- il y a un niveau d'isolation suffisant entre le câble de garde et les conducteurs de phase,
- l'impédance de mise à la terre des pylônes est faible (inférieure à quelques Ω).

La tension apparaissant aux bornes de la chaîne d'isolateurs dépend alors de la résistance de la prise de terre, de l'impédance d'onde du pylône et de la manière dont le courant de foudre se répartit, par l'intermédiaire des câbles, sur les supports les plus proches. Lorsque cette tension atteint la limite d'amorçage de l'isolement de la ligne, il se produit un amorçage en retour

a) Tension au sommet du pylône

La tension au sommet du pylône, tenant compte des réflexions successives de l'onde à travers le pylône est donnée par la relation :

$$V_T(t) = V_1(t) + V_2(t) \quad (3.38)$$

Avec $V_1(t) = Z_I I(t)$

Où $V_1(t)$: tension due à l'onde de courant de la foudre rencontrant l'impédance équivalente Z_I .

$$Z_I = \frac{Z_S Z_T}{Z_S + 2Z_T} \quad (3.39)$$

Z_S : impédance d'onde du pylône (Ω),

Z_T : impédance d'onde du câble de garde (Ω).

Et $V_2(t)$ est la tension due à l'onde de courant de la foudre réfléchiée à travers le pylône.

$$V_2(t) = -Z_w \sum_{n=1}^N \left[I(t - 2n\tau_T) \psi^{n-1} \right] \quad (3.40)$$

Avec Z_w l'impédance d'onde constante sur laquelle toutes les composantes du courant opèrent pour contribuer à la tension au sommet du pylône, qui est donnée par :

$$Z_w \left(\frac{2Z_S^2 Z_T}{(Z_S + 2Z_T)^2} \right) \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (3.41)$$

Où

$$\tau_T = \frac{h_t}{c}$$

τ_T : Temps de propagation de l'onde du sommet à la base du pylône (s),

h_t : Hauteur du pylône (m),

c : Vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 \times 10^8$ m/s),

N : Plus grand nombre entier inférieur ou égal à $\frac{t}{2\tau_T}$,

R : Impédance de mise à la terre du pylône (Ω),

$$\psi : \text{Facteur d'amortissement des ondes réfléchies} : \psi = \left(\frac{2Z_T - Z_S}{Z_S + 2Z_T} \right) \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (3.42)$$

b) Tension au pied du pylône

La tension au pied du pylône à un temps $t + \tau_T$ est due aux composantes ci-dessous :

- l'onde de tension qui arrive au pied du pylône au temps t et qui est réfractée ;
- les ondes de tension dues aux différentes réflexions à la tête du pylône aux temps $t - 2n\tau_T$ et qui sont réfractées.

Elle est donnée par la relation :

$$V_R(t + \tau_T) = \alpha_R Z_I I(t) + \alpha_R Z_I \sum_{n=1}^N I(t - 2n\tau_T) \psi^n \quad (3.46)$$

α_R est le coefficient de réfraction de l'onde à travers la résistance de terre du pylône.

$$\alpha_R = \frac{2R}{Z_T + R} \quad (3.47)$$

Chapitre 4 : PRISES DE TERRE DES POSTES

1. Objectif de la conception des réseaux de terre

Les objectifs prioritaires portent essentiellement sur la protection des personnes et des matériels tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'installation. Il assure aussi la réduction des perturbations sur les équipements électriques ou électroniques sensibles.

2. Prise de terre des postes

En plus des protections HTA coupe-circuit à fusibles ou disjoncteur et BT disjoncteur général, des mesures préventives doivent être prises pour parer aux conséquences de tout défaut interne ou externe pouvant engendrer des courants à la terre dangereux pour les personnes et le matériel. Ces mesures préventives sont essentiellement :

- l'interconnexion et la mise à la terre de toutes les masses du poste,
- la recherche d'une résistance de terre aussi faible que possible,
- la mise en œuvre, à l'entrée des postes alimentés en aérien, d'éclateur ou de parafoudre.

Selon la résistivité effective des sols, il sera prévu une ou plusieurs prises de terre installées à fond de fouille et toutes les masses seront ou ne seront pas interconnectées par une liaison équipotentielle.

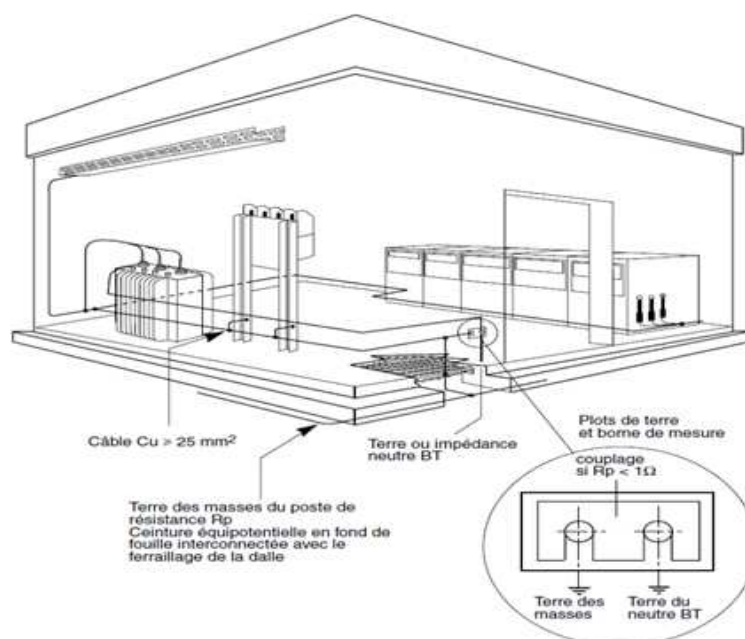


Figure 4.1: Schéma de mise à la terre d'une poste

Il existe trois types de prises de terre reliées aux :

- masses du poste interconnectant les parties métalliques du poste (ferrailage de la dalle, cellules MT, cuve du transformateur) sont reliées à une borne commune. Cette liaison est désignée par la lettre **p**,
- neutre du secondaire du transformateur HTA/BT toujours en étoile. Cette liaison est désignée par la lettre **n**,
- masses d'utilisation du réseau BT aval, désignées par la lettre **A**.

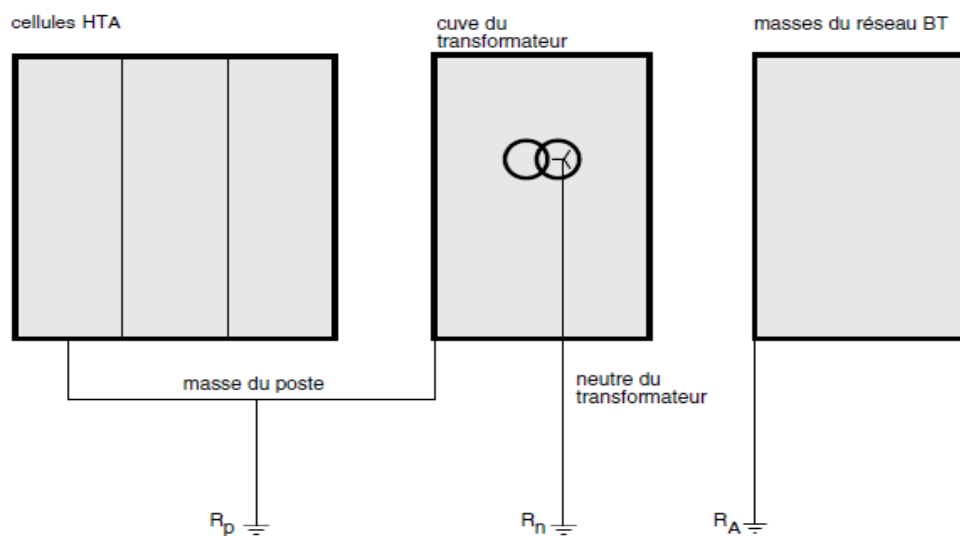


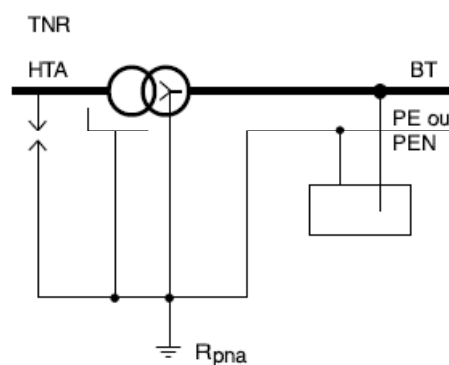
Figure 4.2 : Schéma de principe

3. Manifestation et identification du risque

3.1. Une seule mise à la terre commune au poste et à l'installation

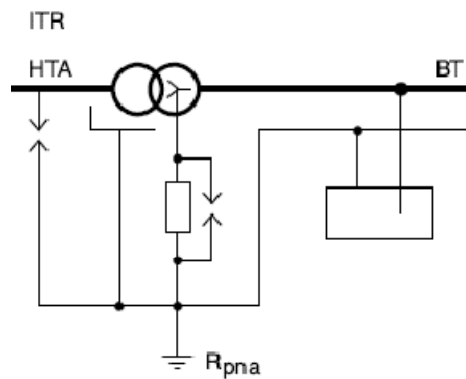
❖ Neutre relié à la terre T

- le courant de défaut s'écoule par R_{pna} ,
- montée en potentiel de l'ensemble des masses.



❖ **Neutre isolé ou impédant I**

- Risques nuls pour le matériel BT et les personnes si l'équipotentialité est totale dans toute l'installation.

❖ **Valeur maximale de la prise de terre du poste**

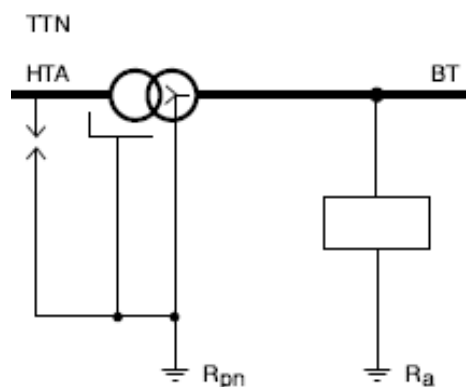
Pas de valeur prescrite mais les valeurs suivantes permettent de limiter la montée en potentiel de l'ensemble.

$I_m (A)$	$R_{pna}(\Omega)$
300	20
1000	10

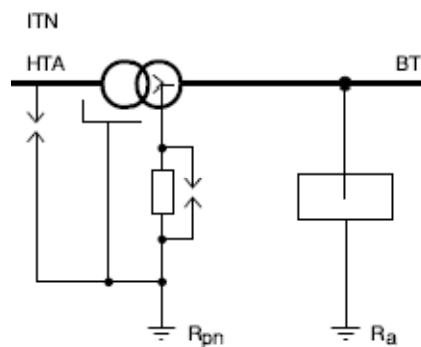
I_m = Intensité maximale du courant de premier défaut monophasé à la terre du réseau HTA alimentant le poste : 300 A pour réseaux aériens, 1000 A pour réseaux souterrains.

3.2. Une seule mise à la terre pour le poste mais distincte de la terre de l'installation

- le courant de défaut s'écoule par R_{pn} ,
- montée en potentiel des masses du poste et du réseau BT par rapport aux masses des utilisations.



- Risques de claquage pour les matériels alimentés par le réseau BT

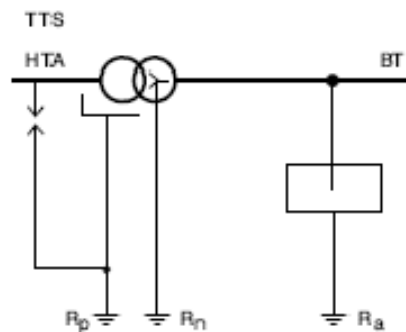


❖ Valeur maximale de la prise de terre du poste

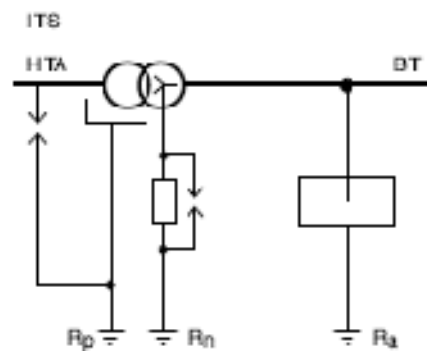
$I_m (A)$	$R_{pn}(\Omega)$
300	3
1000	1

3.3. Mises à la terre distinctes entre les masses du poste, le neutre BT et l'installation

- Le courant de défaut s'écoule par R_p
- montée en potentiel des masses du poste par rapport au réseau BT accroché à R_n .



- Risques de claquage des matériels BT du poste



❖ Valeur maximale de la prise de terre du poste

Selon I_m et U_{tp} , tension de tenue 1 minute 50 Hz des matériels à BT du poste.

I_m (A)	U_{tp} [kV]		
	2	4	10
	$R_p(\Omega)$		
300	4	8	20
1000	1	3	10

U_{tp} : Tension de tenue à la fréquence industrielle des matériels BT du poste.

Pour les déterminations de la résistance maximum de prise de terre, certains matériels à BT du poste de tenue inférieure à 10 kV 50 Hz 1 minute peuvent ne pas être pris en compte s'ils sont isolés des masses du poste, entre autres par l'intermédiaire d'un transformateur à enroulement séparé tenant les 10 kV 50 Hz 1 minute.

4. Prises de terre des réseaux aériens de distribution

4.1. Transformateurs MT/BT sur poteau et interrupteur aériens

La protection des postes MT/BT contre les surtensions doit être réalisée de manière à éviter les avaries des transformateurs et à empêcher l'apparition d'un défaut entre MT et 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 de potentiel par rapport à la terre du neutre MT est la même sur toute l'étendue du réseau. Tout défaut à la terre simple ou double se produisant en un ou plusieurs des points quelconques d'un réseau a pour conséquence d'élèver le potentiel par rapport à la terre des enroulements MT de tous les transformateurs MT/BT du réseau. Il n'y a aucune contrainte appliquée entre les enroulements BT et les masses, sauf dans le cas où le disjoncteur BT est ouvert, ce qui sépare les enroulements BT de la mise à la terre du neutre BT et permet une certaine élévation de tension de ces enroulements par capacité entre enroulements MT et BT.

La séparation ou l'interconnexion des masses MT et du neutre BT sont deux solutions qui présentent chacune leurs avantages et inconvénients.

Tableau 4.1 : Avantage et inconvénient de la séparation ou l'interconnexion des masses MT et du neutre BT

	Interconnexion	Séparation
Avantage	Supprimer toute contrainte électrique entre les enroulements BT et la cuve des transformateurs	Découpler totalement les masses MT du neutre BT Eviter de transmettre les montées en potentiel de la MT vers les clients.
Inconvénient	Transmettre sur le neutre BT l'intégralité de la montée en potentiel des masses MT, ce qui augmente les risque de dégât sur les installations intérieures des clients.	Contraintes diélectriques être très élevées au point de dépasser la tenue de matériel.

La figure ci-dessous présente un schéma pratique où l'interconnexion est réalisée au moyen de parafoudres.

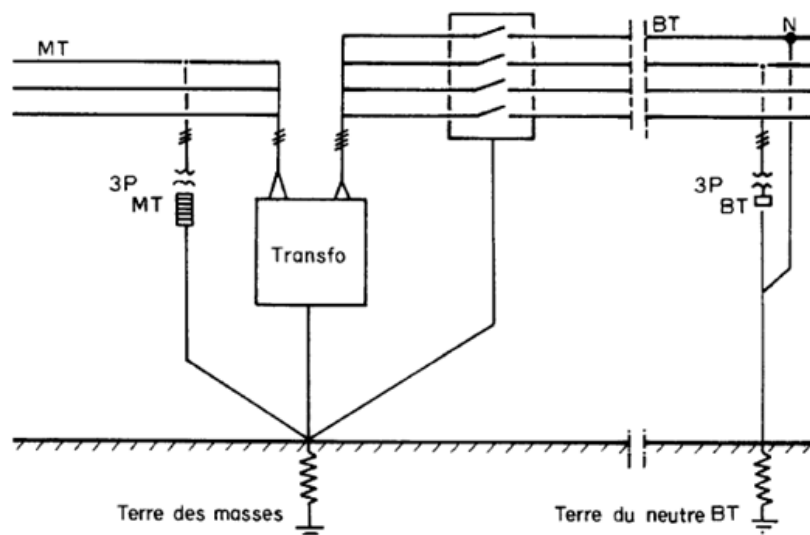


Figure 4.3: Schéma de l'interconnexion au moyen de parafoudres

4.2. Prise de terre d'un poste sur poteau

La prise de terre d'un poste sur poteau ou d'un interrupteur aérien doit être établie soigneusement afin d'assurer une bonne équipotentialité au voisinage du poteau et en particulier entre la commande manuelle et la plate forme de manœuvre au pied du poteau.

A cet effet, la prise de terre doit comporter une ceinture de terre d'environ 1 mètre de rayon enfouie à faible profondeur 30 à 40 cm de manière à supprimer la possibilité d'apparition d'une tension de contact mains-pieds élevée.

Dans le cas d'un sol de forte résistivité, on mettra en place une seconde ceinture de terre concentrique, on allongera les conducteurs rayonnants et on augmentera leur nombre afin de réduire la résistance de terre, l'impédance d'onde et les tensions de pas. Au besoin on améliorera encore la situation par un traitement du sol qui réduira fortement sa résistivité avec une durée d'efficacité susceptible d'atteindre une dizaine d'années.

4.3. Les parafoudres

Le parafoudre est un dispositif installé dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions transitoires et la limitation de la durée et de l'amplitude des courants de suite.



Figure 4.4 : Parafoudre

a) Choix de parafoudre

Les parafoudres doit :

- assurer un désamorçage certain à une valeur de la tension incident au plus égale au niveau de la protection de l'installation,
- être résistant pour permettre plusieurs fonctionnements sans que des entretiens soit nécessaire,
- assure un désamorçage certain à une tension au moins égale au niveau de protection à la fréquence industrielle pour éviter l'entretien indéfinie de l'arc de décharge par la tension de réseau.

b) Les paramètres du parafoudre

- Tension nominale : valeur max de la tension efficace à fréquence industrielle admissible, entre ces bornes de ligne et de terre ne présentent aucun risque d'amorçage.
- Tension résiduelle : tension à la borne du parafoudre pendant le passage du courant de décharge.

- Tension d'amorçage à fréquence industrielle : valeur efficace de la plus basse tension à fréquence industrielle qui est appliquée entre les bornes des parafoudres provoquant l'amorçage.
- Tension d'amorçage au choc : valeur la plus élevée de la tension qui est atteint avant le passage du courant de décharge quand une onde est appliquée entre ces bornes.
- Courant de décharge : courant écoulé par le parafoudre après un amorçage dû à une onde de tension.
- Courant de suite : courant débité par les réseaux et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge.

4.4. Les éclateurs

C'est un dispositif de limitation de surtension comportant un intervalle d'éclatement d'air libre entre une électrode sous-tension et une électrode reliée à la terre.



Figure 4.5 : Eclateur avec anti- oiseau

a) Domaine d'utilisation de l'éclateur

Les éclateurs peuvent être utilisés en tant que :

- dispositif de protection d'une poste,
- dispositif de localisation d'arc.

Selon la tension de service, pour des valeurs de résistance de .MALT élevées, remplacées par des parafoudres,

b) Limite d'utilisation de l'éclateur

L'éclateur est inacceptable du point de vue de la continuité de service car sa présence accroît notablement le nombre de défaut dans la mesure où les amorçages ne s'atteignent pas automatiquement. En outre, la tension d'amorçage de l'éclateur est très dispersés car dépendant des conditions atmosphériques de mesure des électrodes. Ce qui entraîne une protection moins précise.

4.5. Avantage des parafoudres MT sur l'éclateur

La protection contre les surtensions des postes MT/BT est plus efficacement réalisée avec des parafoudres.

Lorsque la foudre atteint une ligne MT à proximité d'un poste de transformation MT/BT protégé par éclateurs le courant de décharge des éclateurs s'écoule par la prise de terre. Le potentiel de la prise de terre et des masses qui y sont reliées s'élève par rapport aux circuits BT. Un amorçage se produit alors entre les masses et les circuits BT.

Les éclateurs laissent donc passer les surtensions sur les circuits BT. 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.

Les parafoudres ont l'avantage de limiter le courant de décharge donc les montées de potentiel des prises de terre. Ils sont capables également de couper leur courant de suite en moins d'une alternance limitant ainsi les risques chez les abonnés BT.

L'interrupteur du courant de suite des parafoudres a pour autre conséquence de limiter le nombre de coupures lors des orages d'où une amélioration considérable de la qualité de service.

Actuellement, on protège les postes MT/BT par des éclateurs reliés à la terre des masses. Toutefois, dans les zones où il est impossible d'obtenir économiquement des prises de terre de valeur inférieure à 30 Ohms ainsi que dans les zones particulièrement exposées aux risques de foudre, la protection est réalisée par un jeu de parafoudres dont la borne de terre est reliée à la prise de terre des masses.

4.6. Mise à la terre des installations de la clientèle

Les surtensions dues à la foudre sur les lignes MT et passant sur le réseau BT par induction électrostatique et électromagnétique entre les enroulements MT et BT des transformateurs ne sont généralement pas dangereuses pour les installations des clients BT du fait de leur atténuation par la plupart des lignes BT.

Par contre, le passage du courant de défaut de réseau MT sur le réseau BT par amorçage en retour dans le poste MT/BT peut avoir des conséquences redoutables. La mise à la terre de neutre en de nombreux points des réseaux BT et la mise à la terre simultanée des conducteurs de phase par parafoudres sur la même prise de terre est une excellente mesure de protection. Mais, seulement dans la limite où de tels ensembles sont assez nombreux et où les prises de terre ont une résistance et une impédance au choc faible.

La protection des installations de la clientèle peut être améliorée grâce aux mesures suivantes :

- réalisation d'un réseau de terre équipotentiel englobant l'ensemble des bâtiments ;
- mise à la terre du neutre BT du client à travers un parafoudre qui n'entre en action que lors de surtension ;
- protection des phases BT par parafoudres.

On peut également protéger des installations de clients BT contre la foudre en reliant la prise de terre de l'installation R_a à celle des parafoudres R_T , comme le montre la figure ci-dessous.

Dans ces conditions, la différence de potentiel transitoire entre les conducteurs de phase et la masse des appareils est toujours limitée au niveau de protection des parafoudres BT et tout risque d'amorçage à la masse est éliminé. Il convient cependant de noter que la protection des personnes n'est pleinement assurée que si la prise de terre de l'installation est vraiment équipotentielle.

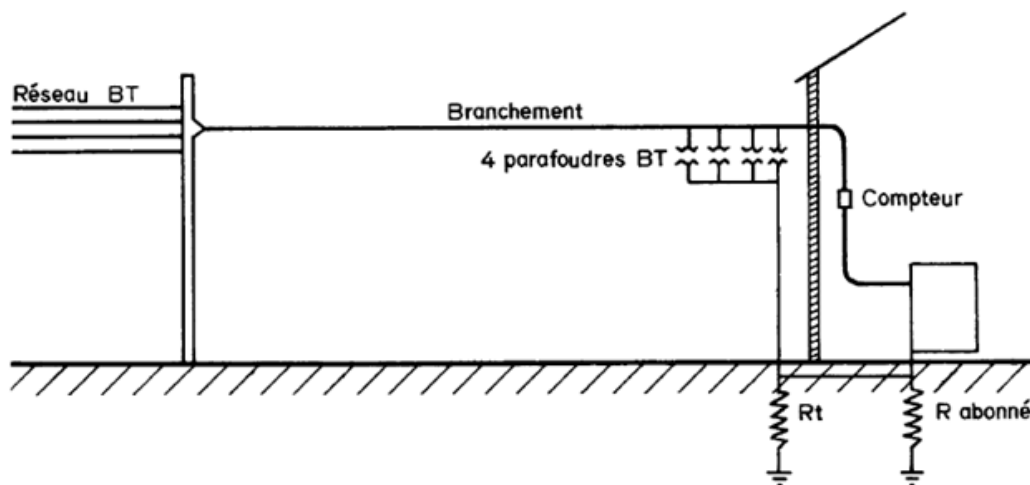


Figure 4.6 : Exemple de protection d'un branchement de client BT

Chapitre 5 : CONCEPTION DU LOGICIEL

Les techniques de programmation n'ont cessé de progresser depuis l'époque de la programmation en langage binaire à nos jours. Cette évolution a toujours été dictée par le besoin de concevoir et de maintenir des applications toujours plus complexes.

Un logiciel est un ensemble de programmes, qui permet à un ordinateur ou à un système informatique d'assurer une tâche ou une fonction en particulier.

1. But

C'est déterminer la résistance d'une mise à la terre pour assurer et maintenir à tout moment la sécurité des biens et des personnes. Dans ce cas, il faut donc écouler les courants de défaut dans le sol et maintenir un potentiel de référence.

2. Modélisation de logiciel

La modélisation de notre logiciel se fait avec le diagramme de cas d'utilisation et le diagramme de séquence. Ces diagrammes ont pour but de faire des simulations avant de construire un système et de générer automatiquement la partie logiciel d'un système.

2.1. Diagramme de cas d'utilisation

Ce diagramme permet de recueillir, d'analyser et d'organiser les besoins, et de recenser les grandes fonctionnalités d'un système. Il s'agit de la première étape UML (Unified Modeling Language en anglais, soit langage de modélisation objet unifié) d'analyse d'un système.

Il modélise les fonctionnalités attendues du système, les interfaces du système avec l'extérieur et de fait les limites du système étudié par rapport à l'extérieur.

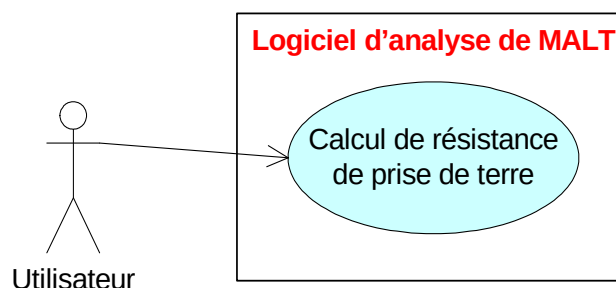


Figure 5.1 : Diagramme de cas d'utilisation du logiciel

2.2. Diagramme de séquence

Les principales informations contenues dans un diagramme de séquence sont les messages échangés entre les lignes de vie, présentés dans un ordre chronologique. C'est-à-dire ce diagramme est utilisé pour d'écrire le déroulement d'une interaction, entre l'utilisateur et le système, en mettant en évidence la dimension temporelle de celle-ci.

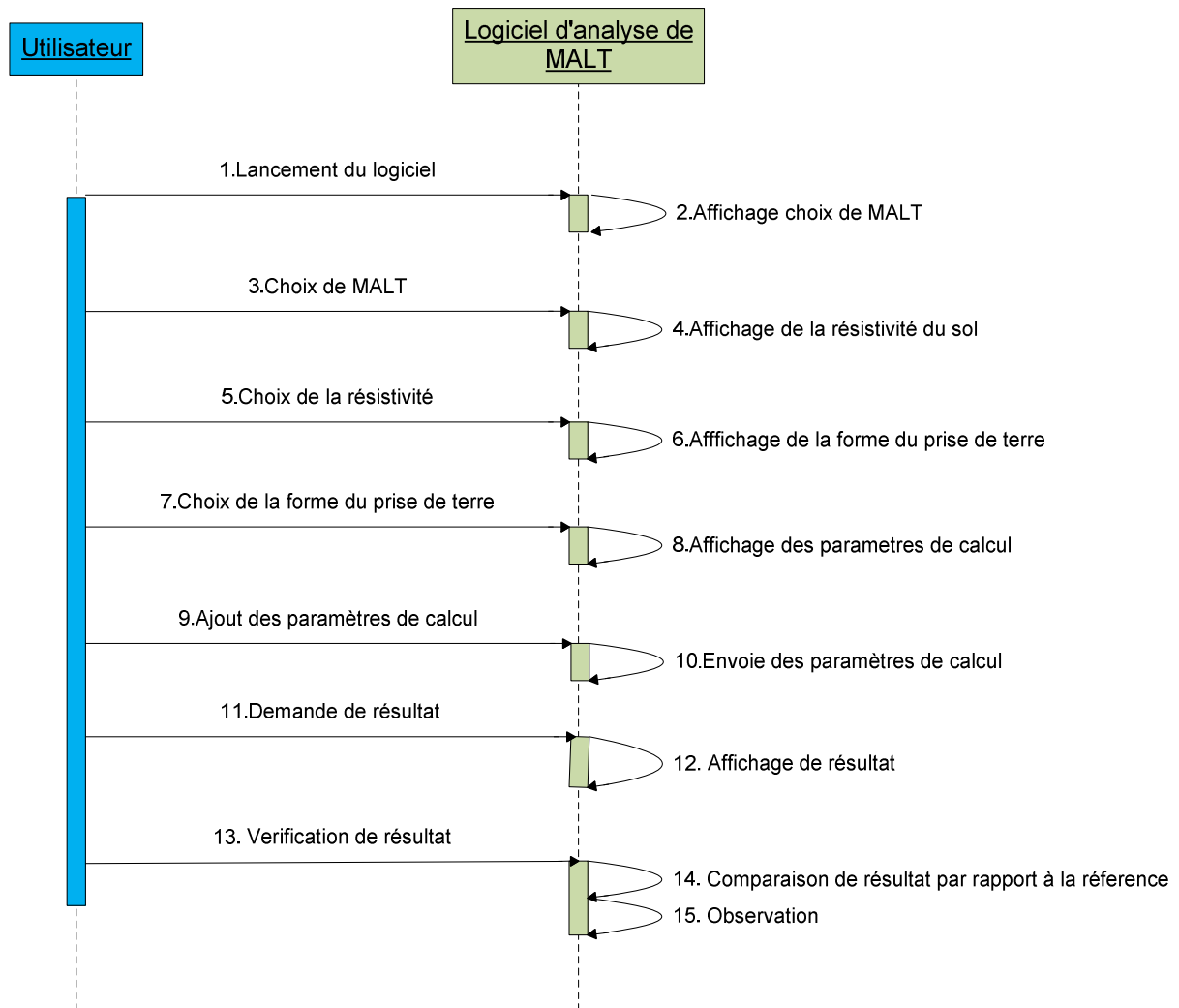


Figure 5.2 : Diagramme de séquence

2.3. Organigramme

C'est l'organigramme général de l'enchaînement des opérations d'un programme dans l'analyse et la détermination des résistances d'une mise à la terre.

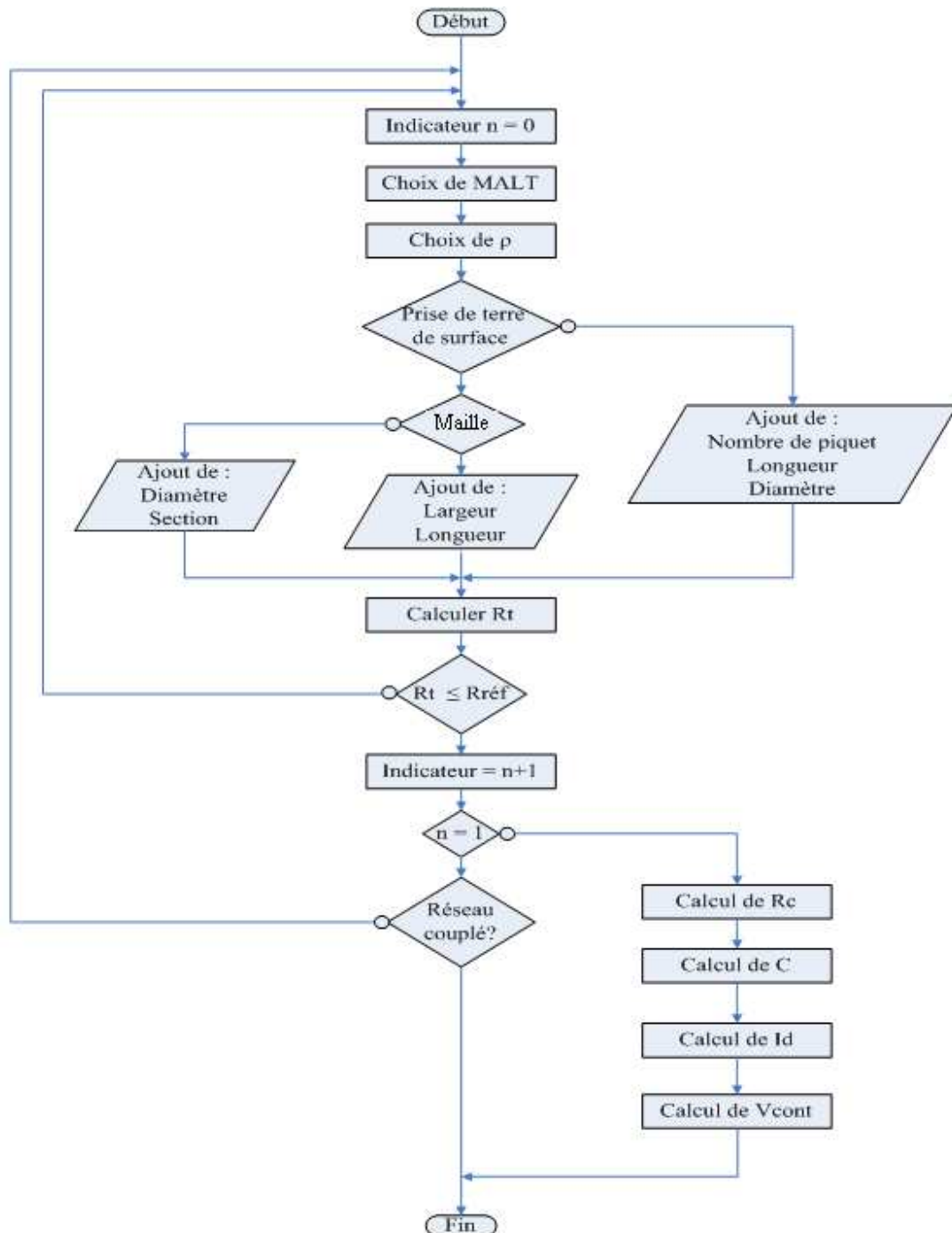


Figure 5.3 : Organigramme général

3. Choix du langage de programmation

Divers types de langage de programmation existent de nos jours pouvant résoudre les problèmes de calcul scientifique, par exemple : le Turbo Pascal, le Delphi, le C++ Builder, le Matlab, Fortran, Java, etc.... La facilité d'utilisation du logiciel de programmation fait partie du choix.

Pour réaliser ce travail, on a choisi le langage Delphi version 7 comme langage de programmation. Delphi est un outil de développement d'application Windows facile à manipuler, lorsqu'on ouvre un nouveau projet, Delphi affiche la fenêtre principale permettant de contrôler la conception et l'exécution du projet. Elle contient la barre de menu, la barre d'outils, la palette des composantes, l'inspecteur d'objet et la fiche principale du projet ou **Form** qui est fait pour créer l'interface utilisateur. L'inspecteur d'objet nous permet de modifier la valeur des propriétés de la fiche et des composants qu'elle contient. Lors du développement des propriétés, c'est Delphi qui met à jour le code source. Différentes modules y sont intégrés pour développer les applications.

4. Présentation du logiciel

Ce présent logiciel est un outil d'analyse de système de mise à la terre. Le programme calculera la valeur de la résistance des prises de terre dans le respect de la sécurité des personnes et des équipements électriques, le couplage entre deux résistances de prise de terre s'il existe et le courant de défaut ainsi que la tension de contact. Tous ces valeurs sont vérifiées après chaque opération à l'aide des valeurs admissibles correspondants aux normes exigées par l'installation électrique. L'utilisateur peut aussi imprimer ou enregistrer ces valeurs par l'intermédiaire du menu fichier. Il y a aussi le bouton aide ? , qui permet à l'utilisateur d'accéder à la manuelle d'utilisation et aux principes de base de tous les calculs.

Ce logiciel a six interfaces dont la première est l'interface d'accueil qui n'a qu'un seul bouton et l'adresse électronique et le contact du propriétaire. Ce bouton nous permet d'accéder au contenu du logiciel.



Figure 5.4 : Interface d'accueil du logiciel

La deuxième interface, c'est l'interface de calcul de résistance de la prise de terre, là où on introduit tous les paramètres nécessaires au calcul.

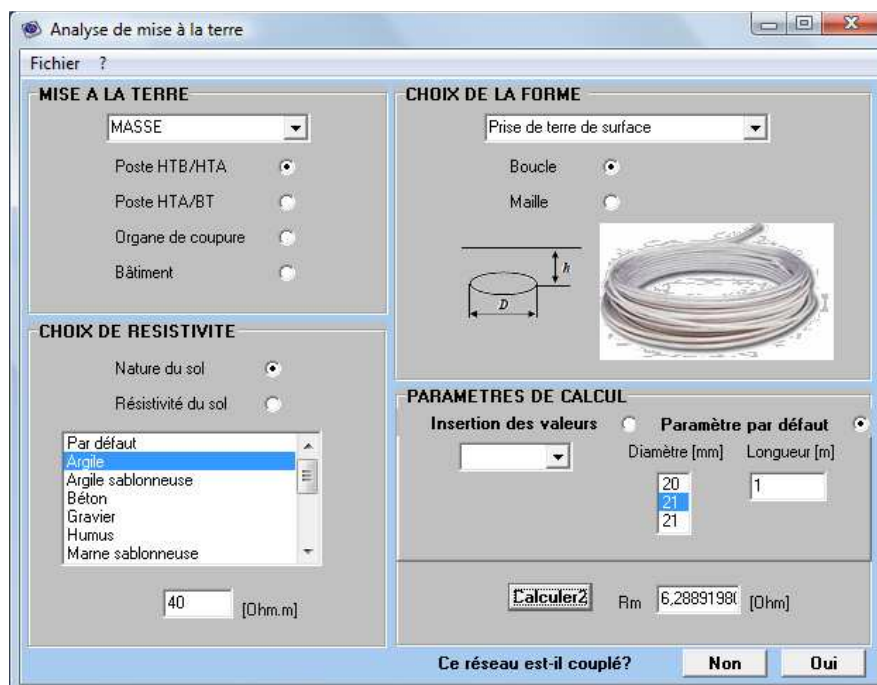


Figure 5.5 : Calcul de résistance de prise de terre

Il y a aussi l'interface une interface qui contient les tableaux des valeurs de référence avec une fenêtre qui résume les valeurs à comparer.

The screenshot shows a software window titled 'Analyse de mise à la terre'. Inside, there's a menu bar with 'Fichier ?'. Below it is a section titled 'VALEURS DE REFERENCES' containing a table. At the bottom left, there's a 'Résultat' section with a text box showing calculated values. At the bottom right, there are two buttons: '< Retour' and 'Suivant >'.

Mise à la terre	Valeur de la résistance de la prise de terre	Éléments fonctionnels
Masse	$R \leq 1 \text{ Ohm}$	Postes HTB/HTA
	$R \leq 30 \text{ Ohms}$	
	$1 \leq R \leq 30 \text{ Ohms}$	Postes HTB/BT
	$R \leq 37 \text{ Ohms}$	Terre pour habitations avec DDR 650 mA
	$R \leq 48 \text{ Ohms}$	Terre pour habitations avec DDR 500 mA
	$R \leq 80 \text{ Ohms}$	Terre pour habitations avec DDR 300 mA
Neutre	$R \leq 15 \text{ Ohms}$	Réseau BT
	5 Ohms	Neutre HTA mis à la terre par impédance 1000 A

Résultat
 a=100[Ohm.m]
 n=Edit3
 Ra=11,609[Ohm]

< Retour Suivant >

Figure 5.6 : Calcul de résistance de prise de terre de masse et du neutre.

Après avoir comparé la résistance de prise de terre calculée par rapport à la référence une petite onglet s'ouvre et demande la tâche à faire. Quand la valeur de la résistance calculée est admissible, il demande l'opération suivante

Ce réseau est-il couplé? **Non** **Oui**

L'appui sur le bouton **oui** vous permet de poursuivre le calcul par la détermination de la résistance de couplage et le coefficient de couplage.

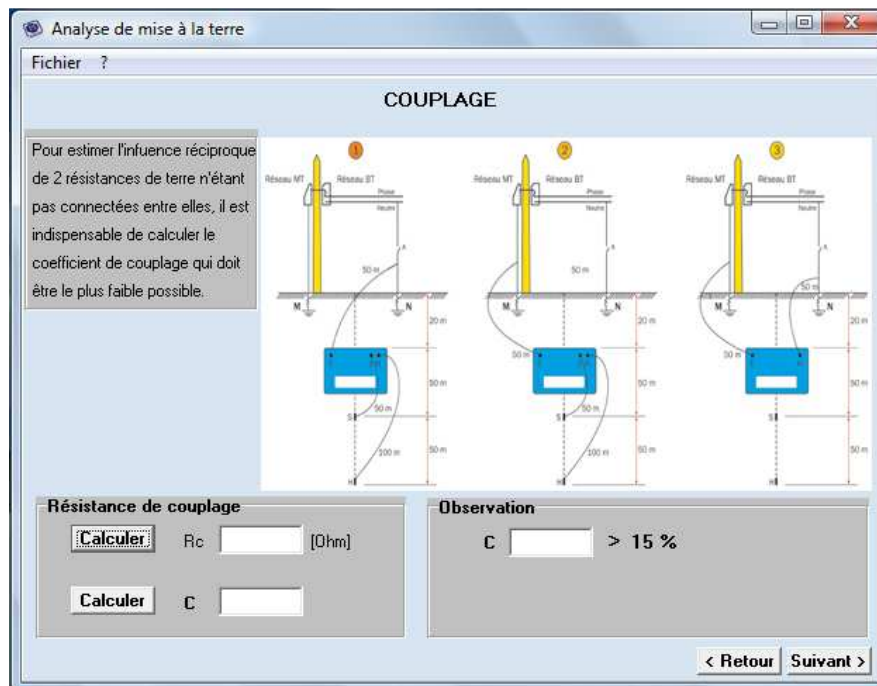


Figure 5.7 : Couplage de la résistance de terre

Lorsque la prise de terre du neutre est couplée à la prise de terre des masses d'utilisation tel que les habitations, le calcul du courant de défaut et de tension de contact est obligatoire pour vérifier l'isolement des appareils.

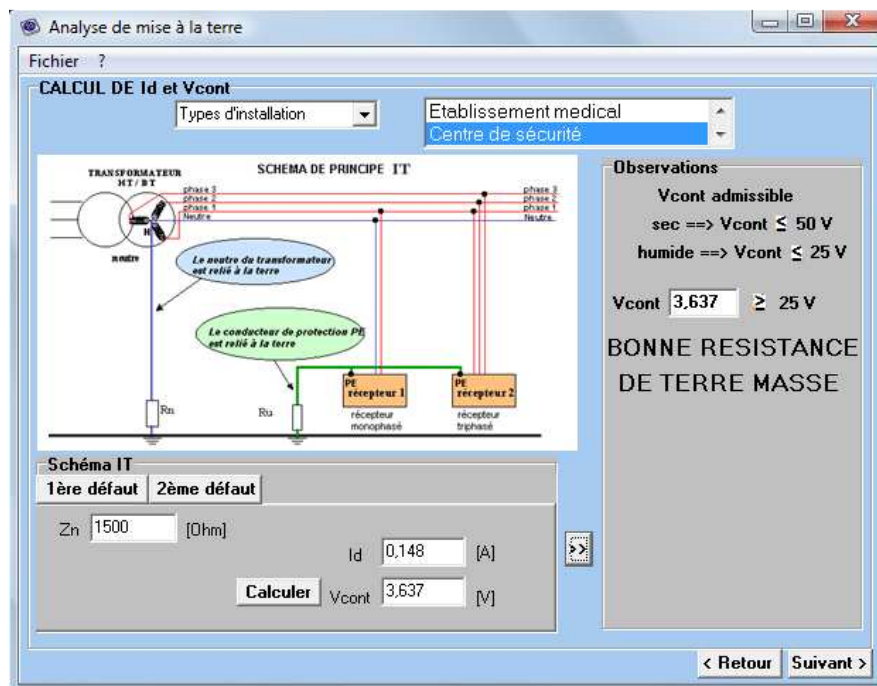


Figure 5.8 : Calcul de courant de défaut et tension de contact

Quand tous ces opérations sont terminées, les résultats des calculs sont affichés dans une fiche à la sixième interface afin que l'utilisateur puissent l'imprimer ou le sauvegarder.

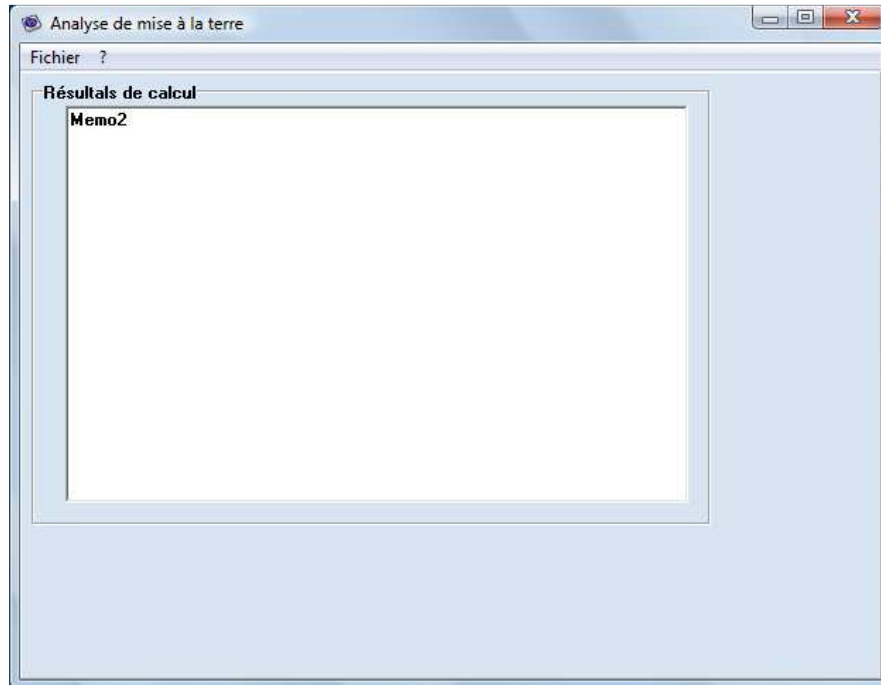
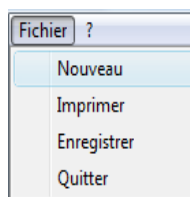


Figure 5.9 : Fenêtre de sauvegarde.

5. Manuel d'utilisation du logiciel

Une fois que vous exécutez le logiciel, la fenêtre d'accueil apparaît. L'appui sur le bouton **Lancer** vous permet de montrer l'interface suivante, qui explicite une chose dont le logiciel va traiter. Pour déterminer la résistance de terre sur ce logiciel, il faut suivre les tâches qu'il demande. Ceci commence par le choix de l'élément à mettre à la terre suivi du choix de la résistivité du sol et de la forme de la prise de terre. Avant de valider l'opération par le bouton **Calculer**, il est obligatoire de compléter les paramètres requises pour le calcul.

La vérification de ces valeurs est effectuée à l'aide des tableaux des valeurs de référence, cette fenêtre apparaît tant qu'on appui sur le bouton **Suivant >**. Le bouton **< Retour** vous permet de retourner à la tâche précédente, ainsi de suite. On peut imprimer ou enregistrer les résultats en passant par le menu Fichier.



On a vu qu'une partie du logiciel, alors essayez de choisir les autres paramètres pour vos choix.

6. Conclusion

L'analyse de mise à la terre est une étude complexe qui nécessite d'étudier plusieurs éléments.

On peut donc utiliser ce logiciel en faisant le choix de résistivité du sol à partir de la valeur ou de nature du sol connu et on obtient des valeurs qui répondent aux critères de la norme (C15-100) de l'installation exigeant la sécurité des personnes et de biens ainsi que la continuité de service.

Mais ce logiciel n'est qu'un commencement, et on peut l'améliorer par des simulations 3D sur le module du sol pour déterminer les caractéristiques du sol par le biais des mesures de résistivités du terrain.

Chapitre 6 : IMPLICATION PEDAGOGIQUE

Fiche pédagogique N°1

Titre de la leçon : MESURE D'UNE RESISTANCE

Niveau : 1^{ère} année

Secteur : industriel

Matière : Essai et Mesure

Spécialité : TMEL

Durée : 4 heures

But: A l'issue de cette séance, les élèves peuvent réaliser des mesures des résistances par un ampèremètre numérique, analogique et par la méthode volt-ampéremétrique.

Pré requis : Utilisation des voltmètres et ampèremètres.

Plan de la leçon

1. INTRODUCTION
2. METHODES DIRECTES
 - 2.1. Ohmmètre à déviation
 - 2.1.1. Schéma de principe
 - 2.1.2. Principe de fonctionnement
 - 2.1.3. Mode opératoire
 - 2.2. Ohmmètre numérique
3. METHODES INDIRECTES
 - 3.1. Méthode volt-ampéremétrique
 - a. Pour le montage amont
 - b. Pour le montage aval
 - 3.2. Méthode des ponts
 - 3.2.1. Pont de WHEATSTONE
 - a. Principe
 - b. Mode opératoire
 - 3.2.2. Pont double de THOMSON
 - a. Principe
 - b. Mode opératoire

1. INTRODUCTION

Dans la pratique, il est indispensable pour assurer la maintenance et le dépannage des appareils et équipements électriques et électroniques de contrôler la continuité d'un circuit et de vérifier le niveau d'isolement d'une installation. Ces mesures et contrôles se divisent en deux grandes parties :

- **les méthodes directes** : elles sont généralement rapides et efficaces (les appareils utilisés sont portables et toujours prêtes pour des mesures rapides dans les installations et les circuits électriques et électroniques,
- **les méthodes indirectes** : elles se pratiquent généralement dans les laboratoires, à cause de leur caractère statique non portatif et offrent ainsi une meilleure précision.

2. METHODES DIRECTES

2.1. Ohmmètre à déviation

2.1.1. Schéma de principe

Le schéma de principe d'un ohmmètre analogique (à aiguille) est donné par la figure ci-dessous :

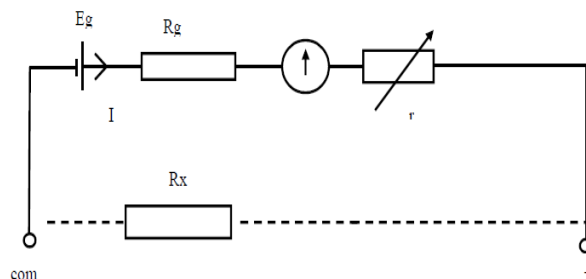


Figure 2.1 : Schéma de principe d'un ohmmètre à aiguille

L'ohmmètre à aiguille est constitué par un équipement à cadre mobile R_g , une résistance r pour le réglage externe du zéro, une pile interne de force électromotrice E_g alimentant le circuit et R_x la résistance à mesurer qui se branche entre les deux bornes de l'appareil.

2.1.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement consiste à mesurer la diminution du courant dans la boucle de mesure lorsqu'on introduit la résistance à mesurer R_x . En effet, le courant I parcourant le circuit est égal :

$$I = \frac{E_g}{R_g + r + R_x} \quad (2.1)$$

Or la déviation de l'aiguille de l'équipage à cadre mobile est proportionnelle à I . Donc on peut écrire d par la relation suivant:

$$d = k \cdot I \quad (2.2)$$

En introduisant (2.1) dans (2.2), on a :

$$d = k \cdot \frac{E_g}{R_g + r + R_x} \quad (2.3)$$

Si on court-circuite les bornes de l'appareil, il serait parcouru par un courant maximal I_g et la déviation de l'aiguille est donc maximale soit :

$$d_{cc} = k \cdot I_g = k \cdot \frac{E_g}{R_g + r} \quad (2.4)$$

Ces deux dernières équations permettent d'écrire :

$$\frac{d_{cc}}{d} = \frac{I_g}{I} = \frac{R_g + r + R_x}{R_g + r} = 1 + \frac{R_x}{R_g + r} \quad \text{Et} \quad R_x = k \cdot E_g \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_{cc}} \right) \quad (2.5)$$

Remarque :

- Le zéro de l'échelle d'un ohmmètre correspond à la déviation maximale de l'aiguille (cas d'un court circuit),
- La déviation nulle de l'aiguille correspond à une résistance infinie (les deux bornes de l'appareil sont à l'air libre).

2.1.3. Mode opératoire

La mesure se fait en deux étapes :

- On court-circuite les deux bornes de l'appareil et on agit sur la borne de réglage du zéro (résistance r) jusqu'à obtenir une déviation maximale, c'est à dire l'aiguille se place devant la graduation zéro de l'échelle de l'ohmmètre.
- On enlève le court-circuit et on branche la résistance à mesurer aux bornes de l'ohmmètre et on lit la déviation de l'aiguille qui correspond à la valeur de la résistance à mesurée.

La précision de cette méthode dépend de la précision des composants internes de l'appareil (E_g , R_g et r) qui est généralement entre 3% et 5%.

2.2. Ohmmètre numérique

L'ohmmètre numérique est constitué par un générateur électronique de courant et un voltmètre à courant continu dont l'indication est affichée d'une manière numérique (digitale).

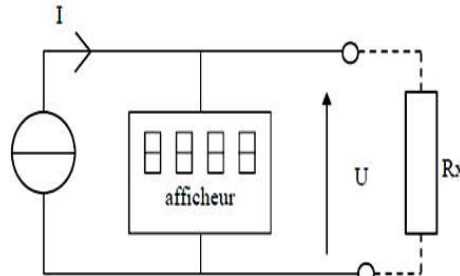


Figure 2.2 : Schéma de principe d'un ohmmètre numérique

Si le courant de mesure I est constant, on voit que la résistance inconnue R_x est directement proportionnelle à la tension U entre ses bornes. Il suffit alors de convertir l'indication du voltmètre en ohms. Les appareils actuels sont plus élaborés et utilisent des amplificateurs opérationnels, ce qui permet d'envoyer un courant de mesure plus faible et plus stable. La mesure est plus précise qu'en ohmmètre à aiguille.

3. METHODES INDIRECTES

3.1. Méthode volt-ampéremétrique

Par l'application de la loi d'ohm, on peut évaluer la valeur des résistances pendant leur fonctionnement. On applique une tension constante U aux bornes de la résistance à mesurer et par la suite on mesure le courant I et la tension U et on calcule la résistance $R_x = \frac{U}{I}$. Deux montages sont possibles pour appliquer cette méthode: le montage amont et le montage Aval.

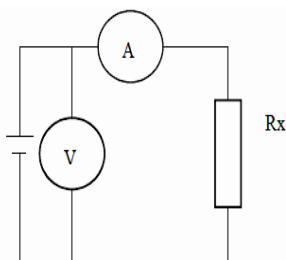


Figure 3.1 : montage amont

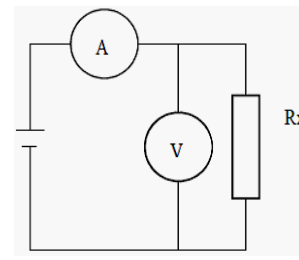


Figure 3.2 : montage aval

La précision de mesure de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et du montage de mesure (erreur méthodique).

a. Pour le montage amont :

$$Rx = \frac{U_{mes}}{I_{mes}} \quad (3.1)$$

$$\text{Or} \quad U_{mes} = U_x + r_a I \quad \text{et} \quad I_{mes} = I \quad (3.2)$$

$$\text{D'où} \quad Rx_{mes} = \frac{U_x}{I} + r_a$$

$$Rx_{mes} = Rx + r_a ; \Delta Rx = r_a \quad (3.3)$$

Avec r_a : la résistance interne de l'ampèremètre utilisé. ΔRx est d'autant plus faible que r_a est faible (tend vers 0).

b. Pour le montage aval :

$$U_{mes} = U_x \quad \text{Et} \quad I_{mes} = I + I_v \quad (3.4)$$

$$Rx_{mes} = \frac{U_x}{I + I_v} = \frac{1}{\frac{I}{U_x} + \frac{I_v}{U_{mes}}} \quad (3.5)$$

$$\Delta Rx = Rx_{mes} - Rx = \frac{R_x^2}{Rx + R_v} \quad \text{Avec } R_v \text{ la résistance interne du voltmètre utilisé.}$$

$$\frac{\Delta Rx}{Rx} = \frac{R_x}{Rx + R_v} \quad \text{est d'autant plus faible que } R_v \text{ est très grande.}$$

Remarque :

- Si on désire que l'incertitude méthodique du montage amont soit au plus égale à 1%, il faut que $R_x > 100 r_a$. Cette méthode est non valable pour des faibles résistances. Sur le plan pratique cette méthode est applicable pour des résistances supérieures à quelques centaines d'ohms ($\approx 500 \Omega$).
- Si on désire que l'incertitude méthodique du montage aval soit au plus égale à 1%, il faut que $R_v > 100 R_x$. Cette méthode est non valable pour des grandes résistances. Sur le plan pratique, cette méthode est applicable pour des résistances de quelques dizaines d'ohms jusqu'à quelques centaines d'ohms ($\approx 200 \Omega$).
- Entre 200Ω et 500Ω , les deux montages sont de performances comparables.

3.2. Méthode des ponts

3.2.1. Pont de WHEATSTONE

a. Principe

Ce dispositif permet une mesure rapide et précise des résistances, généralement dans le domaine des valeurs moyennes (de quelques Ω à quelques dizaines de $K\Omega$).

Le schéma de principe d'un tel pont est donné par la figure ci après :

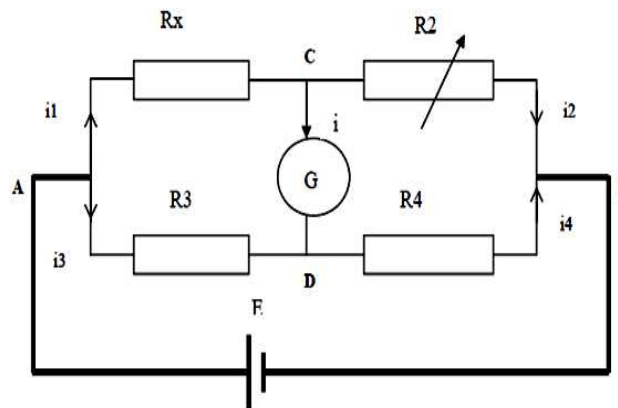


Figure 3.1 : Schéma de principe du pont de WHEATSTONE

Ce pont, constitué de 4 résistances et d'un galvanomètre, alimenté par une source de tension continue E. On agit sur la résistance variable R jusqu'à obtenir l'équilibre du pont ($i=0$ c'est à dire $U_{CD} = 0$ implique $U_c = U_d$), ce qui permet de déterminer la résistance inconnue R_x .

b. Mode opératoire

L'exploitation du pont se fait en deux étapes :

- On choisit le rapport $K = \frac{R_3}{R_4}$ de façon à avoir le maximum de chiffres significatif sur la mesure de R_x ,
- On règle R_2 jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (c'est à dire $i = 0$),
- On calcule $R_x = \frac{R_3}{R_4} R_2 = K R_2$.

3.2.2. Pont double de THOMSON

a. Principe

Le pont double de THOMSON est destiné à la mesure des faibles résistances (de 10^{-1} à $10^{-3} \Omega$) ce qui fait que même la résistance des fils de connexion peut fausser la mesure.

Pour éviter les incertitudes introduites par les fils de connexion et par les contacts (dont les résistances sont de l'ordre de quelques $m\Omega$), on emploie des résistances à 4 bornes constituées de 2 résistances jumelées liées mécaniquement selon le schéma de la figure 3.2 :

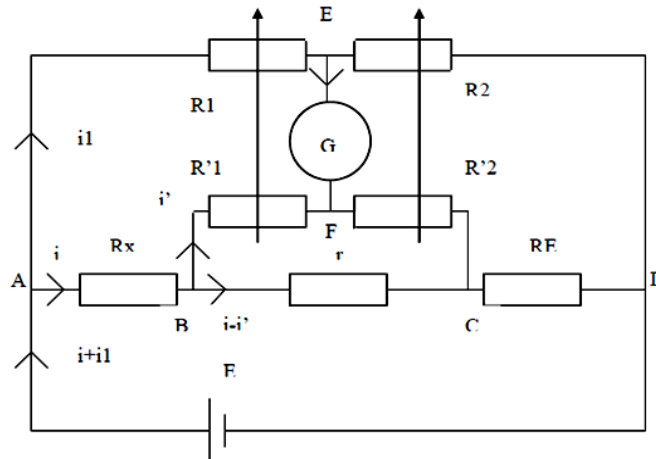


Figure 3.2 : Schéma de principe du pont de THOMSON

b. Mode opératoire

La mesure se fait en trois étapes :

- On choisit $R_2 = R'_2$,
- on fait varier $R_1 = R'_1$ jusqu'à obtenir l'équilibre du pont ($i_g = 0$),
- on calcule $R_x = R_F \cdot \frac{R_1}{R'_1}$.

Fiche pédagogique N°2**Titre de la leçon :** MESURE ET CALCUL D'UNE PRISE DE TERRE**Niveau :** 3^{ème} année**Secteur :** industriel**Matière :** Essai et Mesure**Spécialité :** TMEL**Durée :** 4 heures**But:** A l'issue de cette séance, les élèves peuvent calculer et mesurer la résistance d'une prise de terre.**Pré requis :**

- Schéma de liaison à la terre (sécurité des personnes, schéma TT, TN, IT)
- Mesure de résistance (méthodes direct, indirect, des ponts)

Plan de la leçon :

1. Objectif
2. Définition
3. Principe de fonctionnement
4. Constitution de la prise de terre
5. Calcul de la résistance et mesure de résistance de terre
 - 5.1. Résistivité des terrains
 - 5.2. calcul de résistance de prise de terre
 - 5.3. Mesure de résistance de terre
 - a. Mesure à la pince de terre.
 - b. Méthode des trois pôles – telluromètre.

1. Objectif

- Calculer une résistance de prise de terre
- Être capable de valider la conformité de la protection au moyen de mesurage précis.

2. Définition

Une prise de terre est constituée par une pièce ou un ensemble des pièces conductrices, enfouies dans le sol et assurant une liaison électrique avec la terre. C'est aussi un élément qui assure la sécurité des installations électriques et des personnes utilisatrices de ces installations.

Il existe deux grands types de prises de terre :

- celles devant éliminer des courants de foudre ;
- celles devant éliminer des courants industriels.

Dans ce dernier cas, la prise de terre n'est réellement efficace que lorsqu'elle est associée à un dispositif de coupure différentiel.

3. Principe de fonctionnement

L'écoulement d'un courant de terre s'effectue à travers les résistances de contact qui se séparent elles-mêmes en une infinité de résistances constituées par les éléments de contact de particules du sol. Au-delà d'une certaine distance le nombre de résistances de contact tend vers l'infini et la résistance équivalente devient pratiquement nulle, c'est la limite de la zone d'influence. La mise à la terre est réellement faite.

4. Constitution de la prise de terre

La résistance de la prise de terre dépend de sa forme, ses dimensions, la résistivité du terrain dans lequel elle est établie. Et la résistivité du terrain varie d'un point à un autre, suivant la profondeur, le taux d'humidité, la température. On doit établir les prises de terre de préférence dans les fonds de fouilles des bâtiments et en des endroits abrités de la sécheresse et du gel.

Les prises de terre ne doivent jamais être constituées de pièces métalliques plongées dans l'eau ni établies dans des pièces d'eau ou des rivières. La prise de terre est constituée d'une électrode en métal bon conducteur et non corrodable en bon contact avec le sol.

Cette électrode peut être :

- Soit un câble enterré en cuivre nu de 25 mm² de section au moins, ou en acier galvanisé d'au moins 95 mm² de section,
- Soit un câble en acier d'au moins 95 mm² de section.

5. Calcul et mesure de la résistance d'une prise de terre

5.4. Résistivité des terrains

La résistivité (ρ) d'un terrain correspond à la résistance théorique en Ohm d'un cylindre de terre de 1 m² de section et de 1 m de longueur. Elle s'exprime en Ohm. Mètre ($\Omega.m$), et est très variable selon les régions et la nature des sols car elle dépend du taux d'humidité et de la température. Le gel et la sécheresse augmentent sensiblement la résistivité des terrains.

Nature du terrain	Résistivité en $\Omega.m$
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Tourbe humide	5 à 100
Humus	10 à 150
Limon	20 à 100
Marnes de jurassique	30 à 40
Schistes	50 à 300
Sable argileux	50 à 500
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Calcaires tendres	100 à 300
Sables siliceux	200 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500

5.5. Calcul de résistance de prise de terre

La valeur de la résistance de terre nécessaire pour assurer la protection d'une installation dépend de la sensibilité du disjoncteur différentiel au quel est associé.

Constitution de prise de terre	Calcul	Définitions des grandeurs
Conducteur enfouis horizontal	$R = \frac{2 \rho}{L}$	ρ : résistivité du terrain L : longueur de la tranchée
Piquet vertical	$R = \frac{\rho}{L}$	ρ : résistivité du terrain L : partie enterrée du piquet
Pilier métallique enterrée	$R = \frac{0,37 \rho}{L} \log \frac{3 L}{d}$	ρ : résistivité du terrain L : partie enterrée du pilier d : diamètre du cylindre
Plaque mince	$R = \frac{0,8 \rho}{L}$	ρ : résistivité du terrain L : périmètre de la plaque

5.6. Mesure de résistance de terre

Pour mesurer la résistance d'une prise de terre il existe plusieurs méthodes :

- ✓ méthode des trois pôles – telluromètre.
- ✓ Mesure à la pince de terre.

a. Méthode des trois pôles – telluromètre.

Cette méthode nécessite l'utilisation de deux prises de terres auxiliaires. La prise de terre Y sert de référence de potentiel, la prise de terre Z reçoit le courant I. Le voltmètre (V) du telluromètre mesure la chute de tension due à la résistance de terre et affiche directement la valeur de cette résistance.

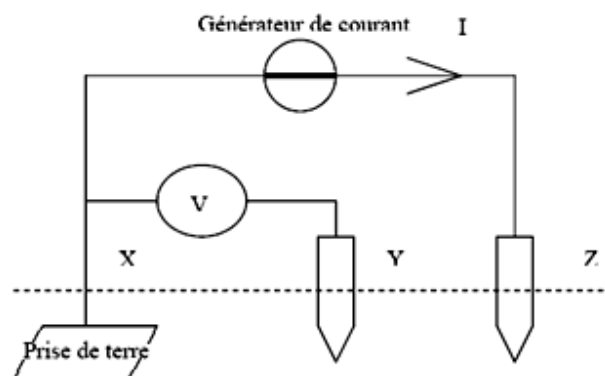


Figure 5.1 : Mesure de résistance de terre par la méthode de telluromètre.

b. Mesure à la pince de terre.

Semblable à la pince ampère métrique. La pince de terre mesure directement la résistance de boucle de terre en se plaçant autour du conducteur de l'installation électrique.

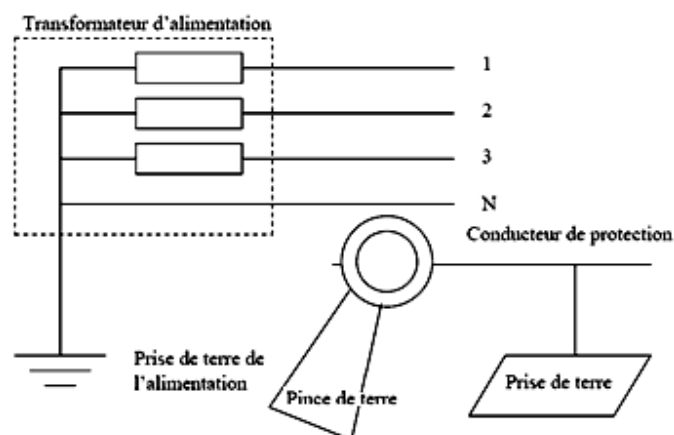


Figure 5.6.1 : Mesure de résistance de terre par la pince de terre.

CONCLUSION

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.

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 et de la forme des électrodes de la terre.

Dans ce travail, pour évaluer les résistances des mises à la terre en fréquence industrielle, une méthode de calcul analytique a été présentée sous forme d'un logiciel, pour quelques configurations d'électrodes. La vérification des résultats sera effectuée par une mesure pratique ou par comparaison des valeurs obtenues à celles de référence selon les éléments fonctionnels à mettre à la terre.

En hautes fréquences, d'autres paramètres et phénomènes s'ajoutent et rendent l'analyse beaucoup plus complexe (impédance constituée de résistance, inductance et capacité).

Suite de difficultés rencontrées sur la programmation, on a pu quand même aboutir au bon résultat. D'où le logiciel est limité au calcul de résistance d'une prise de terre.

Pour terminer, ce logiciel est disponible pour tous et pour ceux qui veulent l'améliorer, on lui souhaite bon courage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Section 6: CEM ET MISE A LA TERRE, (6.3.1) Mise à la terre – Bases de calcul et de conception, Guide Power Qualité Edition Août 2007
- [2] François Sautriau, Mise à la terre du neutre dans un réseau industriel haute tension CT n°62 édition septembre 1991.
- [3] Schneider Electric, Etude d'une installation 1j protection des personnes et des biens, Catalogue distribution électrique 2002.
- [4] Schneider Electric, Etude d'une installation 1o Poste de livraison HTA/BT à comptage BT, Catalogue distribution électrique 2002.
- [5] J.L. Lilien, Effets indirects des champs électromagnétiques, Analyse comparative des mises à la terre aux USA et dans divers pays d'Europe, UNIVERSITE DE LIEGE INSTITUT MONTEFIORE Année académique 2004 – 2005.
- [6] Semaan Georges, Evaluation de l'effet de la mer et du contrepoids sur le profil de la tension d'un système de mise à la terre d'une ligne de transport d'énergie à haute tension dans un sol résistif ; Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, septembre 2001.
- [7] S. STEFANESCO et M. SCHLUMBERGER, Distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain a couches horizontales, homogènes et isotropes, Manuscrit reçu le 13 janvier 1930.
- [8] Jean-Pierre NZURU NSEKERE, Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales, Université de Liège Faculté des sciences appliquées, Février 2009.

- [9] Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Principes de conception et de réalisation des mises à la terre, membres du Groupe de Travail « TERRE ».
- [10] Volker Leitloff, EDF, Rôle de la mise à la terre du neutre, Division Recherche et Développement, Clamart, France Juillet 2000.
- [11] Delphi et KyliX : des descendants de Pascal [Méthodes Informatiques Appliquées à la Gestion des Entreprises (MIAGE) & Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (LIFL)] L. Jourdan
- [12] FONG Gino Ricardin, Logiciel d'aide à la conception et réalisation d'un réseau électrique mémoire de fin d'étude, ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTSIRANANA, 2008.
- [13] Mr Said M'Ze, Cours installation et protection des réseaux ECOLE NORMALE SUPERIEURE pour L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE, PETGE4 (2009-2010)
- [14] Mario CHAN-YOK , Conception de logiciel pour le choix de schéma de liaison à la terre d'une installation électrique, mémoire de fin d'étude 2009, ECOLE NORMALE SUPERIEURE pour L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

WEBOGRAPHIE

- [1] <http://www.leonardo-energy.org/France>
- [2] <http://www.biname.be>
- [3] <http://www.cyme.com>
- [4] <http://www.chauvin-arnoux.com>
- [5] <http://www.franklin-france.com>
- [6] <http://www.forsond.com>
- [7] <http://www.electrotechnique-fr.com>

Table des matières

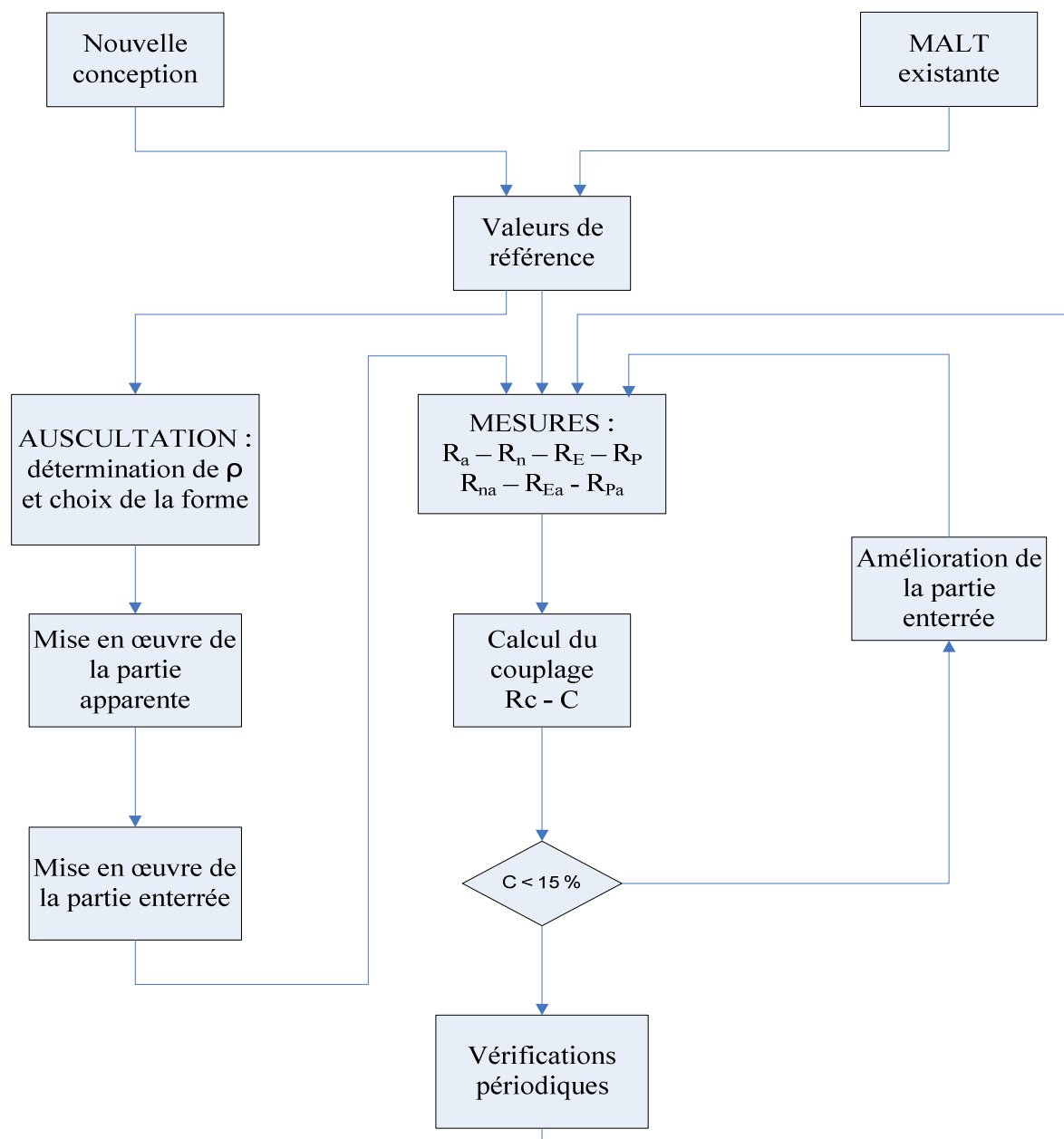
REMERCIEMENT	
INTRODUCTION	1
Chapitre 1 : NOTIONS DE BASE SUR LA MISE A LA TERRE.....	11
1. Généralité.....	11
2. Fonctions des réseaux de terre.....	11
2.1. Sécurité des personnes et des animaux.....	11
2.2. Protection des installations de puissance	12
2.3. Protection des équipements fonctionnant à bas niveaux.....	12
2.4. Potentiel de référence	12
3. Etude géologique du sol.....	12
3.1. Structure du globe terrestre.....	13
3.2. Conductivité électrique du sol.....	13
3.2.1. La conduction électrolytique	14
3.2.2. La conduction électronique	15
3.3. Propriétés thermiques du sol.....	15
3.3.1. Chaleur spécifique	15
3.3.2. Conductivité thermique.....	16
3.4. Répartition de potentiel autour d'un réseau de terre.....	16
3.4.1. Répartition des potentiels avec retour du courant à l'infini.....	16
3.4.2. Retour du courant par un autre réseau de terre	18
3.5. Interactions entre réseaux de terre.....	18
3.6. Résistivité du sol	19
3.6.1. Mesure des résistivités des sols	20
3.6.2. Méthode de mesure de la résistivité.....	21
3.7. Profondeur d'investigation	23
4. Dangers du courant électrique.....	23
4.1. Effets du courant passant par le corps humain.....	23
4.2. Risques de brûlures	24
4.3. Résistance du trajet électrique.....	25
4.3.1. Résistance du corps humain	25
4.3.2. Résistance présentée par les chaussures.....	26
4.3.3. Résistance de terre des pieds	26
4.4. Tension de pas et de contact	26
4.4.1. Tension de pas	26
4.4.2. Tension de contact	28
4.5. Mesure de protection.....	29
4.5.1. Protection contre les contacts directs	29
4.5.2. Protection contre les contacts indirects	29
5. Différentes configurations de mises à la terre.....	29
5.1. Fonction d'un système de liaison à la terre	29
5.1.1. Liaison équipotentielle de protection.....	30
5.1.2. Liaison équipotentielle fonctionnelle.....	30

5.1.3. Protection contre la foudre	30
5.2. Schémas de liaison à la terre	31
5.2.1. Le schéma TT	31
5.2.2. Le schéma TN.....	32
5.2.3. Le schéma IT	33
5.3. Mise à la terre dans les postes MT/BT et surtensions temporaires	33
5.4. Mise à la terre dans les postes MT/BT, surtensions d'origine atmosphérique et de manœuvre.....	34
Chapitre 2 : CALCUL ET MESURE DE LA RESISTANCE DE MISE A LA TERRE	35
1. Calcul de la résistance des prises de terre.....	35
1.1. Sol homogène.....	35
1.1.1. Hémisphère.....	35
1.1.2. Piquet de terre de forme cylindrique et vertical.....	35
1.1.3. Electrodes en ligne droite	37
1.1.4. Câble enterré horizontalement.....	38
1.1.5. Plusieurs câbles.....	38
1.1.6. Réseau maillé ou grille.....	39
1.1.7. Boucle enterrée	41
1.1.8. Détermination du rayon.....	41
1.2. Sol non homogène.....	42
1.2.1. Résistance d'un piquet de terre dans un sol en deux couches	42
1.2.2. Résistance d'une électrode horizontale dans un sol en deux couches.....	43
1.3. Electrodes de terre de fondation.....	43
2. Méthodes de mesure de la résistance des prises de terre.....	45
2.1. Méthode de trois points	45
2.2. Méthode de la chute de potentiel.....	46
2.2.1. Principe de la mesure	46
2.2.2. Conditions de mesure.....	47
2.2.3. Méthode de mesure en ligne dite « des 62% »	48
3. Mesure de la résistance d'une prise de terre ponctuelle	49
4. Choix d'une prise de terre.....	49
5. Coefficient de couplage.....	50
5.1. Calcul de la résistance de couplage.....	51
5.2. Le coefficient de couplage C	51
Chapitre 3 : CARACTERISTIQUES IMPULSIONNELLES DES MISES A LA TERRE	52
1. Modèles des électrodes de mise à la terre.....	52
1.1. Modèle du circuit RLC	52
1.1.1. Prise en compte de l'effet de peau	53
1.1.2. Constante de temps capacitive.....	54
1.1.3. Constante de temps inductive	55
1.1.4. Fréquence de résonance d'un piquet.....	55
1.2. Modèle de ligne de transmission (TL).....	56
1.3. Modèle électromagnétique.....	57
2. Impédances de mise à la terre.....	57
2.1. Impédance harmonique.....	57
2.2. Impédance transitoire	57
2.3. Impédance impulsionnelle	58

2.3.1. Coefficient impulsif.....	59
2.3.2. Longueur effective.....	59
3. Mise à la terre et lignes électriques.....	60
3.1. Généralités sur la foudre.....	60
3.2. Niveau kéraunique (N_k).....	60
3.3. Densité de foudroiement (N).....	61
3.4. Nombre de coups de foudre sur une ligne (NI).....	61
3.5. Distance d'amorçage.....	62
4. Coup de foudre sur une ligne aérienne.....	62
4.1. Coup de foudre sur un conducteur de phase.....	62
4.2. Coup de foudre sur le câble de garde.....	63
Chapitre 4 : PRISES DE TERRE DES POSTES.....	66
1. Objectif de la conception des réseaux de terre.....	66
2. Prise de terre des postes.....	66
3. Manifestation et identification du risque.....	67
4. Prises de terre des réseaux aériens de distribution.....	70
4.1. Transformateurs MT/BT sur poteau et interrupteur aériens.....	70
4.2. Prise de terre d'un poste sur poteau.....	71
4.3. Les parafoudres.....	72
4.4. Les éclateurs.....	73
4.5. Avantage des parafoudres MT sur l'éclateur.....	74
4.6. Mise à la terre des installations de la clientèle.....	74
Chapitre 5 : CONCEPTION DU LOGICIEL.....	76
1. But.....	76
2. Modélisation de logiciel.....	76
2.1. Diagramme de cas d'utilisation.....	76
2.2. Diagramme de séquence.....	77
2.3. Organigramme.....	78
3. Choix du langage de programmation.....	79
4. Présentation du logiciel.....	79
5. Manuel d'utilisation du logiciel.....	83
6. Conclusion.....	84
Chapitre 6 : IMPLICATION PEDAGOGIQUE.....	85
CONCLUSION.....	96
BIBLIOGRAPHIE.....	97
ANNEXES.....	102

ANNEXES

Organigramme de mise en œuvre



ETUDE D'UN OUVRAGE

Le tableau suivant nous donne des ordres de grandeur de résistances de prises de terre en fonction de différents terrains.

CONSTITUTION DE LA PRISE DE TERRE	NATURE DU TERRAIN		
	Arables gras remblais humides	Arables maigres remblais grossier	Pierreux secs sables sec

MAISON INDIVIDUELLE			
Boucle à fond de fouille	3 à 10 Ω	30 à 60 Ω	100 à 200 Ω
1 piquet vertical de 2 m	6 à 75 Ω	220 à 300 Ω	750 à 1500 Ω
1 piquet par angle de la maison	2 à 18 Ω	60 à 120 Ω	220 à 450 Ω

MAISON COLLECTIF			
Boucle à fond de fouille	1 à 3 Ω	10 à 20 Ω	50 à 100 Ω
10 piquets de 2 m répartis	3 à 8 Ω	23 à 45 Ω	120 à 220 Ω

Les tableaux suivants donnent la valeur ohmique d'une prise de terre imposée par les normes.

PROTECTION DES MATERIELS		
Type de terre	Valeur ohmique	Norme
Terre pour paratonnerres	$R < 10 \Omega$	NF C 17-100
Terre pour réservoirs contenant des liquides inflammables	$R < 20 \Omega$	NF M 88-512 NF M 88-513
Terre pour répartiteurs téléphoniques	$R < 1 \Omega$	NF C 90-001
Terre électronique pour ordinateurs	$R < 5 \Omega$ ou $R < 3 \Omega$	Constructeurs
Terre pour éclairage public	$R = 8$ à 800 Ω	NF C 17-200

PROTECTION DES PERSONNES		
Type de terre	Valeur ohmique	Norme
Terre pour habitations équipées de disjoncteurs différentiels : 500 mA 300 mA 100 mA 30 mA	$R < 100 \Omega$ $R < 166 \Omega$ $R < 500 \Omega$ $R < 1670 \Omega$	NF C 15-100
Terre pour ascenseurs, chaufferies d'immeuble	$R < 10 \Omega$	NF P 82-201
Terre pour appareils médicaux	$R < 10 \Omega$	NF C 74-000

Les tableaux suivants donnent la valeur de la section des conducteurs de protection des circuits

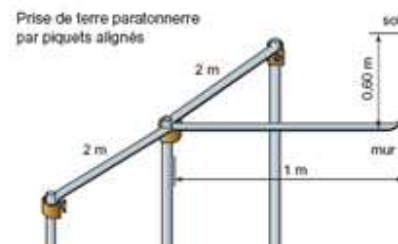
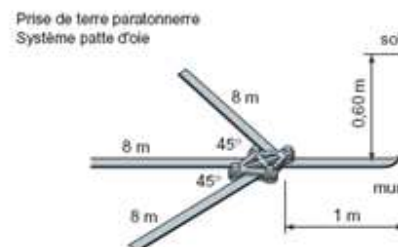
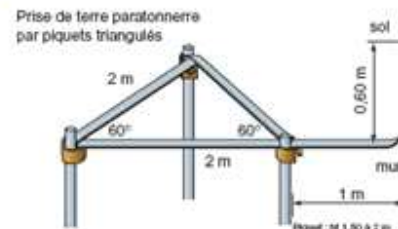
Section des conducteurs actifs (mm ² en cuivre)	Section minimale des conducteurs de protection (mm ² en cuivre)
$S \leq 16$	S
$16 \leq S \leq 35$	16
$S \geq 35$	0,5 S

Guide Pratique

Systèmes de protection
Principes d'installation et prise terre

● Installation des prises de terre

- La prise de terre doit avoir :
 - une résistance inférieure ou égale à 10 ohms.
 - Si cette valeur ne peut être atteinte, la prise de terre devra être constituée d'un minimum de 100 m d'électrode enfouie, sachant que la longueur de chaque élément vertical ou horizontal ne dépasse pas 20 m.
- Une prise de terre extérieure en boucle est enterrée à au moins 0,5 mètre de profondeur et à au moins 1 m des murs.
- La valeur de la prise de terre doit être mesurée par des moyens conventionnels sur la prise de terre isolée de tout autre élément conducteur.
- La prise de terre du paratonnerre est reliée équipotentiellement soit directement sur le circuit de terre en fond de fouilles accessible soit sur une attente ramenée au pied de la descente.
- Il existe plusieurs types de prises de terre qui dépendent principalement de l'environnement dans lequel elles vont être installées :
 - **Par piquets triangulés** : Il s'agit d'une des deux prises de terre décrites dans la norme, et qui utilise le moins de conducteur.
 - **Système patte d'oie** : c'est la seconde prise de terre décrite dans la norme, elle occupe une surface plus importante puisque ces 3 conducteurs horizontaux font chacun 8 m.
 - **Système patte d'oie améliorée** : il permet de trouver souvent des sols de natures différentes pour diminuer la résistance.
 - **Par piquets alignés** : ce système est utilisé dans des conditions où les zones de terrassement sont restreintes.
- Un regard de visite sera placé de façon à déconnecter facilement le fond de fouilles de la prise de terre pour pouvoir la mesurer.
- Le raccordement des conducteurs entre eux s'opère par serrage à l'aide de pièces de même nature, par rivetage plein, par soudure ou brasure.



● Vérification des installations

- La vérification de l'installation est fonction du niveau de protection (tous les 2 ans pour un niveau I et tous les 4 ans pour un niveau IV).

Niveau de protection	Périodicité normale	Périodicité renforcée
I	2 ans	1 an
II	3 ans	2 ans
III	3 ans	2 ans
IV	4 ans	3 ans



Prises de terre

Piquets de terre et accessoires

Piquets acier galvanisé

Réalisés en tube soudé galvanisé à chaud avec pointe préformée, ils sont équipés d'un collier de raccordement.

Piquets allongeables : de diamètre 20 mm et galvanisés à chaud avec une pointe incorporée. De grande résistance, ils sont rallongeables par simple emboîtement et sans manchon. À équiper d'un collier de raccordement du conducteur.

Réf.	Désignation	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Poids (kg)
AFK 0101 PT	Piquet acier galvanisé	21	1,00	1,18
AFK 0102 PT	Piquet acier galvanisé	21	1,50	1,09
AFK 0103 PT	Piquet acier galva auto-allongeable	20	1,20	2,87

Piquets acier inoxydable

Tubes en acier inox de diamètre 16 mm auto-allongeables pour emboîtement (sans manchon).

Prévoir les colliers de raccordement pour conducteur plat ou rond.

Réf.	Désignation	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Poids (kg)
AFK 1029 PT	Piquet acier inox auto-allongeable	16	1,00	1,48
AFK 1030 PT	Piquet acier inox auto-allongeable	16	2,00	3,20

Piquets cuivre - acier

Piquets en cuivre avec âme en acier pour une meilleure rigidité d'enfoncement par percussion.

- Allongeables par éléments à l'aide des manchons en laiton coniques, assurant une parfaite conductibilité électrique.
- Epaisseurs de cuivre constantes.

Réf.	Désignation	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Poids (kg)
AFK 0316 PT	Piquet cuivre-acier épais rallongeable	16	1,5	1,9
AFK 0416 PT	Piquet cuivre-acier épais rallongeable	16	2	2,56
AFK 0319 PT	Piquet cuivre-acier épais rallongeable	19	1,5	2,76
AFK 0419 PT	Piquet cuivre-acier épais rallongeable	19	2	3,88

Autres dimensions sur demande.

Accessoires d'enfoncement et de raccordement

Réf.	Désignation	Nature	Ø (mm)	Poids (kg)
AFK 0010 RP	Collier de raccordement pour piquets	Laiton matriçé	Piquet Ø 16	0,084
AFK 0020 RP	Collier de raccordement pour piquets	Cupro-alu	Piquet Ø 16-19	0,150
AFK 2016 PE	Pointe d'enfoncement piquets	Acier traité	Piquet Ø 16	0,138
AFK 2019 PE	Pointe d'enfoncement piquets	Acier traité	Piquet Ø 19	0,164
AFK 0016 MA	Manchon d'accouplement conique	Laiton	Piquet Ø 16	0,136
AFK 0019 MA	Manchon d'accouplement conique	Laiton	Piquet Ø 19	0,180
AFK 2069 BE	Bouterolle d'enfoncement	Acier traité	Piquet Ø 16	0,190
AFK 2070 BE	Bouterolle d'enfoncement	Acier traité	Piquet Ø 19	0,400

Accessoires de signalisation

Réf.	Désignation	Nature	Dimension (cm)	Poids (kg)
AFH8000PS	Signalisation Paratonnerre	Aluminium	10 x 10 x 10	0,11

AFK 0101 PT



AFK 1029 PT



AFK 0316 PT



AFK 0020 RP



AFK 2069 BE



AFK 0016 MA



AFK 2016 PE



AFH 8000 PS



Produits associés

Mesure et contrôle des prises de terre

Utilisation

Autonomes et étanches ces appareils de chantier légers et très simples d'utilisation, permettent une mesure des résistances des prises de terre par la traditionnelle méthode à piquets.

Contrôleur analogique de terre AFM 2412 TL

- Mesure de 0,5 à 1000 Ohms, précision 5 % +/- 0,5 Ohm
- Galvanomètre: cadre mobile classe 1,5, échelle logarithmique
- Fréquence de mesure 128 Hz
- Tension à vide ≤ 24 V crête
- Conditions d'utilisation: -10...55 °C / 20...90 % HR
- Boîtier IP 54
- Protection de l'appareil par fusible HPC
- Autonomie: 1700 mesures de 15 s

Appareil à double isolation, conçu conformément à la norme IEC 1010-1, présente une très grande sécurité d'utilisation.

Accessoires de terre:

- AFM 2409 MA
- AFM 2405 MA
- AFM 2410 MA

Contrôleur numérique de terre AFM 2411 TL

- Mesure de 0 à 2000 Ohms
- Précision 2 % L +/- 1 pt jusqu'à 200 Ohms
- 2 % L +/- 3 pt de 200 jusqu'à 2000 Ohms
- Afficheur numérique 2000 points (3 digits 1/2) LCD hauteur 18 mm
- Fréquence de mesure 128 Hz
- Tension à vide ≤ 42 V crête
- Conditions d'utilisation: -10...55 °C / 20...90 % HR
- Boîtier IP 54
- Protection de l'appareil par fusible HPC
- Autonomie: 1800 mesures de 15 s

Appareil à double isolation, conçu conformément à la norme IEC 1010-1, présente une très grande sécurité d'utilisation.

Accessoires de terre:

- AFM 2409 MA
- AFM 2405 MA
- AFM 2410 MA

Contrôleur numérique de terre et de résistivité AFM 2406 TL

- Mesure de 0 à 2000 Ohms en 3-calibres à commutation automatique
- Précision 2 % L +/- 1 pt jusqu'à 19,99 Ohms
- 2 % L +/- 1 pt de 20 à 199,99 Ohms
- 2 % L +/- 3 pt de 200 jusqu'à 2000 Ohms
- Afficheur numérique 2000 points (3 digits 1/2) LCD hauteur 18 mm
- Fréquence de mesure 128 Hz
- Tension à vide ≤ 24 V crête
- Conditions d'utilisation: -10...55 °C / 20...90 % HR
- Boîtier IP 54
- Protection de l'appareil par fusible HPC
- Autonomie: 1800 mesures de 15 s

Appareil à double isolation, conçu conformément à la norme IEC 1010-1, présente une très grande sécurité d'utilisation. Il permet les mesures de résistivité des sols, de résistance de terre et de couplage entre prises de terre électriquement indépendantes.

Accessoires de terre:

- AFM 2409 MA
- AFM 2413 MA
- AFM 2414 MA

Terca 2 AFM 2404 TE

- Calibres de 2 Ohms à 20 k Ohms
- Précision 2 % L +/- 1 pt
- Tension de mesure maxi: 50 Veff
- Afficheur numérique 2000 points (3 digits 1/2) LCD hauteur 18 mm
- Fréquence de mesure 128 Hz
- Rigidité diélectrique: 2000 Veff
- Conditions d'utilisation: -5...50 °C / < 80 % HR
- Boîtier IP 54
- Protection de l'appareil par fusible 500 Veff
- Autonomie: > 1500 mesures

Appareil à double isolation, conçu conformément à la norme IEC 1010-1 et VDE 0413, agrément EDF, présente une très grande sécurité d'utilisation. Il permet les mesures de résistivité des sols pour définir la position et la profondeur des prises de terre, les mesures de résistance de terre en conditions difficiles (tensions parasites, courants telluriques élevés, etc.), et de couplage entre prises de terre électriquement indépendantes.

Accessoire de terre: - AFM 2415 MA

Accessoires de terre**Sac pour contrôleur de terre Prestige - AFM 2410 MA**

Sac compartiment rigide comprenant 2 piquets en T, 3 câbles sur enrouleurs (100 m rouge, 60 m Bleu, 10 m vert) et un maillet. Logement pour ranger le contrôleur.

Sac pour contrôleur de terre et de résistivité Prestige - AFM 2413 MA

Idem + 2 piquets et 20 m de câble noir sur enrouleur.

Sac pour contrôleur de terre Standard - AFM 2405 MA

Sac souple comprenant 2 piquets droits, clés d'extraction, 30 m de câble rouge et 30 m de câble bleu sur enrouleurs, 3 m de câble vert et un maillet.

Sac pour contrôleur de terre et de résistivité Standard - AFM 2414 MA

Idem + 2 piquets et 3 m de câble noir sur enrouleur.

Valise de terre Résistivité Terca - AFM 2415 MA

4 piquets tanières, 3 câbles de 50 m, 1 câble de 100 m sur enrouleurs et 1 serre joint.



Réf.	Désignation	Dimensions (mm)	Poids kg
AFM 2412 TL	Contrôleur analogique de terre	238 x 136 x 150	1,3
AFM 2411 TL	Contrôleur numérique de terre	238 x 136 x 150	1,3
AFM 2406 TL	Contrôleur numérique de terre et de résistivité	238 x 136 x 150	1,3
AFM 2404 TE	Terca 2	300 x 290 x 290	6,2

Réf.	Désignation	Dimensions (mm)	Poids kg
AFM 2409 MA	Sacoches	-	-
AFM 2410 MA	Sac pour contrôleur de terre / Prestige	440 x 380 x 280	7
AFM 2413 MA	Sac pour contrôleur de terre et de résistivité / Prestige	440 x 380 x 280	9
AFM 2405 MA	Sac pour contrôleur de terre / Standard	400 x 225 x 280	3,5
AFM 2414 MA	Sac pour contrôleur de terre et de résistivité / Standard	400 x 225 x 280	4
AFM 2415 TE	Terca 2	-	-



Guide pratique des prises de terre



Prises de terre profondes

- Lorsque l'écoulement des courants de défaut à 50 Hz est prioritaire.
 - Elles confèrent des valeurs de terre :
 - Faibles, stables, immuables aux variations climatiques.
 - Elles permettent, la plupart du temps, d'atteindre la valeur ohmique que l'on s'est fixée, même en ne disposant que d'information partielle sur la résistivité du sol. Elles augmentent les chances d'atteindre des couches de faible résistivité.
- Lorsque la résistivité superficielle des sols est forte, ou mal connue, la mesure de résistance à des stades successifs d'enfoncement, fixera la progression.

• Les piquets cuivrés par électrolyse en continu à 350 μ

C'est la solution la plus universelle permettant aux courants de défaut d'atteindre rapidement les couches conductrices du sous-sol.

Ils favorisent :

- La conduction électrique (les 350 μ de dépôt de cuivre pur équivalent à eux-seuls à une section de 20 mm² de Cu),
- Les conditions de fonçage, par leur excellent comportement mécanique aux chocs et au flambage.

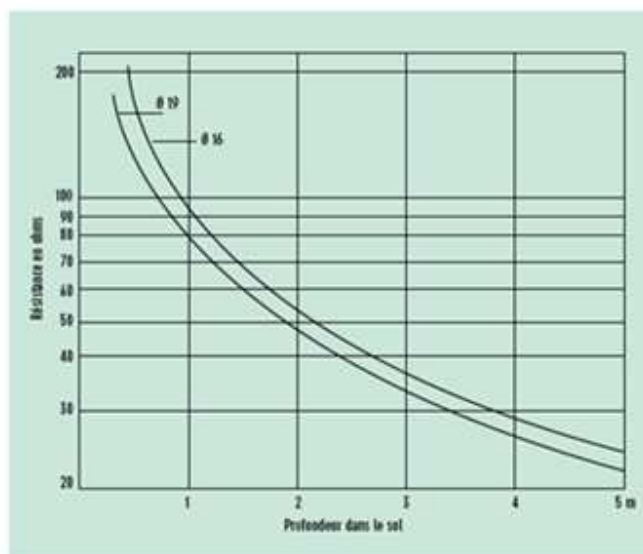
• Les piquets en acier inoxydable

Ils sont utilisés :

- Lorsque la couche conductrice du sous-sol est à faible profondeur, lorsque l'on craint une corrosion de structure métallique très proche du piquet et non reliée à celui-ci par un conducteur d'équipotentialité, dans un sol fortement acide ou basique.

• Les piquets en acier galvanisé

Ils peuvent constituer une solution économique. Dans ce cas, on aura soin d'isoler la connexion et de prévoir un regard de visite pour surveiller la corrosion galvanique.



Extrait de : NFC 15-100 § 542.2.1

Les prises de terre doivent être, dans toute la mesure du possible, enfouies au-dessous du niveau permanent d'humidité, sauf lorsque l'on rencontre un fond rocheux. Les tuyaux ou piquets doivent être prolongés jusqu'à une profondeur assurant un contact approprié avec la terre, par exemple au moins 2 m.

Il doit être tenu compte, si nécessaire, de l'augmentation possible de la résistance de la prise de terre due à la corrosion des électrodes.



Les piquets en acier cuivré à 350 μ offrent une résistance au courant électrique nettement inférieure à celle des piquets en acier inoxydable :

- 9 fois inférieure pour des courants de défaut de type industriel à 50 Hz.
- 32 fois inférieure pour des courants du type foudre ou à très haute fréquence.

La corrosion des piquets cuivrés, à 350 μ par électrolyse en continu, est très lente, même dans les parties non protégées; leur durée de vie est de 40 ans minimum.

Guide pratique des prises de terre



Les prises de terre de surface

Seront à retenir dans les cas particuliers suivants :

- Amélioration d'une terre existante,
- Sols difficiles, profils accidentés pour lesquels le fonçage profond n'est pas praticable ou nécessite des moyens mécanisés,
- Contraintes liées à la méconnaissance du sol,
- Lorsque l'on craint des surtensions atmosphériques (ex : neutre des réseaux aériens en zone foudroyée).

Utiliser dans ces cas des piquets tracteurs ou des piquets non allongeables, si la résistivité des sols est suffisamment bonne pour obtenir la résistance ohmique avec une simple électrode.

Si ce n'est pas le cas :

→ Les grilles de terre pourront se substituer aux piquets dans les cas suivants :

- Le génie civil s'y prête,
- Le fonçage ou la perforation présentent des risques vis-à-vis d'autres concessions (câblage d'énergie, Télécom, conduits divers...).

→ EN ALTERNATIVE des conducteurs enfouis horizontalement :

- 25' Cu minimum, 95' Acier galvanisé, feillard d'acier d'au moins 100 mm² de section et 3 mm d'épaisseur disposé linéairement en tranchée à un mètre de profondeur. Eventuellement, si le génie civil s'y prête, interconnecter les câbles en "fond de fouille" avec le ferrailage des ouvrages.

Dans ces deux derniers cas :

Veiller à une bonne homogénéité des matériaux de remblai. Procéder, si possible, à un amendement des sols, à un apport éventuel de terre végétale. Procéder finalement à un compactage sérieux du remblai.

Les différentes techniques évoquées ci-dessus :

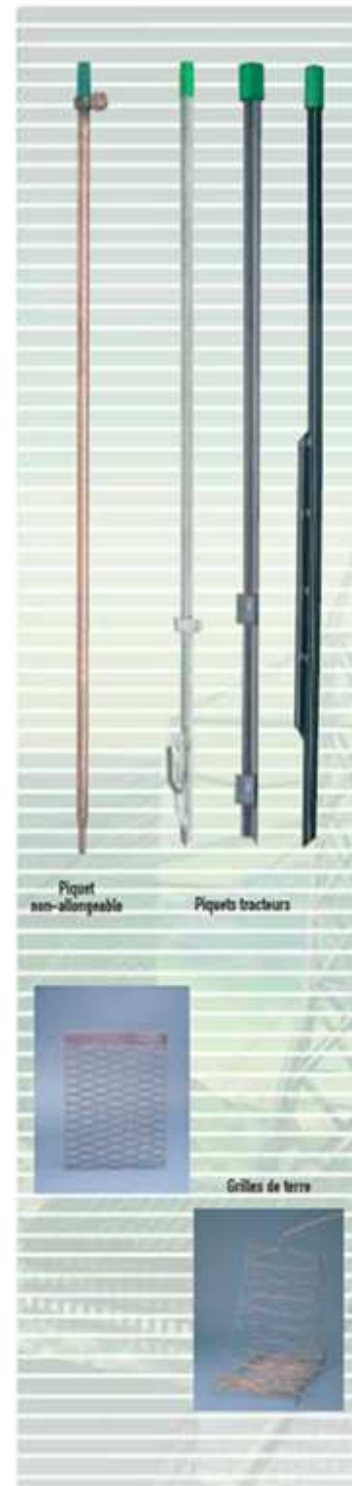
- Piquets verticaux, grilles/cylindres enterrés, conducteurs enfouis horizontalement, peuvent être avantageusement associés pour combiner leurs qualités respectives.

Un réseau maillé ainsi constitué combine :

- Résistance stable, bonne équipotentialité, faible gradient de potentiel alentour, faible impédance aux ondes, aux courants de foudre.

Les précautions à prendre concernent :

- La compatibilité des alliages et matériaux en présence (choix de la connectique), les implantations des éléments verticaux qui devront être espacés les uns des autres d'une distance au moins égale à leur profondeur.



Grilles de terre



Grilles en câble déployé

Cette forme de prise de terre est le moyen le plus efficace pour assurer un bon écoulement à la terre des courants de foudre ou des courants de défauts 50 Hz. Les "ellipses" de contact et le "cadre" de ces grilles sont constitués de fil de cuivre ou d'acier galvanisé Ø 3 mm. Ces fils sont toronnés et mis en forme en final pour obtenir une câblette de raccordement égale à 29 mm². L'ensemble ainsi constitué est particulièrement homogène et complet.

- Les ellipses sont maintenues au cadre par des agrafes.
Bonne tenue au stockage : les grilles peuvent être empilées sans s'emmêler.
Pas de bord coupant.
- Un lien longitudinal en fil de cuivre ou d'acier galvanisé Ø 1 mm maintient les ellipses. Il assure la rigidité des grilles.
Les grilles de grandes dimensions peuvent être pliées pour faciliter le stockage et le transport : elles retrouveront leur rigidité une fois dépliées.



GTC-25/2

Grilles cuivre en câble déployé

Références	Dimensions L x l (m)	Câblette de raccordement (m)	Connexion	Masse (kg)	N° EDF
GTC-4	0,60 x 0,40	4	Directe	1,40	
GTC-6	0,60 x 0,45	2	Directe	1,40	59 82 074
GTC-14	1,40 x 0,46	2	Directe	1,80	59 82 075
GTC-25	2,50 x 0,46	2	Directe	2,75	59 82 076
GTC-25/1	2,50 x 0,46	2	Manchon 29 mm ²	2,80	
GTC-25/2	2,50 x 0,40	2 x 0,50	Directe	2,50	59 82 090
GTC-25/4	2,50 x 0,46	4	Directe	3,20	



GTC

Grilles en acier galvanisé ou cuivre métal déployé

Mailles de 40 x 110 mm. Bande latérale de 42 mm avec trous et encoches pour raccordement du conducteur par boulon ou connecteur CP-95.

- Évite la formation des cavités nuisibles à la surface de contact.

Références	Désignation	Dimensions (m)	Masse (kg)	N° EDF
GMDA-40	Acier galvanisé	0,40 x 0,92	1,75	
GMDA-60	Acier galvanisé	0,60 x 0,92	2,50	
GMDA-120	Acier galvanisé	1,20 x 0,92	6,55	
GMDC-6	Cuivre	0,56 x 0,40	1,15	
GMDC-9	Cuivre	0,50 x 1,00	2,20	59 81 125
CP-95	Connecteur	Cupro-aluminium pour câble 38 mm ² Tige de fixation fileté M 10		



GMD

Prises de terre enterrées



Prises de terre en fond de fouille

Ceinturage à fond de fouille

En application de la norme NFC 15-100, les prises de terre à fond de fouille sont réalisées par feuillard en acier galvanisé d'au moins 100 mm² de section et 3 mm d'épaisseur ou par câble acier galvanisé de section 97 mm², noyé dans le béton de propreté des fondations et intéressant le périmètre du bâtiment.



F50

Feuillard

F-S0 Acier galvanisé 33,5 x 3 mm. Livré au mètre, en couronne d'environ 50 m.
Masse : 40 kg pour 50 m.

BCF Bride pour feuillard - 0,40 kg



BCF

Câble

CAG Câble acier galvanisé 97 mm², 19 fils Ø 2,55 mm - Ø extérieur 13 mm.
Résistance : 40/55 kg/mm². Galvanisation avant toronnage.
Livré par touret perdu.
Longueurs : 100 - 150 - 250 m.
Masse au mètre : 0,800 kg.

Raccord polyvalent pour câble

- Acier galvanisé à chaud.
- Evite tout risque de couple.
- Permet les jonctions sur charpente métallique.

BAC-12-N Raccord double - 0,300 Kg



BAC-12-N

Pancartes, affiches, signalisation



Affiches signalisation de terre

Références	Observations	Dimensions (mm)
AF-119		Base : 100
AF-119 F		Base : 100
AF-119 MM		Base : 100
AF-119 N		Base : 100
AF-119 P		Base : 100
AF-119 PR		Base : 100
AF-132		100 x 200
AF-213		60 x 200
AF-133	Avec fentes	60 x 170
AF-134	Avec fentes	120 x 170
AF-135		60 x 170



Listing of programs

```

procedure TForm1.Nouveau1Click(Sender: TObject);
begin
  Panel1.Show;
  label11.Show;
  button11.Show;
  edit2.Clear;
  edit3.Clear;
  groupbox5.Hide;
  panel2.Hide;
  panel3.Hide;
  panel4.Hide;
  panel6.Hide;
  panel7.Hide;
end;
procedure      TForm1.Enregistrer1Click(Sender:
TObject);
begin
  SaveDialog1.Execute;
end;
procedure      TForm1.Imprimer1Click(Sender:
TObject);
begin
  PrintDialog1.Execute;
end;
procedure TForm1.Quitter1Click(Sender: TObject);
begin
  Application.Terminate;
end;
procedure      TForm1.RadioButton11Click(Sender:
TObject);
begin
  listbox8.Show;
  listbox7.Hide;
  label8.Show;
  label6.Hide;
  label7.Hide;
  edit2.Hide;
  edit3.Show;
end;
procedure TForm1.ListBox7Click(Sender: TObject);
begin
  if ListBox7.itemindex = 0 then begin
    a:=100;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 1 then begin
    a:=40;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 2 then begin
    a:=100;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 3 then begin
    a:=150;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 4 then begin
    a:=400;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 5 then begin
    a:=40;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 6 then begin
    a:=100;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 7 then begin
    a:=400;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 8 then begin
    a:=200;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 9 then begin
    a:=100;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 10 then begin
    a:=200;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 11 then begin
    a:=40;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 12 then begin
    a:=40;
    edit2.text :=floattostr(a);
    edit2.show ;
  end;
  if ListBox7.itemindex = 13 then begin

```

```

a:=2000;
edit2.text :=floattostr(a);
edit2.show ;
end;
if ListBox7.itemindex = 14 then begin
a:=10000;
edit2.text :=floattostr(a);
edit2.show ;
end;
end;
procedure TForm1.ListBox8Click(Sender: TObject);
begin
if ListBox8.itemindex = 0 then begin
edit3.text :='Argil,sol organique,sol marécageux';
edit3.show ;
a:=40;
edit2.text :=floattostr(a);
end;
if ListBox8.itemindex = 1 then begin
edit3.text :='Argil sablonneuse,marne sablonneuse';
edit3.show ;
a:=100;
edit2.text :=floattostr(a);
end;
if ListBox8.itemindex = 2 then begin
edit3.text :='Béton';
a:=150;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
if ListBox8.itemindex = 3 then begin
edit3.text :='Gravier,sable,sol blanc+argile
sablonneuse';
edit2.show ;
a:=200;
edit2.text :=floattostr(a);
end;
if ListBox8.itemindex = 4 then begin
edit3.text :='Sable,gravier';
a:=400;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
if ListBox8.itemindex = 5 then begin
edit3.text :='Sol pierreux';
a:=2000;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
if ListBox8.itemindex = 6 then begin
edit3.text :='Sol rocheux';
a:=10000;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.ListBox8Click(Sender: TObject);
begin
if ListBox8.itemindex = 0 then begin
edit3.text :='Argil,sol organique,sol marécageux';
edit3.show ;
a:=40;
edit2.text :=floattostr(a);
end;
if ListBox8.itemindex = 1 then begin
edit3.text :='Argil sablonneuse,marne sablonneuse';
edit3.show ;
a:=100;
edit2.text :=floattostr(a);
end;
if ListBox8.itemindex = 2 then begin
edit3.text :='Béton';
a:=150;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
if ListBox8.itemindex = 3 then begin
edit3.text :='Gravier,sable,sol blanc+argile
sablonneuse';
edit2.show ;
a:=200;
edit2.text :=floattostr(a);
end;
if ListBox8.itemindex = 4 then begin
edit3.text :='Sable,gravier';
a:=400;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
if ListBox8.itemindex = 5 then begin
edit3.text :='Sol pierreux';
a:=2000;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
if ListBox8.itemindex = 6 then begin
edit3.text :='Sol rocheux';
a:=10000;
edit2.text :=floattostr(a);
edit3.show ;
end;
end;
end;
procedure TForm1.Edit3Change(Sender: TObject);
begin
groupbox1.Show;
groupbox2.Enabled:=false;
end;
procedure TForm1.Edit2Change(Sender: TObject);
begin
groupbox1.Show;
groupbox2.Enabled:=false;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.ListBox1Click(Sender: TObject);
begin
if ListBox1.itemindex = 0 then begin
  R:=1.2;
  edit1.text :=floattostr(R);
  d:=20;
  edit5.text :=floattostr(d);
  R:= strtoint(edit1.text);
  d:= strtoint(edit5.text);
end;
if ListBox1.itemindex = 1 then begin
  R:=1;
  edit1.text :=floattostr(R);
  d:=21;
  edit5.text :=floattostr(d);
end;
if ListBox1.itemindex = 2 then begin
  R:=1.5;
  edit1.text :=floattostr(R);
  d:=21;
  edit5.text :=floattostr(d);
end;
end;
procedure TForm1.RadioButton3Click(Sender:
TObject);
begin
  listbox3.Show;
  listbox2.hide;
  listbox1.hide;
  label2.Show;
  label3.Show;
  label5.Hide;
  label73.hide;
  edit5.Show;
  edit1.show ;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  Ra:=((a*10)/(2*9.859*d))*(ln((8*1000*(d*d))/(500*(
d/2))));
  edit4.text:=floattostr(Ra);
  edit4.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
  Ra:=(a*1000*2)/(((R)+ (d))*2);
  edit4.text:=floattostr(Ra);
  edit4.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
begin
  Rn:=(a*1000*2)/((R+d)*2);
  edit6.text:=floattostr(Rn);

```

```

edit6.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
begin
  Rn:=((a*10)/(2*9.859*d))*(ln((8*1000*(d*d))/(500*(
d/2))));
  edit6.text:=floattostr(Rn);
  edit6.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
  Rn:=(a)/(2*3.14*R)*(ln(((4*R*1000)/(d/2))-1);
  edit6.text:=floattostr(Rn);
  edit6.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Edit6Change(Sender: TObject);
begin
  button10.Enabled:=true;
end;
procedure TForm1.Button10Click(Sender: TObject);
begin
  panel3.Show;
  panel6.Hide;
  panel4.Hide;
  panel1.Hide;
  panel2.Hide;
end;
procedure TForm1.Button13Click(Sender: TObject);
begin
  Id:=230/(strtoint(edit4.Text) +
strtoint(edit6.Text));
  edit19.text:=floattostr(Id);
  edit19.Enabled:=true;
  Vcont:=
(strtoint(edit4.Text))*(strtoint(edit19.Text));
  edit20.text:=floattostr(Vcont);
  edit20.Enabled:=true;
  if Vcont>25 then begin
    label39.show;
    label29.Hide;
    label54.Show;
    label28.Hide;
  end else
    if Vcont<25 then begin
      label29.Show;
      label28.Show;
      label39.Hide;
      label54.Hide;
    end;
  memo1.lines.Add('Ra' + '=' + edit4.text + '[Ohm]');
  memo1.lines.Add('Rn' + '=' + edit6.text + '[Ohm]');
  memo1.lines.Add('Id' + '=' + edit19.text+ '[A]');
  memo1.lines.Add('Vcont' + '=' + edit20.text+ '[V]');
end;

```

Résumé :

Ce travail de mémoire a pour but d'élaborer un logiciel de calcul moderne de mise à la terre à fréquence industriel. Il résume la méthode de détermination des résistances de terre des masses, du neutre, de l'éclateur et du parafoudre ainsi que la détermination du couplage entre eux.

Ce rapport est divisé en trois grandes parties dont la première partie contient quatre chapitres avec un chapitre de base portant la notion d'une mise à la terre et le calcul de résistance de terre. Dans la deuxième partie, nous détaillerons la conception, la présentation ainsi que le manuel d'utilisation du logiciel. Et enfin dans la dernière partie, le livre du professeur qui contient les points essentiels correspondant aux programmes du Lycée Technique et Professionnel.